

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO FÍSICO-QUÍMICO-
MECÂNICO DE MISTURAS CIMENTO-CINZA-CASCA DE
ARROZ POR MEIO DE CORPOS-DE-PROVA
CILÍNDRICOS E PLACAS PRENSADAS**

LÓRIS LODIR ZUCCO

CAMPINAS
JULHO DE 2007

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO FÍSICO-
QUÍMICO-MECÂNICO DE MISTURAS CIMENTO-
CINZA-CASCA DE ARROZ POR MEIO DE CORPOS-
DE-PROVA CILÍNDRICOS E PLACAS PRENSADAS**

Tese de Doutorado submetida à banca
examinadora para a obtenção do título de
Doutor em Engenharia Agrícola, na área de
concentração em Construções Rurais.

LÓRIS LODIR ZUCCO

Orientador: Prof. Dr. Antonio Ludovico Beraldo

CAMPINAS
JULHO DE 2007

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

Z82a	Zucco, Lóris Lodir Avaliação do comportamento físico-químico-mecânico de misturas cimento-cinza-casca de arroz por meio de corpos-de-prova cilíndricos e placas prensadas. / Lóris Lodir Zucco.--Campinas, SP: [s.n.], 2007. Orientador: Antonio Ludovico Beraldo Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola. 1. Cinza de casca de arroz. 2. Calorimetria. 3. Materiais de Construção. 4. Construções rurais. 5. Resíduos agrícolas. I. Beraldo, Antonio Ludovico. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

Título em Inglês: Evaluation of physical-chemical-mechanical behavior of cement-ash-rice husk mixtures by means cylindrical and board specimens

Palavras-chave em Inglês: Ash, Calorimetric, Cement, Composite, Rice husk

Área de concentração: Construções Rurais e Ambiência

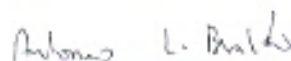
Titulação: Doutor em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Wesley Jorge Freire, Edmundo Henrique Ventura Rodrigues,
Lia Lorena Pimentel e André Munhoz de Argollo Ferrão.

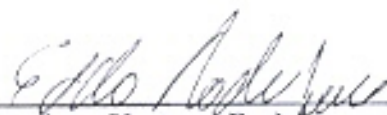
Data da defesa: 23/07/2007

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da Tese Doutorado defendida por Lóris Ladir Zucco, aprovada pela Comissão Julgadora em 23 de julho de 2007, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



Prof. Dr. Antonio Ludovico Beraldo - Presidente
FEAGRI/UNICAMP



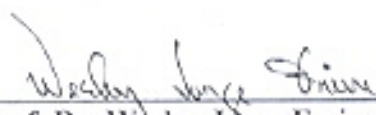
Prof. Dr. Edmundo Henrique Ventura Rodrigues - Membro Titular
UFRRJ/RJ



Profa. Dra. Lia Lorena Pimentel - Membro Titular
PUCCAMP/SP



Prof. Dr. André Munhoz de Argollo Ferrão - Membro Titular
FEC/UNICAMP



Prof. Dr. Wesley Jorge Freire - Membro Titular
FEAGRI/UNICAMP

O pensamento é como a águia que só alça vôo nos espaços vazios do desconhecido.
Pensar é voar sobre o que não se sabe.
Não existe nada mais fatal para o pensamento que o ensino das respostas certas.
Para isto existem as escolas: não para ensinar as respostas, mas para ensinar as perguntas.
As respostas nos permitem andar sobre a terra firme.
Mas somente as perguntas nos permitem entrar pelo mar desconhecido.

Rubem Alves,
no livro: Ao professor, com o meu carinho.

Aos meus pais e familiares,

dedico.

AGRADECIMENTOS

Aos meus familiares e amigos, pela generosa contribuição para o desenvolvimento da pesquisa e, principalmente, pela compreensão da minha ausência.

Ao professor Beraldo, pela confiança e credibilidade em mim depositadas.

Aos professores Luiz Antonio Rossi e Wesley Jorge Freire, pelo apoio e atenção na solução de problemas, com empréstimo de equipamentos.

Ao professor Luiz Ernesto Brossard, pelas orientações no planejamento e análise estatística simplificada através do Software Statgraphics Plus (versão 4.1).

Aos professores Claudio Bianor Sverzut, David de Carvalho, Inácio Maria Dal Fabbro, Paulo Ademar Martins Leal e Raquel Gonçalves, pelo apoio na solução de problemas.

Aos funcionários Ana Paula Montagner, Antonio Freire de Souza, Clemilton Vieira, Clóvis da Silva, Deise Tristão, Francisco de Oliveira, Gelson da Silva, João Lima, José de Alencar Filho, José Ricardo Lucarelli, Jurandi Fagundes de Carvalho, Luciano Torres, Luis Vilela Filho, Marcos Estevon, Maria Rosália Favoretto, Marta Vechi, Maurício Santiciolli, Mônica Rovigati, Robison Orsini, Rosângela Gomes, Sérgio Lopes, Sílvia Helena de Sousa, Suzely Francisco e Túlio Ribeiro, pelo apoio.

Destaco, ainda, como de suma importância os Laboratórios de Controle Ambiental (José Benedito dos Santos), Eletrificação Rural (Edson Caires), Geoprocessamento (Agmon Moreira Rocha), Instrumentação e Controle (Cláudio Kiyoshi Umezu), LABIN (André Nogueira e Clóvis Tristão), Materiais e Estruturas (Flávia de Freitas Vieira e Gisleiva Cristina Ferreira), Propriedades Mecânicas dos Materiais Biológicos (Leandro Moraes), Protótipos (Luiz Carlos dos Santos Silva, José Maria da Silva e Francisco dos Santos Filho) e o de Solos (Antonio Javarez Júnior e Célia Gonçalves), cuja contribuição para a implementação de soluções alternativas, tornaram possível o desenvolvimento da pesquisa, sendo um diferencial propulsor para a realização deste trabalho.

Aos demais professores, técnicos e auxiliares da Faculdade de Engenharia Agrícola, que ao seu modo e dentro das possibilidades, colaboraram para que o presente trabalho pudesse ser realizado.

Aos estatísticos Ana Paula Rocha dos Santos (paulaestat@yahoo.com.br) e Rafael Pimentel Maia (eumaia2003@yahoo.com.br), pelas análises estatísticas realizadas.

Especial deferência aos funcionários do bandeirão, da manutenção elétrica e da segurança, entre outros setores da Prefeitura Universitária, que muito contribuíram para o bem estar e qualidade de vida no campus.

Aos amigos e colegas de pós-graduação, em especial ao Alexandre, Ana Paula, Eder, Edílson, Eliézer, Eduardo, Gentil, Jean, Lia, Marcelo Colet, Marcílio, Martha, Régis, Rogério Nogueira e Wellington, pelo companheirismo e grandeza de espírito para com as dificuldades, que não foram poucas.

Ao professor Alencar Vicente Barbinotto, Diretor do Colégio Técnico (UFRuralRJ-CTUR, 1997-2004), por incentivar e possibilitar aos seus colegas professores a formação em nível de pós-graduação, com reflexos em toda a comunidade Ceturiana.

Ao professor Akihisa Motoki (Departamento de Mineralogia e Petrologia Ígnea, Universidade do Estado do Rio de Janeiro), pelo incentivo, colaboração e compreensão da minha ausência neste período de estudos.

Ao Departamento de Materiais e Engenharia do Instituto Militar de Engenharia (IME-RJ) que, através da Sra. Izabella de Castro Bigno, doutoranda do curso de pós-graduação, viabilizou a realização de ensaios de microscopia eletrônica e de granulometria a laser, auxiliando também na indicação de procedimentos para efetuar as análises químicas.

À empresa URBANO Agroindustrial (www.urbano.com.br), pela doação da casca de arroz queimada em condições especiais (processo industrial).

À empresa Vincere do Brasil (www.interfacebalancas.com.br) em especial ao sr. Sidney Ohta (vincere@mpc.com.br), pela presteza e auxílio na instrumentação da prensa hidráulica utilizada nos ensaios dos materiais, adequação de sistemas, colaboração no desenvolvimento de software e hardware de gerenciamento e pelos ensinamentos na montagem e operação dos ensaios.

À empresa JSL Hidráulica e Pneumática (www.jsl.com.br), na pessoa do sr. Marcelo, pelos ensinamentos na montagem, operação e manutenção do sistema hidráulico de ensaios.

A todos que, mesmo não sendo citados, contribuíram para a realização deste trabalho

muito obrigado.

SUMÁRIO

	página
LISTA DE FIGURAS	xvii
LISTA DE TABELAS	xxv
LISTA DE ABREVIATURAS	xxxv
RESUMO	xxxix
ABSTRACT	xli
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Potencial Anual de Produção da Casca e da Cinza da Casca de Arroz	3
2.2 Casca de arroz	5
2.3 Cinza da casca de arroz (CCA)	14
2.4 Compósitos com cinza da casca de arroz (CCA)	22
2.5 Estudos envolvendo o Calor de Hidratação	29
2.6 Estudos envolvendo o tempo de pega	31
2.7 Estudos envolvendo a avaliação das propriedades mecânicas através da velocidade de propagação do pulso ultra-sônico (VPU)	33
2.8 Estudos envolvendo a resistência em compressão simples, a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à flexão estática em compósitos	37
3 MATERIAL E MÉTODOS	39
3.1 Material	39
3.1.1 Aditivos químicos	39
3.1.2 Água	39
3.1.3 Cal	40
3.1.4 Casca de arroz	41
3.1.5 Cimento	47
3.1.6 Cinza da casca de arroz	49
3.1.7 Equipamentos	56
3.2 Métodos	63
3.2.1 Métodos relativos ao processo de mistura e obtenção de corpos-de-prova ...	66

3.2.2	Métodos relativos à evolução da temperatura da hidratação	70
3.2.3	Métodos relativos à velocidade do pulso ultra-sônico (VPU)	75
3.2.4	Métodos relativos ao Início e Fim de Pega	77
3.2.5	Relativos ao ensaio dos corpos-de-prova cilíndricos	85
3.2.6	Métodos relativos ao ensaio das placas	88
3.2.7	Métodos relativos à determinação do teor de umidade	92
3.2.8	Métodos relativos à análise estatística	93
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	95
Resultados dos ensaios da FASE I – Estudo de PASTAS envolvendo a		
4.1	adição de cinza (0%, 5%, 20% ou 35%) e casca de arroz (7,5%; faixas de distribuição em tamanho: #16, #30, #50, #100 e #200)	95
4.1.1	Resultados relativos à avaliação do comportamento químico das misturas ..	95
4.1.1.1	Avaliação do parâmetro Área sob a curva	97
4.1.1.2	Avaliação do parâmetro Inclinação Máxima	101
4.1.1.3	Avaliação do parâmetro Ponto de Inclinação Máxima	105
4.1.1.4	Avaliação do parâmetro tempo para atingir a Temperatura Máxima	108
4.1.1.5	Avaliação do parâmetro Temperatura Máxima	111
4.1.1.6	Considerações gerais sobre a avaliação química	115
4.1.2	Resultados relativos à avaliação do comportamento mecânico das misturas	115
4.1.2.1	Avaliação do parâmetro Início de Pega das misturas	116
4.1.2.2	Avaliação do parâmetro Fim de Pega das misturas	124
4.1.2.3	Avaliação do parâmetro Resistência à Tração por Compressão Diametral das misturas	131
4.1.2.3.1	Avaliação da <u>VPU</u> (Vel_D, em km/s) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à tração por compressão diametral	132
4.1.2.3.2	Avaliação da <u>Massa Específica Aparente</u> (MEAp_D, em g/cm ³) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à tração por compressão diametral	135
4.1.2.3.3	Avaliação do <u>Módulo de Elasticidade Dinâmico</u> (MOEd_D, em MPa) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à tração por compressão diametral	138
4.1.2.3.4	Avaliação da <u>Tensão Diametral</u> (Tensao_D, em MPa) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à tração por compressão diametral ...	141
4.1.2.4	Avaliação do parâmetro Resistência à Compressão Simples das misturas	145

4.1.2.4.1	Avaliação da <u>VPU</u> (Vel_Ax, em km/s) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à compressão simples	146
4.1.2.4.2	Avaliação da <u>Massa Específica Aparente</u> (MEAp_Ax, em g/cm ³) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à compressão simples	149
4.1.2.4.3	Avaliação do <u>Módulo de Elasticidade Dinâmico</u> (MOEd_Ax, em MPa) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à compressão simples	153
4.1.2.4.4	Avaliação da <u>Tensão Axial</u> (Tensao_Ax, em MPa) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à compressão simples	156
4.1.2.5	Avaliação dos resultados dos ensaios mecânicos envolvendo os parâmetros Resistência à Tração por Compressão Diametral e Resistência em Compressão simples, dos corpos-de-prova cilíndricos ..	160
4.1.2.6	Evolução da Velocidade de Propagação do Pulso Ultra-Sônico (EVPU)	160
4.1.3	Considerações Finais sobre a FASE I: Estudo das misturas tipo <u>PASTA</u> envolvendo a adição de Cinza e Casca de arroz	169
4.2	Resultados dos ensaios da FASE II – Estudo das PASTAS envolvendo a adição de cinza (0%, 20% ou 35%) e casca de arroz (7,5%; distribuição em tamanho das partículas caracterizadas como 5 mm, 10+5 mm e 10 mm)	171
4.2.1	Resultados relativos à avaliação do comportamento químico das misturas ..	171
4.2.1.1	Avaliação do parâmetro Área sob a curva	173
4.2.1.2	Avaliação do parâmetro Inclinação Máxima	176
4.2.1.3	Avaliação do parâmetro Ponto de Inclinação Máxima	179
4.2.1.4	Avaliação do parâmetro tempo para atingir a Temperatura Máxima	181
4.2.1.5	Avaliação do parâmetro Temperatura Máxima	185
4.2.1.6	Considerações gerais sobre a avaliação química	187
4.2.2	Resultados relativos à avaliação do comportamento mecânico das misturas	188
4.2.2.1	Avaliação do parâmetro Início de Pega das misturas	189
4.2.2.2	Avaliação do parâmetro Fim de Pega das misturas	195
4.2.2.3	Avaliação do parâmetro Resistência à Tração por Compressão Diametral das misturas	201
4.2.2.3.1	Avaliação da <u>VPU</u> (Vel_D, em km/s) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à tração por compressão diametral	202
4.2.2.3.2	Avaliação da <u>Massa Específica Aparente</u> (MEAp_D, em g/cm ³) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à tração por compressão diametral	205

4.2.2.3.3	Avaliação do <u>Módulo de Elasticidade Dinâmico</u> (MOEd_D, em MPa) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à tração por compressão diametral	208
4.2.2.3.4	Avaliação da <u>Tensão Diametral</u> (Tensao_D, em MPa) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à tração por compressão diametral ...	211
4.2.2.4	Avaliação do parâmetro Resistência à Compressão Simples das misturas	214
4.2.2.4.1	Avaliação da <u>VPU</u> (Vel_Ax, em km/s) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à compressão simples	215
4.2.2.4.2	Avaliação da <u>Massa Específica Aparente</u> (MEAp_Ax, em g/cm ³) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à compressão simples	218
4.2.2.4.3	Avaliação do <u>Módulo de Elasticidade Dinâmico</u> (MOEd_Ax, em MPa) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à compressão simples	221
4.2.2.4.4	Avaliação da <u>Tensão Axial</u> (Tensao_Ax, em MPa) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à compressão simples.	224
4.2.2.5	Avaliação dos resultados dos ensaios mecânicos envolvendo os parâmetros Resistência à Tração por Compressão Diametral e Resistência em Compressão simples, dos corpos-de-prova cilíndricos ..	229
4.2.2.6	Evolução da Velocidade de Propagação do Pulso Ultra-Sônico (EVPU)	229
4.2.3	Considerações finais sobre a FASE II: Estudo das misturas tipo <u>PASTA</u> envolvendo a adição de Cinza e Casca de arroz	236
4.3	Resultados dos ensaios da FASE III – Estudo dos COMPÓSITOS à base de casca de arroz (distribuição em tamanho das partículas caracterizadas como 5 mm (42% de casca), 10+5 mm (39% de casca) e 10 mm (35% de casca)) com adições de cinza (0%, 20% ou 35%)	238
4.3.1	Resultados relativos à avaliação do comportamento químico das misturas	238
4.3.1.1	Avaliação do parâmetro Área sob a curva	240
4.3.1.2	Avaliação do parâmetro Inclinação Máxima	242
4.3.1.3	Avaliação do parâmetro Ponto de Inclinação Máxima	245
4.3.1.4	Avaliação do parâmetro tempo para atingir a Temperatura Máxima	248
4.3.1.5	Avaliação do parâmetro Temperatura Máxima	251
4.3.1.6	Considerações gerais sobre a avaliação química	253
4.3.2	Resultados relativos à avaliação do comportamento mecânico das misturas	254
4.3.2.1	Avaliação do parâmetro Início de Pega das misturas	254
4.3.2.2	Avaliação do parâmetro Fim de Pega das misturas	261

4.3.2.3	Avaliação do parâmetro Resistência à Tração por Compressão Diametral das misturas	268
4.3.2.3.1	Avaliação da <u>VPU</u> (Vel_D, em km/s) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à tração por compressão diametral	269
4.3.2.3.2	Avaliação da <u>Massa Específica Aparente</u> (MEAp_D, em g/cm ³) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à tração por compressão diametral	272
4.3.2.3.3	Avaliação do <u>Módulo de Elasticidade Dinâmico</u> (MOEd, em MPa) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à tração por compressão diametral	275
4.3.2.3.4	Avaliação da <u>Tensão Diametral</u> (Tensao_D, em MPa) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à tração por compressão diametral	277
4.3.2.4	Avaliação do parâmetro Resistência à Compressão Simples das misturas	281
4.3.2.4.1	Avaliação da <u>VPU</u> (Vel_Ax, em km/s) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à compressão simples	282
4.3.2.4.2	Avaliação da <u>Massa Específica Aparente</u> (MEAp_Ax, em g/cm ³) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à compressão simples	285
4.3.2.4.3	Avaliação do <u>Módulo de Elasticidade Dinâmico</u> (MOEd_Ax, em MPa) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à compressão simples	288
4.3.2.4.4	Avaliação da <u>Tensão Axial</u> (Tensao_Ax, em MPa) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à compressão simples	290
4.3.2.5	Avaliação dos resultados dos ensaios mecânicos envolvendo os parâmetros Resistência à Tração por Compressão Diametral e Resistência à Compressão simples, dos corpos-de-prova cilíndricos	294
4.3.2.6	Evolução da Velocidade de Propagação do Pulso Ultra-Sônico (EVPU)	295
4.3.3	Considerações finais sobre a FASE III: Estudo dos <u>COMPÓSITOS</u> à base de casca de arroz (corpos-de-prova cilíndricos) com adições de cinza (0%, 20% ou 35%)	301
4.3.4	Comparação entre a FASE II - <u>PASTAS</u> e a FASE III – <u>COMPÓSITOS</u>	302
4.4	Resultados dos ensaios da FASE IV – Estudo das PLACAS prensadas de COMPÓSITO à base de casca de arroz (distribuição em tamanho das partículas: 5 mm (42% de casca), 10+5 mm (39% de casca) e 10 mm (35% de casca)) com adições de cinza (0%, 20% ou 35%)	309

4.4.1	Avaliação dos corpos-de-prova extraídos das placas – ensaio de flexão estática	309
4.4.1.1	Avaliação do Módulo de Elasticidade no Limite de Proporcionalidade em corpos-de-prova extraídos das PLACAS e ensaiados à Flexão Estática	314
4.4.1.2	Avaliação da Tensão no Limite de Proporcionalidade em corpos-de-prova extraídos das PLACAS e ensaiados à Flexão Estática	319
4.4.1.3	Avaliação da Tensão de Ruptura em corpos-de-prova extraídos das PLACAS e ensaiados à Flexão Estática	324
4.4.1.4	Considerações finais sobre o ensaio de Flexão Estática	328
4.4.2	Avaliação dos corpos-de-prova extraídos das placas – ensaio de compressão paralela à superfície (CPS)	330
4.4.2.1	Avaliação da Tensão de Ruptura em corpos-de-prova extraídos das PLACAS e ensaiados à compressão paralela à superfície	331
4.4.2.2	Avaliação da VPU em corpos-de-prova extraídos das PLACAS e ensaiados à compressão paralela à superfície	336
4.4.2.3	Avaliação da Massa Específica Aparente em corpos-de-prova extraídos das PLACAS e ensaiados à compressão paralela à superfície	341
4.4.2.4	Considerações finais sobre o ensaio à Compressão Paralela à Superfície	347
4.4.3	Avaliação dos corpos-de-prova extraídos das placas – ensaio de absorção e variação dimensional	350
4.4.4	Considerações finais sobre o ensaio das placas	357
4.5	Resultados relativos da avaliação conjunta do comportamento das misturas das Fases I, II, III e IV – Correlações e Modelos matemáticos	358
4.6	Avaliação do consumo de cimento	365
5	CONCLUSÕES	367
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	371

LISTA DE FIGURAS

	página
Figura 1	Micrografias da cascas de arroz: (a) 10 X, (b) 50 X, (c) 200 X e (d) 500 X . 6
Figura 2	Pasta de CP-V-ARI com casca de arroz (#200 N), 24 h após a mistura com água 9
Figura 3	Algumas faixas de distribuição em tamanho das partículas empregadas nas curvas de hidratação. A cor mais escura é característica na casca lavada em solução de cal 9
Figura 4	Efeito da distribuição em tamanho das partículas, nas condições Natural (N) e Lavada em Solução de Cal (LSC), sobre a evolução da temperatura de hidratação 10
Figura 5	Corpos-de-prova com sinais de incompatibilidade química (Inc.) na região da base 11
Figura 6	Efeito da dimensão das partículas e do traço na evolução da temperatura de hidratação do cimento CP-V-ARI 12
Figura 7	Efeitos da adição de cinza e acelerador de pega CaCl_2 na evolução da temperatura da hidratação 23
Figura 8	Influência do percentual de adição de cinza 25
Figura 9	Influência da adição de cinza e casca de arroz (Natural e Lavada em Solução de Cal - LSC) 26
Figura 10	Comportamento Químico: Interação Cinza–Dimensão das Partículas 27
Figura 11	Influência da adição de cinza: misturas de cimento CP-V-ARI RS com casca de arroz natural (não lavada) passante em peneira 0,075 mm 28
Figura 12	Calorimetria e resistência à penetração de argamassa 32
Figura 13	Correlação entre Ensaios Destrutivos e Ensaios Não Destrutivos 35
Figura 14	Casca de arroz natural, definida como 10 mm 41
Figura 15	Casca de arroz natural, ampliada 35 X 42
Figura 16	Casca de arroz natural, ampliada 55 X 42
Figura 17	Distribuição em tamanho das partículas: 10 mm 44
Figura 18	Distribuição em tamanho das partículas: 5 mm 45
Figura 19	Distribuição em tamanho das partículas: 10+5 mm 46

Figura 20	Casca de arroz lavada em solução de cal (LSC), ampliada 35 X. Área em azul ampliada 55X na Figura 21	47
Figura 21	Detalhe da Figura 20 - Casca de arroz lavada em solução de cal (LSC), ampliada 55 X	47
Figura 22	Cinza da casca de arroz: A = natural; B = após ser moída e peneirada (passante em peneira 0,149 mm)	50
Figura 23	Cinza da casca de arroz moída: Granulometria à laser	51
Figura 24	Cinza da casca de arroz moída (aumento 100 X)	52
Figura 25	Cinza da casca de arroz moída (aumento 500 X)	52
Figura 26	Cinza da casca de arroz moída (aumento 1000 X)	53
Figura 27	Vicat Modificado (A); Termômetro Digital Multicanal - TDM (B) e Vaso Isotérmico (C)	56
Figura 28	Argamassadeira padrão ABNT (A) e bateadeira industrial (B)	57
Figura 29	Visão interna da câmara úmida e suportes	57
Figura 30	Moinho-de-martelos: Vista externa (A); detalhe das abas internas (B); detalhe dos martelos e substituição da peneira por chapa lisa (C)	58
Figura 31	Prensa instrumentada: Visão geral e tela do software de gerenciamento	58
Figura 32	Dispositivos de corte para obtenção dos corpos-de-prova	59
Figura 33	MedTemp: Tela do software, módulo eletrônico de gerenciamento e sensores	59
Figura 34	Esquema construtivo da UTS, com destaque para o isolamento térmico	60
Figura 35	UTS e sensores (A); desmoldagem do cilindro de mistura (B); Detalhe do sistema de acoplamento do sensor de ultra-som na extremidade da UTS	61
Figura 36	BP-7-Steinkamp: Equipamento de ultra-som com sensores de ponta acoplados (exponencial)	61
Figura 37	Prensa Hidráulica e fôrma para moldagem das placas de compósito	62
Figura 38	Visão geral da sala climatizada com equipamentos: UTS (A), Vicat Modificado (B), Ultra-som (C) e Mesa vibratória (D), entre outros	62
Figura 39	Fôrma utilizada na confecção de placas: travamento e distribuição da carga	69
Figura 40	Evolução da temperatura de hidratação: CP-V-ARI RS empregado na pesquisa (Fator a/c = 0,5; acelerador de pega - CaCl_2 - 3% da massa do cimento)	71
Figura 41	Curvas de evolução da temperatura: hidratação do compósito 10 mm-35% (cilindro e vaso isotérmico → RP's), do ar e, da água (isolada em vaso isotérmico)	73
Figura 42	Parâmetros: Inclinação Máxima e Ponto de Inclinação Máxima em curva de evolução da temperatura de hidratação da pasta de mistura #16-20%	74

Figura 43	Evolução da VPU (EVPU) no compósito 10 mm - 35%	76
Figura 44	Pasta após o ensaio de Início e Fim de Pega	79
Figura 45	Etapas do ensaio de resistência à penetração: compactação, marcação e ensaio	80
Figura 46	Orifício característico do ensaio de resistência à penetração	81
Figura 47	Ensaio de resistência à penetração: um dos pontos do compósito 10 mm-35%	81
Figura 48	Dispersão dos pontos do ensaio de resistência à penetração	82
Figura 49	Curva de AJUSTE: estimativa da rigidez da pasta, com evolução da interação cimento-cinza-casca	84
Figura 50	Cilindros de mistura: delimitação dos cortes (10 mm-20% e 10 mm -0%) ..	85
Figura 51	Determinação das dimensões dos corpos-de-prova cilíndricos: diâmetro, para o ensaio à tração por compressão diametral e altura	86
Figura 52	Corpo-de-prova e gráfico do ensaio de tração por compressão diametral (10 mm-35%)	87
Figura 53	Corpo-de-prova e gráfico do ensaio à compressão simples (10 mm -35%) ..	87
Figura 54	Esquema do corte das placas para obtenção dos corpos-de-prova e indicação das posições dos transdutores de ultra-som para acompanhar a EVPU	89
Figura 55	Esquema estático de carregamento e ensaio	89
Figura 56	Umidade: extração de corpo-de-prova - placa com 16 mm de espessura	90
Figura 57	Corpo-de-prova e gráfico do ensaio à compressão paralela à superfície, na condição “seca” (10 mm-35%)	90
Figura 58	Ensaio de absorção e variação dimensional: determinação de medidas	91
Figura 59	Padrões de referência e efeitos da interação casca-cinza nas diferentes faixas de distribuição em tamanho de casca	95
Figura 60	Interação casca-cinza: parâmetro Área	99
Figura 61	Área sob a curva de hidratação e fator CA	100
Figura 62	Interação casca-cinza: parâmetro In_Max	103
Figura 63	Interação casca-cinza: parâmetro P_In_Max	107
Figura 64	Interação casca-cinza: parâmetro tempo_TMax	110
Figura 65	Interação casca-cinza: parâmetro Temp_Max	114
Figura 66	Interação casca-cinza: parâmetro Início de Pega (IP_tempo)	121
Figura 67	Interação casca-cinza: parâmetro Início de Pega (IP_Temp)	122
Figura 68	Interação casca-cinza: parâmetro Início de Pega (IP_Vel)	123
Figura 69	Dispersão das partículas de casca #100-20% e #16-35% na pasta de cimento	123

Figura 70	Interação casca-cinza: parâmetro Fim de Pega (FP_tempo, FP_Temp e FP_Vel)	129
Figura 71	Interação casca-cinza: parâmetro Fim de Pega (FP_tempo, FP_Temp e FP_Vel)	130
Figura 72	Interação casca-cinza: elemento de análise Vel_D	134
Figura 73	Interação casca-cinza: elemento de análise MEAp_D	137
Figura 74	Interação casca-cinza: elemento de análise MOEd_D	141
Figura 75	Interação casca-cinza: elemento de análise Tensao_D	143
Figura 76	Interação casca-cinza: elemento de análise Vel_Ax	149
Figura 77	Interação casca-cinza: elemento de análise MEAp_Ax	152
Figura 78	Interação casca-cinza: elemento de análise MOEd_Ax	155
Figura 79	Interação casca-cinza: elemento de análise Tensao_Ax	158
Figura 80	EVPU (0-24 h): Pastas sem adição de casca	160
Figura 81	EVPU (0-24 h): Faixa de distribuição em tamanho de casca #200	161
Figura 82	EVPU (0-24 h): Faixa de distribuição em tamanho de casca #100	161
Figura 83	EVPU (0-24 h): Faixa de distribuição em tamanho de casca #50	161
Figura 84	EVPU (0-24 h): Faixa de distribuição em tamanho de casca #30	162
Figura 85	EVPU (0-24 h): Faixa de distribuição em tamanho de casca #16	162
Figura 86	EVPU (0-24 h): Efeito da adição de 0% de cinza	162
Figura 87	EVPU (0-24 h): Efeito da adição de 5% de cinza	163
Figura 88	EVPU (0-24 h): Efeito da adição de 20% de cinza	163
Figura 89	EVPU (0-24 h): Efeito da adição de 35% de cinza	163
Figura 90	EVPU (0-28 dias): Pastas sem adição de casca	164
Figura 91	EVPU (0-28 dias): Faixa de distribuição em tamanho de casca #200	165
Figura 92	EVPU (0-28 dias): Faixa de distribuição em tamanho de casca #100	165
Figura 93	EVPU (0-28 dias): Faixa de distribuição em tamanho de casca #50	165
Figura 94	EVPU (0-28 dias): Faixa de distribuição em tamanho de casca #30	166
Figura 95	EVPU (0-28 dias): Faixa de distribuição em tamanho de casca #16	166
Figura 96	EVPU (0-28 dias): Efeito do percentual de adição de 0% de cinza	167
Figura 97	EVPU (0-28 dias): Efeito do percentual de adição de 5% de cinza	167
Figura 98	EVPU (0-28 dias): Efeito do percentual de adição de 20% de cinza	167
Figura 99	EVPU (0-28 dias): Efeito do percentual de adição de 35% de cinza	168
Figura 100	VPU aos 28 dias: Médias: cilindros e corpos-de-prova	168
Figura 101	Equação linear, Limites do intervalo de confiança (95%) e Limites dos valores previstos pela equação	169

Figura 102	Padrões de referência e efeitos da interação casca-cinza nas diferentes misturas, relativas às distribuições em tamanho das partículas da casca de arroz	171
Figura 103	Interação casca-cinza: parâmetro Área	175
Figura 104	Interação casca-cinza: parâmetro In_Max	178
Figura 105	Interação casca-cinza: parâmetro P_In_Max	180
Figura 106	Interação casca-cinza: parâmetro tempo_TMax	184
Figura 107	Interação casca-cinza: parâmetro Temp_Max	187
Figura 108	Interação casca-cinza - fator CASCA: parâmetro Início de Pega (IP_tempo, IP_Temp e IP_Vel)	194
Figura 109	Interação casca-cinza - fator CINZA: parâmetro Início de Pega (IP_tempo, IP_Temp e IP_Vel)	194
Figura 110	Interação casca-cinza - fator CASCA: parâmetro Fim de Pega (FP_tempo, FP_Temp e FP_Vel)	200
Figura 111	Interação casca-cinza - fator CINZA: parâmetro Fim de Pega (FP_tempo, FP_Temp e FP_Vel)	200
Figura 112	Interação casca-cinza: elemento de análise Vel_D	204
Figura 113	Cascas de arroz “chochas”, “fechadas”	206
Figura 114	Interação casca-cinza: elemento de análise MEAp_D	207
Figura 115	Interação casca-cinza: elemento de análise MOEd_D	210
Figura 116	Interação casca-cinza: elemento de análise Tensao_D	213
Figura 117	Interação casca-cinza: elemento de análise Vel_Ax	218
Figura 118	Interação casca-cinza: elemento de análise MEAp_Ax	220
Figura 119	Interação casca-cinza: elemento de análise MOEd_Ax	223
Figura 120	Interação casca-cinza: elemento de análise Tensao_Ax	226
Figura 121	EVPU (0-24 h): Pastas sem adição de casca	230
Figura 122	EVPU (0-24 h): distribuição em tamanho de casca 5 mm	230
Figura 123	EVPU (0-24 h): distribuição em tamanho de casca 10+5 mm	230
Figura 124	EVPU (0-24 h): distribuição em tamanho de casca 10 mm	231
Figura 125	EVPU (0-24 h): Efeito da adição de 0% de cinza	231
Figura 126	EVPU (0-24 h): Efeito da adição de 20% de cinza	231
Figura 127	EVPU (0-24 h): Efeito da adição de 35% de cinza	232
Figura 128	EVPU (0-28 dias): Pastas pura sem adição de casca	233
Figura 129	EVPU (0-28 dias): distribuição em tamanho de casca 5 mm	233
Figura 130	EVPU (0-28 dias): distribuição em tamanho de casca 10+5 mm	233
Figura 131	EVPU (0-28 dias): distribuição em tamanho de casca 10 mm	234

Figura 132	EVPU (0-28dias): Efeito da adição de 0% de cinza	234
Figura 133	EVPU (0-28 dias): Efeito da adição de 20% de cinza	234
Figura 134	EVPU (0-28 dias): Efeito da adição de 35% de cinza	235
Figura 135	VPU aos 28 dias: Médias: cilindros e corpos-de-prova	235
Figura 136	Equação linear, Limites do intervalo de confiança (95%) e, Limites dos valores previstos pela equação	236
Figura 137	Padrão de referência (0% de Cinza) e efeitos da interação casca-cinza nas diferentes misturas tipo COMPÓSITO , para as distribuições em tamanho de casca 5 mm (42% de casca), 10+5 mm (39% de casca) e 10 mm (35% de casca)	238
Figura 138	Interação casca-cinza: parâmetro Área	241
Figura 139	Interação casca-cinza: parâmetro In_Max	244
Figura 140	Interação casca-cinza: parâmetro P_In_Max	247
Figura 141	Interação casca-cinza: parâmetro tempo_Tmax	250
Figura 142	Interação casca-cinza: parâmetro Temp_Max	253
Figura 143	Interação casca-cinza - fator CASCA: parâmetro Início de Pega (IP_tempo, IP_Temp e IP_Vel)	259
Figura 144	Interação casca-cinza - fator CINZA: parâmetro Início de Pega (IP_tempo, IP_Temp e IP_Vel)	259
Figura 145	Interação casca-cinza - fator CASCA: parâmetro Fim de Pega (FP_tempo, FP_Temp e FP_Vel)	267
Figura 146	Interação casca-cinza - fator CINZA: parâmetro Fim de Pega (FP_tempo, FP_Temp e FP_Vel)	267
Figura 147	Interação casca-cinza: elemento de análise Vel_D	272
Figura 148	Interação casca-cinza: elemento de análise MEAp_D	274
Figura 149	Interação casca-cinza: elemento de análise MOEd_D	277
Figura 150	Interação casca-cinza: elemento de análise Tensao_D	279
Figura 151	Interação casca-cinza: elemento de análise Vel_Ax	284
Figura 152	Interação casca-cinza: elemento de análise MEAp_Ax	287
Figura 153	Interação casca-cinza: elemento de análise MOEd_Ax	290
Figura 154	Interação casca-cinza - fator CASCA: elemento de análise Tensao_Ax	292
Figura 155	EVPU (0-24 h): distribuição em tamanho de casca 5 mm	296
Figura 156	EVPU (0-24 h): distribuição em tamanho de casca 10+5 mm	296
Figura 157	EVPU (0-24 h): distribuição em tamanho de casca 10 mm	296
Figura 158	EVPU (0-24 h): Efeito da adição de 0% de cinza	297
Figura 159	EVPU (0-24 h): Efeito da adição de 20% de cinza	297
Figura 160	EVPU (0-24 h): Efeito da adição de 35% de cinza	297

Figura 161	EVPU (0-28 dias): distribuição em tamanho de casca 5 mm	298
Figura 162	EVPU (0-28 dias): distribuição em tamanho de casca 10+5 mm	298
Figura 163	EVPU (0-28 dias): distribuição em tamanho de casca 10 mm	299
Figura 164	EVPU (0-28dias): Efeito da adição de 0% de cinza	299
Figura 165	EVPU (0-28 dias): Efeito do percentual de adição de 20% de cinza	300
Figura 166	EVPU (0-28 dias): Efeito do percentual de adição de 35% de cinza	300
Figura 167	VPU aos 28 dias: Médias: cilindros e corpos-de-prova	301
Figura 168	Equação linear, Limites do intervalo de confiança (95%) e, Limites dos valores previstos pela equação	301
Figura 169	Pastas: Tensão Diametral (MPa): gráfico de caixas – níveis de cinza dentro do tipo de casca (5 = 5 mm; 10 = 10 mm e 15 = 10+5 mm)	306
Figura 170	Gráficos dos parâmetros Tensão (MPa), Massa Específica Aparente (g/cm^3) e VPU (km/s), em conjunto com o consumo de cimento (kg/m^3) ...	308
Figura 171	Ensaio de flexão estática: mistura 5 mm, nas condições “seca” e “úmida” ..	310
Figura 172	Ensaio de flexão estática: mistura 10+5 mm, nas condições “seca” e “úmida”	312
Figura 173	Ensaio de flexão estática: mistura 10 mm, nas condições “seca” e “úmida”	313
Figura 174	Interação casca-cinza: elemento de análise MOE_LP	317
Figura 175	Interação casca-condição: elemento de análise MOE_LP	317
Figura 176	Interação cinza-condição: elemento de análise MOE_LP	318
Figura 177	Interação casca-cinza: elemento de análise Tensao_LP	321
Figura 178	Interação casca-condição: elemento de análise Tensao_LP	322
Figura 179	Interação cinza-condição: elemento de análise Tensao_LP	323
Figura 180	Interação casca-cinza: elemento de análise Tensao_Ruptura	326
Figura 181	Interação casca-condição: elemento de análise Tensao_Ruptura	327
Figura 182	Interação cinza-condição: elemento de análise Tensao_Ruptura	327
Figura 183	Interação casca-cinza: elemento de análise Tensao_CPS	333
Figura 184	Interação casca-condição: elemento de análise Tensao_CPS	334
Figura 185	Interação cinza-condição: elemento de análise Tensao_CPS	335
Figura 186	Interação casca-cinza: elemento de análise VPU _CPS	339
Figura 187	Interação casca-condição: elemento de análise VPU _CPS	340
Figura 188	Interação cinza-condição: elemento de análise VPU _CPS	340
Figura 189	Interação casca-cinza: elemento de análise MEAp_CPS	344
Figura 190	Interação casca-condição: elemento de análise MEAp_CPS	345
Figura 191	Interação cinza-condição - fator CINZA: elemento de análise MEAp_CPS	346

Figura 192	Correlação entre Tensao_CPS e MEAp_CPS: dispersão dos pontos, em análise conjunta das condições seca e úmida	348
Figura 193	Correlação entre Tensao_CPS e MEAp_CPS: dispersão dos pontos dos elementos em análise na condição seca	349
Figura 194	Correlação entre Tensao_CPS e MEAp_CPS na condição seca: Equação linear, Limites do intervalo de confiança (95%) e, Limites dos valores previstos pela equação	349
Figura 195	Correlação entre Tensao_CPS e MEAp_CPS: dispersão dos pontos dos elementos em análise na condição úmida	349
Figura 196	Correlação entre Tensao_CPS e MEAp_CPS na condição úmida: Equação linear, Limites do intervalo de confiança (95%) e, Limites dos valores previstos pela equação	350
Figura 197	Curvas de variação da absorção de água: percentuais de massa	351
Figura 198	Interação casca-cinza evidenciando a absorção de água em percentuais de massa (ABS_Massa_24_h)	352
Figura 199	Curvas de variação na absorção de água: percentuais de volume	353
Figura 200	Interação casca-cinza e intervalo de confiança (Tukey, 95%), para a absorção de água em percentuais de volume (ABS_Volume_24_h)	354
Figura 201	Curvas da variação (média) das dimensões dos corpos-de-prova (comprimento, largura e espessura) em função do tempo de imersão	355
Figura 202	Curvas da variação (médias) das dimensões dos corpos-de-prova em função da distribuição em tamanho da casca ou do percentual de adição da cinza	356
Figura 203	Gráfico de caixas dos resultados dos ensaios mecânicos envolvendo o ensaio de tração por compressão diametral (Tensao_D): Fases I (1), II (2) e III (3)	358
Figura 204	Gráfico de caixas: Tensao_D - fases I (1), II (2) e III (3) para cada nível de cinza	359
Figura 205	Correlação (Pearson): Matriz da dispersão dos pontos entre ensaios das fases III (3) e IV (4)	362
Figura 206	Equação linear, Limites do intervalo de confiança (99%) e Limites dos valores previstos pela equação	363
Figura 207	Equação linear, Limites do intervalo de confiança (95%) e Limites dos valores previstos pela equação	364
Figura 208	Comparação entre a fase III e a fase IV: Comportamento envolvendo a Tensão de ruptura, a Massa Específica Aparente e a velocidade de propagação da onda ultra-sônica, em conjunto com o consumo de cimento	366

LISTA DE TABELAS

	página
Tabela 1 Composição das misturas (g): evolução da temperatura de hidratação	12
Tabela 2 Traços (em massa) empregados na obtenção de corpos-de-prova cilíndricos ensaiados em compressão simples, de acordo com o tamanho das partículas	12
Tabela 3 Resultado do ensaio de compressão simples e análise estatística simplificada	13
Tabela 4 Pastas - Composição das misturas	23
Tabela 5 Inclinação Máxima e Ponto de Inclinação Máxima	27
Tabela 6 Distribuição em tamanho das partículas: 10 mm	44
Tabela 7 Distribuição em tamanho das partículas: 5 mm	45
Tabela 8 Distribuição em tamanho das partículas: 10+5 mm	46
Tabela 9 Características físico-químicas do cimento CP-V-ARI RS	48
Tabela 10 Cinza da casca de arroz, na condição natural (sem moagem): Distribuição em tamanho das partículas	49
Tabela 11 Distribuição em tamanho das partículas da cinza da casca de arroz passante em peneira 0,149 mm	50
Tabela 12 Análise química da cinza moída (Resumo)	55
Tabela 13 Tratamentos - Fase I: Pastas (traço: cimento:cinza:casca)	63
Tabela 14 Tratamentos - Fase II: Pastas (traço: cimento:cinza:casca)	64
Tabela 15 Tratamentos - Fase III: Compósitos (traço:cimento:cinza:casca)	64
Tabela 16 Tratamentos - Fase IV: Placas de Compósito (traço: cimento:cinza:casca)	65
Tabela 17 Parâmetros de referência empregados no ensaio de flexão estática	89
Tabela 18 FASE I - Avaliação química (Médias)	96
Tabela 19 ANOVA do parâmetro Área sob a curva	97
Tabela 20 Análise do fator CASCA: parâmetro Área: Médias (Tukey, 95%)	98
Tabela 21 Análise do fator CINZA: parâmetro Área: Médias (Tukey, 95%)	98
Tabela 22 ANOVA do parâmetro Inclinação Máxima	101
Tabela 23 Análise do fator CASCA: parâmetro In_Max: Médias (Tukey, 95%)	102
Tabela 24 Análise do fator CINZA: parâmetro In_Max: Médias (Tukey, 95%)	103
Tabela 25 ANOVA do parâmetro Ponto de Inclinação Máxima	105

Tabela 26	Análise do fator CASCA: parâmetro P_In_Max: Médias (Tukey, 95%)	106
Tabela 27	Análise do fator CINZA: parâmetro P_In_Max: Médias (Tukey, 95%)	106
Tabela 28	ANOVA do parâmetro tempo para atingir a temperatura máxima	109
Tabela 29	Análise do fator CASCA: parâmetro tempo_TMax: Médias (Tukey, 95%) ..	109
Tabela 30	Análise do fator CINZA: parâmetro tempo_TMax: Médias (Tukey, 95%) ..	110
Tabela 31	ANOVA do parâmetro temperatura máxima	112
Tabela 32	Análise do fator CASCA: parâmetro Temp_Max: Médias (Tukey, 95%)	112
Tabela 33	Análise do fator CINZA: parâmetro Temp_Max: Médias (Tukey, 95%)	113
Tabela 34	FASE I - Avaliação físico-mecânica: Parâmetro <u>Início de Pega</u>	117
Tabela 35	ANOVAs do parâmetro Início de Pega	118
Tabela 36	Análises do fator CASCA: parâmetro Início de Pega (elementos de análise: IP_tempo, IP_Temp e IP_Vel): Médias (Tukey, 95%)	119
Tabela 37	Análises do fator CINZA: parâmetro Início de Pega (elementos de análise: IP_tempo, IP_Temp e IP_Vel): Médias (Tukey, 95%)	120
Tabela 38	FASE I - Avaliação físico-mecânica: Parâmetro <u>Fim de Pega</u>	124
Tabela 39	ANOVAs do parâmetro Fim de Pega	125
Tabela 40	Análises do fator CASCA: parâmetro Fim de Pega (elementos de análise: FP_tempo, FP_Temp e FP_Vel): Médias (Tukey, 95%)	126
Tabela 41	Análises do fator CINZA: parâmetro Fim de Pega (elementos de análise: FP_tempo, FP_Temp e FP_Vel): Médias (Tukey, 95%)	127
Tabela 42	FASE I - Avaliação físico-mecânica: Parâmetro <u>Compressão Diametral</u> ..	131
Tabela 43	ANOVA do elemento de análise Velocidade Diametral dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral	132
Tabela 44	Análise do fator CASCA: elemento de análise Vel_D dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%)	133
Tabela 45	Análise do fator CINZA: elemento de análise Vel_D dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%)	133
Tabela 46	ANOVA do elemento de análise Massa Específica Aparente dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral	135
Tabela 47	Análise do fator CASCA: elemento de análise MEAp_D dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%)	136
Tabela 48	Análise do fator CINZA: elemento de análise MEAp_D dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%)	136
Tabela 49	ANOVA do elemento de análise Módulo de Elasticidade dinâmico dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral	139
Tabela 50	Análise do fator CASCA: elemento de análise MOEd_D dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%)	139

Tabela 51	Análise do fator CINZA: elemento de análise MOEd_D dos corpos de prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%)	140
Tabela 52	ANOVA do elemento de análise Tensão Diametral	142
Tabela 53	Análise do fator CASCA: elemento de análise Tensao_D dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%)	142
Tabela 54	Análise do fator CINZA: elemento de análise Tensao_D dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%)	143
Tabela 55	Coeficientes de correlação (Pearson) entre os elementos de análise do parâmetro Resistência à Tração por Compressão Diametral	145
Tabela 56	FASE I - Avaliação físico-mecânica: Parâmetro <u>Compressão Simples</u>	146
Tabela 57	ANOVA do elemento de análise Velocidade Axial dos corpos-de-prova ensaiados em compressão simples	147
Tabela 58	Análise do fator CASCA: elemento de análise Vel_Ax dos corpos-de-prova ensaiados em compressão simples: Médias (Tukey, 95%)	147
Tabela 59	Análise do fator CINZA: elemento de análise Vel_Ax dos corpos-de-prova ensaiados em compressão simples: Médias (Tukey, 95%)	148
Tabela 60	ANOVA do elemento de análise Massa Específica Aparente dos corpos de prova ensaiados em compressão simples	150
Tabela 61	Análise do fator CASCA: elemento de análise MEAp_Ax dos corpos-de-prova ensaiados em compressão simples: Médias (Tukey, 95%)	150
Tabela 62	Análise do fator CINZA: elemento de análise MEAp_Ax dos corpos-de-prova ensaiados em compressão simples: Médias (Tukey, 95%)	151
Tabela 63	ANOVA do elemento de análise Módulo de Elasticidade dinâmico dos corpos-de-prova ensaiados em compressão simples	153
Tabela 64	Análise do fator CASCA: elemento de análise MOEd_Ax dos corpos-de-prova ensaiados em compressão simples: Médias (Tukey, 95%)	154
Tabela 65	Análise do fator CINZA: elemento de análise MOEd_Ax dos corpos-de-prova ensaiados em compressão simples: Médias (Tukey, 95%)	155
Tabela 66	ANOVA do elemento de análise Tensão Axial	156
Tabela 67	Análise do fator CASCA: elemento de análise Tensao_Ax dos corpos-de-prova ensaiados em compressão simples: Médias (Tukey, 95%)	157
Tabela 68	Análise do fator CINZA: elemento de análise Tensao_Ax dos corpos-de-prova ensaiados em compressão simples: Médias (Tukey, 95%)	157
Tabela 69	Coeficientes de correlação (Pearson) entre os elementos de análise do parâmetro Resistência em Compressão simples	159
Tabela 70	FASE I: Resumo do comportamento dos parâmetros avaliados	169
Tabela 71	FASE II - Avaliação química (Médias)	172

Tabela 72	ANOVA do parâmetro Área sob a curva	173
Tabela 73	Análise do fator CASCA: parâmetro Área: Médias (Tukey, 95%)	173
Tabela 74	Análise do fator CINZA: parâmetro Área: Médias (Tukey, 95%)	174
Tabela 75	ANOVA do parâmetro Inclinação Máxima	176
Tabela 76	Análise do fator CASCA: parâmetro In_Max: Médias (Tukey, 95%)	177
Tabela 77	Análise do fator CINZA: parâmetro In_Max: Médias (Tukey, 95%)	177
Tabela 78	ANOVA do parâmetro Ponto de Inclinação Máxima	179
Tabela 79	Análise do fator CASCA: parâmetro P_In_Max: Médias (Tukey, 95%)	179
Tabela 80	Análise do fator CINZA: parâmetro P_In_Max: Médias (Tukey, 95%)	180
Tabela 81	ANOVA do parâmetro tempo para atingir a temperatura máxima	182
Tabela 82	Análise do fator CASCA: parâmetro tempo_TMax: Médias (Tukey, 95%) ..	182
Tabela 83	Análise do fator CINZA: parâmetro tempo_TMax: Médias (Tukey, 95%) ..	183
Tabela 84	ANOVA do parâmetro temperatura máxima	185
Tabela 85	Análise do fator CASCA: parâmetro Temp_Max: Médias (Tukey, 95%)	186
Tabela 86	Análise do fator CINZA: parâmetro Temp_Max: Médias (Tukey, 95%)	186
Tabela 87	FASE II - Avaliação físico-mecânica: Parâmetro <u>Início de Pega</u>	189
Tabela 88	ANOVAs do parâmetro Início de Pega	190
Tabela 89	Análises do fator CASCA: parâmetro Início de Pega (elementos de análise: IP_tempo, IP_Temp e IP_Vel): Médias (Tukey, 95%)	191
Tabela 90	Análises do fator CINZA: parâmetro Início de Pega (elementos de análise: IP_tempo, IP_Temp e IP_Vel): Médias (Tukey, 95%)	192
Tabela 91	FASE II - Avaliação físico-mecânica - Parâmetro <u>Fim de Pega</u>	195
Tabela 92	ANOVAs do parâmetro Fim de Pega	196
Tabela 93	Análises do fator CASCA: parâmetro Fim de Pega (elementos de análise: FP_tempo, FP_Temp e FP_Vel): Médias (Tukey, 95%)	197
Tabela 94	Análises do fator CINZA: parâmetro Fim de Pega (elementos de análise: FP_tempo, FP_Temp e FP_Vel): Médias (Tukey, 95%)	199
Tabela 95	FASE II - Avaliação físico-mecânica: Parâmetro <u>Compressão Diametral</u> ..	202
Tabela 96	ANOVA do elemento de análise Velocidade Diametral dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral	203
Tabela 97	Análise do fator CASCA: elemento de análise Vel_D dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%)	203
Tabela 98	Análise do fator CINZA: elemento de análise Vel_D dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%)	204
Tabela 99	ANOVA do elemento de análise Massa Específica Aparente dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral	205

Tabela 100	Análise do fator CASCA: elemento de análise MEAp_D dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%)	206
Tabela 101	Análise do fator CINZA: elemento de análise MEAp_D dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%)	207
Tabela 102	ANOVA do elemento de análise Módulo de Elasticidade dinâmico dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral	209
Tabela 103	Análise do fator CASCA: elemento de análise MOEd_D dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%)	209
Tabela 104	Análise do fator CINZA: elemento de análise MOEd_D dos corpos de prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%)	210
Tabela 105	ANOVA do elemento de análise Tensão Diametral	211
Tabela 106	Análise do fator CASCA: elemento de análise Tensao_D dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%)	212
Tabela 107	Análise do fator CINZA: elemento de análise Tensao_D dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%)	212
Tabela 108	Coeficientes de correlação (Pearson) entre os elementos de análise do parâmetro Resistência à Tração por Compressão Diametral	214
Tabela 109	FASE II - Avaliação físico-mecânica – Parâmetro <u>Compressão Simples</u> ..	215
Tabela 110	ANOVA do elemento de análise Velocidade Axial dos corpos-de-prova ensaiados em compressão simples	216
Tabela 111	Análise do fator CASCA: elemento de análise Vel_Ax dos corpos-de-prova ensaiados em compressão simples: Médias (Tukey, 95%)	216
Tabela 112	Análise do fator CINZA: elemento de análise Vel_Ax dos corpos-de-prova ensaiados em compressão simples: Médias (Tukey, 95%)	217
Tabela 113	ANOVA do elemento de análise Massa Específica Aparente dos corpos-de-prova ensaiados em compressão simples	219
Tabela 114	Análise do fator CASCA: elemento de análise MEAp_Ax dos corpos-de-prova ensaiados em compressão simples: Médias (Tukey, 95%)	219
Tabela 115	Análise do fator CINZA: elemento de análise MEAp_Ax dos corpos-de-prova ensaiados em compressão simples: Médias (Tukey, 95%)	220
Tabela 116	ANOVA do elemento de análise Módulo de Elasticidade dinâmico dos corpos-de-prova ensaiados em compressão simples	221
Tabela 117	Análise do fator CASCA: elemento de análise MOEd_Ax dos corpos-de-prova ensaiados em compressão simples: Médias (Tukey, 95%)	222
Tabela 118	Análise do fator CINZA: elemento de análise MOEd_Ax dos corpos de prova ensaiados em compressão simples: Médias (Tukey, 95%)	223
Tabela 119	ANOVA do elemento de análise Tensão Axial	224

Tabela 120	Análise do fator CASCA: elemento de análise Tensao_Ax dos corpos-de-prova ensaiados em compressão simples: Médias (Tukey, 95%)	225
Tabela 121	Análise do fator CINZA: elemento de análise Tensao_Ax dos corpos-de-prova ensaiados em compressão simples: Médias (Tukey, 95%)	226
Tabela 122	Coeficientes de correlação (Pearson) entre os elementos de análise do parâmetro Resistência à Compressão simples	228
Tabela 123	FASE II: Resumo do comportamento dos parâmetros avaliados	236
Tabela 124	FASE III - Avaliação química (Médias)	239
Tabela 125	ANOVA do parâmetro Área sob a curva	240
Tabela 126	Análise do fator CASCA: parâmetro Área: Médias (Tukey, 95%)	240
Tabela 127	Análise do fator CINZA: parâmetro Área: Médias (Tukey, 95%)	241
Tabela 128	ANOVA do parâmetro Inclinação Máxima	242
Tabela 129	Análise do fator CASCA: parâmetro In_Max: Médias (Tukey, 95%)	243
Tabela 130	Análise do fator CINZA: parâmetro In_Max: Médias (Tukey, 95%)	244
Tabela 131	ANOVA do parâmetro Ponto de Inclinação Máxima	245
Tabela 132	Análise do fator CASCA: parâmetro P_In_Max: Médias (Tukey, 95%)	246
Tabela 133	Análise do fator CINZA: parâmetro P_In_Max: Médias (Tukey, 95%)	246
Tabela 134	ANOVA do parâmetro tempo para atingir a temperatura máxima	248
Tabela 135	Análise do fator CASCA: parâmetro tempo_Tmax: Médias (Tukey, 95%) ..	249
Tabela 136	Análise do fator CINZA: parâmetro tempo_Tmax: Médias (Tukey, 95%) ..	249
Tabela 137	ANOVA do parâmetro temperatura máxima	251
Tabela 138	Análise do fator CASCA: parâmetro Temp_Max: Médias (Tukey, 95%)	252
Tabela 139	Análise do fator CINZA: parâmetro Temp_Max: Médias (Tukey, 95%)	252
Tabela 140	FASE III - Avaliação físico-mecânica: Parâmetro <u>Início de Pega</u>	254
Tabela 141	ANOVAs do parâmetro Início de Pega (IP_tempo , IP_Temp e IP_Vel) ...	255
Tabela 142	Análises do fator CASCA: parâmetro Início de Pega (elementos de análise: IP_tempo, IP_Temp e IP_Vel): Médias (Tukey, 95%)	256
Tabela 143	Análises do fator CINZA: parâmetro Início de Pega (elementos de análise: IP_tempo, IP_Temp e IP_Vel): Médias (Tukey, 95%)	257
Tabela 144	FASE III - Avaliação físico-mecânica: Parâmetro <u>Fim de Pega</u> (Médias) ..	262
Tabela 145	ANOVAs do parâmetro Fim de Pega (FP_tempo , FP_Temp e FP_Vel) ...	263
Tabela 146	Análises do fator CASCA: parâmetro Fim de Pega (elementos de análise: FP_tempo, FP_Temp e FP_Vel): Médias (Tukey, 95%)	264
Tabela 147	CASCA: Média dos parâmetros IP_Temp, FP_Temp e Temp_Max	264
Tabela 148	Análises do fator CINZA: parâmetro Fim de Pega (elementos de análise: FP_tempo, FP_Temp e FP_Vel): Médias (Tukey, 95%)	265
Tabela 149	CINZA: Média dos parâmetros IP_Temp, FP_Temp e Temp_Max	266

Tabela 150	FASE III - Avaliação físico-mecânica: Parâmetro <u>Compressão Diametral</u>	269
Tabela 151	ANOVA do elemento de análise Velocidade Diametral dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral	270
Tabela 152	Análise do fator CASCA: elemento de análise Vel_D dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%)	270
Tabela 153	Análise do fator CINZA: elemento de análise Vel_D dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%)	271
Tabela 154	ANOVA do elemento de análise Massa Específica Aparente dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral	273
Tabela 155	Análise do fator CASCA: elemento de análise MEAp_D dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%)	273
Tabela 156	Análise do fator CINZA: elemento de análise MEAp_D dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%)	274
Tabela 157	ANOVA do elemento de análise Módulo de Elasticidade dinâmico dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral	275
Tabela 158	Análise do fator CASCA: elemento de análise MOEd_D dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%)	276
Tabela 159	Análise do fator CINZA: elemento de análise MOEd_D dos corpos de prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%)	276
Tabela 160	ANOVA do elemento de análise Tensão Diametral	278
Tabela 161	Análise do fator CASCA: elemento de análise Tensao_D dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%)	278
Tabela 162	Análise do fator CINZA: elemento de análise Tensao_D dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%)	279
Tabela 163	Coeficientes de correlação (Pearson) entre os elementos de análise do parâmetro Resistência à Tração por Compressão Diametral	281
Tabela 164	FASE III - Avaliação físico-mecânica: Parâmetro <u>Compressão Simples</u> ..	282
Tabela 165	ANOVA do elemento de análise Velocidade Axial dos corpos-de-prova ensaiados em compressão simples	282
Tabela 166	Análise do fator CASCA: elemento de análise Vel_Ax dos corpos-de-prova ensaiados em compressão simples: Médias (Tukey, 95%)	283
Tabela 167	Análise do fator CINZA: elemento de análise Vel_Ax dos corpos-de-prova ensaiados em compressão simples: Médias (Tukey, 95%)	283
Tabela 168	ANOVA do elemento de análise Massa Específica Aparente dos corpos-de-prova ensaiados em compressão simples	285
Tabela 169	Análise do fator CASCA: elemento de análise MEAp_Ax dos corpos-de-prova ensaiados em compressão simples: Médias (Tukey, 95%)	286

Tabela 170	Análise do fator CINZA: elemento de análise MEAp_ax dos corpos-de-prova ensaiados em compressão simples: Médias (Tukey, 95%)	286
Tabela 171	ANOVA do elemento de análise Módulo de Elasticidade dinâmico dos corpos-de-prova ensaiados em compressão simples	288
Tabela 172	Análise do fator CASCA: elemento de análise MOEd_Ax dos corpos-de-prova ensaiados em compressão simples: Médias (Tukey, 95%)	288
Tabela 173	Análise do fator CINZA: elemento de análise MOEd_Ax dos corpos de prova ensaiados em compressão simples: Médias (Tukey, 95%)	289
Tabela 174	ANOVA do elemento de análise Tensão Axial	291
Tabela 175	Análise do fator CASCA: elemento de análise Tensao_Ax dos corpos-de-prova ensaiados em compressão simples: Médias (Tukey, 95%)	291
Tabela 176	Análise do fator CINZA: elemento de análise Tensao_Ax dos corpos-de-prova ensaiados em compressão simples: Médias (Tukey, 95%)	291
Tabela 177	Coeficientes de correlação (Pearson) entre os elementos de análise do parâmetro resistência à compressão simples	293
Tabela 178	Coeficientes de correlação (Pearson) entre os parâmetros Tensao_D e Tensao_Ax	294
Tabela 179	Valores dos parâmetros Tensão_D e Tensão_Ax	295
Tabela 180	FASE III: Resumo do comportamento dos parâmetros avaliados	302
Tabela 181	Comparação entre a FASE II e a FASE III: Avaliação Química - Pastas x Compósitos (Tukey, 95%)	303
Tabela 182	Comparação entre a FASE II e a FASE III: Avaliação Físico-Mecânica - Pastas x Compósitos (Tukey, 95%)	305
Tabela 183	FASE IV - Ensaio de flexão estática: distribuição em tamanho de casca 5 mm: condições “seca” e “úmida”	309
Tabela 184	FASE IV - Ensaio de flexão estática: distribuição em tamanho de casca 10+5 mm: condições “seca” e “úmida”	311
Tabela 185	FASE IV - Ensaio de flexão estática: distribuição em tamanho de casca 10 mm: condições “seca” e “úmida”	314
Tabela 186	ANOVA do elemento de análise Módulo de Elasticidade no Limite de Proporcionalidade	315
Tabela 187	Análise do fator CASCA: elemento de análise MOE_LP dos corpos-de-prova ensaiados à flexão estática: Médias (Tukey, 95%)	315
Tabela 188	Análise do fator CINZA: elemento de análise MOE_LP dos corpos-de-prova ensaiados à flexão estática: Médias (Tukey, 95%)	316
Tabela 189	Análise do fator CONDIÇÃO: elemento de análise MOE_LP dos corpos-de-prova ensaiados à flexão estática: Médias (Tukey, 95%)	316
Tabela 190	ANOVA do elemento de análise Tensão no Limite de Proporcionalidade ...	319

Tabela 191	Análise do fator CASCA: elemento de análise Tensao_LP dos corpos-de-prova ensaiados à flexão estática: Médias (Tukey, 95%)	320
Tabela 192	Análise do fator CINZA: elemento de análise Tensao_LP dos corpos-de-prova ensaiados à flexão estática: Médias (Tukey, 95%)	320
Tabela 193	Análise do fator CONDIÇÃO: elemento de análise Tensao_LP dos corpos-de-prova ensaiados à flexão estática: Médias (Tukey, 95%)	321
Tabela 194	ANOVA do elemento de análise Tensão de Ruptura	324
Tabela 195	Análise do fator CASCA: elemento de análise Tensao_Ruptura dos corpos-de-prova ensaiados à flexão estática: Médias (Tukey, 95%)	325
Tabela 196	Análise do fator CINZA: elemento de análise Tensao_Ruptura dos corpos-de-prova ensaiados à flexão estática: Médias (Tukey, 95%)	325
Tabela 197	Análise do fator CONDIÇÃO: elemento de análise Tensao_Ruptura dos corpos-de-prova ensaiados à flexão estática: Médias (Tukey, 95%)	326
Tabela 198	FASE IV - Ensaio de compressão paralela à superfície	330
Tabela 199	ANOVA do elemento de análise Tensão de Ruptura	331
Tabela 200	Análise do fator CASCA: elemento de análise Tensao_CPS dos corpos-de-prova ensaiados à compressão paralela à superfície: Médias (Tukey, 95%)	332
Tabela 201	Análise do fator CINZA: elemento de análise Tensao_CPS dos corpos-de-prova ensaiados à compressão paralela à superfície: Médias (Tukey, 95%)	332
Tabela 202	Análise do fator CONDIÇÃO: elemento de análise Tensao_CPS dos corpos-de-prova ensaiados à compressão paralela à superfície: Médias (Tukey, 95%)	333
Tabela 203	ANOVA do elemento de análise Velocidade de Propagação do Pulso Ultra-sônico	336
Tabela 204	Análise do fator CASCA: elemento de análise VPU_CPS dos corpos-de-prova ensaiados à compressão paralela à superfície: Médias (Tukey, 95%)	337
Tabela 205	Análise do fator CINZA: elemento de análise VPU_CPS dos corpos-de-prova ensaiados à compressão paralela à superfície: Médias (Tukey, 95%)	337
Tabela 206	Análise do fator CONDIÇÃO: elemento de análise VPU_CPS dos corpos-de-prova ensaiados à compressão paralela à superfície: Médias (Tukey, 95%)	338
Tabela 207	ANOVA do elemento de análise Massa Específica Aparente	342
Tabela 208	Análise do fator CASCA: elemento de análise MEAp_CPS dos corpos-de-prova ensaiados à compressão paralela à superfície: Médias (Tukey, 95%)	343
Tabela 209	Análise do fator CINZA: elemento de análise MEAp_CPS dos corpos-de-prova ensaiados à compressão paralela à superfície: Médias (Tukey, 95%)	343
Tabela 210	Análise do fator CONDIÇÃO: elemento de análise MEAp_CPS dos corpos-de-prova ensaiados à compressão paralela à superfície: Médias (Tukey, 95%)	344

Tabela 211	Ensaio de compressão paralela à superfície (CPS): comparação entre as condições seca e úmida, com base na condição seca dos corpos-de-prova ..	347
Tabela 212	FASE IV - Absorção de água: Médias (24 h de imersão)	351
Tabela 213	ANOVA da absorção de água em massa para o tempo de imersão de 24 h .	352
Tabela 214	ANOVA da absorção de água em volume para o tempo de imersão de 24 h	353
Tabela 215	FASE IV: Resumo do comportamento dos parâmetros avaliados	355
Tabela 216	Resumo da avaliação estatística das variações dimensionais (Tukey, 95%)	356
Tabela 217	Correlação entre Fases: Novas variáveis e níveis assumidos	360
Tabela 218	Coeficiente de correlação entre os ensaios de tração por compressão diametral, compressão simples, flexão estática e compressão paralela à superfície	362
Tabela 219	Modelos alternativos, entre F_IV_Flexao e F_III_Diam: Coeficientes de correlação e de determinação (R^2)	363
Tabela 220	Modelos alternativos, entre F_IV_Flexao e F_III_Axial: Coeficientes de correlação e de determinação (R^2)	364
Tabela 221	Variação média da redução no consumo de cimento em função da adição de cinza	366

LISTA DE ABREVIATURAS

TERMO	DESCRIÇÃO
ABS_Massa_24_h	Absorção de água em percentuais de massa, para o tempo de imersão de 24 h
ABS_Volume_24_h	Absorção de água em percentuais de volume, para o tempo de imersão de 24 h
AFm	Monosulfoaluminato de Cálcio
AFt	Trissulfoaluminato de Cálcio
ANOVA	Análise da Variância
ASTM	American Society for Testing and Material (Sociedade Americana de Testes e Materiais)
CA	Casca de Arroz
CH-III	Cal Hidratada tipo III
CP-II-E-32	Cimento Portland, tipo II, com adição de Escória
CP-V-ARI	Cimento Portland, tipo V, de Alta Resistência Inicial
CP-V-ARI-RS	Cimento Portland, tipo V, de Alta Resistência Inicial Resistente aos Sulfatos
CP's	Corpos-de-prova
CPS	Compressão paralela à superfície
CPS-TR	Tensão de Ruptura no ensaio de compressão paralela à superfície
C-S-H ou CSH	Silicato de Cálcio Hidratado
Cto-Consumo	Consumo de cimento
DIN	Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemão de Normatização)
END	Ensaio Não Destrutivos (ultra-som)
EVPU	Evolução da Velocidade de Propagação do pulso Ultra-sônico
FATOR CA	Fator Área sob a Curva (Área sob a curva de evolução da temperatura de hidratação no período de 24 h)
FBB	Fluid Bed Blast (Forno de Leito Fluidizado)
Flexão-TR	Tensão de Ruptura no ensaio de flexão estática
FP_Temp	Temperatura no Fim de Pega
FP_tempo	Tempo para o Fim de pega
FP_Vel	Velocidade do pulso ultra-sônico no Fim de pega

F_III_Diam	Fase III Diametral (médias dos CP's cilíndricos de compósitos ensaiados em tração por compressão diametral)
F_III_Axial	Fase III Axial (médias dos CP's cilíndricos de compósitos ensaiados em compressão simples)
F_IV_Flexao	Fase IV Flexão (médias da tensão de ruptura das placas prensadas ensaiadas em flexão estática)
F_IV_CPS	Fase IV Compressão Paralela à Superfície (médias da tensão de ruptura das placas prensadas ensaiadas em compressão paralela à superfície)
IME-RJ	Instituto Militar de Engenharia - Rio de Janeiro
In_Max	Inclinação Máxima da curva de hidratação
IP_Temp	Temperatura no Início de Pega
IP_tempo	Tempo para o início de pega
IP_Vel	Velocidade do pulso ultra-sônico no início de pega
ISO	International Organization for Standardization (Organização Internacional para a Standardização)
LME	Laboratório de Microscopia Eletrônica (IME-RJ)
LSC	Lavada em Solução de Cal (casca ou partículas da casca de arroz)
MEAp	Massa Específica Aparente
MEAp_Ax	Massa específica aparente dos CP's Cilíndricos ensaiados em compressão simples
MEAp_CPS	MEAp de CP's extraídos de placas prensadas, ensaiados em compressão paralela à superfície
MEAp_D	Massa específica aparente dos CP's Cilíndricos ensaiados em tração por compressão diametral
MEAp_Flex	MEAp de CP's extraídos de placas prensadas, ensaiados em flexão estática
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura (IME-RJ)
MF	Módulo de Finura
MI-GEIDA	Ministério do Interior - Grupo Executivo de Irrigação para o Desenvolvimento Agrícola
MOE	Módulo de Elasticidade
MOEd	Módulo de Elasticidade dinâmico (ultra-som)
MOEd_D	Módulo de Elasticidade dinâmico, nos CP's Cilíndricos ensaiados em tração por compressão diametral
MOEd_Ax	Módulo de Elasticidade dinâmico, nos CP's Cilíndricos ensaiados em compressão simples

MOE _{LP} ou MOE _{LP}	Módulo de Elasticidade no Limite de Proporcionalidade (ensaio de Flexão estática)
N	Natural (sem lavagem da casca ou de suas partículas)
NBR	Norma Brasileira
P_In_Max	Ponto de Inclinação Máxima
PP ou PR	Pasta Pura ou Pasta Referência (sem adição de casca)
PRFV	Plástico Reforçado com Fibra de Vidro ou FIBERGLASS
qtidade	Quantidade de casca
RP	Resistência à Penetração
RHA	Rice Husk Ash (cinza da casca de arroz)
TDM	Termômetro Digital Multicanal (Sistema MedTemp)
tempo_TMax	Tempo para atingir a temperatura máxima (curva de hidratação)
Temp_Max	Temperatura máxima alcançada na curva de hidratação
T _{LP} ou Tensao_LP	Tensão no Limite de Proporcionalidade (ensaio de Flexão estática)
Tensao_Ruptura	Tensão de Ruptura ou Módulo de Ruptura (ensaio de Flexão estática)
Tensao_Ax	Tensão de Ruptura em CP's Cilíndricos ensaiados em compressão simples
Tensao_CPS	Tensão de Ruptura em CP's ensaiados em compressão paralela à superfície
Tensao_D	Tensão de Ruptura em CP's Cilíndricos ensaiados em tração por compressão diametral
UTS	Unidade Termo-Sônica
Vel_Ax	VPU nos CP's Cilíndricos ensaiados em compressão simples
Vel_CPS	VPU em CP's extraídos de placas prensadas e ensaiados em compressão paralela à superfície
Vel_D	VPU nos CP's Cilíndricos ensaiados em tração por compressão diametral
Vel_Flex	VPU em CP's extraídos de placas prensadas e ensaiadas em flexão estática
VM	Vicat Modificado
VPU	Velocidade de Propagação do pulso Ultra-sônico
VPU_CPS	VPU em CP's ensaiados em compressão paralela à superfície

RESUMO

A reciclagem pode ser considerada uma ferramenta adequada para minimizar o impacto humano causado ao meio ambiente, o que aponta para o aproveitamento de resíduos agrícolas na obtenção de materiais para construções rurais, como uma forma alternativa de seqüestro ou da não emissão de carbono. O aproveitamento racional dos resíduos ainda é um problema não solucionado e uma parte substancial dos resíduos é desperdiçada, ou contamina o meio ambiente. No entanto, agregados de origem vegetal podem ser empregados na fabricação de artefatos leves de cimento, na busca de materiais de comportamento diferenciado em termos de isolamento térmico e acústico e de resistência às cargas dinâmicas. Esse trabalho de pesquisa, baseado em estudos anteriores envolvendo o aproveitamento da casca de arroz (CASCA), objetivou a redução no consumo de cimento através da incorporação de maior quantidade de material, a casca de arroz queimada em condições especiais, resultante de processo industrial (CINZA). Os percentuais de adição de casca e de cinza, variaram em função do tipo de mistura (pasta ou compósito). Assim, as diferentes misturas cimento-cinza-casca obtidas foram agrupadas em FASES, de acordo com o tipo de mistura (Pasta ou Compósito), a quantidade de casca (7,5% nas Fases I e II; variável nas Fases III e IV) e a quantidade de cinza (0%, 5%, 20% e 35%, na fase I e de 0%, 20% e 35%, nas demais fases). Por ser um material biológico a casca de arroz apresentou comportamento físico-químico-mecânico variável, com síntese apresentada ao final de cada fase, em função do grande volume de informação (interação entre os fatores CASCA e CINZA). São apresentadas avaliações do comportamento químico, físico e mecânico das misturas à base de cimento, com incorporação de casca de arroz e/ou cinza da casca de arroz. As avaliações evidenciaram através do comportamento químico das misturas, o efeito negativo dos extrativos da casca de arroz (lavada em solução de cal) sobre as reações químicas do cimento (curva de hidratação), bem como sua redução pela adição de cinza, independentemente da distribuição em tamanho das partículas de casca. Atribuiu-se ao alto teor de carbono (98%) da cinza, a melhoria no comportamento químico das misturas. As reduções observadas em alguns parâmetros químicos, com a adição de cinza, está associada ao aumento de massa no sistema. A avaliação do comportamento físico-mecânico das misturas evidenciou que a adição de casca promoveu um aumento na resistência em tração por compressão diametral e redução na resistência em compressão simples. A adição de cinza promoveu aumento nestas resistências. A avaliação das placas prensadas evidenciou a ausência de diferença significativa entre as misturas, fato este também constatado na fase III, de modo que a adição de cinza não afetou de forma significativa a resistência mecânica, o que sugere a mistura 10 mm-35% como sendo a mais adequada para a produção de compósitos cimento-cinza-casca, com redução no consumo de cimento em cerca de 25%. Destaca-se que a mistura 10 mm-35% apresentou a maior capacidade de confinamento (ou de não emissão) de carbono. Sua capacidade de confinar foi estimada em cerca de 1,9 toneladas de CO₂ por tonelada de cimento consumido no processo de fabricação do compósito, o que seria liberado para a atmosfera, quando da queima da casca de arroz no uso ou descarte inadequados.

Palavras-chaves: calorimetria; casca de arroz; cimento; cinza; compósito.

ABSTRACT

The recycling is an effective tool to minimize environmental impact that is caused by human civilization. The utilization agricultural residual for rural construction is an efficient way for retain or reduce carbon emission to the atmosphere. However, the present-day technology is not enough to be a satisfactory level. A part of the residue is not consumed, and the rejected substances are causing environmental pollution. However, the vegetable aggregates can be employed to lightweight cement artifacts production, which is applied to thermal and acoustic isolators. This work look for a method for light artifacts production with minor cement consumption and larger rice husk (HUSK) consumption, with the help of the rice husk burned by a special industrial process (ASH). The ash and rice husk addition percentages had varied in function of the type of mixture (paste or composite). The different gotten mixtures cement-ash-rice husk been grouped in PHASES, in accordance with the type of mixture (Paste or Composite), the amount of rice husk (7.5% in Phases I and II; variable in Phases III and IV) and the amount of ash (0%, 5%, 20% and 35%, in phase I and of 0%, 20% and 35%, in the too much phases). For a biological material, the rice husk presented behavior changeable physic-chemistry-mechanic. A analyze synthesis is presented on the end each phase; this is necessary of the great volume of the information (interaction between the factors HUSK and ASH). Evaluations of the chemical, physical and mechanical behavior of cement-ash-rice husk mixtures are presented. The evaluations had evidenced through the chemical behavior of the mixtures, the negative effect of the extractives of the rice husk (Washed in Lime Solution) on the chemical reactions of the cement - hydration curve (temperature against time), the its reduction with the ash addition, independently of the particles size range. The high carbon content (98%) of the ash attributed the improvement to the chemical behavior of the mixtures. The reductions observed in some chemical parameters, with the ash addition, are associated with the increase of mass in the system. The behavior physical-mechanical evaluation of the mixtures evidenced that the rice husk addition increase the resistance in Brazilian test, with reduction in the resistance in simple compression. The ash addition promoted increase in this resistance. The evaluation of the board manufacturing evidenced an absence of significant difference between the mixtures, fact also evidenced in phase III. The ash addition not is significant affect in the mechanical resistance properties. The mixture 10 mm-35% proposed from at the production of composite, have reduction in the cement consumption in about 25%. In detach for 10 mm-35% mixture, presented the higher capacity of retain or reduce carbon dioxide emission. The capacity of to confine was estimated to in about 1.9 tons of CO₂ for each ton of cement consumed in the process of manufacture of the composite, what would be emitted for the atmosphere, when of the burning of the rice husk, on the use or in the inadequate deposit.

Keywords: ash; calorimetric, cement; composite; rice husk.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a reciclagem de materiais tem contemplado principalmente aqueles que apresentam maior valor agregado (materiais industrializados), tais como o alumínio, vidro, plástico, papel e aço, entre outros.

As mudanças no regime pluviométrico, relativas ao período e à intensidade das chuvas, promoveram a redução na capacidade de geração de energia elétrica, devido à escassez de água nos reservatórios, fato este que também tem afetado o fornecimento de água potável para os grandes centros urbanos.

Estes fenômenos, aliados a fatos políticos ligados à conservação do meio ambiente, despertaram a necessidade de se encontrar fontes alternativas para suprir a demanda de energia elétrica, dando origem a diversas pesquisas visando o aproveitamento dos recursos naturais renováveis.

O aproveitamento dos resíduos, quer seja de forma integral ou integrada, é uma tendência, ou melhor, uma necessidade cada vez maior no mundo. O uso de biomassa na co-geração de energia elétrica é um ponto interessante, pois, quando esta é queimada, o CO₂ que é liberado na atmosfera volta para o ciclo de carbono da biosfera terrestre, podendo ser absorvido pelos vegetais no processo de fotossíntese.

Tal fato sugere, por exemplo, a implantação das indústrias de beneficiamento nas proximidades das regiões produtoras de arroz, permitindo atender ou complementar as necessidades locais ou regionais de energia para uso na irrigação e no beneficiamento da safra agrícola, entre outras possibilidades.

Excluindo o descarte e a queima de forma inadequada, a casca de arroz tem sido utilizada, nos últimos anos, principalmente como material de combustão no processo de beneficiamento do arroz, para o “cozimento” (processo de parboilização do arroz) e secagem dos grãos.

Deve-se salientar que, segundo o Ministério do Interior - Grupo Executivo de Irrigação para o Desenvolvimento Agrícola (M.I.-GEIDA, 1972), para a implantação de uma pequena indústria de beneficiamento de arroz com capacidade mínima de 25 sacas de 60 kg

por dia, a área mínima de cultivo é da ordem de 250 ha para uma produção média de 1500 kg/ha (arroz de sequeiro).

Estes valores indicam uma produção estimada e necessária de 375 toneladas de grãos, dos quais 75 toneladas correspondem à casca que, caso seja queimada, pode gerar cerca de 15 toneladas de cinza.

Estes valores já são indicadores da possibilidade de uso e de uma destinação adequada para estes rejeitos, que são expressivos, o que poderia viabilizar um pequeno investimento em tecnologia de processamento (moagem) para melhorar as propriedades da cinza da casca de arroz.

A procura por formas alternativas de uso dos materiais cinza e casca de arroz pode promover uma redução no descarte desses resíduos a céu aberto e, em consequência, uma minimização dos problemas ambientais decorrentes desta prática danosa ao meio ambiente.

Assim, a presente pesquisa buscou desenvolver estudos que possibilitem o aproveitamento da casca de arroz queimada em condições especiais (processo industrial), denominada neste trabalho como cinza da casca de arroz, para a produção de compósitos à base de cimento, os quais, aproveitando da potencialidade desses materiais, poderão ser empregados na obtenção de materiais alternativos de construção em formato de peças ou elementos não estruturais, como placas prensadas para uso como forro, divisórias ou outros sistemas construtivos ainda não evidenciados.

O objetivo geral deste trabalho foi o de estudar o emprego da casca de arroz e das cinzas resultantes de sua queima em condições especiais (processo industrial) na produção de compósitos à base de cimento (CP-V-ARI).

Esta proposta de uso teve por objetivo específico verificar o seu potencial como elemento redutor de incompatibilidade química casca-cimento, baseado na capacidade adsorbtiva dos materiais carbonosos (alta superfície específica), além de seu efeito como finos¹, capaz de melhorar o desempenho mecânico do compósito assim obtido.

¹ Finos: material com partículas inferiores a 0,15 mm (passante em peneira #100 mesh); *filler*: material com partículas inferiores a 0,075 mm (passante em peneira #200 mesh).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Potencial Anual de Produção da Casca e da Cinza da Casca de Arroz

Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2005), o cultivo do arroz (*Oriza sativa* L.), no Brasil, gerou uma produção de 13.232.776 toneladas de arroz em casca, na safra 2005. Cerca de 48% da produção nacional concentrou-se no estado do Rio Grande do Sul (6,34 milhões de toneladas de arroz em casca), seguido por Mato Grosso (16%), Santa Catarina (8%), Maranhão (6%) e Pará (5%).

Considerando-se que a quantidade de palha que permanece nos campos é cerca de 1,25 vezes a quantidade do arroz em casca produzido - base seca (BAKER, 1992), e que a casca equivale a 20%-22% da massa dos grãos (FREIRE, 1991), ter-se-ia, no Brasil, para o ano de 2006, um potencial de matéria-prima de cerca de 16,5 milhões de toneladas de palha e de cerca de 2,6 milhões de toneladas de casca de arroz.

Cerca de 30% da produção de arroz no país é beneficiada em cidades de médio porte ou em grandes centros urbanos (PRUDÊNCIO e SANTOS, 1996), o que induz ao descarte dos materiais cinza e casca de arroz, de forma danosa ao meio ambiente. Quando a indústria de beneficiamento de arroz encontra-se localizada próxima ao centro de produção, o descarte no meio ambiente é minimizado pela deposição em áreas de cultivo (cobertura morta), entre outras possibilidades.

Porém, o mesmo não ocorre com as beneficiadoras localizadas nos centros urbanos onde, para uma mesma quantidade de casca, estimada em 75 toneladas/ano, para uma pequena indústria de beneficiamento com capacidade diária de 25 sacas de 60 kg (MI-GEIDA, 1972), ter-se-ia em seu depósito de rejeitos um volume de 600 m³, o que equivaleria ao recobrimento de uma área de 300 m² (lote urbano, de elevado valor territorial, quando comparado à área rural), com uma camada de cerca de 2 m de espessura.

Como agravante, por ser um material de decomposição lenta na natureza (estimada em 5 anos), o acúmulo anual da casca de arroz passa a ser um grave problema de descarte e deposição, o mesmo ocorrendo com a cinza resultante da sua queima.

No caso da casca de arroz, se depositada de forma inadequada devido ao seu acúmulo constante, pode ocorrer uma decomposição anaeróbica que produz gases poluentes (metano e óxido nitroso, entre outros, potencialmente danosos à camada de ozônio).

O excedente da casca de arroz sugere o seu uso como combustível para a geração de vapor, o qual poderia ser empregado na co-geração de energia elétrica, no beneficiamento do arroz ou em outros processos industriais. A cinza, por sua vez, promoverá poluição no solo, pois apresenta uma quantidade considerável de carbono residual (considerado como poluente para o solo), além de concentração excessiva de óxidos alcalinizantes (CaO , MgO , K_2O e Na_2O , entre outros, que em contato com a água, alcalinizam o meio aquoso).

Segundo Santi e Sevá Filho (1999), as fábricas de cimento instaladas no Rio Grande do Sul, Goiás e Triângulo Mineiro, regiões tradicionalmente produtoras de arroz, processaram, respectivamente, 280 mil t, 104 mil t e 23 mil t de casca de arroz, chegando a substituir 30% dos combustíveis anteriormente empregados; no período compreendido entre 1986 e 1995, esse montante de resíduos vegetais equivaleu a 144 mil toneladas de óleo combustível.

Shimizu e Jorillo Jr. (1990) sugeriram que o modo mais conveniente de se desfazer da casca de arroz é através da sua queima a céu aberto, dispondo-a em amontoados. Desta forma, com base no exemplo citado (MI-GEIDA, 1992), se toda a casca fosse queimada (mínimo 6 t/mês), a cinza resultante deste processo (mínimo 1,2 t/mês) teria como destino o descarte, em função de um baixo volume, insuficiente para justificar investimentos em qualidade (sílica), mesmo se tratando de um material nobre, destacando-se o fato de ser um rejeito ainda sem emprego específico, no que diz respeito a grandes volumes de demanda.

Prudêncio Jr. et al. (2003) afirmaram que as empresas beneficiadoras de arroz são as principais consumidoras da casca de arroz, empregando-a como combustível nos processos de secagem e parboilização.

Como geralmente são empresas de pequeno porte (em acordo com MI-GEIDA, 1992), a maioria não apresenta controle tecnológico no processo da queima e, conseqüentemente, no aproveitamento e descarte adequado da cinza produzida, geralmente depositada em terrenos baldios ou lançada em cursos d'água, ocasionando poluição e contaminação de mananciais.

Portanto, o aproveitamento da cinza da casca de arroz contribuirá para a despoluição do meio ambiente, acarretando benefícios técnicos, econômicos, energéticos e ecológicos.

Considerando-se o incremento nas pesquisas envolvendo a cinza da casca de arroz nos mais diversos segmentos da indústria (borracha, cerâmica, química e construção civil, entre outros), espera-se uma elevação no seu consumo, nos próximos anos, pois atualmente o uso da cinza da casca de arroz ainda é incipiente, se considerado o potencial volumétrico disponível anualmente.

Neste cenário, destaca-se a empresa Urbano Agroindustrial, de Jaraguá do Sul, no estado de Santa Catarina, considerada como pioneira no uso da casca de arroz para a geração de energia elétrica com co-geração de vapor de baixa pressão, sendo também pioneira na comercialização da cinza resultante do processo, em embalagem plástica hermética (sacos), o que garante a alta qualidade e uniformidade do produto, razão pela qual foi escolhida como fornecedora do material empregado nesta pesquisa.

2.2. Casca de arroz

Segundo Dafico e Prudêncio Jr. (2002), a casca de arroz é constituída de quatro camadas fibrosas, esponjosas ou celulares, altamente silicosas, cuja composição química média em base anidra corresponde a, aproximadamente, 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica.

Krishnarao et al. (2001) apontaram como constituintes químicos orgânicos presentes na casca de arroz, a celulose, a lignina, a D-xilose, pequenas quantidades de ácido metil-glucurônico e D-galactose, o que corresponde a cerca de 51%, em massa, do elemento carbono, 7%, em massa, do elemento hidrogênio e a 42%, em massa, do elemento oxigênio, de modo que a sua combustão em baixas temperaturas (inferiores a 400 °C) resulta em cinzas com elevado teor de carbono.

Jauberthie et al. (2003), através de análises de microscopia e difração de raios X, observaram que a sílica presente na casca de arroz ocorre na forma cristalina (quartzo) e amorfa, concentrando-se na superfície externa da casca. As micrografias apresentadas na Figura 1 apresentam detalhes da estrutura externa, com ampliações de 10 X (a), 50 X (b) e de 200 X (c), destacando também a estrutura interna de uma casca de arroz, através de um corte transversal (d) com ampliação de 500 X.

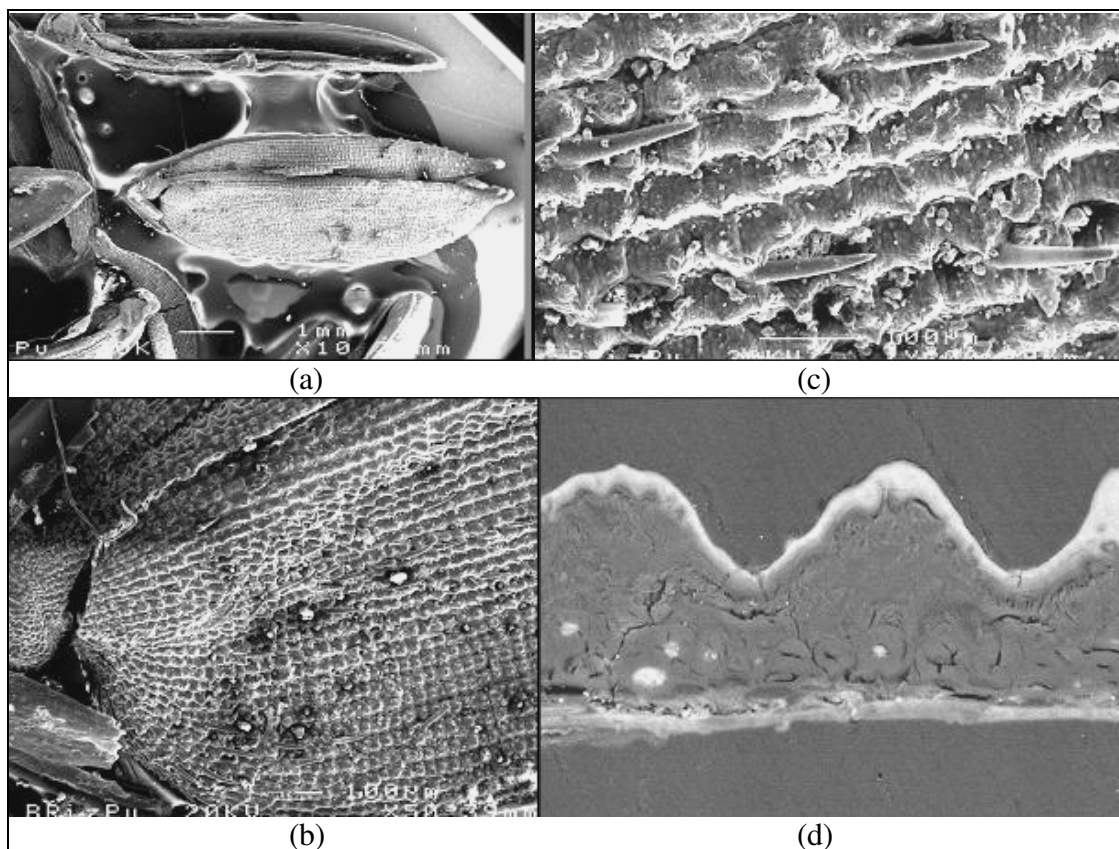


Figura 1 - Micrografias da casca de arroz: (a) 10 X, (b) 50 X, (c) 200 X, (d) 500 X.
Fonte: Jauberthie et al. (2003).

Irle e Simpsons (1992) afirmaram, em seu trabalho, que a sílica contida na palha do arroz (que é semelhante à da casca), pode agir como uma ponte de cristalização, aumentando a aderência entre a palha (ou a casca) e a matriz de cimento.

Nesse sentido, Jauberthie et al. (2003) observaram que a pasta de cimento mantinha-se em contato e penetrava nas células da casca de arroz. Verificaram ainda que o interior de algumas das células era preenchido com produtos da hidratação, afirmando ser difícil identificar a sua natureza, devido à dimensão das formações que ocorriam.

Das múltiplas possibilidades de uso da casca de arroz, cita-se o trabalho de Satto et al. (1998), que a utilizaram com o intuito de minimizar a presença de fissuras em canais de irrigação revestidos com argamassa (cimento, areia e casca de arroz). Como resultados, os autores concluíram, com base na taxa de infiltração média de $0,003 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (obtida pelo represamento) e no coeficiente de rugosidade "n" de Manning (0,012), que o comportamento dos canais assim construídos foi equivalente ao de canais de tijolos com argamassa de cimento em boas condições.

Mesa Valenciano (2004), em seu estudo envolvendo argamassas reforçadas com fibras vegetais (casca de arroz, bambu e bagaço de cana), verificou que os maiores valores de resistência à compressão simples, para corpos-de-prova cilíndricos, foram alcançados pela testemunha (argamassa sem adição de fibras), seguidos pelos tratamentos com adição de casca de arroz.

Avaliando vigas de argamassa com e sem reforço de fibras, a autora constatou que os maiores valores de módulo de elasticidade foram obtidos em vigas testemunhas (sem adição de fibras), seguido das vigas de compósitos confeccionados com casca de arroz.

Misturas envolvendo resíduos de origem vegetal e cimento apresentam, geralmente, problemas de ordem química, causados pela interferência de compostos químicos presentes nas partículas vegetais.

Esses compostos, facilmente solubilizáveis no meio alcalino promovido pelo cimento, modificam o comportamento das pastas ou misturas de cimento. Essas mudanças são evidenciadas nos processos de pega, enrijecimento e no desempenho mecânico, avaliado através de ensaios de compressão simples, tração por compressão diametral, e por meio de Ensaios Não Destrutivos por ultra-som (**END**), entre outros.

Este comportamento negativo é denominado de incompatibilidade química entre o aglomerante e a biomassa vegetal, sendo, geralmente, expresso por um índice de compatibilidade.

Simatupang (1986) constatou que extrativos, como a celulose e a celobiose, sofrem degradação em contato direto com a pasta de cimento, tendo seu efeito retardador cessado após 7 dias, em função da conversão dos inibidores em produtos inativos.

Segundo Sander mann et al. (1960), a hidratação do cimento (expressada pela elevação da temperatura) é rapidamente interrompida quando há presença de glicose, amido ou taninos (considerados retardadores de pega) na água de amassamento.

No caso do material casca de arroz, os primeiros estudos envolvendo a aplicação deste material em misturas com cimento podem ser atribuídos a Serrano e Castro (1985), que determinaram como o melhor tratamento a lavagem da casca de arroz com cal (lavagem em solução de cal), na dosagem de 5% de massa de cal, por massa de casca (5% p/p), uma vez que a mesma possibilitou obter os melhores resultados de resistência mecânica.

Esta lavagem da casca de arroz com uma solução de cal cria a possibilidade de

componentes da cal reagirem com a fibra vegetal, como supôs Gram (1986), o que causaria a sua precipitação no lúmen das fibras e nos espaços intercelulares, tornando as fibras menos flexíveis, porém mais resistentes, o que também foi confirmado por Pirje et al. (1990), que verificaram uma quantidade considerável de cálcio impregnando a parede das fibras de celulose, tendo havido alguma penetração no lúmen das fibras.

A ocorrência de incompatibilidade química entre a casca de arroz e o cimento foi posteriormente estudada por Beraldo e Zucco (1998 a,b), os quais, entre outras observações, referenciaram o fato de a água de amassamento solubilizar compostos químicos que, em contato com o cimento, inibem a sua pega e o seu enrijecimento, tornando o processo produtivo de materiais para uso em construção, inadequado.

Os compostos químicos hidrossolúveis presentes na casca de arroz, denominados genericamente como extrativos, podem estar associados a diferentes funções na planta, entre as quais, a de servir como reserva alimentar (amido, açúcares) e de proteção contra pragas e moléstias.

Para avaliar a incompatibilidade química entre a casca de arroz e o cimento, com o propósito de aproveitá-la na obtenção de material alternativo para ser empregado em construções, os referidos autores utilizaram a metodologia proposta por Weatherwax e Tarkow (1964), que se baseia no intervalo de tempo para se atingir a temperatura máxima de hidratação do cimento, verificando também a influência do tamanho das partículas e da razão casca/cimento, no índice inibitório.

Como parâmetro quantitativo, a melhor referência foi o fator CA (área sob a curva de hidratação), dado por Hachmi et al. (citados por HACHMI e MOSLEMI, 1989), o qual traduz o quanto um material é considerado como compatível, adotando-se um fator CA superior a 68%, moderadamente compatível entre 28% e 68% e incompatível se inferior a 28%.

Zucco (1999), em seus estudos, evidenciou problemas de incompatibilidade química entre a casca de arroz e os dois tipos de cimento empregados (CP-II-E-32 e CP-V-ARI), incompatibilidade esta evidenciada inicialmente através da ausência de pega em misturas do tipo pasta, contendo casca de arroz natural (sem tratamento) e cimento.

A Figura 2 evidencia a falta de pega e endurecimento, 24 h após a mistura com água, de pasta de cimento CP-V-ARI (Traço em massa de 1:0,075:0,45 - cimento:casca:água) à qual se adicionou casca de arroz natural (N) passante em peneira de #200 mesh (ABNT 0,075 mm).



Figura 2: Pasta de CP-V-ARI com casca de arroz (#200 N), 24 h após a mistura com água.

Para avaliar o comportamento químico das diferentes distribuições em tamanho das partículas (Figura 3), Beraldo e Zucco (1998 b) e Zucco (1999) fizeram uso do método das curvas de hidratação comparando curvas das misturas, com a curva da pasta referência.



Figura 3: Algumas faixas de distribuição em tamanho das partículas empregadas nas curvas de hidratação. A cor mais escura é característica na casca lavada em solução de cal.

Os referidos autores destacaram o efeito benéfico do acelerador de pega cloreto de cálcio, combinado com a lavagem das partículas da casca de arroz em solução de cal (LSC) (Figura 4).

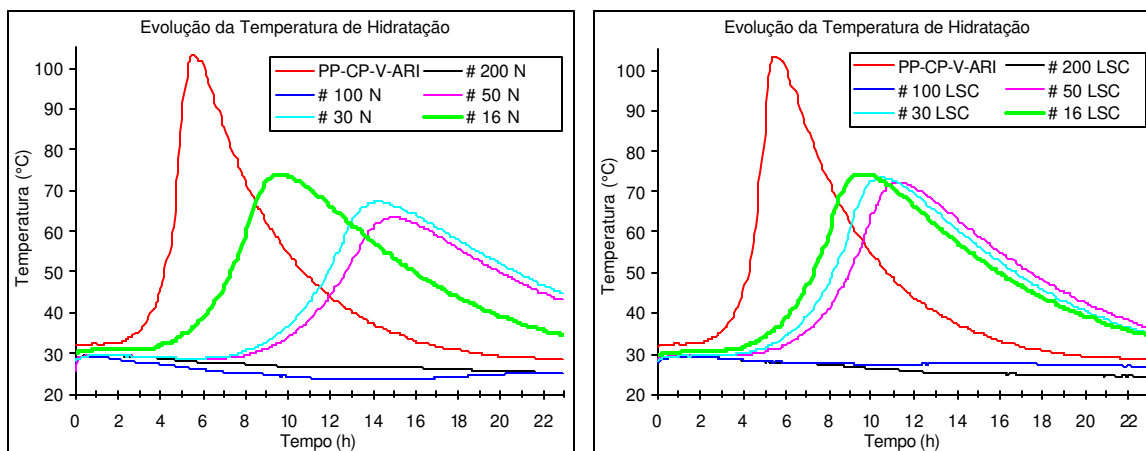


Figura 4: Efeito da distribuição em tamanho das partículas, nas condições Natural (N) e Lavada em Solução de Cal (LSC), sobre a evolução da temperatura de hidratação. Fonte: adaptado de Zucco (1999).

Em termos de temperatura máxima e o tempo necessário para atingi-la, os referidos autores verificaram que as curvas que apresentavam a maior uniformidade no comportamento, foram aquelas relacionadas aos materiais lavados em solução de cal, combinados com o uso do acelerador de pega cloreto de cálcio. Esta combinação, além de promover os melhores resultados em termos de comportamento químico da pasta de cimento, refletiu também em uma melhoria no comportamento mecânico do compósito, avaliado por meio do ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos.

Os efeitos da incompatibilidade química cimento-casca (visuais e mecânicos) também foram observados em corpos-de-prova de compósitos (Figura 5) confeccionados com casca lavada com cal – LC (a cal empregada foi a cal para argamassa, encontrada no comércio em sacos de 20 kg, diferente da cal para pintura, comercializada em sacos de 8 kg).

A lavagem da casca com cal obedeceu sempre o mesmo padrão, da proporção 10:1:0,05 ou seja, 10 partes de água, 1 (uma) parte de casca e 0,05 partes de cal (5% da massa de casca) no caso, cal para argamassa.

A adição de elevadas dosagens de casca de arroz – Traços em massa: 1:0,56:0,75 e 1:0,49:0,75; respectivamente, 167 g e 147 g de casca, do tipo **3 mm** (peneira do moinho-de-martelos com furos de 3 mm) para cada 300 g de cimento e 225 g de água, evidenciou a formação de manchas características, indicadoras da incompatibilidade química (Figura 5), apontando uma baixa eficiência no tratamento, empregando cal para argamassa (NBR 7175/1992).

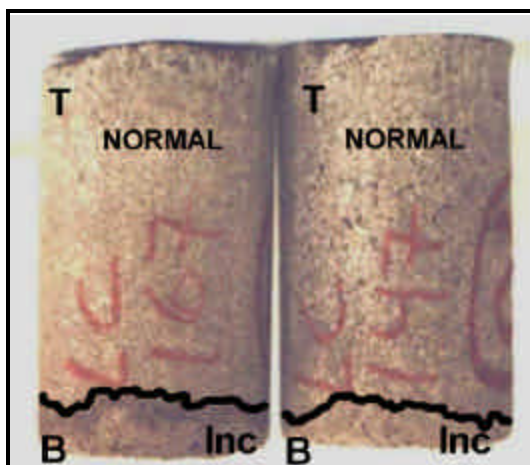


Figura 5: Corpos-de-prova com sinais de incompatibilidade química (Inc.) na região da base.
Fonte: Beraldo e Zucco (1998 b).

Os corpos-de-prova indicaram baixa resistência à compressão simples, apresentando valores muito inferiores a 1,0 MPa. A partir da constatação de que a qualidade da cal interferia no tratamento da casca, houve a substituição da cal para argamassa (tipo CH-III) pela cal para pintura, após o que não mais se observou o mesmo fenômeno, apresentado na Figura 5.

A diferença entre as duas cals está em sua composição química e nos resíduos após a solubilização, sendo que a cal para pintura apresenta maior pureza, com reduzida presença de resíduos sólidos após a diluição.

Beraldo e Zucco (1998 b) concluíram que, quanto menor era a dimensão média das partículas do material casca de arroz, maiores eram os efeitos da incompatibilidade química observados com o cimento, fato este associado com a redução substancial da temperatura máxima de hidratação, combinado com um aumento significativo no tempo para se alcançar o pico de temperatura.

Os referidos autores verificaram, ainda, que a melhoria da compatibilidade química da casca de arroz com o cimento, apresentada na Figura 6, era devido à combinação dos fatores cimento de alta resistência inicial (CP-V-ARI), acelerador de pega cloreto de cálcio (CaCl_2 a 3% em relação à massa do cimento) e casca de arroz (“granulometria” 10 mm, na condição Lavada em Solução de Cal - LSC).

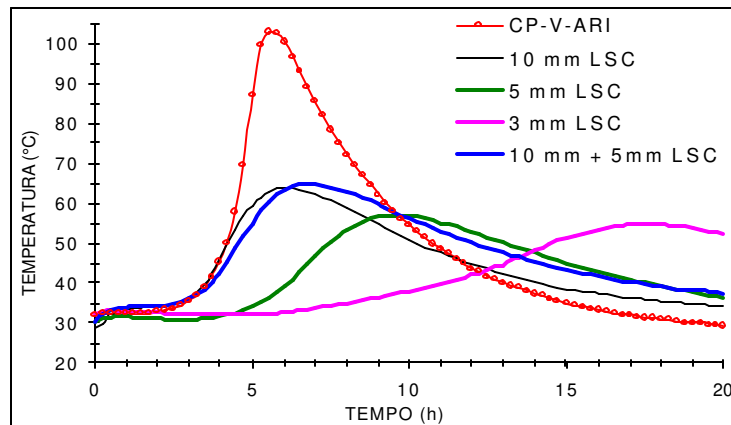


Figura 6: Efeito da dimensão das partículas e do traço na evolução da temperatura de hidratação do cimento CP-V-ARI.
Fonte: Beraldo e Zucco (1998 b).

A composição de cada tipo de mistura utilizada pelos autores, no experimento de evolução da temperatura de hidratação, é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Composição das misturas (g): evolução da temperatura de hidratação.

Parâmetros	cimento	Casca	água	CaCl ₂
10 mm (LSC)	200,0	72,0	100,0	6,0
5 mm (LSC)	200,0	84,0	100,0	6,0
3 mm (LSC)	200,0	98,0	100,0	6,0
10 + 5 mm (LSC)	200,0	(50+28)	100,0	6,0

Fonte: Beraldo e Zucco (1998 b).

Na Tabela 2 são apresentados os traços empregados pelos autores na obtenção dos corpos-de-prova cilíndricos, que foram ensaiados à compressão simples, de acordo com a distribuição em tamanho das partículas.

Tabela 2: Traços (em massa) empregados na obtenção de corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à compressão simples, de acordo com o tamanho das partículas.

Dimensão das Partículas	10 mm	5 mm	3 mm
Traço (em massa)	1:0,36:0,75	1:0,42:0,75	1:0,49:0,75

Fonte: Beraldo e Zucco (1998 b).

A Tabela 3 apresenta o resultado dos ensaios de compressão simples (MPa) dos corpos-de-prova cilíndricos, em análise estatística simplificada (software SANEST), onde são apontadas a existência (?) ou não (=) de diferenças significativas, entre as médias.

Tabela 3: Resultado do ensaio de compressão simples (MPa) e análise estatística simplificada.

Tratamentos Químicos	CP V-ARI			CP II-E-32		
	10 mm	5 mm	3 mm	10 mm	5 mm	3 mm
Testemunha	LSC ≠ (N = L) 2,46±1,67=1,24	LSC ≠ N ≠ L 6,01±2,70=1,75	LSC ≠ (N = L) 6,38±2,46=2,41	LSC ≠ (N = L) 1,56±0,76=0,68	LSC ≠ (L = N) 2,45±0,53=0,42	LSC ≠ (L = N) 2,85±0,29=0,22
Acelerador CaCl ₂	LSC ≠ (N = L) 3,48±1,95=1,83	LSC ≠ (N = L) 9,05±3,85=3,38	LSC ≠ (N = L) 8,39±6,49=5,46	LSC ≠ (L = N) 2,62±1,14=0,80	LSC ≠ (L = N) 4,34±0,74=0,50	LSC ≠ (L = N) 4,29±0,51=0,19
Acelerador Al ₂ (SO ₄) ₃	LSC ≠ (N = L) 3,35±2,43=1,75	LSC ≠ N ≠ L 6,28±5,35=3,11	(LSC = N) ≠ L 6,22±5,60=3,70	LSC = N = L 2,24±1,61=1,60	LSC ≠ (N = L) 3,14±1,41=1,17	LSC ≠ L ≠ N 4,24±1,82=0,19
Mineralização	N = (LSC = L) 3,21±2,55=2,31	(N = LSC) ≠ L 5,84±5,35=3,65	(LSC = N) ≠ L 7,30±6,89=4,87	LSC = (L = N) 2,38±1,83=1,48	LSC ≠ (N = L) 4,24±3,04=2,27	LSC ≠ (N = L) 4,78±2,62=1,91

OBS.: São indicados (ordem decrescente) o resultado da análise estatística para as diferentes condições do material (primeira linha), bem como os valores médios obtidos (segunda linha), para cada condição (média de três repetições). N = Natural; L = Lavado em água quente e LSC = Lavado em Solução de Cal (5% p/p).

Fonte: Beraldo e Zucco (1998 b).

Segundo os autores, a escolha da distribuição em tamanho das partículas definida como 10 mm, para a fabricação de placas de compósito, levou em consideração o fato de que o fracionamento gera custos adicionais, associado ao fato de ocorrer um maior efeito inibitório associado às partículas da casca de arroz com dimensões inferiores a 0,15 mm, traduzido pelo maior tempo necessário para a ocorrência do pico de temperatura, sendo este pico ligeiramente decrescente com a diminuição do tamanho das partículas.

Como forma de contrapor este efeito inibitório da casca de arroz nas características de hidratação, os autores recomendaram o uso do acelerador de pega cloreto de cálcio (CaCl₂ a 3%) em misturas de cimento CP-V-ARI e uso da casca de arroz lavada em solução de cal.

A Lavagem em Solução de Cal (LSC) teve por finalidade eliminar ao máximo os extrativos solúveis, causadores da inibição da pega e endurecimento do cimento, além do fato de o elemento químico cálcio tornar os materiais da parede celular menos acessíveis à ação das enzimas hidrolizantes, e também reduzir a degradação das paredes celulares por enzimas microbianas ou de origem fúngica, razões pela qual a cal é amplamente utilizada na conservação e desinfecção de instalações (pintura, pedilúvio). A cal aderida à casca (aderência mecânica) pode ainda servir de ponte de ligação com produtos de hidratação do cimento, constituídos em sua maioria por silicatos de cálcio.

2.3. Cinza da casca de arroz (CCA)

A composição química média da casca de arroz, em base anidra, correspondente a aproximadamente, 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica. A celulose e a lignina, quando removidas por combustão controlada, deixam para trás a sílica numa forma vítrea e microporosa, de altíssima superfície específica. Dependendo das impurezas presentes e das condições de queima, a cinza tende a ser preta (por conter carbono), púrpura ou branca.

Atualmente, a maior parte das pesquisas visando o aproveitamento do resíduo casca de arroz concentra-se nos estudos envolvendo a sua cinza. Fatores como o grande conteúdo em cinza, de cerca de 18% a 22% da massa da casca ou, de cerca de 4% da massa dos grãos (FREIRE, 1997), o elevado teor de sílica presente nesta cinza (pode chegar a 98%), o tipo de estrutura física da sílica (estrutura alveolar, de grande superfície específica) e a disponibilidade da matéria-prima casca de arroz ao longo do ano e em quase todos os estados do Brasil, contribuem para destacar este resíduo como sendo um dos mais promissores em termos de utilização.

Como destaque, apontam-se usos nas indústrias cimenteira (pozolana), de borracha (carga mineral), extração de ouro (substituto da Thiourea), produção de carbetos de silício (abrasivos e cerâmica de alta resistência) e, principalmente, na produção de zeólita (alumino-silicatos cristalinos microporosos) para uso agrícola (liberação lenta de nutrientes, minimizando perdas por lixiviação), entre outras possibilidades (MARTINS et al., 2003; FOLETTO et al., 2005).

A literatura especializada em cinza da casca de arroz indica que o processo de combustão da casca de arroz é a chave para obter a atividade pozolânica da cinza resultante, pois a calcinação em temperatura adequada produz cinza com alto teor de sílica amorfa, considerada como a responsável pela atividade pozolânica. Evidentemente, nem toda casca é queimada em temperatura controlada e, esse tipo de processo acaba gerando cinzas com presença de sílica cristalina, as quais são quimicamente inativas. A literatura indica que teores de até 12% de carbono nas cinzas afetam o desempenho das misturas com elas produzidas.

Segundo Freire (1997), a cinza da casca de arroz apresenta forma esférica de alta porosidade interna e superfície específica variando de 50 m²/g a 100 m²/g, característica esta dependente da duração e da temperatura de calcinação.

Guedert et al. (1989) estudaram o desempenho da cinza da casca de arroz na fabricação de cimento alternativo, baseado na mistura cimento Portland e cinza da casca de arroz (entre outras misturas). No caso das misturas cimento-cinza, a substituição do cimento por teores variando de 10% a 35% de cinza, em massa, apontaram que a cinza adequada para a fabricação de cimento pozolânico apresenta área específica superior a 6.330 cm²/g (ou 0,633 m²/g, o que está em acordo com Nakata et al., citados por DELLA et al., 2001), sendo que, para uma mesma resistência, o teor de cinza admissível no aglomerante tipo cimento-cinza foi diretamente proporcional à superfície específica da cinza.

Os autores indicaram ainda um aumento na resistência à compressão, após 28 dias de idade, de até 14%, em argamassas onde houve a substituição parcial do cimento pela cinza, destacando os teores de cinza de 35% e 25%, moídas respectivamente durante 8 h e 2 h, apresentando equivalência de resistência à compressão em relação às argamassas de cimento Portland (testemunha).

Segundo os autores, o emprego da cinza da casca de arroz como material pozolânico em adição ao cimento é justificado por razões de ordem tecnológica, econômica e ambiental.

Do ponto de vista tecnológico, a explicação baseia-se nas reações da cal liberada pelo cimento, quando da hidratação do clínquer Portland (C₃S e C₂S), fixando a cal liberada, pela formação de monossilicatos cálcicos de composição semelhante aos da hidratação dos cristais de clínquer, conferindo às argamassas onde houve a substituição parcial do cimento pela cinza, características como uma maior resistência (principalmente em idades mais avançadas), menor calor de hidratação, maior resistência ao ataque de ácidos (maior durabilidade em ambientes agressivos), inibição da expansão devido à reação álcali-agregado, maior impermeabilidade, maior Módulo de Elasticidade, melhor comportamento quando submetido à cura térmica e basicidade total ou reserva alcalina mais baixa, pelo consumo do hidróxido de cálcio – Ca(OH)₂.

Nakata et al., citados por DELLA et al. (2001), apontaram que a composição química da cinza é variável, dependente de condições do solo em que o arroz foi plantado, tipos e teores dos fertilizantes empregados, assim como do tipo (variedade) do arroz.

Os autores afirmaram, ainda, que cinzas obtidas de cascas queimadas a 400 °C possuem área superficial de cerca de 147 m²/g; quando queimadas em temperatura de 800 °C, a área superficial foi de 5 m²/g e, acima de 900 °C, variou de 0,8 a 0,4 m²/g.

A tendência de redução na área superficial, com o aumento da temperatura, deve-se ao efeito de fusão das partículas que se agregam umas às outras, conforme relataram os autores.

Della et al. (2001) afirmaram que a presença de sílica amorfa (reativa) ou cristalina (praticamente inerte) está diretamente ligada à temperatura e ao método de obtenção da cinza. Quando a temperatura de queima da casca de arroz é baixa ou quando o tempo de exposição da mesma a altas temperaturas é reduzido, a sílica contida na cinza é predominantemente amorfa.

Silveira e Dal Molin (1995) estudaram os efeitos do tipo de queima (forno do tipo leito fluidizado a 560 °C e caldeira a 800 °C), a relação água / aglomerante (0,41; 0,50; 0,59) e a porcentagem de adição (0%, 5% e 10%) de cinza na resistência à compressão (28 dias) de corpos-de-prova de argamassa. Concluíram que houve uma relação entre o processo de queima, a pozolanicidade e a resistência à compressão aos 28 dias, sendo a cinza da casca de arroz obtida pelo processo de queima controlada, um excelente material pozolânico.

Rego et al. (2003) avaliaram o comportamento de aglomerantes formados pela substituição do cimento Portland comum CP-I (referência) por cinza da casca de arroz (CCA), tendo as seguintes composições: • 100% cimento CP-I (referência); • 95% cimento CP-I + 5% CCA amorfa; • 90% cimento CP-I + 10% CCA amorfa; • 80% cimento CP-I + 20% CCA amorfa; • 95% cimento CP-I + 5% CCA cristalina; • 90% cimento CP-I + 10% CCA cristalina; 80% cimento CP-I + 20% CCA cristalina. Os autores verificaram que esses aglomerantes propiciaram um significativo aumento da resistência à compressão das argamassas, sendo este efeito mais pronunciado com a incorporação da CCA amorfa, que promoveu uma redução na massa específica das argamassas.

No estudo desenvolvido por Hossain et al. (1991), os autores fizeram uso de cinza da casca de arroz para estabilizar solos siltosos aluviais, em Bangladesh, como uma forma de resolver o problema de disposição das mesmas, tal o volume produzido pelas caldeiras utilizadas no beneficiamento (cozimento e secagem) dos grãos de arroz.

Os autores compararam solos siltosos aluviais estabilizados com cimento Portland comum e uma mistura de cimento e cinza da casca de arroz (CCA), para aplicação em pavimentação de estradas de baixo volume de tráfego. Como resultados, os autores verificaram que a substituição parcial do cimento num teor de 25% não prejudicou a

durabilidade nem as características de resistência à compressão dos solos siltsos aluviais estabilizados, mas ressaltaram que a adição de CCA resultou em um aumento no volume de água necessário à mistura solo-cimento-CCA, ocorrendo uma diminuição da densidade máxima do solo seco. Valores mais elevados no teor de cinzas aumentaram a plasticidade da mistura estabilizada (solo-cimento-CCA).

Agopyan et al. (1990) apontaram a cinza da casca de arroz como sendo o resíduo agrícola brasileiro com maior potencial de exercer atividade pozzolânica em misturas com o cimento. Visando otimizar a produção de energia e, ao mesmo tempo, obter cinza com propriedades pozzolânicas, os autores desenvolveram um processo de queima em forno de leito fluidizado, que permitiu produzir aglomerante misturando 50% de cinza e 50% de cimento Portland comum.

Smith (1984) fez um levantamento das condições de produção do cimento à base de cinza da casca de arroz, na região compreendida pela Índia, Paquistão e Nepal. O autor verificou que:

- O cimento alternativo produzido apresentou menor custo (45%) do que o cimento Portland comum, apesar de ser necessária maior quantidade volumétrica do aglomerante alternativo nas misturas devido a sua baixa massa específica;
- O tempo de moagem da cinza variou de produtor para produtor, assim como a temperatura de queima e a qualidade do material. Em alguns casos, a cinza era moída em moinho de bolas, por uma hora, após o qual era adicionada a cal (ou lama de cal), e esta mistura era novamente moída por mais meia hora.

Na maior parte dos casos, o cimento produzido consistia de uma mistura de 33,3% de cal e 66,7% de cinza, respectivamente. A argamassa produzida com este cimento era dosada no traço 1:3, de cimento e areia, respectivamente.

Como principais conclusões, o autor indicou ser possível produzir cimento de cinza da casca de arroz, recomendando que a queima seja controlada em incineradores, nos quais a temperatura não seja superior a 700 °C. O autor afirmou ainda que a casca queimada em grandes quantidades produz cinzas de características cristalinas, ao passo que aquelas queimadas em pequena quantidade produzem cinzas amorfas com um menor teor de carbono, consequência do melhor suprimento de ar no processo de combustão. Um teor de carbono de até 20% na cinza pode ser aceitável para a produção de cimento alternativo.

Cincotto et al. (1990), ao estudarem a utilização do resíduo de caldeira de leito fluidizado (Fluid Bed Blast - FBB), com tempo e temperatura controlados, obtiveram cinzas cuja composição química era de: 94,7% de SiO_2 ; 0,09% de Al_2O_3 ; 1,46% Fe_2O_3 ; 0,99% de CaO ; 0,95% de MgO ; 0,02% de Na_2O ; 1,75% de K_2O e, 0,21% de SO_3 .

Os autores determinaram a atividade pozolânica deste tipo de cinza e a compararam com a cinza comum, obtida pela queima em forno estático (ignição auxiliada por meio de combustível, queimando sem chama durante 24 h, com temperatura abaixo de 800 °C).

A cinza de FBB consumiu de 623 mg a 699 mg de CaO por grama de cinza, ao passo que a cinza comum consumiu apenas 606 mg de CaO por grama de cinza. Utilizando o material passante na peneira de 325 mesh, encontraram, como resultado, 700 mg de CaO por grama de cinza comum e 730 mg de CaO por grama de cinza de FBB, o que caracteriza a cinza de FBB como de melhor atividade pozolânica.

Para ser considerado um material pozolânico, a cinza deve consumir, no mínimo, 500 mg de CaO por grama. Quanto maior for o valor encontrado no teste de pozolanicidade, melhor será a qualidade da cinza. A finura Blaine da cinza comum foi de 145 m^2/kg e, da cinza de FBB, de 419 m^2/kg . A massa específica da cinza comum foi de 1880 kg/m^3 e a da cinza FBB, de 2110 kg/m^3 .

Segundo Ruiz et al. [1995], a casca de arroz apresenta como uma das principais características a combustão lenta. Quando queimada em temperatura superior a 800 °C, a céu aberto ou em fornalhas para a secagem de grãos, como ocorre nos centros de beneficiamento, produzirá cinzas contendo sílica na forma essencialmente cristalina ou não reativa, sendo considerada, por Prudêncio e Santos (1996), como prejudicial à saúde humana.

Quando convenientemente queimada e beneficiada, apresentará boas propriedades pozolânicas, devido ao seu alto teor de sílica (90% a 95%), podendo substituir parcialmente o cimento na produção de argamassas e concretos ou, quando misturada com cal, formando um cimento pozolânico para aplicações não estruturais, como compósitos de biomassa vegetal.

Os autores citaram ainda o fato de que a cinza reativa apresentou coloração variável, do cinza escuro ao cinza claro, dependendo do teor de carbono residual que, quando inferior a 10%, não afetará a qualidade da cinza, tecendo, ainda, comentários sobre os processos de beneficiamento da cinza, bem como dos percentuais adequados de mistura, para a produção de cimento alternativo.

Segundo Shimizu e Jorillo Jr. (1990), a queima a céu aberto é o modo mais conveniente de se desfazer da casca de arroz. Para dispor da cinza, os autores estudaram a viabilidade de usá-la no concreto, com diferentes porcentagens de substituição do cimento. Apontam que os testes revelaram ser viável o uso deste tipo de cinza como um material de construção, sendo que para uma proporção cimento:cinza de 80:20 (1:0,25), em volume, ou 87:13 (1:0,15), em massa, a resistência à compressão do concreto obtido, com baixo teor de cinza da casca de arroz (CCA), variou de 93% a 100%, em relação à resistência do concreto convencional.

Farias e Recena (1990) descreveram os procedimentos a serem adotados para preparar cimento de cinza da casca de arroz, para aplicação em construções de baixo custo. Inicialmente determinaram a composição química e física da cinza da casca de arroz (CCA), da cal e do cimento Portland comum. Em seguida, prepararam uma série de misturas com os materiais, sendo as mesmas posteriormente submetidas a ensaios de caracterização e de resistência. Verificaram que a cinza obtida em forno rudimentar poderia ser usada na fabricação de cimento de CCA desde que o conteúdo de carbono fosse baixo.

Concluíram que uma proporção, em volume, de 1:10,8:38 (Cimento:Cal:CCA), seria satisfatória para ser usada em alvenaria. Verificaram ainda que o cimento de cinza da casca de arroz atendeu todas as exigências e padrões utilizados para a confecção de argamassas de cal e/ou cimento utilizadas em alvenaria. O aumento da finura da cinza da casca de arroz melhorou a trabalhabilidade, a retenção de água e a incorporação de areia na argamassa.

Freire (1991) citou vários estudos envolvendo o uso de cinza da casca de arroz na produção de cimento, tendo destacado o fato do custo de produção, para as condições tailandesas, ser da ordem de 32% do cimento comum.

Em trabalhos similares, Ajiwe et al. (2000) e Paya et al. (2002) obtiveram sucesso na produção de cimento utilizando o resíduo agrícola casca de arroz. Para isto a casca de arroz foi inicialmente queimada (pré-carbonizada) em uma unidade piloto, da qual obtiveram uma cinza com elevado teor de carbono, que foi posteriormente descarbonizada em um forno elétrico. O material resultante era misturado a outros materiais locais, visando à produção de cimento. Nos referidos trabalhos, consta que a mistura obtida, constituída por 24,5% de CCA, foi utilizada na produção de concreto. Segundo seus autores, os testes efetuados com este concreto confirmaram que o cimento produzido era similar ao cimento comercial.

Com base nos resultados encontrados, os autores recomendaram a produção de cimento à base de cinza da casca de arroz para países em desenvolvimento, podendo tal sugestão contribuir para a redução dos problemas existentes com a casca de arroz, como o seu desperdício na agroindústria e, nas atividades agrícolas em geral, minimizando os problemas do descarte inadequado.

Segundo Santos (1997), o uso de cinzas provenientes de processos geradores de energia, como adição ao cimento Portland, tem sido incentivado ao longo dos anos, por dois fatores principais: economia de energia no processo de produção do material e despoluição do meio ambiente. Entre estas cinzas, destaca-se a cinza da casca de arroz (CCA) dada a sua elevada atividade pozzolânica, comprovada em diversos trabalhos desenvolvidos nas últimas décadas.

Em seu trabalho, o autor avaliou a influência do processo de queima e do grau de moagem sobre as propriedades pozzolânicas da CCA residual, produzida nas beneficiadoras do sul do estado de Santa Catarina, sob diferentes condições de queima (tempo e temperatura) e a manutenção dessas propriedades ao longo do tempo, bem como seu desempenho, sob diferentes teores de substituição ao cimento Portland, em argamassas e concretos.

O autor concluiu que os resultados são comparáveis àqueles apresentados quando do uso de pozolanas já conhecidas (sílica ativa e a cinza volante de carvão mineral). A CCA apresentou resultados de atividade pozzolânica com o cimento superiores àqueles previstos pela norma brasileira, e desempenho, sob o ponto de vista da resistência, compatível com a sílica ativa, e superior ao da cinza volante, provando ser viável seu uso em substituição parcial ao cimento Portland.

Tashima et al. (2004) verificaram que o concreto com adição de 5% de CCA apresentou 25% de ganho de resistência em relação ao traço de referência aos 28 dias. Em relação à absorção de água, os autores verificaram claramente a influência da CCA, sendo que o concreto com 10% de CCA apresentou uma redução de 27% na absorção em relação ao traço de referência aos 28 dias.

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), em concretos de cimento Portland, a zona de transição é geralmente mais porosa do que a pasta, por conter larga quantidade de cristais de hidróxido de cálcio na superfície do agregado. Quando sujeita a tensões, facilmente ocorrem microfissuras nesta zona de transição. A incorporação de adições minerais, como a

CCA, pode alterar e melhorar as características da zona de transição, pois mesmo em baixas quantidades (30%), esse material é capaz de consumir quase completamente o hidróxido de cálcio presente, agindo como ponto de nucleação para os produtos de hidratação.

Khan et al. (citados por Silveira, 1996), afirmaram que cerca de 52% da sílica é consumida em 28 dias e o produto resultante da reação entre a sílica da cinza e o hidróxido de cálcio $[Ca(OH)_2]$ é um C-S-H de baixa cristalinidade.

Beraldo e Vieira (2003), em seus estudos, verificaram que a substituição parcial do cimento CP-II-E-32 por cinza da casca de arroz foi adequada apenas em percentuais inferiores a 5%. Os teores de substituição (em massa) e a média de resistência, foram, respectivamente, de: 1,5% = 33,9 MPa, 3% = 24,3 MPa, 5% = 28,4 MPa, 10% = 24,9 MPa, 20% = 17,7 MPa, 30% = 6,7 MPa e 40% = 3,4 MPa, para uma relação água:cimento variando de 0,40 a 0,56.

Segundo John et al. (2003), o principal fator a ser considerado no uso de cinzas com propriedades aglomerantes é a sua disponibilidade regional. Os autores referenciaram por aglomerantes as substâncias que devido à sua composição química, microestrutura e superfície específica (material pulverulento), apresentam reatividade com a água (solubilidade em meio aquoso, em condições ambientais normais), resultando na formação de um corpo sólido, endurecido.

Assim, ao reagirem com a água, os aglomerantes liberam energia na forma de calor, o qual pode ser quantificado. No caso das pozolanas com propriedades aglomerantes (predomínio de silício, cuja forma vítrea se solubiliza em meio alcalino, reagindo com íons cálcio, quando presentes), esta liberação de calor é lenta, razão pela qual são misturadas ao cimento Portland, que promove o desenvolvimento de resistência nas primeiras idades.

Entre os inúmeros processos destacados pelos referidos autores para a avaliação das propriedades pozolânicas, destaca-se, a seguir, os de aplicação prática, desprovidos de maiores recursos tecnológicos, portanto passíveis de serem reproduzidos em nível de campo, adequando-se ao material CCA.

a) **Finura**: pode ser grosseiramente estimada pela fração retida na peneira #200 mesh (abertura de malha 0,074 mm), sendo recomendável que o material seja passante pela peneira #400 mesh (abertura de malha 0,035 mm). Neste sentido, Isaia (1996) considerou que apenas partículas abaixo de 15 μm podem desenvolver atividade pozolânica, embora esta atividade seja consequência de uma combinação de fatores.

b) **Resistência Mecânica:** A NBR 5752/1992 trata do ensaio de mistura da pozolana com o cimento, com o objetivo de avaliar seu potencial, como adição aos cimentos Portland. Assim, a eficiência da pozolana será avaliada pela comparação entre a argamassa confeccionada apenas com cimento e uma argamassa produzida com parte do cimento substituído por pozolana (65% de cimento e 35% de pozolana). Para ser considerado um material adequado, com propriedades pozolânicas, a argamassa com pozolana deve apresentar resistência, aos 28 dias, superior a 75% da resistência da argamassa produzida apenas com cimento. As argamassas devem ser confeccionadas com areia normal.

c) **Liberação de calor:** como a taxa de liberação de calor pelas pozolanas é muito baixa, seu efeito na evolução da liberação do calor somente se torna interessante quando a pozolana é combinada com o cimento, pois este promove o desenvolvimento da resistência nas primeiras idades, além de favorecer as reações pozolânicas, pela liberação de calor de hidratação.

Entre os principais estudos apresentados sobre pozolana, os autores retrocitados, enfatizaram o efeito físico de melhoria da resistência à compressão, pelo fato de a pozolana contribuir (a longo prazo) para o preenchimento dos vazios (definido como “refinamento dos poros”), o que parece, a princípio, ser contraditório tendo em vista a maior necessidade em consumo de água de amassamento (aumento da porosidade, quando da evaporação de parte da água de amassamento), para uma mesma consistência.

É consenso, no meio técnico, que a atividade pozolânica da cinza da casca de arroz é caracterizada pela capacidade da sílica amorfa presente em misturas com cimento ou cal, se solubilizar no meio alcalino promovido pelo cimento ou cal, reagindo em solução com os íons de cálcio, liberado nas reações de hidratação do cimento ou outras fontes, formando compostos estáveis (monossilicatos de cálcio) dotados de poder aglomerante (silicatos e aluminatos de cálcio).

Desta forma, quanto maior for a quantidade de sílica amorfa, maior será a possibilidade de melhoria na resistência da argamassa.

2.4 Compósitos com cinza da casca de arroz (CCA)

Beraldo e Zucco (1998 b) desenvolveram estudos com o propósito de aproveitar o material casca de arroz na obtenção de compósitos para uso no meio rural.

Na elaboração desses compósitos, o cimento mostrou ser a matéria-prima de custo mais elevado e sua possível substituição, mesmo que parcial, poderia permitir a redução no custo de produção dos compósitos obtidos, bem como dar um destino mais adequado ao material CCA.

Com o intuito de verificar a possibilidade de substituir parte do cimento utilizado na confecção de placas de compósito cimento-casca de arroz, Zucco (1998) e Zucco e Beraldo (2003) utilizaram a metodologia de curvas de hidratação (Figura 7) para evidenciar o comportamento químico de misturas envolvendo os materiais cimento, cinza e casca de arroz.

A composição das misturas está indicada na Tabela 4.

Tabela 4: Pastas - Composição das misturas (g).

Parâmetros	Cimento	Cinza	Casca	Água	CaCl ₂
# 200 N	200	-----	15	90,5	6
# 200 N+Cz+CC	130	70	15	90,5	6
# 100 N	200	-----	15	90,5	6
# 100 N+Cz+CC	110	90	15	90,5	6
# 100 LSC	200	-----	15	90,5	6
# 100 LSC+Cz+CC	175	25	15	90,5	6

OBS.: Natural (N); Lavado em Solução de Cal (LSC); Cinza (Cz) e Cloreto de Cálcio (CC).

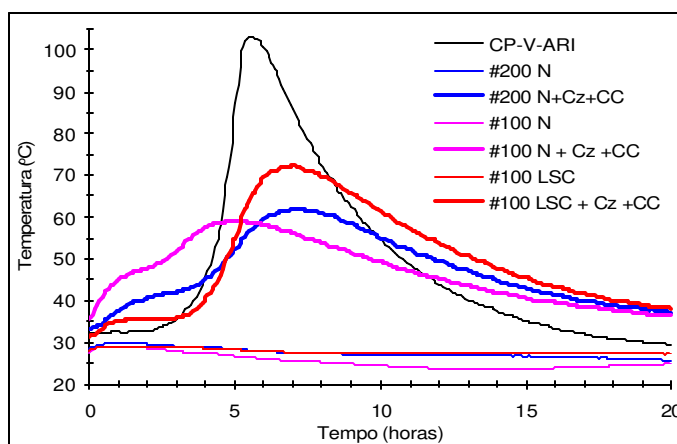


Figura 7: Efeitos da adição de cinza e acelerador de pega CaCl₂ na evolução da temperatura da hidratação.

Fontes: Zucco (1998) e Zucco e Beraldo (2003).

Os referidos autores relataram que os bons resultados obtidos, relativos ao tempo e a temperatura máxima de hidratação, para o material #100 LSC + Cz + CC foram devidos à combinação da sílica reativa presente na cinza adicionada à mistura, com os íons de cálcio

presentes na água de amassamento, provenientes da dissociação² em meio aquoso do acelerador de pega CaCl_2 , da dissolução das cales (aderida à casca ou liberada nas reações).

Verificou-se ainda que, nas misturas com casca de arroz na condição natural (contendo extrativos inibidores da pega) em que se adicionou a cinza em percentuais de substituição ao cimento de 35% (#200 N + Cz + CC) ou de 45% (#100 N + Cz + CC), o comportamento químico das misturas, expresso através da evolução do calor de hidratação, foi similar, mas muito superior às misturas sem cinza e acelerador de pega (#200 N; #100 N).

Estas considerações, associadas às afirmações de Irle e Simpsom (1992) de que a sílica pode agir como uma ponte de cristalização, aumentando a aderência da palha do arroz com a matriz de cimento, induzem a uma possível melhoria na resistência do material compósito.

Zucco e Beraldo (2005), utilizando outra fonte de cinza da casca de arroz (URBANO AGROINDUSTRIAL – Jaraguá do Sul - SC) e cimento de outro fabricante (CP-V-ARI-RS, marca VOTORAN), também verificaram que quanto menor foi a dimensão média das partículas do material casca de arroz, maior foi a sua incompatibilidade química com o cimento, tendo observado que o pico de temperatura para pastas puras, com a adição de acelerador de pega cloreto de cálcio e fator água/cimento de 0,50 era, em média, de 40 °C para um tempo médio de 5,88 h.

Na Figura 8 destaca-se a influência do percentual de adição de cinza na evolução da temperatura de hidratação de pastas de cimento (Pasta Pura – PP, sem adição de casca de arroz), para os teores de 0%, 5%, 20% e 35% de cinza.

Na interpretação das curvas, os autores afirmaram que a adição de CCA interferiu na liberação de energia térmica (calor medido através dos sensores digitais de temperatura), o que pode ser explicado por dois fenômenos:

² Segundo [Wikipédia](#): [...] processo em que se dá a separação dos íons da molécula, podendo voltar a recombinar-se para dar origem à molécula original. Assumindo que a [dissolução](#) é um processo de dispersão molecular, isso implica na ruptura de ligações ou [forças intermoleculares](#) presentes no [soluto](#), gerando ligações entre as moléculas do soluto e as moléculas do [solvente](#); se o solvente é a [água](#), o processo é denominado de **hidratação**.

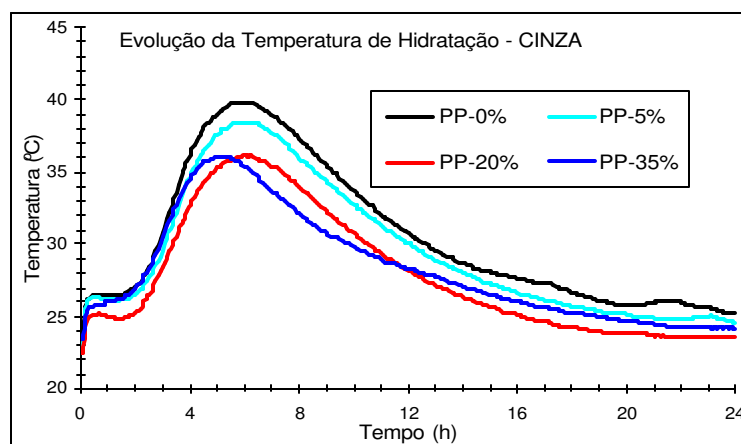


Figura 8: Influência do percentual de adição de cinza.

Fonte: adaptado de Zucco e Beraldo (2005).

- a) **O aumento da massa no sistema:** Um aumento na massa do sistema (água, cinza, casca ou outros materiais) exige uma quantidade de energia maior (não disponível) para um mesmo aquecimento global da mistura. Neste sentido, verificou-se que as curvas com 5% e 20% de adição de cinza apresentaram uma tendência de redução no comportamento, que foi quantificada, com base no FATOR CA (área sob a curva – 24 h), onde a adição de 5% de cinza reduziu em cerca de 3% a área sob a curva; no caso das adições de 20% e de 35% de cinza, estas reduções foram, respectivamente, de 8,5% e de 8,3%.
- b) **O efeito de interação química:** A alta superfície específica da cinza (devida ao alto teor de carbono) capaz de reter (adsorver) compostos químicos presentes na água de amassamento (íons; moléculas orgânicas – extrativos da casca de arroz), pode alterar a cinética (velocidade) das reações, no sentido da formação de compostos hidratados do cimento. A base teórica adotada para esta explicação parte do princípio de que a concentração de **Reagentes** na solução chega a um ponto crítico, de modo a desencadear as reações químicas no sentido da formação dos **Produtos**, que serão precipitados. Isso fica mais claro quando da adição de 35% de cinza (redução de 8,3% na área sob a curva), onde se verificou que, em termos de temperatura máxima, assemelha-se ao material com adição de 20% de cinza (redução de 8,5% na área sob a curva). Ocorreu, porém, uma redução no tempo para atingir esta temperatura máxima, o que pode ser interpretado como uma indicação da supressão de agentes químicos (íons sulfato ou outros compostos presentes no cimento) com ação retardante ou regulatória das reações do cimento. A tendência, considerando-se o efeito do aumento da massa no sistema, seria a redução da

temperatura, como apresentada entre os teores de 5% e 20% de adição de cinza, em relação à Pasta Pura (PP).

Na Figura 9 são apresentadas curvas de hidratação de pastas de cimento com acelerador de pega cloreto de cálcio (3% em massa do cimento), às quais se adicionou casca de arroz passante em peneira #200 mesh (ABNT 0,075 mm), nas condições Natural (sem lavagem) e Lavada em Solução de Cal (LSC), com adição de cinza (percentuais de 0%, 5%, 20% e 35%).

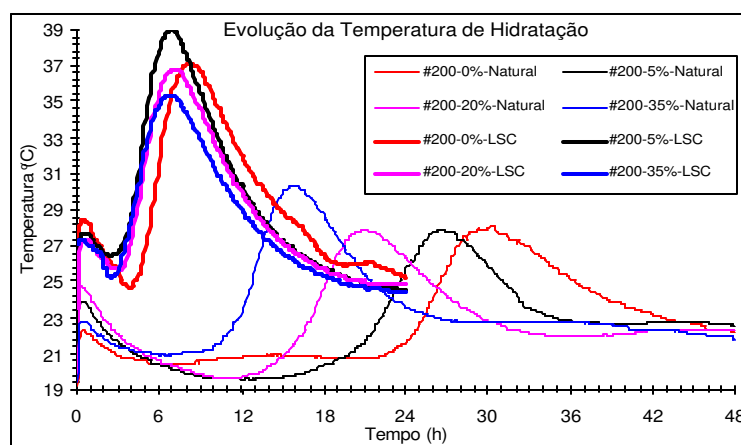


Figura 9: Influência da adição de cinza e casca de arroz (Natural e Lavada em Solução de Cal - LSC).

Fonte: Zucco e Beraldo (2005).

Os autores verificaram que a influência da cinza dentro do grupo das cascas lavadas (#200 LSC) não foi tão perceptível quanto no grupo das cascas naturais (#200 Natural), atribuindo tal fato à maior compatibilidade casca-cimento.

Evidenciaram, ainda, as melhorias promovidas na evolução das reações químicas de hidratação do cimento, em termos de redução no tempo para atingir a temperatura máxima e no aumento da temperatura máxima alcançadas, com destaque para a mistura da casca Lavada em Solução de Cal com 5% de cinza, com resultados de comportamento químico superiores ao das demais misturas. Observando a inclinação no trecho ascendente das curvas de hidratação das misturas com material lavado (#200 LSC), verificaram que a cinética das reações químicas, traduzida pela inclinação máxima, variou de 3,82 °C/h a 5,45 °C/h (Tabela 5), valores estes muito superiores ao do material natural, indicando que o processo químico, em relação ao material casca de arroz natural (sem lavagem), é efetivamente mais rápido.

Tabela 5: Inclinação Máxima e Ponto de Inclinação Máxima.

Natural (sem Lavagem)				Lavado em solução de cal			
Incl. Máx. (°C/h)				Incl. Máx. (°C/h)			
0%	5%	20%	35%	0%	5%	20%	35%
1,75	1,64	1,96	2,73	5,13	5,45	4,47	3,82
Ponto Incl. Máx. (? T°C=T ₂ -T ₁)				Ponto Incl. Máx. (? T°C=T ₂ -T ₁)			
0%	5%	20%	35%	0%	5%	20%	35%
0,2	0,2	0,2	0,3	0,5	0,6	0,5	0,4

OBS.: Os valores 0%, 5%, 20% e 35% são os percentuais de adição de cinza.

Fonte: Zucco e Beraldo (2005).

Os referidos autores enfatizaram a interação dos fatores cinza-casca (dimensão das partículas) através da evolução da temperatura de hidratação para os diferentes percentuais de cinza e de distribuição em tamanho de partículas. Esta interação é melhor evidenciada quando em comparação com a pasta pura (PP - sem adição de cinza e casca de arroz), o que demonstra a variabilidade do comportamento químico das misturas, como mostra a Figura 10.

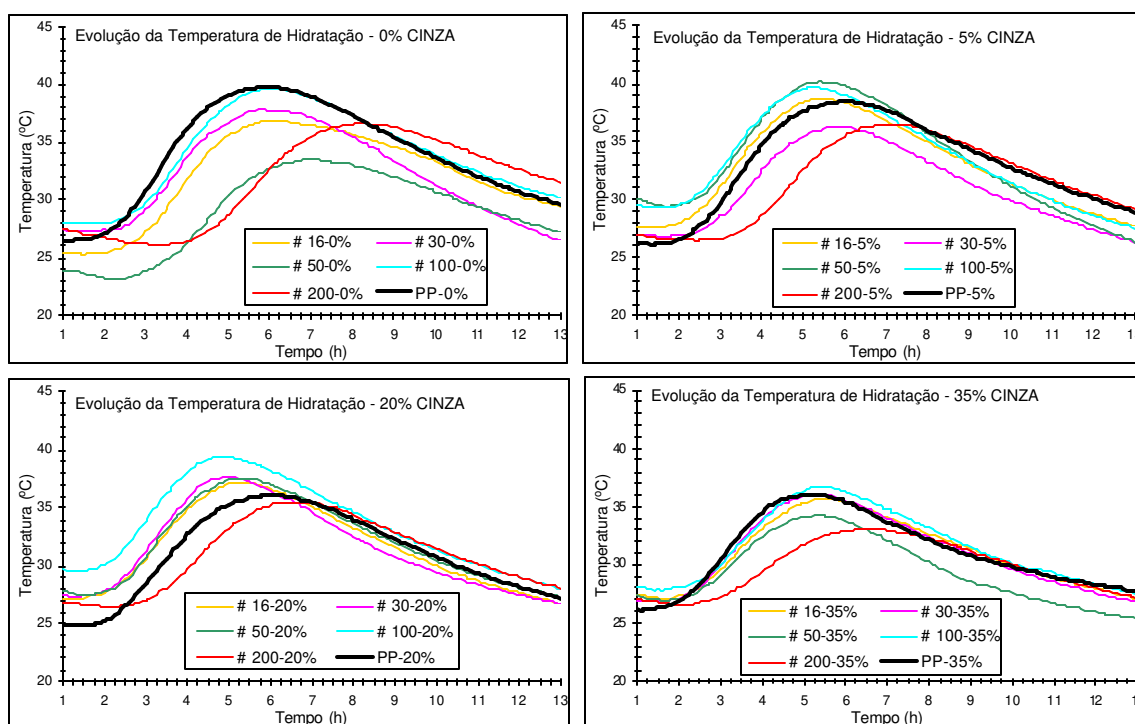


Figura 10: Comportamento Químico: Interação Cinza-Dimensão das Partículas.

Fonte: Zucco e Beraldo (2005).

Na Figura 11 destaca-se a influência do percentual de adição de cinza nos parâmetros Início e Fim de pega (Vicat Modificado → molde troncocônico com sensor de temperatura, construído em PRFV), associado à evolução da temperatura de hidratação, para as pastas de

cimento com adição de casca de arroz natural (sem lavagem) passante pela peneira de malha 0,075 mm (#200 mesh) e adição de cinza, nos percentuais de 0%, 5%, 20% e 35%.

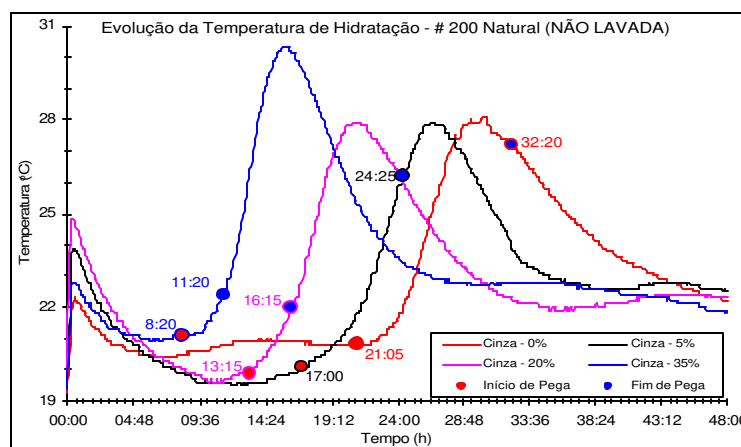


Figura 11: Influência da adição de cinza: misturas de cimento CP-V-ARI RS com casca de arroz natural (não lavada) passante em peneira 0,075 mm (#200 mesh).
Fonte: Zucco e Beraldo (2005).

Em função dos dados avaliados, os autores verificaram que, em geral, teores de adição de cinza de 20% e 35% não diferiram estatisticamente entre si. Contudo, a literatura aponta que valores elevados de cinza afetam negativamente a adesão entre partículas.

Os resultados sugeriram que se considerasse o percentual de adição de cinza de 20% como sendo aquele que melhor atenderia as expectativas de melhoria nas propriedades físico-químicas dos compósitos à base de cimento-cinza-casca de arroz, cuja distribuição em tamanho das partículas da casca de arroz seja superior a 1,2 mm (#16 mesh). Atribuíram ao alto teor de carbono da cinza, de cerca de 98%, as melhorias no comportamento químico das misturas com cinza.

Apontaram, ainda, que a adição de casca de arroz promoveu redução da resistência à compressão simples, sendo responsável por cerca de 63% da variabilidade total dos dados. No caso da compressão diametral, a adição de casca de arroz contribuiu para a melhoria da resistência, sendo-lhe atribuída cerca de 39,7% do efeito da variabilidade total nos dados.

Em geral, as interferências químicas da casca de arroz (lavada em solução de cal) nas reações de hidratação do cimento devem-se aos seus extrativos, não sendo constatada diferença significativa em termos de distribuição em tamanho das partículas, o que foi atribuído ao tratamento da lavagem (LSC).

Em relação à cinza, os autores consideraram que o efeito químico promovido por sua adição foi positivo, promovendo melhoria significativa nos parâmetros físicos avaliados, bem como uma contribuição na melhoria do comportamento químico das misturas.

Um comportamento não esperado, observado no caso das partículas da casca de arroz definidas como #100 (diâmetro teórico entre 0,15 mm e 0,075 mm), foi atribuído ao efeito de dupla lavagem (LSC) aplicado ao material, em decorrência de problemas operacionais. Esta dupla lavagem evidenciou a existência de extrativos ainda presentes na casca de arroz, o que possibilita aperfeiçoar o processo de lavagem para uma melhor eliminação dos extrativos contidos. Em relação à distribuição em tamanho das partículas da casca de arroz, lavadas em solução de cal, não foi possível definir claramente sua influência.

Jauberthie et al. (2003) correlacionaram o aumento da aderência casca de arroz - matriz de cimento com a melhoria na resistência do material compósito, sendo esta afirmativa contraditória, no sentido de que as fibras (composição química assemelhada entre casca e palha de arroz), impregnadas e enrijecidas pelos produtos do cimento (uma precipitação de componentes da cal no lúmen das fibras, como definiu GRAM, 1986), perderiam a propriedade de reduzir as fissuras, devido à perda na flexibilidade, refletindo, porém, em um ganho de resistência.

2.5 Estudos envolvendo o Calor de Hidratação

Mehta e Monteiro (1994) indicaram que a reação de hidratação do cimento é uma reação química exotérmica onde a quantidade de água necessária para hidratar 1 g de cimento é de aproximadamente 0,24 g e, por ser um material composto (mistura heterogênea de vários compostos, entre os quais C_2S , C_3S , C_3A , C_4AF), a reação de hidratação do cimento Portland é, na realidade, uma composição das diversas reações de hidratação, interdependentes e com cinéticas (velocidades) diferentes, de modo que o calor gerado induz ao aumento da velocidade (ou cinética) do processo químico, alterando a cinética inicial das reações.

A evolução do calor gerado também pode ser interpretada como sendo uma resposta do processo de evolução das reações químicas, correspondente ao aumento progressivo do número de hidratos que formam a estrutura cristalina, estrutura esta responsável pelo aumento da rigidez (enrijecimento da pasta) e da resistência do material.

O ponto de inclinação máxima e o trecho de inclinação máxima, observados na evolução do calor de hidratação, representam o ponto e o trecho em que houve o máximo de atividade química exotérmica, ao que se associou à hidratação dos grãos de cimento, pelo mecanismo conhecido por dissolução-precipitação. Deste modo, pode-se dizer que a evolução da reação de hidratação está diretamente relacionada à evolução das propriedades do material (pela formação da estrutura cristalina básica, com liberação de energia térmica), enquanto que o pico de temperatura máxima somente representa a temperatura máxima alcançada, ao que se atribui à inércia térmica e ao mecanismo de ação topoquímica - hidratação no estado sólido (reações de hidratação, por difusão iônica, na superfície do grão de cimento anidro, encapsulados por produtos de hidratação, sem liberação de compostos para a solução), cuja liberação de calor é lenta, mas contínua.

Ainda, segundo os autores, com a adição de um produto com ação retardante, o início da pega e a geração de calor são afetados, de modo que o tempo para que ocorram pode exceder 12 horas. Atribuem a causa da ação retardante aos grupos funcionais presentes no material adicionado (grupos hidroxila, sais de ácidos, produtos de celulose, lignossulfonatos) que, reagindo com os íons cálcio (Ca^{+2}) originados pela hidratação de cimento, formam sais de cálcio precipitados.

Este consumo de íons (Ca^{+2}) retarda a formação de pontos de nucleação, como o hidróxido de cálcio [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], alterando a concentração de reagentes e, em consequência, a formação dos produtos, com liberação de energia.

Esta idéia também é compartilhada por outros pesquisadores, entre os quais pode-se citar Neville (1997), que confirmou a ação retardante, atribuída também ao consumo dos reagentes iônicos dissolvidos (sais dissociados liberando ânions e cátions na solução aquosa), tornando mais lento o processo de crescimento dos núcleos de hidróxido de cálcio, modificando o crescimento dos cristais ou a sua morfologia.

Neville (1997) afirmou, ainda, que qualquer que seja o modo de precipitação dos produtos de hidratação, a velocidade de hidratação decresce continuamente ao longo do tempo, permanecendo uma quantidade apreciável de cimento não hidratado, podendo se determinar a evolução da hidratação do cimento através do calor desenvolvido na hidratação, entre outros processos.

Segundo Meneghetti (1999), o calor de hidratação exerce influência significativa

sobre a evolução de resistência nas primeiras idades, fazendo com que a resistência em um dado elemento estrutural, geralmente de maior dimensão do que um corpo-de-prova, seja diferente daquela encontrada nas condições ideais dos ensaios de laboratório.

Em seu estudo, o autor construiu curvas de correlação para diferentes tipos de concreto convencional e de alta resistência, levando em consideração a influência das condições de temperatura interna do concreto. As condições de temperatura interna mostraram influência significativa sobre o desenvolvimento da resistência nas primeiras idades, mas as correlações entre a velocidade de propagação do pulso ultra-sônico (VPU) e a resistência à compressão não foram influenciadas por tal fator.

2.6 Estudos envolvendo o tempo de pega

Segundo Mehta e Monteiro (1994), os fenômenos de enrijecimento, de pega e de endurecimento são manifestações físicas das reações progressivas de hidratação do cimento.

A perda de consistência da pasta plástica, pela perda de água livre (água de amassamento) devido às reações iniciais de hidratação, adsorção física (superfície e interior de “agregados” e produtos de hidratação de baixa cristalinidade), e a evaporação, promovem o enrijecimento da pasta e, finalmente, o endurecimento.

Por diversas razões, o tempo de pega da argamassa, ou mesmo do concreto, não coincidem com o tempo de pega da pasta de cimento. O tempo de início e de fim de pega do cimento são pontos definidos arbitrariamente por um método de ensaio que determina o começo da solidificação de uma pasta fresca de cimento.

Em geral, o início de pega define o limite de manuseio de uma pasta ou mistura contendo pasta de cimento (compósito, argamassa, concreto), enquanto que o fim da pega representa o tempo em que há o desenvolvimento da resistência mecânica a uma taxa significativa.

Biblis e Lo (1968) definiram o tempo para o fim de pega de misturas madeira-cimento como sendo o tempo decorrido entre a mistura dos componentes cimento (200 g) e madeira (15 g, passante em peneira de #200 mesh), e o tempo necessário para se obter a temperatura máxima de hidratação, indicando que o tempo de pega da mistura com o cimento aumenta à medida que o teor de substâncias inibitórias (açúcares, por exemplo) aumenta,

sendo que outros autores, como Moslemi et al. (1983) e Moslemi e Lim (1984), empregaram o tempo para atingir a máxima temperatura, a temperatura máxima de hidratação e a inclinação da curva de hidratação como parâmetros para determinar o índice de inibição. Destaca-se que os referidos autores observaram uma certa melhoria na pega do cimento com a remoção de açúcares, entre outros extrativos. Estes parâmetros também utilizados por Hoffstrand et al. (1984) em sua pesquisa.

Objetivando relacionar o desenvolvimento do calor decorrente das reações de hidratação com o enrijecimento da argamassa, Epaminondas Ferreira Júnior (FEC-UNICAMP) e o autor, utilizando-se de procedimento experimental indicado na NBR 9832/1992, procuraram avaliar os tempos para o início e o fim de pega, obtido por meio do ensaio de resistência à penetração. Verificaram que o tempo para o fim de pega, obtido pelo ensaio de penetração, não correspondeu àquele indicado pela calorimetria (Figura 12) e, que o desenvolvimento da resistência mecânica e as reações químicas seguiam tendências distintas, o que também foi observado em outro tipo de argamassa (substituição de 35% da massa de cimento por cinza). Este assunto, ainda passível de discussão, evidenciou a necessidade de estudos mais aprofundados para que se obtenha uma melhor compreensão da ação dessas variáveis e, do fenômeno químico-mecânico.

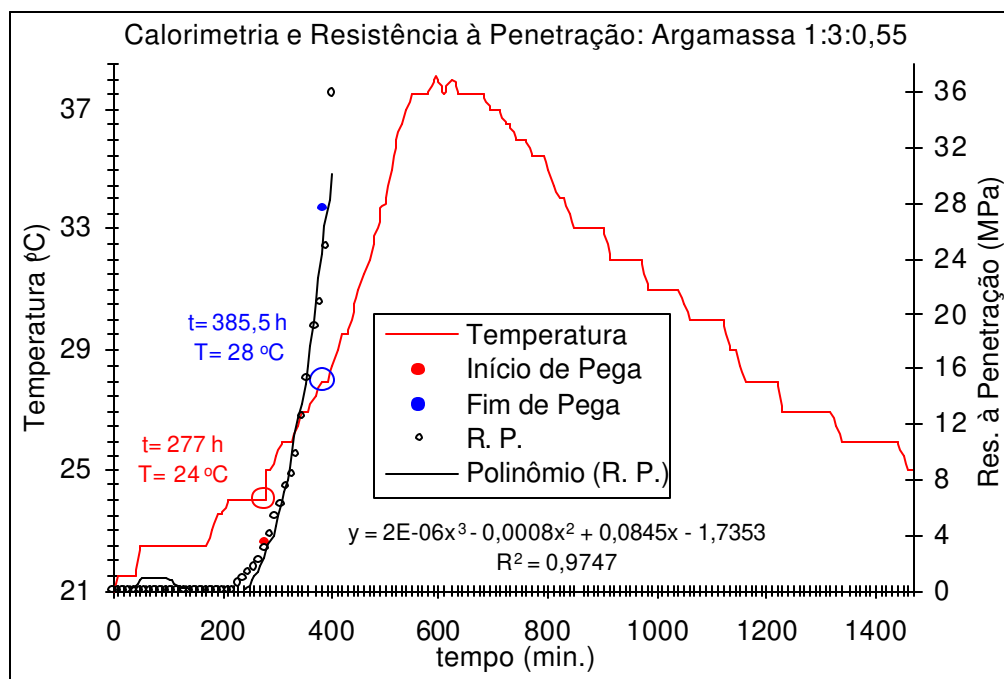


Figura 12: Calorimetria e resistência à penetração de argamassa.

2.7 Estudos envolvendo a avaliação das propriedades mecânicas através da velocidade de propagação do pulso ultra-sônico (VPU)

Segundo Caetano (2002), as ondas ultra-sônicas são ondas mecânicas, ou seja, as partículas atômicas ou moleculares de uma substância oscilam em torno de sua posição de equilíbrio. Em muitos aspectos, o feixe sônico é semelhante a um feixe de luz. Ambos são ondas e obedecem aos mesmos princípios. Cada um viaja na sua velocidade característica em um meio homogêneo, sendo que a velocidade depende das propriedades do meio e não das propriedades da onda.

A velocidade e a atenuação (perda gradual de amplitude e energia) das ondas sônicas dependem das propriedades do meio no qual a onda propaga-se. A atenuação é a perda de intensidade do feixe sônico recebido por um transdutor, tendo como principais fatores o efeito de impedância acústica (diferença no comportamento da onda na mudança de uma interface, em materiais compostos, onde parte do feixe sônico que atinge a interface seja refletido e parte seja transmitido para o segundo meio), o efeito da Absorção (perda de energia ultra-sônica pela conversão de energia mecânica em energia térmica (para a maioria dos materiais, as perdas por absorção aumentam diretamente com o aumento da frequência), o efeito de Espalhamento (descontinuidades cristalinas, tais como contorno de grão, sendo desprezível quando o tamanho de grão é menor que 0,01 vezes o comprimento de onda).

As propriedades de um material são comumente obtidas por meio de ensaios físicos-mecânicos, tais como, ensaios de compressão simples, tração por compressão diametral e de impacto. Estes ensaios são conhecidos como ensaios destrutivos e avaliam o desempenho físico-mecânico de materiais, elementos e componentes construtivos.

Entretanto, algumas propriedades podem ser estimadas por intermédio de ensaios não destrutivos. Para concretos, argamassas, gesso, madeira e compósitos, o emprego de **Ensaio Não Destrutivo (END)** pode ser útil para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico (módulo dinâmico de Young), da anisotropia total do material (comportamento variável em função do eixo avaliado), para a detecção de patologias, defeitos e, mais recentemente, em estudos visando o acompanhamento de processos como a estabilização química e mecânica de materiais à base de cimento.

A avaliação das propriedades de materiais como madeira, concreto, argamassa e compósitos utilizando **END** se baseia na propagação de um pulso ultra-sônico através do material a ser testado, pulso este gerado por meio de transdutor piezelétrico com frequência de ressonância adequada ao material, como por exemplo, transdutor de 45 kHz, seção circular de 30 mm, base plana, calibrado em 20 μ s, para materiais como madeira, concreto, argamassa, gesso e compósitos.

A onda ultra-sônica produzida pelo transdutor “emissor” se propaga através do material até atingir o transdutor “receptor”. O tempo decorrido entre a emissão do sinal e sua recepção é então medido (μ s), sendo utilizado no cálculo da velocidade de propagação da onda ultra-sônica no meio (compósito, gesso, argamassa, concreto, madeira ou outro material).

Enquanto os ensaios destrutivos avaliam a rigidez da estrutura, o ensaio não destrutivo empregando o ultra-som avalia o arranjo desta estrutura cristalina (responsável pela propagação do ultra-som), de modo que sua aplicação pode ser voltada para o controle de qualidade de um material.

Segundo Beraldo (1994), o uso de métodos acústicos permite avaliar de forma rápida e segura as características dos corpos-de-prova. Beraldo (2000) ponderou que a vantagem dos métodos não destrutivos reside no fato de que eles oferecem uma avaliação correta da qualidade do material. Permite acompanhar as mudanças ocorridas na velocidade da onda ultra-sônica ao longo do tempo, ou de estudar a heterogeneidade das amostras através de medições efetuadas em diferentes pontos da mesma.

No caso de ensaios convencionais, no entanto, torna-se difícil efetuar a separação entre os efeitos decorrentes da fabricação dos corpos-de-prova, daqueles provenientes dos tratamentos aos quais eles foram submetidos.

No caso de compósito cimentícios, a evolução das propriedades de um material pode ser acompanhada por meio da medida da velocidade de propagação da onda no objeto, desde as fases iniciais (pega), até idades mais avançadas (endurecimento), para o mesmo material. Assim, o tempo de propagação da onda (e a conseqüente velocidade) pode caracterizar o material, servindo de parâmetro para avaliação das suas propriedades mecânicas.

Bodig e Jayne (1982) indicaram que a técnica comumente utilizada para correlacionar ensaios destrutivos com não destrutivos consiste de uma análise de regressão dos valores de módulo de ruptura (MOR) encontrados, e da velocidade obtida em ensaio não destrutivo.

Obtém-se, desta forma, um gráfico (Figura 13) cujos valores de abscissa são a velocidade (m/s) obtida no ensaio não destrutivo e, nas ordenadas, seu correspondente em módulo de ruptura, obtido no ensaio destrutivo de flexão estática, ou outro parâmetro, de acordo com o tipo de ensaio, devendo ser excluídos pontos que estejam abaixo de um limite admitido.

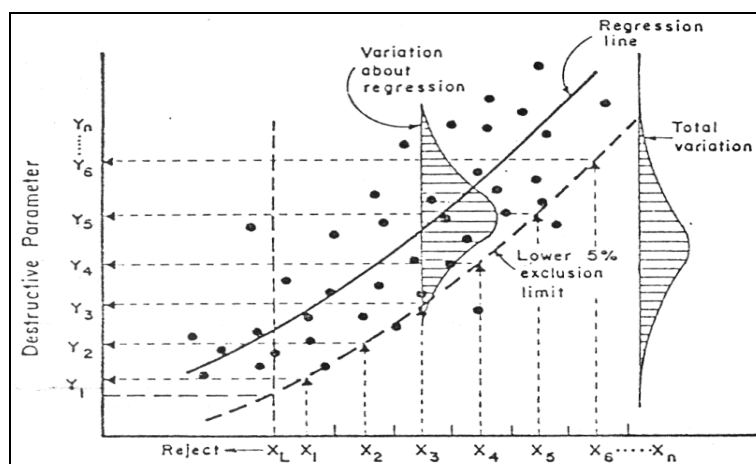


Figura 13: Correlação entre Ensaios Destrutivos e Ensaios Não Destrutivos.
Fonte: Bodig e Jayne (1982).

O limite admitido para a exclusão dos pontos (em até 5%), depende da espécie de madeira utilizada, obtendo-se com isto, uma confiabilidade de que 95% dos pontos são representados.

O módulo de elasticidade dinâmico pode ser obtido relacionando-se a velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas com algumas propriedades físicas do compósito, empregando a expressão (1):

$$E_d = \rho \times V^2 \times 10^{-6} \quad (1)$$

onde:

E_d = módulo de elasticidade dinâmico (MPa);

ρ = massa específica aparente do sólido (kg/m³);

V = velocidade de propagação do pulso ultra-sônico (m/s).

Beraldo et al. (2000) verificaram que a evolução da velocidade de propagação da onda ultra-sônica através dos corpos-de-prova de compósitos obedece a uma lei exponencial, tendendo a estabilizar-se em torno de uma semana após a fabricação.

Mesa Valenciano (2004), estudando a durabilidade de compósitos à base de cimento, verificou a existência de correlação entre as variáveis resistência à compressão simples e velocidade ultra-sônica, afirmando que as equações de regressão que melhor se ajustaram foram as do tipo exponencial. Observou ainda que, nos compósitos confeccionados com partículas de bambu ou, naqueles com fibras de bagaço de cana-de-açúcar, houve uma tendência à estabilização, em função da idade, o mesmo não se dando com os compósitos confeccionados com casca de arroz.

Este comportamento diferenciado da casca de arroz, evidenciado por Mesa Valenciano (2004), encontra como explicação a composição da casca de arroz, rica em sílica (DAFICO e PRUDÊNCIO Jr., 2002), de forma amorfa concentrada na superfície externa da casca (JAUBERTHIE et al., 2003), altamente reativa com a cal liberada pelo cimento, conferindo características como uma maior resistência, principalmente em idades mais tardias (GUEDERT et al., 1989), principalmente quando se considera que as reações de hidratação do cimento são progressivas (MEHTA e MONTEIRO, 1994), explicando, desta forma, a falta de tendência à estabilização da velocidade de propagação da onda ultra-sônica nos compósitos confeccionados com casca de arroz.

Philippidis e Aggelis (2003) procuraram desenvolver através de END, uma metodologia para avaliar a qualidade de concretos no estado fresco ou nas primeiras idades. Os autores correlacionaram as características de propagação da onda ultra-sônica com propriedades do concreto, em especial a relação água/cimento.

Os autores relataram que a propagação da onda foi afetada fortemente pelas propriedades e características elásticas dos seus materiais constituintes e que medidas de velocidade ultra-sônica não foram consideradas antes de 15 minutos após a mistura dos componentes, sendo verificada uma coerência entre valores reais (medidos) com aqueles calculados com base na velocidade da onda, após as primeiras horas. Apontaram, ainda, uma forte correlação entre a resistência à compressão e a velocidade de propagação da onda, sendo esta fortemente influenciada pela idade e pela umidade do concreto.

Para Meneghetti (1999), o conhecimento da resistência do concreto em idades iniciais, de doze horas até três dias, traz benefícios como a aceleração do processo construtivo através da redução no prazo da retirada de fôrmas e do cimbramento, aumentando a produtividade em unidades pré-moldadas e na execução de protensão em baixas idades. Nesses casos, a estimativa da resistência nas primeiras idades fica condicionada a técnicas e testes rápidos que possibilitem avaliar o desempenho da estrutura.

2.8 Estudos envolvendo a resistência à compressão simples, a resistência à tração por compressão diametral e, a resistência à flexão estática em compósitos

Miller e Moslemi (1991), utilizando modelos de constituintes especificamente encontrados na madeira, observaram que açúcares, taninos e hemicelulose afetavam todas as características de hidratação, sendo que açúcares reduziam em 40% a resistência à tração dos compósitos. Apesar da pequena correlação existente entre a resistência à tração e as características da curva de hidratação (temperatura máxima e tempo para sua ocorrência, geração relativa de calor), os referidos autores concluíram que o melhor meio de se distinguir o efeito dos constituintes da madeira seria determinando a diferença relativa na geração de calor entre as pastas de cimento com adição dos constituintes e a pasta pura.

Valenzuela (1989), procurou encontrar uma forma de estimar a resistência de painéis de compósito cimento-madeira submetidos à flexão estática. No mesmo estudo, avaliou o efeito do tempo de estocagem das partículas vegetais sobre as reações de hidratação, resistência à tração por compressão diametral e outras propriedades dos painéis. Concluiu que partículas estocadas por mais de 12 meses apresentavam menor influência nas características dos compósitos do que partículas com menor tempo de estocagem.

O autor determinou, ainda, a correlação entre os diversos parâmetros estudados: flexão estática e temperatura máxima ($R = 0,42$); flexão estática e compressão diametral ($R = 0,76$); flexão estática e teor de açúcares ($R = 0,56$); temperatura máxima e compressão diametral ($R = 0,65$); temperatura máxima e teor de açúcares ($R = 0,43$); compressão diametral e teor de açúcares ($R = 0,65$). Propôs um índice de compatibilidade madeira-cimento, com base na norma alemã DIN 1101, que estipula valores mínimos aceitáveis de resistência à flexão estática para chapas madeira-cimento.

Para obter os valores mínimos de resistência à flexão estática, os corpos-de-prova devem apresentar uma certa resistência à tração por compressão diametral, abaixo da qual o material lignocelulósico é considerado como inadequado para a fabricação de painéis madeira-cimento. Para esta previsão, o autor utilizou-se da expressão (2):

$$FLc = \frac{2,1511 \times 3,9749^{CD}}{1,0029^{MB}} \quad \text{onde:} \quad (2)$$

FLc = resistência à flexão estática dos painéis (MPa);

CD = resistência à tração por compressão diametral dos corpos-de-prova cilíndricos (MPa);

MB = massa específica aparente da madeira, condição anidra (kg/m³).

Assim, utilizando a referida expressão, o autor verificou que, para obter painéis de 12 mm de espessura que atendessem à resistência mínima de 7,5 MPa (norma ISO 8355.1987), para a espécie *Picea abies* (L.) Karst., os corpos-de-prova deveriam apresentar uma resistência à tração por compressão diametral de, no mínimo, 1,89 MPa, para se considerar o material como adequado para a obtenção de chapas madeira-cimento. Ainda, segundo o autor, para prever satisfatoriamente a qualidade de painéis de fibro-cimento (madeira-cimento) é suficiente determinar três características: resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos, determinações químicas (açúcares) e calorimetria (temperatura máxima).

Mesa Valenciano (2004) verificou em seu estudo que as vigas testemunhas (argamassa sem adição de fibras) foram as mais resistentes à flexão, apresentando também os maiores valores de módulo de elasticidade (MOE), seguidas das vigas de compósito (argamassa reforçada) com casca de arroz, partículas de bambu e fibras de bagaço de cana-de-açúcar. Verificou ainda que os maiores valores de carga aplicada às vigas envelhecidas (um ano, seguido de ciclos de molhamento e secagem), foram alcançados pelas vigas testemunhas (sem adição de fibras), seguidas das vigas de compósitos (argamassa reforçada) com casca de arroz, partículas de bambu e, com os menores valores, para as vigas confeccionadas com fibras de bagaço de cana-de-açúcar.

Zucco (1999) apontou em seu estudo, que as placas prensadas de compósito cimento-casca de arroz não diferiram significativamente entre si, tendo atribuído a similaridade no desempenho, ao efeito da prensagem.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Material

No que se refere ao estudo para a obtenção de compósitos de cimento Portland, cinza da casca de arroz e casca de arroz, foram utilizados os seguintes materiais:

3.1.1. Aditivos químicos

De acordo com a NBR 11768/1992 (Aditivos para concreto de cimento Portland), aditivos são produtos utilizados em pequenas quantidades para modificar algumas propriedades do concreto (extensivo a pastas, argamassas, compósitos), adequando-as ao uso. Da referida norma, destaca-se o aditivo do tipo acelerador de pega (A), sendo empregado o acelerador de pega cloreto de cálcio comercial, marca Chemco (lote nº 12039 de dezembro de 2003), em quantidade correspondente a 3% em massa do cimento.

A função esperada do aditivo é a de elevar a concentração de íons Ca^{+2} na solução (água de amassamento) de modo a promover rapidamente a sua saturação, que é considerado o processo desencadeador das principais reações de hidratação do cimento (formação de pontos de nucleação, com conseqüente formação de Silicatos de Cálcio Hidratados [C-S-H]), possibilitando a redução nos tempos para o início de pega, fim de pega e para atingir a temperatura máxima.

3.1.2. Água

Tendo em vista a complexidade e o desconhecimento das interações químicas cimento-cinza-casca, utilizou-se a água desionizada (NBR 12006/1990 – Determinação do calor de hidratação), como forma de eliminar possíveis fontes de íons (cloretos, fluoretos e carbonatos, entre outros) encontrados na água potável fornecida pela rede pública e capazes de interferir ou influenciar nos resultados.

Neste sentido, considera-se oportuno apresentar as considerações que fez Valenzuela (1989) sobre o uso da água fornecida pela rede de distribuição (fornecimento estatal ou privado), pois essa água apresenta certas substâncias, como por exemplo, o cloro, que podem reagir com o cimento acelerando o seu endurecimento. Em sua pesquisa, o referido autor encontrou diferenças estatísticas significativas nos resultados de temperatura de hidratação e de resistência à compressão (simples e diametral) quando foram empregadas a água fornecida pela rede de abastecimento e a água destilada.

Isto é compreensível, na medida em que a água captada pelas estações de tratamento está à mercê das condições ambientais e de intervenções humanas no meio ambiente, de modo que a qualidade da água fornecida nas cidades brasileiras sofre flutuações em sua composição, dentro (ou não) das margens estabelecidas pelos parâmetros de potabilidade³, considerando-se que há processos distintos de tratamento de água, em acordo com a qualidade da água bruta captada pelas estações de tratamento.

Com base nestas considerações, optou-se pelo emprego de água desionizada com o propósito de minimizar a influência da variabilidade do componente água nos resultados da pesquisa, principalmente por ser o elemento promotor do processo de hidratação do cimento (formação dos hidratos) e responsável pela trabalhabilidade da mistura antes do início do seu enrijecimento. A água foi armazenada em sala climatizada ($23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$), sendo utilizada nesta temperatura, até a adição do acelerador de pega cloreto de cálcio, quando então sofria aquecimento, pela dissociação do sal (reação exotérmica). Por ser um procedimento padrão, não se fez qualquer verificação de temperatura, tendo em vista a sequência de mistura dos materiais, inicialmente a casca (até uniformização), a cinza (até uniformização) e, por último, o cimento (procedimento padrão de tempo de mistura).

3.1.3. Cal

Foi empregada cal hidratada de uso corrente em pinturas, marca MINERCAL. A quantidade de cal empregada correspondeu a 5% da massa da casca a ser tratada, tendo-se empregado uma proporção, em massa, de 10 partes de água para 1 (uma) parte de casca de arroz, o que corresponde à uma solução de cal a 0,5% p/p (ZUCCO, 1999).

3 MINISTÉRIO DA SAÚDE, PORTARIA N.º 518, de 25 de março de 2004.

Tem-se então, uma proporção de 100:10:0,5 ou seja, 100 partes (em massa) de água; 10 partes (em massa) de casca de arroz e 0,5 partes (em massa) de cal.

3.1.4. Casca de arroz

A casca de arroz empregada (Figura 14) foi coletada em beneficiadora da cidade de Itu-SP, distante cerca de 65 km de Campinas-SP. Foi processada (moagem; lavagem; mistura) em acordo com os procedimentos estabelecidos e descritos por Zucco (1999), no qual o material definido como 10 mm, refere-se à distribuição em tamanho das partículas equivalente à casca de arroz originária da beneficiadora.

O material definido como 5 mm, refere-se à distribuição em tamanho das partículas equivalente ao material moído em moinho-de-martelos, cuja peneira possui orifícios com 5 mm de diâmetro. O material definido como 10+5 mm (mistura constituída por 65% de massa de casca do material 10 mm e de 35% de massa de casca do material 5 mm).



Figura 14: Casca de arroz natural, definida como 10 mm.

Objetivando uma melhor visualização de detalhes anatômicos (forma) que pudessem auxiliar na compreensão da interação casca-cimento, obteve-se o auxílio de Izabella Castro Bigno (IME-RJ) que, utilizando o microscópio eletrônico de varredura (MEV) com imagens de elétrons secundários do Laboratório de Microscopia Eletrônica (LME) do **IME-RJ**, obteve as micrografias apresentadas na Figura 15 (referentes à casca de arroz natural, ampliada 35 X) e Figura 16 (referentes a casca de arroz natural, ampliada 55 X).

Segundo Bigno (2002), o microscópio eletrônico de varredura utilizado (MEV JSM 5800-LV, marca JEOL) apresenta como característica a geração de um feixe de elétrons (principal) em baixo vácuo, a partir de um filamento de tungstênio, cuja tensão variou entre 10 e 25 kV, tendo-se uma distância de trabalho fixada entre 20 mm e 35 mm.

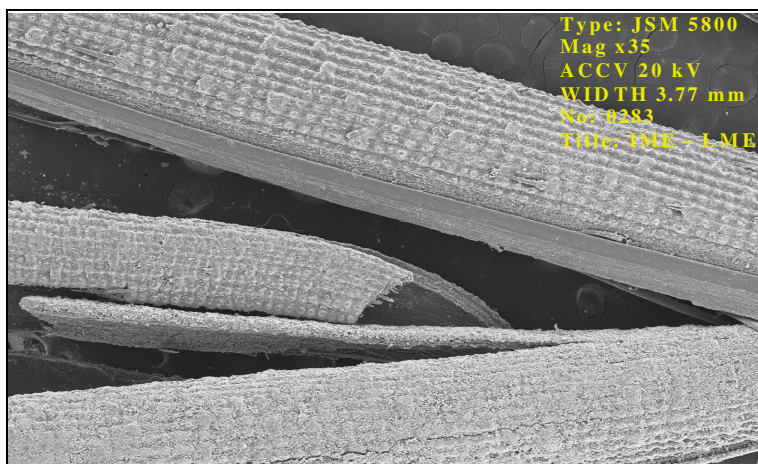


Figura 15: Casca de arroz natural, ampliada 35 X.
Fonte: Izabella Castro Bigno (IME-RJ)

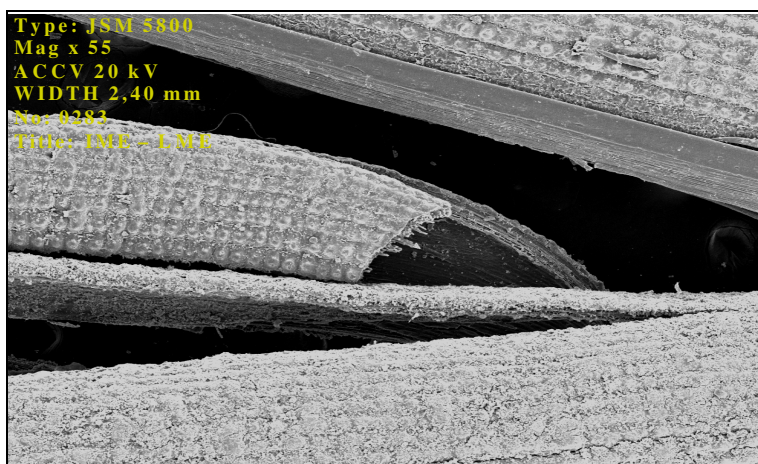


Figura 16: Casca de arroz natural, ampliada 55 X.
Fonte: Izabella Castro Bigno (IME-RJ)

Ainda, em acordo com Zucco (1999), objetivando a realização de estudos envolvendo o comportamento de pastas e compósitos quanto à evolução da temperatura de hidratação do cimento e de suas misturas, obteve-se, através da moagem da casca em moinho-de-martelos e peneiramento em agitador mecânico de peneiras, as frações correspondentes às diferentes peneiras da série normal, incluindo-se a peneira de malha 0,074 mm (#200 mesh).

Cada uma das diferentes frações (#200, #100, #50, #30 e #16) e distribuições em tamanho das partículas (10 mm, 5 mm e 10+5 mm), foi lavada em solução de cal (ZUCCO, 1999), centrifugada para a remoção do excesso de água de lavagem.

Destaca-se a importância da centrifugação, enquanto processo, por permitir a remoção do excesso de umidade das fibras de modo que a secagem em estufa não se transforme em um processo de “cozimento”, tendo em vista o excesso de água retido pela casca de arroz não centrifugada. Efetuou-se a secagem em estufa até a estabilização em massa ($105^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$, por 24 horas).

Em função da ação aglutinadora da cal, ocorreu a formação de grumos de partículas, o que exigiu a necessidade de se efetuar novo peneiramento, em agitador mecânico de peneiras, para a uniformização das diferentes frações das partículas, eliminando desse modo os grumos formados.

Zucco (1999) verificou que as distribuições em tamanho das partículas correspondentes aos materiais 10 mm e 5 mm apresentaram teores de umidade, após 2 (dois) minutos de centrifugação, de respectivamente, 60% e 80% de umidade.

Com base neste estudo, verificou-se que após 10 minutos de centrifugação, a casca lavada ficou com umidade em torno de 30% (média dos materiais), de modo que uma pré-secagem ao ar livre, com posterior secagem em estufa, até a estabilização em massa, promove considerável economia de energia elétrica, em um curto espaço de tempo (24 horas).

Deste modo, tem-se, por definição, as seguintes distribuições em tamanho das partículas das cascas de arroz empregadas na pesquisa, após lavagem em solução de cal (LSC), secagem em estufa e, no caso das frações, após o peneiramento em agitador mecânico de peneiras:

- a) #200, equivalente ao material passante pela peneira #200 mesh (ABNT 0,074 mm) e retido no fundo.
- b) #100, equivalente ao material passante pela peneira #100 mesh (ABNT 0,149 mm) e retido na peneira #200 mesh (ABNT 0,074 mm).
- c) #50, equivalente ao material passante pela peneira #50 mesh (ABNT 0,297 mm) e retido na peneira #100 mesh (ABNT 0,149 mm).
- d) #30, equivalente ao material passante pela peneira #30 mesh (ABNT 0,59 mm) e retido na peneira #50 mesh (ABNT 0,297 mm).

- e) #16, equivalente ao material passante pela peneira #16 mesh (ABNT 1,19 mm) e retido na peneira #30 mesh (ABNT 0,59 mm).
- f) 10 mm, equivalente ao material passante pela peneira #8 mesh (ABNT 2,38 mm), com distribuição em tamanho de partículas apresentada na Tabela 6 e na Figura 17.

Tabela 6: Distribuição em tamanho das partículas: **10 mm**.

Casca de Arroz	10 mm - LSC	
Malha/No.Peneira (ABNT)	% Retida	% Acumulada
# 4.76 / 4	0,00	0,00
# 2.38 / 8	5,07	5,07
# 1.19 / 16	71,20	76,27
# 0.59 / 30	20,05	96,33
# 0.297 / 50	1,85	98,18
# 0.149 / 100	0,76	98,94
# 0.074 / 200	0,39	99,33
Fundo	0,67	100,00
SOMA	100,00	
% Finos (menor que 0,42 mm)	3,67	Umidade seco em estufa
Módulo de Finura	3,75	
Dimensão Máx. Característica	2,38 mm	

Avaliando-se a Tabela 6, verifica-se que mais de 75% do material apresenta dimensão superior a 1,19 mm (#16 mesh).

Admite-se que a fração passante na peneira 0,075 mm (#200 mesh) possa corresponder à cal da lavagem que, aderida à casca, se desprende no peneiramento, uma vez que o processo de lavagem remove partículas muito finas.

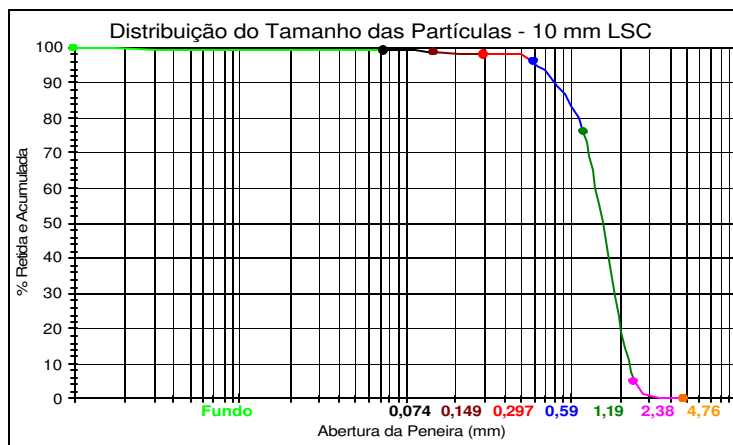


Figura 17: Distribuição em tamanho das partículas: **10 mm**.

- g) 5 mm, equivalente ao material passante pela peneira do moinho-de-martelos com furos de 5 mm, com distribuição em tamanho de partículas apresentada na Tabela 7 e na Figura 18.

Tabela 7: Distribuição em tamanho das partículas: **5 mm**.

Casca de Arroz	5 mm - LSC	
Malha/No.Peneira (ABNT)	% Retida	% Acumulada
# 4.76 / 4	0,00	0,00
# 2.38 / 8	0,00	0,00
# 1.19 / 16	8,90	8,90
# 0.59 / 30	76,54	85,43
# 0.297 / 50	12,08	97,52
# 0.149 / 100	1,34	98,86
# 0.074 / 200	0,51	99,37
Fundo	0,63	100,00
SOMA	100,00	
% Finos (menor que 0,42 mm)	14,57	Umidade seco em estufa
Módulo de Finura	2,91	
Dimensão Máx. Característica	1,19 mm	

Avaliando-se a Tabela 7, verifica-se que o material 5 mm apresenta cerca de 1,1% de material particulado com dimensão inferior a 0,149 mm (#100 mesh) e, que mais de 75% do material particulado apresenta dimensões entre 0,59 mm (#30 mesh) e 1,19 mm (#16 mesh).

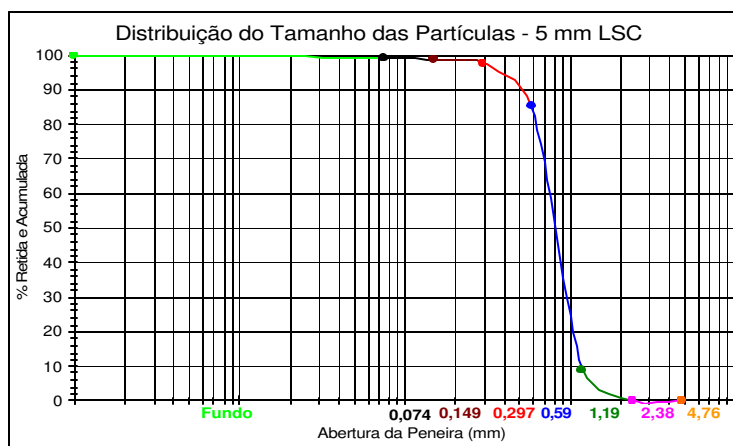


Figura 18: Distribuição em tamanho das partículas: **5 mm**.

- h) 10+5 mm, equivalente a mistura dos materiais 10 mm (65% da massa de casca na mistura) e 5 mm (35% da massa de casca na mistura), com distribuição em tamanho de partículas apresentada na Tabela 8 e na Figura 19.

Tabela 8: Distribuição em tamanho das partículas: **10+5 mm**.

Casca de Arroz	10+5 mm - LSC	
Malha/No.Peneira (ABNT)	% Retida	% Acumulada
# 4.76 / 4	0,00	0,00
# 2.38 / 8	1,35	1,35
# 1.19 / 16	47,53	48,88
# 0.59 / 30	42,05	90,93
# 0.297 / 50	6,58	97,51
# 0.149 / 100	1,40	98,90
# 0.074 / 200	0,30	99,20
Fundo	0,80	100,00
SOMA	100,00	
% Finos (menor que 0,42 mm)	9,07	Umidade seco em estufa
Módulo de Finura	3,38	
Dimensão Máx. Característica	2,38 mm	

Avaliando-se a Tabela 8, verifica-se que o material 10+5 mm apresenta cerca de 1,1% de material particulado com dimensão inferior a 0,149 mm (#100 mesh) e, que cerca de 90% do material particulado apresenta dimensão superior a 0,59 mm (#30 mesh).

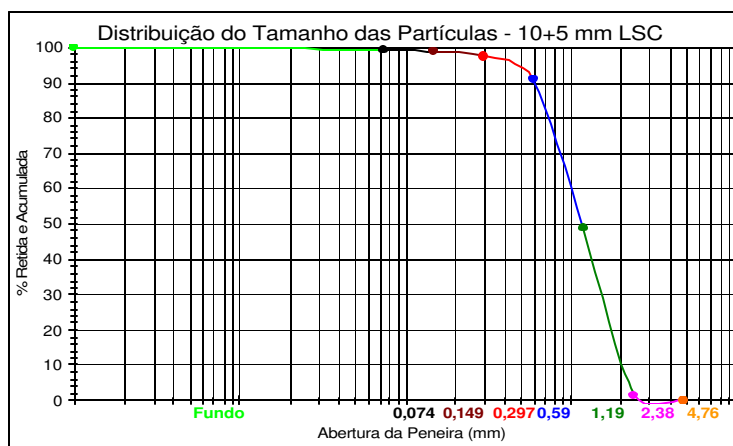


Figura 19: Distribuição em tamanho das partículas: **10+5 mm**.

Izabella Castro Bigno, utilizando o microscópio eletrônico de varredura (MEV) com imagens de elétrons secundários do Laboratório de Microscopia Eletrônica (LME) do IME-RJ, obteve a micrografia apresentada na Figura 20, referente à casca de arroz Lavada em Solução de Cal – LSC, ampliada 35 X.

A Figura 21 apresenta outra micrografia obtida por Izabella Castro Bigno (IME-RJ), referente à casca de arroz Lavada em Solução de Cal – LSC, ampliada 55 X.

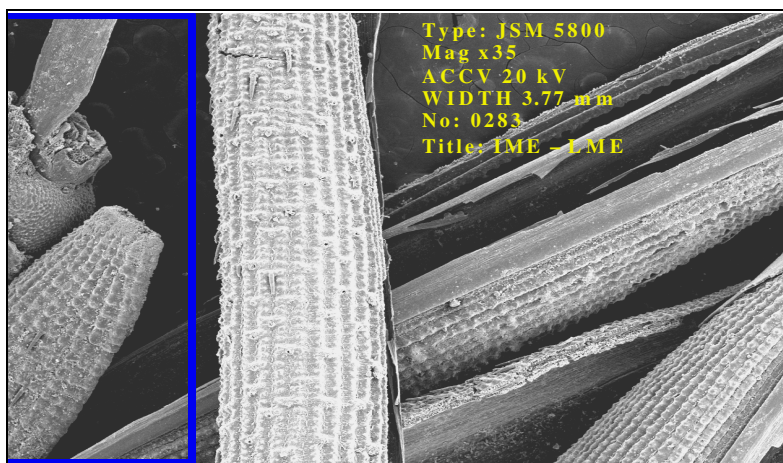


Figura 20: Casca de arroz lavada em solução de cal (LSC), ampliada 35 X. Área em azul ampliada 55 X na Figura 21.
Fonte: Izabella Castro Bigno (IME-RJ).

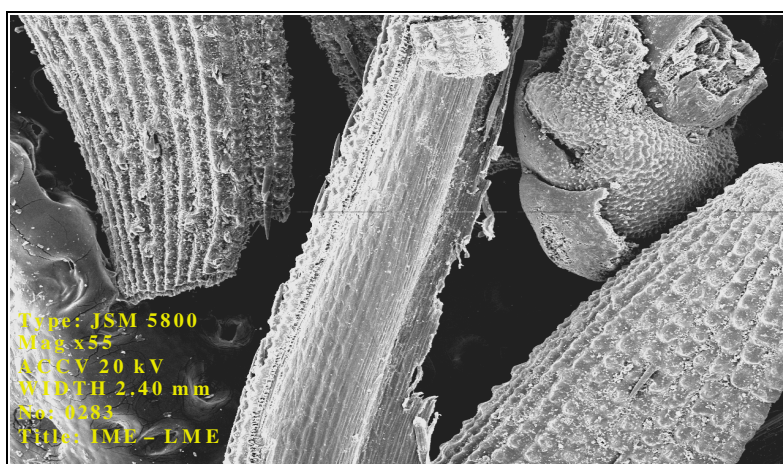


Figura 21: Detalhe da Figura 20 - Casca de arroz lavada em solução de cal (LSC), ampliada 55 X.
Fonte: Izabella Castro Bigno (IME-RJ).

3.1.5. Cimento

Empregou-se o cimento Portland CP-V-ARI RS (cimento Portland de alta resistência inicial - ARI, com resistência a sulfatos - RS), marca Votoran, cujas características físicas, químicas e mecânicas favoreceram a redução do tempo de desforma das peças, além de apresentar menor sensibilidade à ação dos extrativos ainda presentes na casca de arroz, em relação ao cimento Portland CP-II-E-32.

A Tabela 9 apresenta o resumo das características do cimento empregado, ressaltando-se a importância do emprego de cimento de um mesmo lote de fabricação, uma vez que sua composição influencia o calor de hidratação (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Tabela 9: Características físico-químicas do cimento CP-V-ARI RS.

Item de Controle		Unid.	Média	Desvio	Mínimo	Máximo
Ensaio Físicos	Material Retido #200 (mesh)	%	0,13	0,05	0,10	0,20
	Material Retido #325 (mesh)	%	1,23	0,26	1,00	1,60
	Blaine	cm ² /g	4863	118	4760	5050
	Água de Consistência	%	30,87	0,38	30,40	31,20
	Início de Pega	Horas	3:31	0:25	3:15	4:20
	Fim de Pega	Horas	4:41	0:25	4:25	5:30
	Expansibilidade a Quente	mm	0,17	0,24	0,00	0,50
	Resistência R1	MPa	25,17	0,59	24,10	25,60
	Resistência R3	MPa	33,83	0,15	33,70	35,80
	Resistência R7	MPa	39,87	0,32	39,50	40,60
	Resistência R28	MPa	48,72	1,75	47,40	51,30
Ensaio Químicos	Perda ao Fogo	%	1,67	0,93	0,94	3,01
	SiO ₂	%	23,13	0,67	22,59	24,41
	Al ₂ O ₃	%	7,08	0,31	6,87	7,74
	Fe ₂ O ₃	%	2,84	0,15	2,72	3,12
	CaO	%	52,50	0,56	51,03	52,82
	MgO	%	6,12	0,06	5,96	6,14
	K ₂ O	%	1,01	0,02	1,00	1,07
	Na ₂ O	%	0,16	0,02	0,15	0,20
	SO ₃	%	3,22	0,04	3,15	3,27
	Resíduo Insolúvel	%	6,95	1,37	6,55	10,64
	CO ₂	%	0,82	0,86	0,17	2,05

Massa Específica deste cimento: 2,97 g/cm³.

Fonte: Cimentos Votoran.

Esta escolha do cimento CP-V-ARI está baseada em estudos anteriormente realizados por Beraldo e Zucco (1998 a,b) e Zucco (1999).

Segundo o fabricante, o cimento Portland CP-V-ARI RS atende aos requisitos especificados nas normas NBR 5737/1992 (cimento Portland resistentes a sulfatos; Especificação) e a NBR 5733/1991 (cimento Portland de alta resistência inicial; Especificação), de modo que o cimento empregado apresenta qualidades superiores, em relação ao CP-V-ARI.

3.1.6. Cinza da casca de arroz

A cinza da casca de arroz empregada nos experimentos foi fornecida pela empresa beneficiadora de arroz **Urbano Agroindustrial Ltda**, da cidade de Jaraguá do Sul – SC. Sua escolha deveu-se pelo fato de ser resultante de processo industrial, razão principal da sua escolha dentre outras possíveis fontes de fornecimento de cinza, sendo comercializada em embalagem plástica (saco com cerca de 5 kg). Em função de sua característica adsortiva, foi considerada como um produto de alta qualidade. A cinza empregada na pesquisa foi obtida diretamente na empresa, quando em visita às suas instalações em dezembro de 2003, tendo-se recebido amostras para avaliação em maio de 2003.

A Tabela 10 apresenta a distribuição em tamanho das partículas de cinza da casca de arroz comercializada em embalagem plástica (ensacada), com base na série normal (NBR 7217/1987), acrescida da peneira de malha 0,074 mm (#200 mesh).

Tabela 10: Cinza da casca de arroz, na condição natural (sem moagem): Distribuição em tamanho das partículas.

Cinza - Jaraguá do Sul		Original	
Malha / No.Peneira (ABNT)	% Retida	% Acumulada	
# 4,76 / 4	0,00	0,00	
# 2,38 / 8	4,40	4,40	
# 1,19 / 16	46,01	50,41	
# 0,59 / 30	40,40	90,81	
# 0,297 / 50	7,50	98,31	
# 0,149 / 100	1,38	99,69	
# 0,074 / 200	0,18	99,87	
Fundo	0,13	100,00	
Módulo de Finura		3,44	Umidade
Dimensão Máx. Característica		2,38 mm	3,10%

Para ser empregada na pesquisa, a cinza (ensacada com teor de umidade de 3,1%) passou por um processo de moagem em moinho-de-martelos (processo contínuo, com regulagem de entrada da cinza no moinho e, com tempo de residência no interior do mesmo por um período de tempo inferior a 10 minutos). Para obter estes parâmetros, o moinho-de-martelos foi adaptado, tendo-se substituído a peneira (chapa com orifícios cujo diâmetro caracteriza a peneira) por chapa lisa, de modo a forçar a passagem da cinza moída por entre as frestas (vãos) do equipamento, na posição basal, de saída normal de material triturado (as demais foram vedadas), de modo a possibilitar sua coleta.

A Figura 22 apresenta a cinza da casca de arroz na sua forma natural (amostra retirada diretamente da embalagem plástica) e, após sofrer o processo de moagem em moinho de martelos, com posterior peneiramento em agitador mecânico de peneiras.



Figura 22: Cinza da casca de arroz: A = natural; B = após ser moída e peneirada (passante em peneira 0,149 mm).

Após a moagem, a cinza resultante foi peneirada sendo selecionada a fração passante na peneira de malha ABNT 0,149 mm (#100 mesh) para uso na pesquisa. Considera-se que o processo de moagem adotado foi eficiente, tendo-se como critério o descarte de material, inferior a 5%, correspondente à quantidade de material retido na peneira de malha 0,149 mm (#100 mesh), que foi cerca de 6,0 kg em um total de 135 kg de cinza beneficiada.

A Tabela 11 apresenta a distribuição em tamanho das partículas da cinza da casca de arroz passantes em peneira de malha 0,149 mm (#100 mesh). As peneiras utilizadas foram as disponíveis no laboratório, sendo que a caracterização da cinza pelo processo mecânico de peneiramento mostrou-se inadequado em função das perdas de material por emissão de particulado no ar.

Tabela 11: Distribuição em tamanho das partículas da cinza da casca de arroz passante em peneira 0,149 mm (#100 mesh).

Cinza - Jaraguá do Sul	Moída, passante na # 100	
Malha / No.Peneira (ABNT)	% Retida	% Acumulada
# 0,074 / 200	52,44	52,44
# 0,062 / 230	15,51	67,96
# 0,053 / 270	5,67	73,62
# 0,037 / 400	16,94	90,56
Fundo	9,44	100,00

Uma melhor avaliação da cinza somente foi possível com o apoio de Izabella Castro Bigno e do Instituto Militar de Engenharia (IME-RJ), que viabilizaram a determinação da granulometria empregando o método à Laser, conforme apresentado na Figura 23.

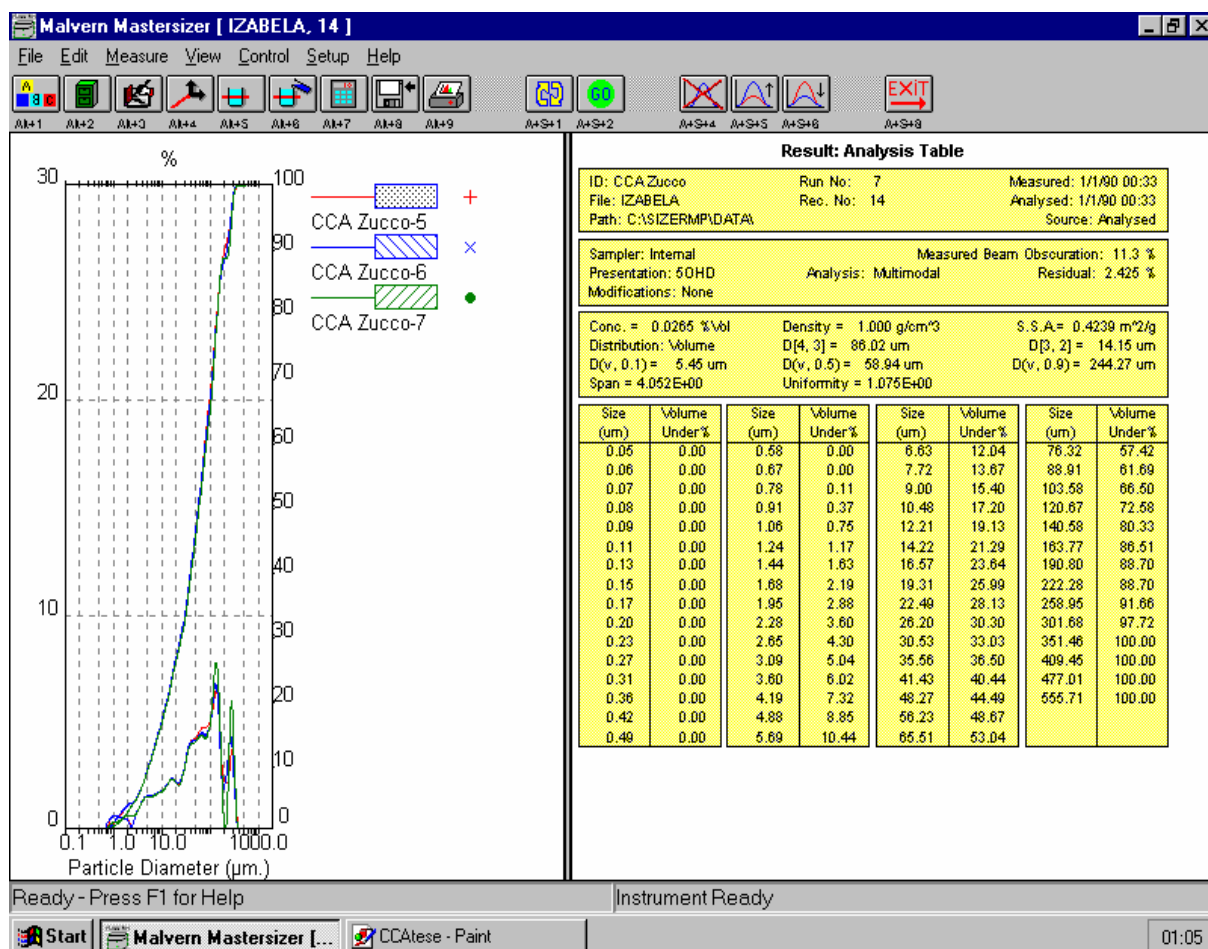


Figura 23: Cinza da casca de arroz moída: Granulometria à laser.
 Fonte: Izabella Castro Bigno (IME-RJ).

Segundo Bigno (2002), a determinação da distribuição em tamanho das partículas utilizando o equipamento Malvern Mastersizer Micro “Plus”, MAF 5001, baseia-se no princípio de espalhamento da luz, o que possibilita determinar a distribuição das partículas na faixa de diâmetro entre 0,05 µm e 550 µm.

Outras contribuições relevantes de Izabella Castro Bigno para o desenvolvimento desta pesquisa foram as micrografias da casca (já apresentadas) e da cinza da casca moída. Na Figura 24 é apresentada a micrografia da cinza da casca de arroz moída (ampliação de 100 X), tendo-se verificado que a mesma apresenta uma grande variedade de formas e dimensões.

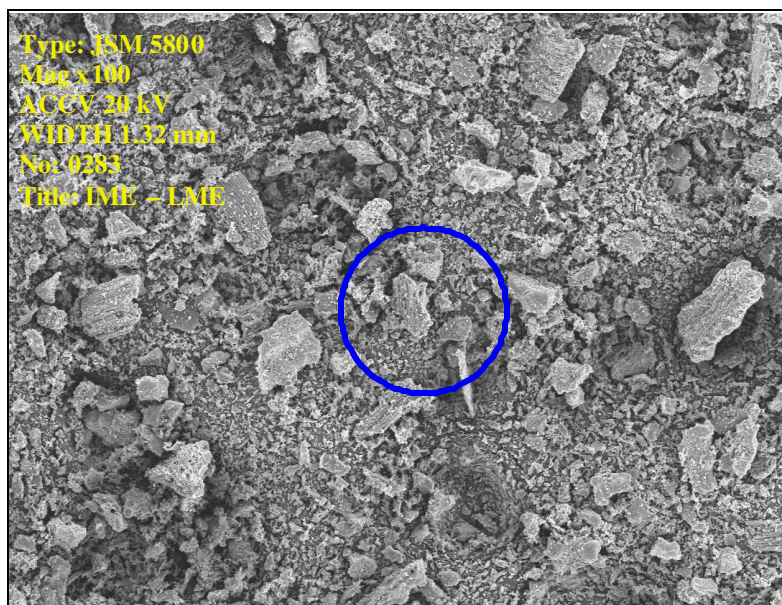
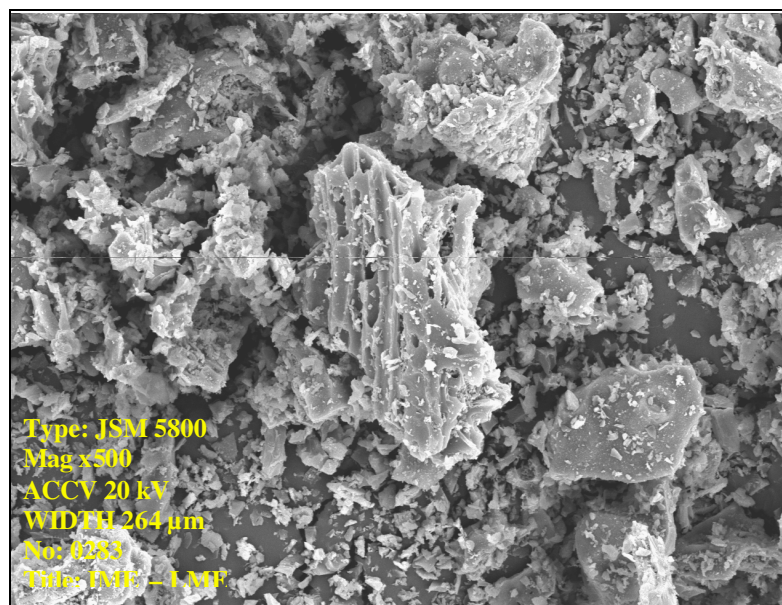


Figura 24: Cinza da casca de arroz moída (aumento 100 X).
Fonte: Izabella Castro Bigno (IME-RJ).

A área em destaque (círculo azul) é apresentada ampliada (500 X) na Figura 25, o que permite evidenciar o formato irregular das partículas e sua possível contribuição na melhoria das propriedades das misturas (aderência cimento-cinza). A Figura 26 é uma ampliação (1000 X) da área destacada na Figura 24 (círculo azul), e permite visualizar detalhes como a estrutura alveolar altamente porosa e partículas de reduzida dimensão.



Figuras 25: Cinza da casca de arroz moída (aumento 500 X).
Fonte: Izabella Castro Bigno (IME-RJ).

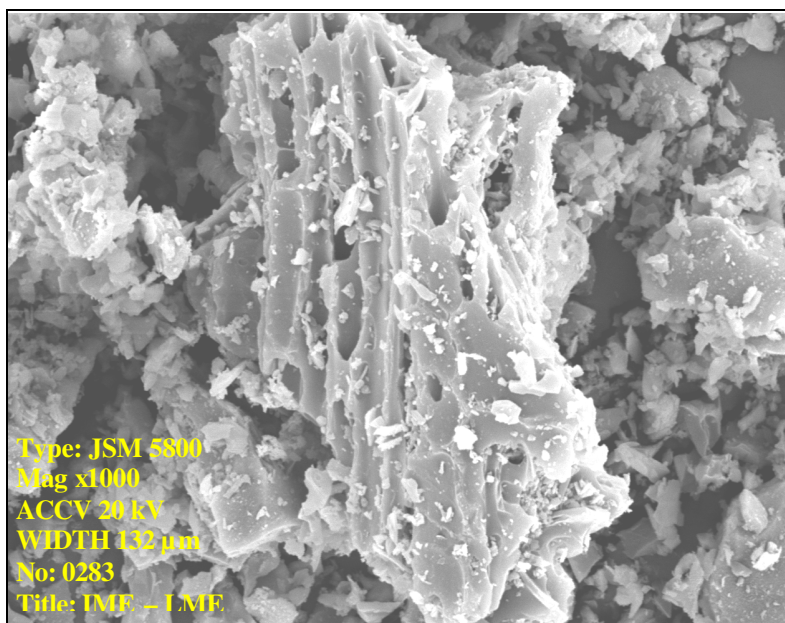


Figura 26: Cinza da casca de arroz moída (aumento 1000 X).
Fonte: Izabella Castro Bigno (IME-RJ).

Essa estrutura porosa permite que se considere a possibilidade de ocorrer a intrusão da água de amassamento, de compostos químicos do cimento, bem como de produtos da hidratação do cimento de modo que seja possível obter-se o enrijecimento das paredes da estrutura porosa (da cinza e mesmo da casca), promovendo um aumento na sua rigidez, bem como da estrutura formada pela junção de partículas (Cimento-Cinza-Casca).

A irregularidade das linhas e das bordas de ruptura, assim como a irregularidade de formas indicam que não há uma tendência de comportamento associada à fratura do material.

Em função de sua estrutura altamente porosa e constituída por 98% de carbono (Tabela 12), atribuiu-se à cinza um comportamento químico adsorativo capaz de reter substâncias químicas inibidoras da pega e do endurecimento do cimento, liberadas pela casca de arroz quando em contato com a água de amassamento (pH alcalino promovido pelo cimento), como evidenciado na Figura 9.

Tal afirmação tem por base o trabalho de Nakbanpote et al. (2000), que comparou a capacidade adsorativa da cinza da casca de arroz queimada em diferentes temperaturas (300 °C, 400 °C e 500 °C) com a capacidade adsorativa do carvão ativado, visando o desenvolvimento de um novo adsorvente para o complexo químico Thiouréia-Ouro $[\text{Au}(\text{CS}(\text{NH}_2)_2)]^+$, empregado no processo de extração de ouro.

Verificaram que a baixa adsorção da cinza da casca de arroz (0,072 mg de thiouréia/g de adsorvente) em relação ao carvão ativado (0,377 mg thiouréia/g de adsorvente) é compensada pela facilidade na recuperação da cinza para sua reutilização.

A capacidade máxima de adsorção da cinza foi obtida quando queimada em temperatura de 300 °C, sendo de 21,12 mg de ouro/g de adsorvente, considerada como adequada para a indústria extrativa de ouro.

A capacidade máxima de adsorção do carvão ativado foi de 33,27 mg de ouro/g de adsorvente.

Apontaram como possíveis mecanismos de adsorção, para a thiouréia, grupos funcionais contendo oxigênio e arranjos específicos do grupo silanol, destacando, contudo, a existência de outros grupos como os hidroxílicos, fenólicos, carboxílicos e o oxigênio funcional (ligado ao carbono). Concluíram que a cinza da casca de arroz, queimada a 300 °C, pode ser usada como um novo adsorvente para o complexo ouro-thiourea.

Foletto et al. (2005) apontaram outros empregos da cinza da casca de arroz como adsorventes, para a remoção de chumbo e mercúrio em águas residuárias, remoção de ácidos graxos livres em óleo de soja e adsorção de cobre, níquel e zinco em soluções sintéticas.

Com o intuito de verificar a composição química da cinza, foi encaminhada amostra para análise química na Central Analítica da UNICAMP (Tabela 12). A metodologia empregada na análise foi a Fluorescência de Raios-X, sugerida por Izabella Castro Bigno (IME-RJ), como sendo a mais apropriada, tendo em vista a rapidez e, principalmente, por não consumir reagentes químicos analíticos.

Da análise da Tabela 12 verifica-se que a cinza possui alto teor de carbono (cerca de 98%), a qual, segundo a literatura especializada, é inadequada para uso em concretos e argamassas, tendo-se verificado que, através da granulometria à Laser, apenas 22% das partículas de cinza poderiam desenvolver atividade pozolânica, pois estariam com dimensão inferior à 15 µ, como apontou Isaia (1996) em seu estudo.

Avaliando sua atividade pozolânica com cimento, verificou-se que a resistência obtida foi de 60% (ZUCCO e BERALDO, 2005), inferior aos 75% mínimos exigidos para ser considerado um material com propriedades pozolânicas (NBR 5752/92).

Tabela 12: Análise química da cinza moída (Resumo).

Sample : AM 0243 Operator: HELENA Comment : Metal, Vac, 2chan/QUALI Group : CENTRAL ANALITICA Date : 2005-03-29 08:45:15						
Measurement Condition						
Instrument: EDX-700 Atmosphere: Vac. Collimator: 10 (mm) Spin: Off						
Analyte	TG kV	uA	FI Acq. (keV)	Anal. (keV)	Time (sec)	D.T. (%)
Ti-U	Rh 50	37-Auto	-- 0 - 40	0.0 - 40.0	Real - 99	25
Na-Sc	Rh 15	317-Auto	-- 0 - 20	0.0 - 4.4	Real - 100	24
Qualitative Result						
Element: Si, S, Rh, K, Ca, Mn, Fe, Rb, Sm, P						
Quantitative Result						
Analyte	Result	(Std.Dev.)	Proc.-Calc.	Line	Int. (cps/uA)	
Si	1.879 %	(0.005)	Quan-FP	SiKa	6.612	
K	0.036 %	(0.000)	Quan-FP	K Ka	0.340	
Ca	0.020 %	(0.000)	Quan-FP	CaKa	0.228	
Mn	0.014 %	(0.000)	Quan-FP	MnKa	1.260	
S	0.013 %	(0.000)	Quan-FP	S Ka	0.135	
Fe	0.010 %	(0.000)	Quan-FP	FeKa	1.239	
P	0.008 %	(0.001)	Quan-FP	P Ka	0.045	
Rb	0.001 %	(0.000)	Quan-FP	RbKa	0.656	
C	98.018 %	(-----)	Balance	-----	-----	

Fonte: Central Analítica – Unicamp.

A composição química da cinza, em termos de teor de sílica (cerca de 1,9%), sugere que a ação desta sílica não deve ser considerada como o principal elemento promotor de melhorias nas propriedades mecânicas pois, com base na literatura, a relação entre sílica e hidróxido de cálcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, sendo da ordem de *duas partes* de sílica para *uma parte* de hidróxido de cálcio (2:1), evidencia que haveria apenas o consumo de cerca de 1 grama de hidróxido de cálcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ para cada 100 gramas da cinza utilizada na mistura, se considerado apenas o percentual de sílica.

Pressupõe-se que, dada à porosidade dos materiais casca de arroz e cinza, poderá haver a deposição de cal no interior das estruturas (GRAM, 1986; PIRJE et al., 1990) e ainda, ocorrer uma impregnação (ou adsorção) nas paredes das fibras e cinza.

A explicação mais adequada deve ser atribuída ao efeito mecânico da adição de finos. Em relação à melhoria no comportamento químico, atribui-se à capacidade adsorviva da cinza (98% de carbono), capaz de promover a inativação dos compostos químicos inibidores da pega e do endurecimento do cimento, ainda presentes na casca, reduzindo as interferências na cinética das reações químicas do cimento, refletindo em melhorias nas propriedades mecânicas das pastas e compósitos.

3.1.7. Equipamentos

Os principais equipamentos empregados na pesquisa foram:

- Agitador mecânico de peneiras, com peneiras da série normal (NBR 7217/1987) combinadas ou não com peneiras de malha 0,074 mm (# 200 mesh), 0,062 mm # 230 mesh), 0,053 mm (# 270 mesh) e 0,037 mm (# 400 mesh), para a separação das frações referentes às faixas de distribuições em tamanho das partículas (usadas na calorimetria), determinação do Módulo de Finura (MF) e determinação da distribuição em tamanho das partículas dos materiais empregados.
- Aparelho de Vicat Modificado (VM, utilizado na determinação dos tempos de Início e Fim de Pega das pastas das misturas) e vasos isotérmicos (utilizados na determinação dos tempos de Início e Fim de Pega dos compósitos), apresentados na Figura 27.

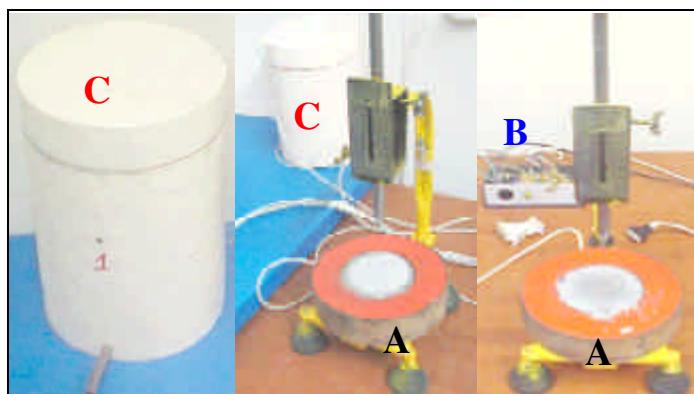


Figura 27: Vicat Modificado (A); Termômetro Digital Multicanal - TDM (B) e Vaso Isotérmico (C).

Os recipientes utilizados na determinação dos tempos de pega foram construídos em Fiberglass, tendo isolamento térmico de lã de rocha, possuindo sensor de temperatura acoplado e monitorado em conjunto com os sensores da Unidade Termo-Sônica (UTS). Para evitar perdas térmicas excessivas (apenas no instante do ensaio), os recipientes são dotados de tampa construída com o mesmo material. No caso do recipiente utilizado no VM, as dimensões internas eram de 75 mm de diâmetro na base, 85 mm de diâmetro na face superior e 42 mm de profundidade. No caso dos vasos isotérmicos, as dimensões internas eram de 95 mm de diâmetro na base, 105 mm de diâmetro na face superior e 150 mm de profundidade.

- Argamassadeira padrão ABNT e batedeira industrial. Na Figura 28 são apresentadas a argamassadeira padrão e a bateadeira industrial utilizadas na mistura dos materiais;



Figura 28: Argamassadeira padrão ABNT (A) e bateadeira industrial (B).

- Balança analítica, empregadas na pesagem dos materiais (marca MARTE, com capacidade para 5,0 kg e, a marca BEL, com capacidade para 1,3 kg e conexão com PC).
- Câmara úmida: Armazenagem e cura das placas e dos cilindros (pasta e compósitos) até a data do ensaio (28 dias de idade). Na Figura 29 apresenta uma visão interna da câmara úmida com os suportes para placas e cilindros de mistura (pastas e compósitos).



Figura 29: Visão interna da câmara úmida e suportes.

- Centrífuga: Utilizada na centrifugação da casca para eliminar o excesso de água (lavagem).
- Estufa com termostato regulável: Empregada na secagem da casca de arroz (LSC) e amostras (compósitos, casca, cinza) para determinação do teor de umidade.
- Moinho-de-martelos. A Figura 30 apresenta uma vista externa e de detalhes das adaptações feitas, com destaque para a chapa lisa, utilizada na moagem da cinza da casca de arroz.

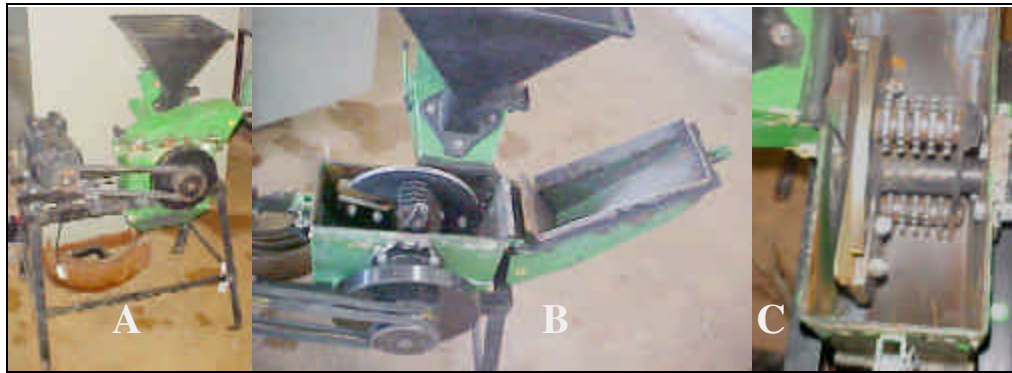


Figura 30: Moinho de martelos: Vista externa (A); detalhe das abas internas (B); detalhe dos martelos e substituição da peneira por chapa lisa (C).

- Paquímetro digital (sensibilidade de 0,01 mm) e trena, utilizados na determinação das medidas das peças a serem ensaiadas.
- Prensa hidráulica instrumentada. A Figura 31 apresenta uma visão geral da prensa instrumentada, com destaque para a tela do software de gerenciamento dos dispositivos eletrônicos - sensor de posição e célula de carga (500 kgf; 10000 kgf ou de 40000 kgf).



Figura 31: Prensa instrumentada: Visão geral e tela do software de gerenciamento.

- Dispositivos de corte de corpos-de-prova. Na Figura 32 são apresentados dois dispositivos empregados no corte (a seco) dos cilindros (pastas e compósitos) e das placas moldadas. Utilizou-se, para o corte, disco abrasivo ou disco diamantado.



Figura 32: Dispositivos de corte para obtenção dos corpos-de-prova.

- Dispositivos para capeamento dos corpos-de-prova cilíndricos a serem ensaiados à compressão simples, composto por capela, moldes e pasta de enxofre.
- Sistema MedTemp - Termômetro Digital Multicanal (TDM), baseado em tecnologia da DALLAS Semicondutores, cujas especificações estão disponíveis na internet em <http://pdfserv.maxim-ic.com/en/ds/DS18B20.pdf>. Foi empregado na aquisição de dados de temperatura utilizando sensor digital, com resolução de 12 bits (precisão de 0,0625 °C). Na Figura 33 são apresentados a tela do software, o módulo eletrônico de gerenciamento e o sensor eletrônico de temperatura (características de isolamento e ligação do sensor digital).

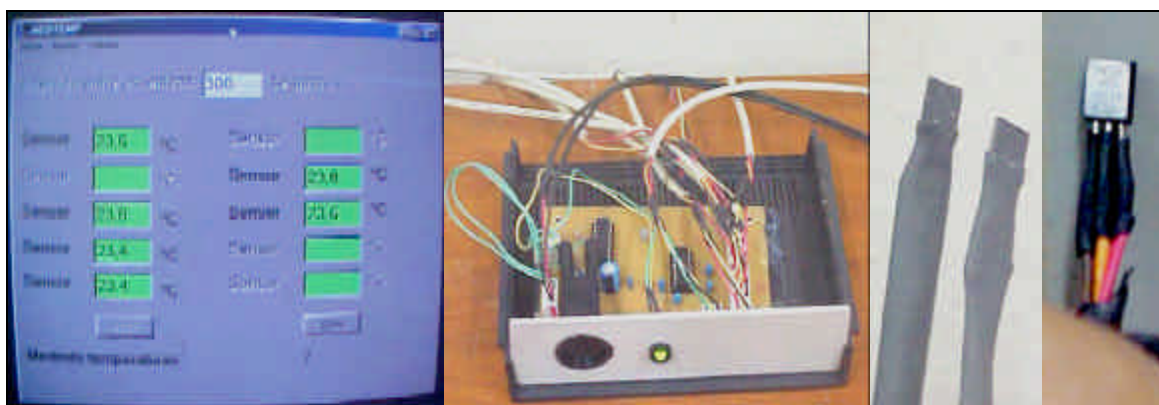


Figura 33: MedTemp: Tela do software, módulo eletrônico de gerenciamento e sensor usado.

A grande vantagem deste sistema é a simplicidade de sua manipulação e, principalmente, o elevado número de sensores que podem ser acoplados ao módulo eletrônico de gerenciamento.

- Sistema de energia de emergência: utilizado como fonte de energia elétrica suplementar

para evitar interrupções no sistema de aquisição de dados, nos casos de interrupção ou oscilações indesejadas no fornecimento de energia elétrica na rede convencional.

- **Unidade Termo-Sônica (UTS):** Dispositivo construído em PRFV (Plástico Reforçado com Fibras de Vidro) ou FIBERGLASS, utilizado como molde para os corpos-de-prova cilíndricos, com dispositivos que permitem fazer o acompanhamento e registro da evolução da temperatura do processo (TDM) e da evolução da velocidade de propagação da onda ultra-sônica no material (Ultrasonic Tester BP-7, marca STEINKAMP). A versão utilizada na pesquisa foi construída com resina de poliéster reforçada com manta de fibra de vidro (450 g/m²), tendo-se preenchido as peças (ocas) com lã de rocha para melhorar a eficiência do isolamento térmico, pois o PRFV possui propriedade isolante térmica. A Figura 34 apresenta um esquema da construção da UTS, onde se destaca o isolamento térmico com lã de rocha. As peças em fibra são encaixantes (macho e fêmea) e, quando unidas, formam um tubo que é o molde dos corpos-de-prova (cilindro de mistura). A UTS possui dispositivos de contato embutidos, que permitem o acoplamento dos sensores de temperatura ligados ao TDM, de modo que se trata de um calorímetro de condução. Nas extremidades da UTS podem ser instalados os transdutores do ultra-som.

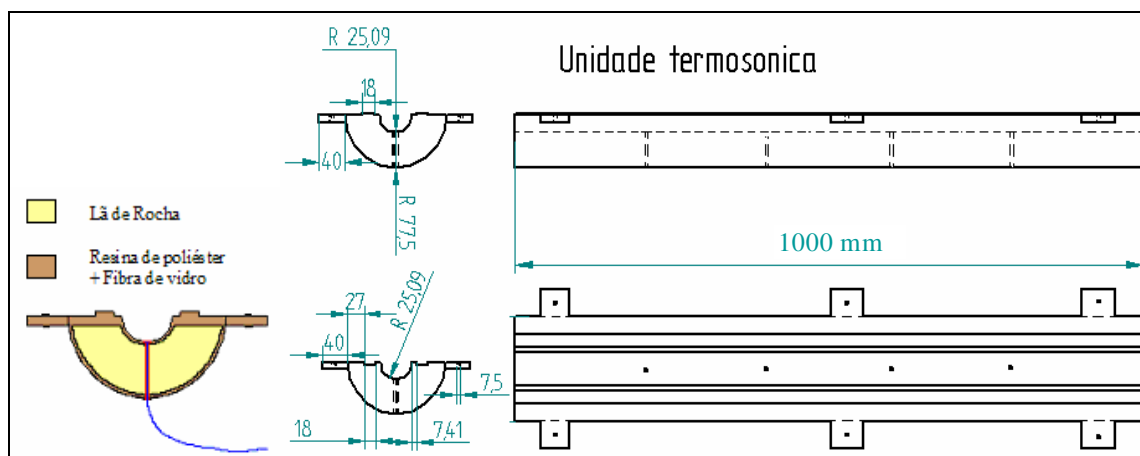


Figura 34: Esquema construtivo da UTS, com destaque para o isolamento térmico.

A Figura 35 apresenta a UTS utilizada no experimento, tendo-se uma visão geral do equipamento (A), uma visão interna, com o detalhe de um cilindro formado, no momento da desmoldagem (B) e, o detalhe da peça de acoplamento (tubo de acrílico) do sensor de ultra-som (sensor plano de seção circular com 30 mm de diâmetro e 70 mm de comprimento) (C).



Figura 35: UTS e sensores (A); desmoldagem do cilindro de mistura (B); Detalhe do sistema de acoplamento do sensor de ultra-som na extremidade da UTS.

- Equipamento de ultra-som modelo Ultrasonic Tester BP-7, marca STEINKAMP. A Figura 36 apresenta os sensores de ponta (ou exponencial) empregados no acompanhamento diário das placas e, dos corpos-de-prova extraídos das placas antes de serem ensaiados.



Figura 36: Equipamento de ultra-som, com sensores de ponta (exponencial).

No caso dos sensores planos (seção circular de 30 mm de diâmetro), foram utilizados nas extremidades da **UTS** para acompanhar a evolução da velocidade de propagação da onda ultra-sônica na mistura durante as primeiras 24 horas (em conjunto com a evolução da temperatura de hidratação). Também foram utilizados nas leituras diárias das velocidades nos cilindros de mistura e, no caso dos corpos-de-prova cilíndricos, antes de serem ensaiados (Compressão simples ou diametral). A frequência de ressonância dos sensores empregados (face plana; de ponta ou exponencial) é de 45 kHz.

- Prensa hidráulica convencional e fôrma para moldagem das placas. Na Figura 37 são apresentadas a prensa hidráulica e uma das fôrmas metálicas empregadas na moldagem das

placas de compósito, sendo aplicada uma carga de cerca de 7 kgf/cm^2 (ZUCCO, 1999). A estrutura das placas possui dispositivo de fixação por parafuso para a manutenção da carga aplicada no ato da prensagem.



Figura 37: Prensa Hidráulica e fôrma para moldagem das placas de compósito.

- Outros equipamentos, recipientes e utensílios diversos: A Figura 38 apresenta uma visão geral da sala climatizada ($22 \pm 3^\circ\text{C}$).

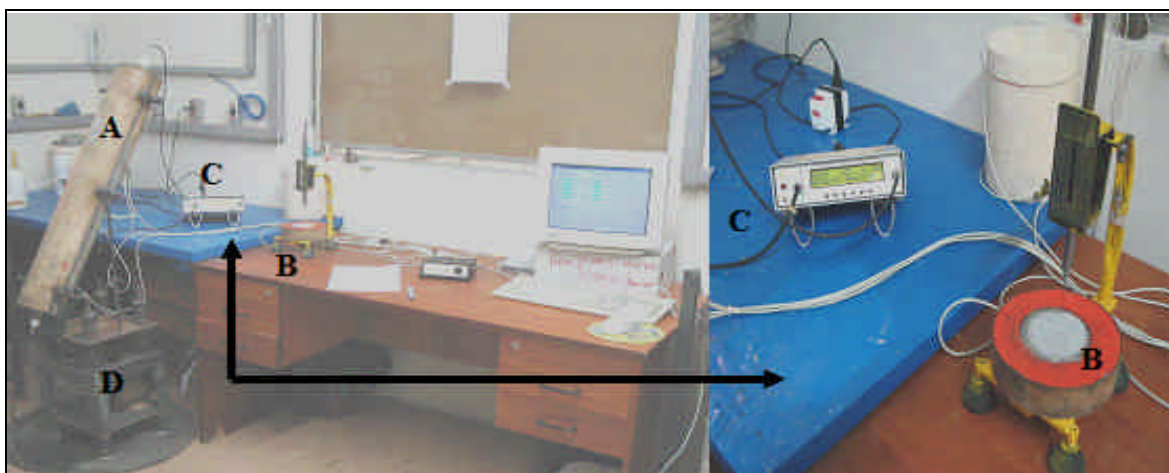


Figura 38: Visão geral da sala climatizada com alguns dos equipamentos empregados na pesquisa: UTS (A), Vicat Modificado (B), Ultra-som (C) e Mesa vibratória (D).

3.2 Métodos

Para avaliar o efeito da adição de cinza às misturas cimento-casca de arroz, houve a necessidade de se determinar o comportamento das mesmas, através da moldagem e ensaio de corpos-de-prova. Em função das dificuldades para efetuar-se uma avaliação global, a pesquisa foi dividida em quatro fases, nas quais foram empregados delineamentos experimentais do tipo fatorial. As Fases I, II e III referem-se a corpos-de-prova cilíndricos; na Fase IV, os corpos-de-prova foram obtidos de placas prensadas.

As Fases I e II são **misturas do tipo pasta**, assim definidas em função do seu elevado teor de pasta de cimento. As Fases III e IV são **misturas do tipo compósito**, assim definidas em função do seu elevado teor de casca. A diferença entre as Fases I e II relaciona-se ao tipo de partículas da casca de arroz empregadas, sendo que na Fase I as partículas estão separadas em diferentes faixas de distribuição em tamanho das partículas (#200, #100, #50, #30 e, #16) e, na Fase II, pela distribuição em tamanho da casca (todas as faixas inclusas, em percentuais de composição definidos nas Tabelas 6, 7 e 8) definida como 10 mm, 5 mm e 10+5 mm.

Na Fase I (Tabela 13) efetuaram-se avaliações estatísticas do comportamento químico-físico-mecânico de pastas de cimento às quais se adicionou casca de arroz e/ou cinza da casca de arroz, caracterizando um fatorial 6 x 4.

Tabela 13: Tratamentos - Fase I: misturas tipo Pasta (cimento:cinza:casca).

Tratamento	Traço	Tratamento	Traço	Tratamento	Traço
PP - 0%	1 : 0,0 : 0,0	# 200 - 0%	1 : 0,0 : 0,075	# 100 - 0%	1 : 0,0 : 0,075
PP - 5%	1 : 0,05 : 0,0	# 200 - 5%	1 : 0,05 : 0,075	# 100 - 5%	1 : 0,05 : 0,075
PP - 20%	1 : 0,20 : 0,0	# 200 - 20%	1 : 0,20 : 0,075	# 100 - 20%	1 : 0,20 : 0,075
PP - 35%	1 : 0,35 : 0,0	# 200 - 35%	1 : 0,35 : 0,075	# 100 - 35%	1 : 0,35 : 0,075
# 50 - 0%	1 : 0,0 : 0,075	# 30 - 0%	1 : 0,0 : 0,075	# 16 - 0%	1 : 0,0 : 0,075
# 50 - 5%	1 : 0,05 : 0,075	# 30 - 5%	1 : 0,05 : 0,075	# 16 - 5%	1 : 0,05 : 0,075
# 50 - 20%	1 : 0,20 : 0,075	# 30 - 20%	1 : 0,20 : 0,075	# 16 - 20%	1 : 0,20 : 0,075
# 50 - 35%	1 : 0,35 : 0,075	# 30 - 35%	1 : 0,35 : 0,075	# 16 - 35%	1 : 0,35 : 0,075

OBS.: Casca de arroz passante em peneira de malha quadrada de 0,075 mm (#200 mesh); 0,15 mm (# 100 mesh); 0,30 mm (#50 mesh); 0,60 mm (#30 mesh) e 1,20 mm (#16 mesh). Cinza passante em peneira 0,15 mm (#100 mesh). Em todas as misturas empregou-se acelerador de pega (CaCl_2 a 3% da massa do cimento), água desionizada ($a/c = 0,5$) e cimento CP-V-ARI RS (marca Votoran).

Em relação à adição de casca de arroz, as faixas específicas são os materiais passantes em peneiras #200, #100, #50, #30 e, #16, tendo-se como controle pastas sem adição de casca.

Cada faixa isolada da casca de arroz é caracterizada pelos materiais passantes em uma peneira (malha quadrada) e retidos na peneira de abertura imediatamente inferior, conforme descrito no item 3.1.4 - casca de arroz. Em relação à adição de cinza, adotou-se os percentuais de adição de 0% (sem adição, como controle ou testemunha), 5%, 20% e 35%.

Na Fase II (Tabela 14) efetuaram-se avaliações estatísticas do comportamento químico-físico-mecânico de pastas de cimento às quais se adicionou casca de arroz com distribuição em tamanho da casca definidas como 10 mm, 5 mm e 10+5 mm (Tabelas 6, 7 e 8). Os percentuais de adição de cinza foram de 0% (sem adição, ou seja, o controle ou testemunha), 20% e 35%, caracterizando um fatorial 3 x 3. O percentual de adição de 5% de cinza foi descartado desta análise tendo em vista que a avaliação dos dados da Fase I apontou ausência de diferença significativa, em relação ao controle.

Tabela 14: Tratamentos - Fase II: misturas tipo Pasta (cimento:cinza:casca).

Tratamento	Traço	Tratamento	Traço	Tratamento	Traço
10 mm - 0%	1 : 0,0 : 0,075	5 mm - 0%	1 : 0,0 : 0,075	10+5 mm - 0%	1 : 0,0 : 0,075
10 mm - 20%	1 : 0,20 : 0,075	5 mm - 20%	1 : 0,20 : 0,075	10+5 mm - 20%	1 : 0,20 : 0,075
10 mm - 35%	1 : 0,35 : 0,075	5 mm - 35%	1 : 0,35 : 0,075	10+5 mm - 35%	1 : 0,35 : 0,075

OBS.: Casca de arroz com distribuição em tamanho da casca definida como 10 mm, 5 mm e 10+5 mm. Cinza passante em peneira 0,15 mm (#100 mesh). Em todas as misturas empregou-se acelerador de pega (CaCl_2 a 3% da massa do cimento), água desionizada ($a/c = 0,5$) e cimento CP-V-ARI RS (marca Votoran).

Na Fase III (Tabela 15), efetuaram-se avaliações estatísticas do comportamento químico-físico-mecânico de compósitos, na forma de corpos-de-prova cilíndricos, com base nos traços indicados por Zucco (1999) para a casca de arroz (10 mm, 5 mm e 10+5 mm, com 0% de adição de cinza). Tendo em vista o fato de que a Fase II não apontou diferença significativa entre adições de 20% e 35% de cinza, optou-se pela execução das duas misturas, ou seja, adição de casca de arroz (10 mm, 5 mm e 10+5 mm) e adição de cinza (0%, 20% e 35%), de modo que o delineamento experimental nesta fase constituiu-se em um fatorial 3 x 3.

Tabela 15: Tratamentos - Fase III: misturas tipo Compósito (cimento:cinza:casca).

Tratamento	Traço	Tratamento	Traço	Tratamento	Traço
10 mm - 0%	1 : 0,0 : 0,35	5 mm - 0%	1 : 0,0 : 0,42	10+5 mm - 0%	1 : 0,0 : 0,39
10 mm - 20%	1 : 0,20 : 0,35	5 mm - 20%	1 : 0,20 : 0,42	10+5 mm - 20%	1 : 0,20 : 0,39
10 mm - 35%	1 : 0,35 : 0,35	5 mm - 35%	1 : 0,35 : 0,42	10+5 mm - 35%	1 : 0,35 : 0,39

OBS.: Casca de arroz com distribuição em tamanho da casca definida como 10 mm, 5 mm e 10+5 mm. Cinza passante em peneira 0,15 mm (#100 mesh). Em todas as misturas empregou-se acelerador de pega (CaCl_2 a 3% da massa do cimento), água desionizada ($a/c = 0,5$) e cimento CP-V-ARI RS (marca Votoran).

Na Fase IV (Tabela 16) efetuaram-se avaliações estatísticas do comportamento físico-mecânico de compósitos, na forma de placas prensadas, para aplicação em construções rurais, tendo-se empregado nesta fase os traços indicados por Zucco (1999), para a casca de arroz (10 mm, 5 mm e 10+5 mm), sem adição de cinza (0%, como controle ou testemunha).

Ainda com base nos traços cimento-casca indicados por Zucco (1999), efetuou-se adições de 20% ou de 35% de cinza, de modo que o delineamento experimental, nesta fase, constituiu-se em um fatorial 3 x 3, diferindo da Fase III (corpos-de-prova cilíndricos) por se tratar de placas prensadas, com avaliação dos parâmetros flexão estática, compressão paralela à superfície e, de absorção e variação dimensional, com corpos-de-prova específicos a cada parâmetro de avaliação.

Tabela 16: Tratamentos - Fase IV: misturas tipo Compósito: Placas (cimento:cinza:casca).

Tratamento	Traço	Tratamento	Traço	Tratamento	Traço
10 mm - 0%	1 : 0,0 : 0,35	5 mm - 0%	1 : 0,0 : 0,42	10+5 mm - 0%	1 : 0,0 : 0,39
10 mm - 20%	1 : 0,20 : 0,35	5 mm - 20%	1 : 0,20 : 0,42	10+5 mm - 20%	1 : 0,20 : 0,39
10 mm - 35%	1 : 0,35 : 0,35	5 mm - 35%	1 : 0,35 : 0,42	10+5 mm - 35%	1 : 0,35 : 0,39

OBS.: Casca de arroz com distribuição em tamanho das partículas definidas por 10 mm, 5 mm e 10+5 mm. Cinza passante em peneira 0,15 mm (#100 mesh); Em todas as misturas empregou-se acelerador de pega (CaCl_2 a 3% da massa do cimento), água desionizada ($a/c = 0,5$) e cimento CP-V-ARI RS (marca Votoran).

Pimentel (2004) enfatizou em seu estudo que fibras naturais, utilizadas como reforço de matriz cimentícias, não possuem normas (brasileiras) para sua caracterização.

Assim, para o desenvolvimento de processos de avaliação, um critério básico pode ser a adoção de Padrões de Referência.

No desenvolvimento deste estudo, envolvendo materiais compósitos à base de casca de arroz, houve a necessidade de se ajustar metodologias e parâmetros baseados em normas específicas existentes (geralmente para argamassas), objetivando estabelecer um critério técnico único.

Desta forma, com o objetivo de avaliar da melhor forma possível os materiais compósitos em estudo, foram utilizados padrões de referência para a comparação com os demais materiais, tendo em vista a heterogeneidade das matérias-primas empregadas e aos métodos dependentes de avaliação pessoal, entre os quais a determinação do Início da Pega e do Fim da Pega em misturas do tipo pasta (Vicat Modificado).

3.2.1. Métodos relativos ao processo de mistura e obtenção de corpos-de-prova:

Os processos de mistura mecânica indicados nas normas NBR 12006/1990 (Cimento: Determinação do calor de hidratação) e NBR 7215/1996 (Cimento: Determinação da Resistência à Compressão) são distintos. Os procedimentos referenciados na literatura são:

- Pastas:

O processo de mistura para a obtenção de pastas é empregado apenas quando se deseja avaliar a evolução do calor de hidratação, segundo a metodologia de Weatherwax e Tarkow (1964): 1- Misturar o cimento e o material a ser analisado (fibra vegetal passante na peneira de malha quadrada ABNT 0,074 mm - # 200 mesh) até uniformizar; 2- adicionar água e misturar até uniformizar; 3- Inserir a amostra no calorímetro.

- Argamassas:

O processo de mistura descrito pela norma NBR 12006/1990 é empregado na avaliação da qualidade do cimento: 1- Despejar areia e cimento na cuba do misturador; 2- Homogeneizar por 30 s em velocidade baixa (1, misturador padrão ABNT); após, adicionar a água com o misturador em movimento; 3- Após 1 min, passar para a velocidade alta (2, misturador padrão ABNT) e misturar por 1 min. Tempo total de mistura = 2 min; 4- Leituras Obrigatórias: 72 h e final às 168 h.

O processo de mistura descrito pela norma NBR 7215/1996 é empregado para avaliar misturas de argamassa: 1- Despejar água na cuba do misturador; 2- Adicionar o cimento (ou a mistura cimento/material pozzolânico, no caso da NBR 5752/1992) e homogeneizar por 30 s em velocidade baixa (1, misturador padrão ABNT = 140 ± 5 rpm); em seguida, com o misturador em movimento, adicionar lentamente a areia até completar 1 min; 3- Após, passar para a velocidade alta (2, misturador padrão ABNT = 285 ± 10 rpm) e misturar por 30 s; 4- deixar em repouso por 1min e 30 s, coberto com pano úmido, sendo que nos primeiros 15 s, raspar a massa retida nas laterais da cuba. 5- Após, misturar durante 1 min em velocidade alta (2, misturador padrão ABNT = 285 ± 10 rpm). Tempo total de mistura = 4 minutos.

→ **Processo de mistura adotado na pesquisa:** Com base nos procedimentos descritos por Zucco (1999), a mistura mecânica dos materiais (misturas tipo pasta ou tipo compósito) foi realizada utilizando-se batedeira industrial, tendo-se efetuado as seguintes operações

sequenciais: 1) Deposição do acelerador de pega previamente pesado no interior da cuba do misturador, com adição da massa total da água desionizada, seguida de mistura até a solubilização do acelerador; 2) Deposição da casca de arroz no interior da cuba, com mistura até a homogeneização (velocidade 1 - batedeira industrial; 235 ± 5 rpm); 3) Quando a mistura continha cinza em sua formulação, adicionava-se a cinza efetuando-se a mistura até a homogeneização (velocidade 1 - batedeira industrial; 235 ± 5 rpm); 4) Adicionava-se o cimento, homogeneizando por 30 s na velocidade 1, mudando-se em seguida para a velocidade 3 da batedeira industrial (363 ± 10 rpm) de modo que o tempo total de mistura, após a adição do cimento, foi de 3 minutos. Concluída a mistura dos materiais, a massa resultante era depositada no interior da UTS (*Unidade Termo-Sônica*) e de recipientes adequados à determinação dos tempos de pega.

Para efetuar a mistura de pastas empregou-se pá de misturas tipo “raquete”, que é a convencionalmente empregada na argamassadeira padrão ABNT. No caso das misturas de compósito, empregou-se a pá de mistura tipo “gancho”, que demonstrou ser mais apropriada em misturas tipo compósito, mais secas (altos teores de casca e cinza). Durante o processo de mistura, empregou-se espátula de nylon (acessório da batedeira industrial) para efetuar a raspagem das paredes internas da cuba do misturador, de modo a auxiliar o processo de homogeneização da mistura.

➔ Processos de confecção dos cilindros.

Após a mistura dos componentes, a massa obtida foi depositada no interior da UTS e dos recipientes específicos para a determinação dos tempos de pega. A cura dos cilindros, após a desmoldagem, foi efetuada em câmara úmida até a data do ensaio, aos 28 dias de idade.

Em misturas tipo pasta (Fases I e II) empregou-se a deposição do material no interior da UTS por processo mecânico de vibração (cerca de 910 oscilações por minuto), em um tempo inferior a 5 (cinco) minutos, dada a fluidez das misturas. Concluída a deposição da pasta no interior da UTS (auxiliada por processo vibratório), procedia-se ao preenchimento dos moldes do Vicat Modificado (VM), empregado na determinação dos tempos de pega, também por meio de processo vibratório.

Para minimizar as perdas térmicas e de água de amassamento (vapores), as extremidades da UTS eram obstruídas com o dispositivo de acoplamento dos transdutores do equipamento de ultra-som (Figura 35). No caso do VM, fez-se uso de tampa com aplicação de

vaselina (em pasta) na face do molde de modo a corrigir a folga entre a tampa e o molde.

Decorridas 24 h da mistura dos materiais com o cimento, efetuava-se a desmoldagem dos cilindros, anotando-se as medidas relativas ao comprimento e massa do cilindro obtido e, principalmente, o tempo de propagação da onda ultra-sônica, efetuando-se também a marcação necessária à identificação do cilindro de mistura. Medições diárias da massa e do tempo de propagação da onda ultra-sônica foram feitas, com o propósito de se estudar a evolução das mesmas ao longo do tempo. Na data do ensaio, aos 28 dias de idade, os cilindros de pasta foram cortados para a obtenção de corpos-de-prova cilíndricos.

Em misturas tipo compósito (Fase III), a metodologia empregada para a deposição do material foi uma combinação do processo mecânico de vibração (tempo inferior a 10 (dez) minutos, dada a falta de fluidez de algumas misturas), intercalado com compactação manual (5 camadas, com 3 golpes por camada utilizando-se haste de madeira de 1,20 m de comprimento, 22 mm de diâmetro e extremidade semi-esférica).

No caso do preenchimento dos recipientes (vasos isotérmicos) empregados na determinação dos tempos de pega (NBR 9832/1992 – Concreto e argamassa – Determinação dos tempos de pega por meio da resistência à penetração), efetuou-se a deposição e o pré-adensamento do material com auxílio de espátula. Após completar o volume do vaso, depositava-se sobre a massa de mistura um disco metálico (diâmetro de 95 mm; espessura de 31,4 mm e massa de 1750 g). Acionava-se o sistema de vibração e pressionava-se o disco (cerca de $1,2 \text{ kgf/cm}^2$) para a acomodação da mistura até o alinhamento da face do disco metálico (superior) com a do vaso (borda), quando então se desligava o sistema de vibração.

Para obter um acabamento uniforme da superfície (superfície lisa) e facilitar a remoção do disco metálico, o mesmo era rotacionado, antes de ser removido. A altura final do material compósito no interior do molde estabilizava-se em torno de 135 mm de altura (cerca de 15 mm abaixo da borda do vasilhame), devido ao efeito de expansão, próprio do material casca de arroz. Para minimizar as perdas térmicas e parte da água de amassamento (vapores), aplicava-se vaselina (em pasta) como selante entre a tampa e o vaso isotérmico.

Cerca de 24 h após a mistura dos materiais com o cimento, efetuava-se a desmoldagem do cilindro, anotando-se as medidas relativas ao seu comprimento, sua massa e, principalmente, o tempo de propagação da onda ultra-sônica, efetuando-se também a marcação necessária à identificação do cilindro de mistura. Medições diárias da massa e do

tempo de propagação da onda ultra-sônica foram feitas, com o propósito de se estudar a evolução das mesmas ao longo do tempo. Na data do ensaio, aos 28 dias de idade, os cilindros de compósito foram cortados para a obtenção de corpos-de-prova cilíndricos.

→ **Processo de confecção das placas prensadas de compósito.**

Para a confecção das placas prensadas foram empregadas fôrmas metálicas com dispositivo de travamento (fixação por parafusos) para a manutenção da carga aplicada. Os traços empregados na confecção das placas prensadas (cimento:cinza:casca) estão indicados na Tabela 16.

Para o preenchimento do molde da placa, empregou-se uma massa de materiais secos de (2225 ± 25) gramas. Após a mistura dos materiais (procedimento descrito na etapa processo de mistura), a massa obtida foi distribuída manualmente no interior da fôrma metálica, de modo o mais uniforme possível. Sobre a massa, foi assentada a tampa do molde e, sobre esta, dispositivos para a distribuição da carga (placas e perfil metálicos) no processo de prensagem (Figura 39).



Figura 39: Fôrma utilizada na confecção de placas: travamento e distribuição da carga.

Na prensagem das placas empregou-se uma prensa hidráulica convencional, marca Charlott, modelo PH 30, com capacidade nominal de 30 toneladas-força (Figura 37). Efetuou-se a calibração da prensa (manômetro) para a carga de trabalho de 9,5 toneladas-força (cerca de $7,0 \text{ kgf/cm}^2$), por meio de uma célula de carga.

O processo de prensagem consistiu na aplicação contínua de carga até atingir um

valor de prensagem de 10 toneladas-força. Instalavam-se os dispositivos de travamento (parafusos), efetuando-se um primeiro ajuste. Aguardava-se por cerca de 2 (dois) minutos sem remover a carga, para permitir uma melhor acomodação do material, quando então nova carga complementar era aplicada. Este processo foi repetido até que o nível desejado, de 9,5 toneladas-força, se estabilizasse, efetuando-se o aperto final nos parafusos.

Concluída a prensagem, com o travamento do molde, aliviava-se a carga aplicada, removiam-se os dispositivos de distribuição da carga (placas; perfil metálico) e o molde da prensa, liberando o espaço para a instalação de um segundo molde, quando então repetia-se o processo para a produção de outra placa.

Cerca de 24 horas após a mistura dos materiais com o cimento, efetuava-se a desforma, obtendo-se placas com dimensões de 610 mm x 220 mm e espessura variando entre 13 mm e 16 mm. A variabilidade na espessura das placas é atribuída, principalmente, ao traço empregado. As placas prensadas recebiam, após a desforma, marcações referentes à identificação e posições destinadas às leituras do tempo de propagação da onda ultra-sônica.

Foram efetuadas anotações de cada placa, referentes a massa dos materiais empregados, massa após a desmoldagem, tempo de propagação da onda ultra-sônica após a desmoldagem (duas posições longitudinais) e as anotações diárias (tempo de propagação da onda ultra-sônica e massa da placa) até a data do ensaio aos 28 dias de idade (inclusive), quando então eram seccionadas para a obtenção dos corpos-de-prova. Foram produzidas três placas (3 repetições) para cada mistura a ser avaliada.

3.2.2. Métodos relativos à evolução da temperatura da hidratação

A metodologia para a avaliação da evolução da temperatura da hidratação se orientou (no que coube) na NBR 12006/1990 e em estudos desenvolvidos para compósitos de cimento e fibras vegetais por diversos autores, entre os quais Weatherwax e Tarkow (1964).

Especificamente em relação ao material compósito à base de casca de arroz, destacam-se os trabalhos desenvolvidos por Beraldo e Zucco (1998 a,b), Zucco (1999) e Zucco e Beraldo (2005).

O método utilizado pelos autores precedentes se baseia no registro da temperatura resultante do processo químico de hidratação do cimento (ou de suas misturas) em intervalo

programado de leituras automáticas a cada 5 minutos, nas primeiras 24 horas.

Para isto, empregou-se um sistema de aquisição de dados de temperatura (TDM – Termômetro Digital Multicanal), com sensores acoplados a UTS (evolução da temperatura de hidratação dos cilindros) e aos recipientes empregados na determinação dos tempos de pega (Vicat Modificado e vasos isotérmicos).

O emprego desta metodologia visou obter informações do comportamento químico-mecânico das misturas estudadas com a possibilidade de compará-las, objetivando a determinação dos efeitos e as interações entre os componentes das misturas.

Assim, com base na curva de hidratação (período de 24 h), foram efetuadas avaliações do comportamento químico de uma mistura, tendo-se como parâmetros de avaliação a **área sob a curva** (calculada por integração numérica - método dos trapézios), a **inclinação máxima** (calculada com base na máxima velocidade do processo exotérmico em um trecho de 12 leituras consecutivas), o **ponto de inclinação máxima** (calculado com base na máxima velocidade do processo exotérmico, entre 2 leituras consecutivas), a **temperatura máxima** e o **tempo para atingir essa temperatura máxima**.

Com base em Taylor (1992) e Mehta e Monteiro (1994), apresenta-se a Figura 40, que é um gráfico da pastas (pasta pura = PP) do cimento empregado na pesquisa como padrão de referência (com 3% de acelerador de pega - CaCl_2 e água desionizada), com uma descrição do processo de hidratação.

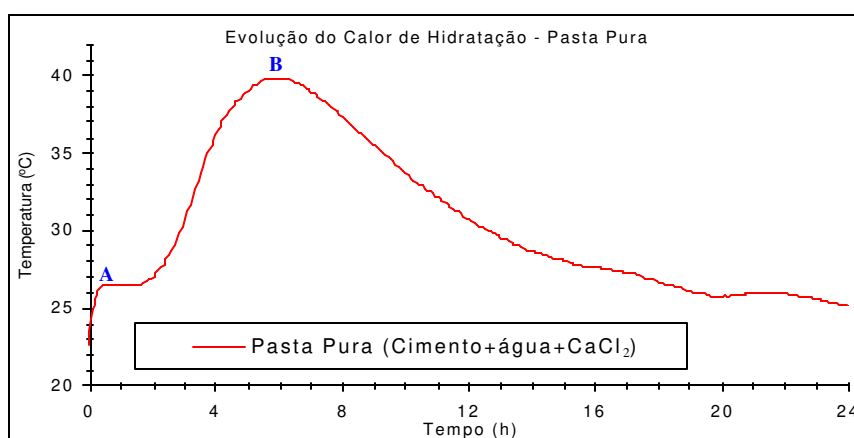


Figura 40: Evolução da temperatura de hidratação: CP-V-ARI RS empregado na pesquisa (Fator $a/c = 0,5$; acelerador de pega - CaCl_2 - 3% da massa do cimento).

Assume-se que, com a mistura do cimento à água, ocorra:

- a) uma rápida evolução de calor, por poucos minutos (trecho ascendente até o Pico “A”), atribuída ao calor de dissociação de aluminatos (C_3A – aluminato tri-cálcico) e sulfatos ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$ - gesso);
- b) a presença dos sulfatos em solução promova redução da disponibilidade de íons aluminatos (formação de trissulfoaluminatos de cálcio - AFt), de modo que esta evolução de calor termine rapidamente (Pico “A”);
- c) entre o primeiro pico (“A”) e o início do pico seguinte (sentido ascendente ao pico “B”), há um período de latência atribuído à solubilização dos silicatos (principalmente do C_3S – silicato tri-cálcico) com a liberação de íons cálcio (Ca^{+2}) para a solução (água de amassamento) de forma contínua;
- d) a saturação ou supersaturação da solução (água de amassamento) com íons cálcio (Ca^{+2}) promove a formação de pontos de nucleação, considerados indutores da formação de estruturas químicas cristalinas (com liberação de energia na forma de calor);
- e) a aglutinação dos produtos secundários [$C-S-H$] - silicatos de cálcio hidratados e [$Ca(OH)_2$] – hidróxidos de cálcio) promova uma perda gradual na plasticidade da mistura, fazendo com que a pasta apresente o início de pega (começo do enrijecimento) antes de atingir o ápice em “B”;
- f) a menor geração de calor de hidratação, observada após o pico “B”, está associada com a redução gradual das reações químicas.

Observou-se, por ocasião de ensaios preliminares, a importância da ordem de inserção dos materiais na operação de mistura, de modo que possíveis reações que demandem concentração de íons Ca^{+2} (adsorção; consumo químico por inibidores da pega; outros mecanismos), sejam efetuadas antes da adição do cimento (possível efeito do acelerador de pega) minimizando a influência negativa destas reações de demanda de íons Ca^{+2} .

A Figura 41 apresenta curvas de evolução da temperatura: hidratação da mistura depositada na UTS e vasos isotérmicos para a mistura compósito 10 mm-35%; curvas de temperatura do ar da sala climatizada e, da água (vaso isotérmico). Destacam-se, no gráfico, os parâmetros Início de Pega, Fim de Pega, Inclinação Máxima e o Ponto de Inclinação Máxima. A metodologia de evolução da temperatura de hidratação possibilitou constatar e avaliar o potencial de aplicação da cinza como um agregado reativo sinérgico (não pozolânico) capaz de promover melhorias no comportamento químico das misturas do cimento utilizado.

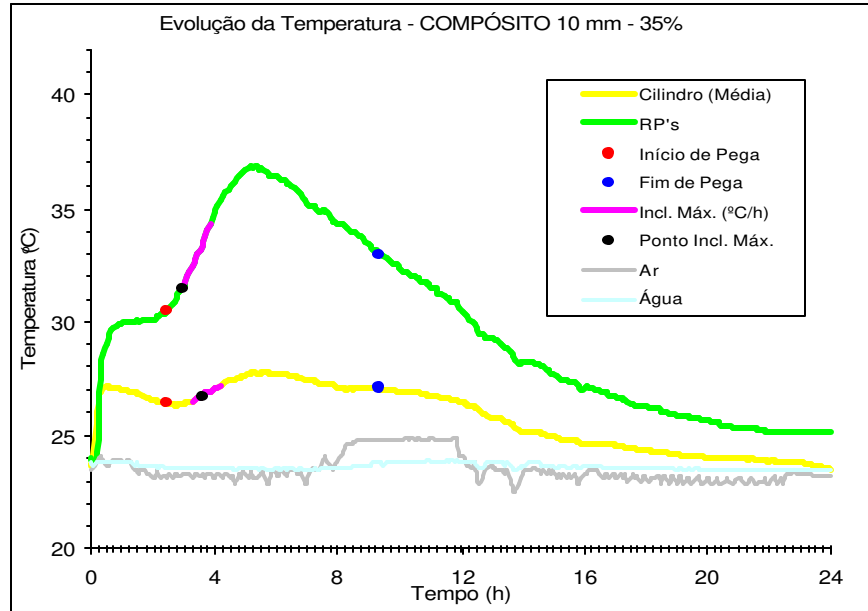


Figura 41: Curvas de evolução de temperatura: hidratação do compósito 10 mm-35% (cilindro e vaso isotérmico), do ar e, da água (isolada em vaso isotérmico).

Esta constatação não deixou margens a dúvidas quando se utilizou casca de arroz natural (NÃO LAVADA) passante na peneira de malha ABNT 0,075 mm (#200 mesh), tendo uma pasta referência para a comparação com as demais misturas, nas quais houve a adição de cinza (Figura 11).

➔ Avaliação do parâmetro Área sob a curva (Área, em °C.h).

A área sob a curva de hidratação foi calculada por meio de análise numérica (método dos trapézios) tendo-se por variáveis o intervalo entre leituras (a cada 5 minutos) e os valores de temperatura medidos em cada leitura. A expressão empregada foi:

$$AREA = \frac{x}{2} \times [V_i + V_f + (2 \times \sum V_{int})] \quad (x)$$

onde:

x = intervalo de tempo entre leituras (intervalo constante de 5 minutos);

V_i = Valor da temperatura no tempo 0:00 h (valor inicial de temperatura);

V_f = Valor da temperatura no tempo 24:00 h (valor final de temperatura);

$\sum V_{int}$ = Somatório dos valores intermediários de temperatura (soma dos valores das temperaturas lidas no intervalo de tempo de 0:05h à 23:55h, inclusive).

→ Avaliação do parâmetro Inclinação Máxima (In_Max , em $^{\circ}C/h$)

Na avaliação da cinética do processo de hidratação do cimento, verificou-se que o trecho ascendente da curva de evolução da temperatura de hidratação é o de maior importância. Neste trecho encontra-se o parâmetro de avaliação inclinação máxima, definida como o intervalo de 12 leituras consecutivas (correspondente ao intervalo de tempo de 1 h) onde ocorre a máxima velocidade do processo exotérmico. Para os cálculos, empregou-se a expressão (3):

$$In\_Max = \frac{T12 - T1}{t12 - t1} (^{\circ}C/h) \quad (3)$$

onde:

$T12$ = Temperatura correspondente ao tempo $t12$;

$T1$ = Temperatura correspondente ao tempo $t1$;

$t12$ = tempo, a partir da mistura do cimento com a água de amassamento, correspondente à 12ª leitura, do trecho de 12 leituras consecutivas de temperatura;

$t1$ = tempo, a partir da mistura do cimento com a água de amassamento, correspondente à 1ª leitura do trecho de 12 leituras consecutivas de temperatura.

Na Figura 42 destaca-se o trecho no qual se obteve o ponto de máxima inclinação.

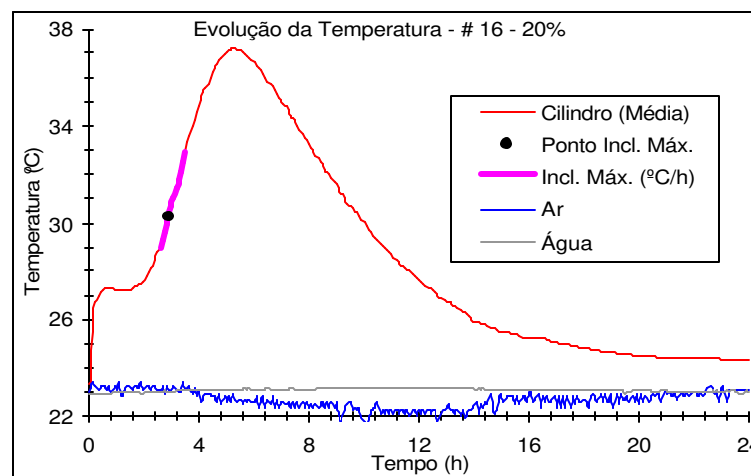


Figura 42: Parâmetros: Inclinação Máxima e Ponto de Inclinação Máxima em curva de evolução da temperatura de hidratação da pasta de mistura #16-20%.

→ **Avaliação do parâmetro tempo necessário para atingir a Temperatura Máxima (tempo_TMax, em h).**

O tempo necessário para atingir a temperatura máxima foi definido como sendo o intervalo de tempo medido entre o instante em que o cimento entra em contato com a água de amassamento e a temperatura máxima alcançada no processo de hidratação.

→ **Avaliação do parâmetro Temperatura Máxima (Temp_Max, em °C).**

O parâmetro temperatura máxima foi definido como o maior valor de temperatura alcançada no processo de hidratação do cimento, dentro do intervalo de tempo de 24 h, contado a partir do instante em que o cimento entra em contato com a água de amassamento.

3.2.3. Métodos relativos à velocidade do pulso ultra-sônico (VPU)

A metodologia de avaliação das propriedades mecânicas utilizando Ensaios Não Destrutivos (END) se baseia na geração de pulso ultra-sônico, por meio de transdutor piezoelétrico de baixa frequência de ressonância. Foram empregados dois tipos de transdutores, ambos com frequência de ressonância de 45 kHz, porém com calibrações distintas. Os transdutores de face plana, foram calibrados em 20 μ s, sendo empregados para avaliar os materiais obtidos através da UTS (cilindros de mistura e os corpos-de-prova dela extraídos), enquanto que os transdutores de ponta (tipo exponencial), calibrados em 10 μ s, foram empregados para avaliar as placas de compósito e os corpos-de-prova dela extraídos.

No caso da avaliação das misturas obtidas através da UTS (cilindros de pasta ou de compósito), fez-se o registro do tempo de percurso do pulso ultra-sônico na direção da maior dimensão (altura), após decorridos cerca de 10 minutos do contato do cimento com a água, em intervalo programado de leituras automáticas a cada 5 minutos, nas primeiras 24 horas.

Após este período, foram feitas leituras diárias (na mesma direção: a altura), até a data do ensaio e, com base na dimensão da altura dos cilindros, calculou-se a velocidade do pulso ultra-sônico (VPU). Os corpos-de-prova cilíndricos obtidos após o corte dos cilindros de mistura (28 dias de idade) foram avaliados calculando-se a VPU no material (pasta ou compósito) na direção da sua altura. A Figura 43 apresenta um gráfico de Evolução da VPU (EVPU), para uma mistura tipo compósito, constituída por casca de arroz com distribuição em tamanho definido como 10 mm, com adição de 35% de cinza.

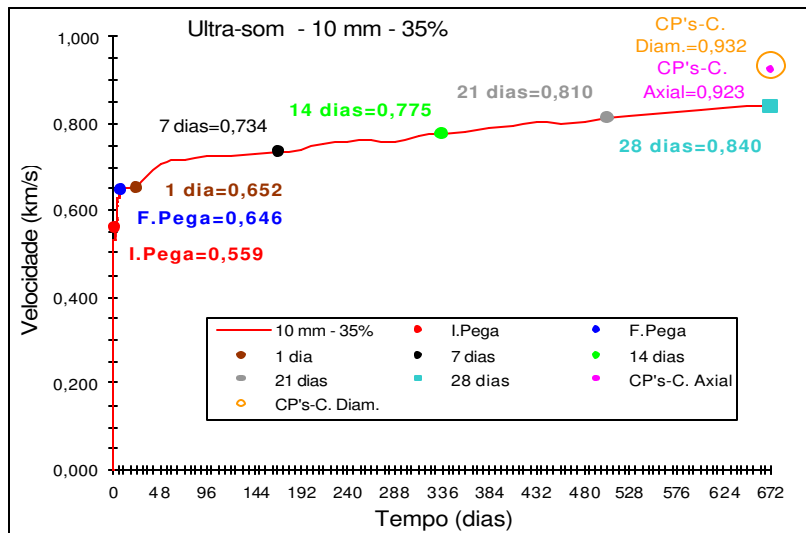


Figura 43: Evolução da VPU (EVPU) no compósito 10 mm - 35%.

No caso das placas prensadas, o tempo de propagação do pulso ultra-sônico foi medido na direção da sua maior dimensão (comprimento), em duas posições padronizadas (Figura 54). A leitura do tempo de propagação do pulso ultra-sônico nas placas foi iniciada logo após a desmoldagem, tendo se efetuado também o controle da massa das placas. Medidas diárias foram efetuadas até a idade de 28 dias, quando, então, essas placas foram seccionadas para a obtenção dos corpos-de-prova empregados nos ensaios, tendo-se efetuado medições nos corpos-de-prova, antes da realização do ensaio (aos 28 dias para a condição seca ou, aos 29 dias para a condição úmida).

No caso dos corpos-de-prova destinados aos ensaios de flexão estática, a avaliação por meio de END foi efetuada medindo-se o tempo de percurso da onda ultra-sônica ao longo do seu comprimento (mesmo sentido das placas), tendo-se adotado esta direção de medição, por se possuir informações prévias da EVPU das placas, por ser a mesma direção empregada nos ensaios de compressão paralela à superfície e, por se julgar como sendo a mais adequada para a detecção de variabilidades no material capaz de influir no comportamento a ser avaliado (resistência), tendo-se um reduzido número de pontos de leitura, no caso, apenas um ponto de leitura para cada corpo-de-prova.

Os corpos-de-prova extraídos das placas prensadas e destinados ao ensaio de compressão paralela (100 mm x 25,4 mm e espessura de acordo com a placa), foram avaliados por meio de END (VPU na direção do seu comprimento, de cerca de 100 mm - ZUCCO, 1999), nas condições seca ou úmida (24 h de imersão em água).

O emprego desta metodologia visou obter informações do comportamento mecânico das misturas estudadas, como forma de controle de qualidade e uma possível correlação com os outros tipos de ensaios mecânicos.

3.2.4. Métodos relativos ao Início e Fim de Pega

O parâmetro início de pega possui como característica básica o seu caráter prático, que, por estar relacionado com a perda de plasticidade e começo da solidificação da pasta de cimento, define o limite de manuseio de uma pasta ou de uma mistura contendo pasta de cimento (compósito, argamassa, concreto). Os elementos auxiliares de análise associados ao início de pega são o tempo para o início de pega (IP_tempo), a temperatura no início de pega (IP_Temp) e, a velocidade do pulso ultra-sônico no início de pega (IP_Vel).

No caso do parâmetro fim de pega, sua característica “teórica” é a de apontar o final do enrijecimento com o “início” de um rápido desenvolvimento da resistência mecânica. Seu caráter prático reside na possibilidade de determinação de um tempo mínimo para a desforma segura das peças de compósito, no pós-fim de pega. Os elementos auxiliares de análise associados ao fim de pega são o tempo para o fim de pega (FP_tempo), a temperatura no fim de pega (FP_Temp) e a velocidade do pulso ultra-sônico no fim de pega (FP_Vel).

A metodologia para a avaliação do início e do fim de pega foi baseada nas normas NBR 9832/1992 (Concreto e Argamassa – Determinação dos tempos de pega por meio da resistência à penetração) e NBR 11581/1991 (Cimento Portland: Determinação dos tempos de pega). No caso da avaliação dos tempos de pega em misturas do tipo pasta, adequou-se a metodologia prescrita na NBR 11581/1991 às necessidades da pesquisa, adaptando-se o equipamento com o intuito de efetuar o acompanhamento da evolução da temperatura de hidratação (VM – Vicat Modificado).

Considerou-se que a determinação dos tempos de pega em pastas também está associada a um comportamento mecânico de puncionamento, onde a redução da plasticidade devida à formação de precipitados ou estruturas cristalinas impede a penetração da agulha de Vicat. Enfatiza-se que, para minimizar as perdas térmicas e de parte da água de amassamento, aplicou-se vaselina (em pasta) na face dos moldes do Vicat Modificado, como selante entre a tampa e o molde.

As reações entre o cimento e a água são as causas básicas da pega da mistura, de modo que a norma prevê somente a determinação do início e do fim de pega em pastas de consistência normal. Com a incorporação de maior quantidade de água e/ou de outros materiais (cinza e/ou casca), há uma mudança no comportamento físico-químico da pasta de cimento, de modo que os tempos de início e de fim de pega também se modificam.

Partiu-se do princípio de que a pasta pura utilizada na pesquisa (cimento + água + acelerador de pega CaCl_2) representasse o padrão de comportamento desejado. Quando comparada com outras pastas (adição de materiais como cinza e/ou casca), poder-se-ia evidenciar os efeitos (isolados ou em interações) destes materiais (cinza e/ou casca) no comportamento químico-mecânico da pasta.

Os efeitos da adição de materiais na pasta podem ser de origem química, como é o caso da presença dos extrativos inibidores da casca de arroz, ou de origem mecânica, como é o caso da redução da plasticidade da pasta pela absorção de água livre de amassamento, redução do calor medido (absorção de parte do calor gerado nas reações químicas pela massa de cinza e/ou casca adicionada ao sistema, para o aquecimento global da mistura), entre outros.

Constatou-se de forma tátil que, enquanto a cinza promove a plasticidade, a casca de arroz tende a promover a ancoragem da pasta. No primeiro caso, percebeu-se uma plasticidade maior nas pastas, em função da dimensão reduzida das partículas de cinza (efeito mecânico de redutor de atrito).

No caso da casca de arroz, a ancoragem parece ser devida a uma combinação de efeitos de ação mecânica (emaranhado de partículas e absorção da água livre de amassamento) com aqueles decorrentes de ação química (pontos de aderência ou adsorção química, associados principalmente à cal aderida, derivada do processo de lavagem das partículas).

Mesmo com misturas onde se fez a adição de fibras de menor dimensão, destaca-se que o modo de determinação do início e do fim de pega, empregando o método de Vicat Modificado, não foi o mais adequado, pois mostrou-se muito dependente da interpretação pessoal do operador (parâmetros subjetivos).

Uma possível forma de determinar os tempos de pega de pastas com adições (cinza e/ou casca) seria equivalente àquele empregado na determinação da resistência à penetração (NBR 9832/1992), mas com maior sensibilidade (0,01 g-força), tendo-se por referência a força aplicada pela agulha de Vicat, de cerca de 3,0 MPa (300g em cerca de 1,0 mm²).

Neste sentido, considera-se que a determinação do Início de Pega utilizando o ultrassom poderia ser mais adequada, na medida em que a componente subjetiva (operador) poderia ser minimizada.

Enfatiza-se o trabalho desenvolvido por Philippidis e Aggelis (2003), com concreto, no qual aos autores afirmaram que a propagação da onda é afetada fortemente pelas propriedades e pelas características elásticas dos materiais constituintes, não devendo ser consideradas medidas de velocidade obtidas por ao menos 15 minutos após a mistura dos componentes, e ao fato de que a coerência da velocidade com os parâmetros avaliados se dá após as primeiras horas, o que inclui o início de pega.

Cerný et al. (2003) também destacaram a importância do uso das técnicas de ultrassom no monitoramento da água livre da pasta de cimento, a qual, combinada com outros ensaios, apontou a coerência entre os parâmetros mecânicos da pasta do cimento (início e fim de pega, entre outros) com o desenvolvimento do calor de hidratação (demonstra características qualitativas e quantitativas da pasta).

A maior dificuldade em determinar os tempos de pega foram nos casos das misturas com partículas definidas como #16 (partículas com dimensões entre 1,19 mm e 0,59 mm), em função da obstrução mecânica promovida pelas fibras, sendo minimizado o problema com o aumento do número de ensaios (aplicação em diferentes posições).

As medidas dos tempos de pega foram realizadas em conjunto com leituras de temperatura e do tempo de propagação da onda ultra-sônica.

A Figura 44 apresenta a superfície de uma pasta submetida ao ensaio de início e fim de pega, destacando-se o tipo de recipiente, em PRFV (Vicat Modificado).



Figura 44: Pasta após o ensaio de Início e Fim de Pega.

No caso da avaliação dos tempos de pega em misturas do tipo compósito, a metodologia empregada foi a NBR 9832/1992 (Concreto e Argamassa – Determinação dos tempos de pega por meio da resistência à penetração).

Efetuar-se adequações para atender às condições do equipamento utilizado, adequações estas referentes ao vaso isotérmico (vaso construído em fiberglass, com isolamento térmico em lã de rocha), dispondo de sensor de temperatura acoplado, para efetuar o monitoramento da evolução da temperatura de hidratação, em conjunto com a UTS.

Para minimizar as perdas térmicas e de água de amassamento, empregou-se vaselina (em pasta, na face dos vasos) como selante, para corrigir possíveis folgas entre a tampa e a face do vaso isotérmico.

Antes de se efetuar o primeiro ensaio de penetração, fez-se a impressão do padrão de pontos dos locais de penetração da agulha, na superfície da massa do compósito, respeitando-se os afastamentos mínimos de 25 mm das bordas e de 15 mm entre impressões da agulha.

A Figura 45 apresenta a sequência de preparo e um exemplo do ensaio.



Figura 45: Etapas do ensaio de resistência à penetração: compactação, marcação e ensaio.

Para determinar a força aplicada na penetração de 25 mm (em 10 segundos) da agulha (6,3 mm de diâmetro) na massa do compósito, utilizou-se a prensa instrumentada com célula de carga de 500 kgf (sensibilidade de 50 g) e sensor de deslocamento (régua eletrônica com precisão de 0,005 mm). O sistema garantiu a qualidade dos dados coletados, minimizando a influência do operador nos resultados.

Como o início de pega da pasta pura de cimento (sem casca e sem cinza) com acelerador de pega, surge a partir de 135 minutos, reduzindo-se para 105 minutos quando há adição de 35% de cinza (dados baseados em corpos-de-prova cilíndricos), considerou-se que os ensaios de resistência à penetração, realizados em até 60 minutos após a mistura com a água (tempo inferior ao início do enrijecimento da pasta de cimento), evidenciavam valores de

resistência associados ao comportamento mecânico da casca de arroz, relativos a um grau de adensamento e de umidade das partículas da casca de arroz.

A Figura 46 apresenta orifícios característicos observados nas fases iniciais e após o enrijecimento da mistura. Com o enrijecimento da pasta do cimento, verificou-se a ruptura das fibras, de forma cisalhante, de modo que a impressão da agulha não apresenta bordas irregulares.



Figura 46: Orifício característico do ensaio de resistência à penetração.

A Figura 47 apresenta um gráfico referente ao valor de um dos pontos do ensaio de resistência à penetração para o material compósito 10 mm com adição de 35% de cinza.

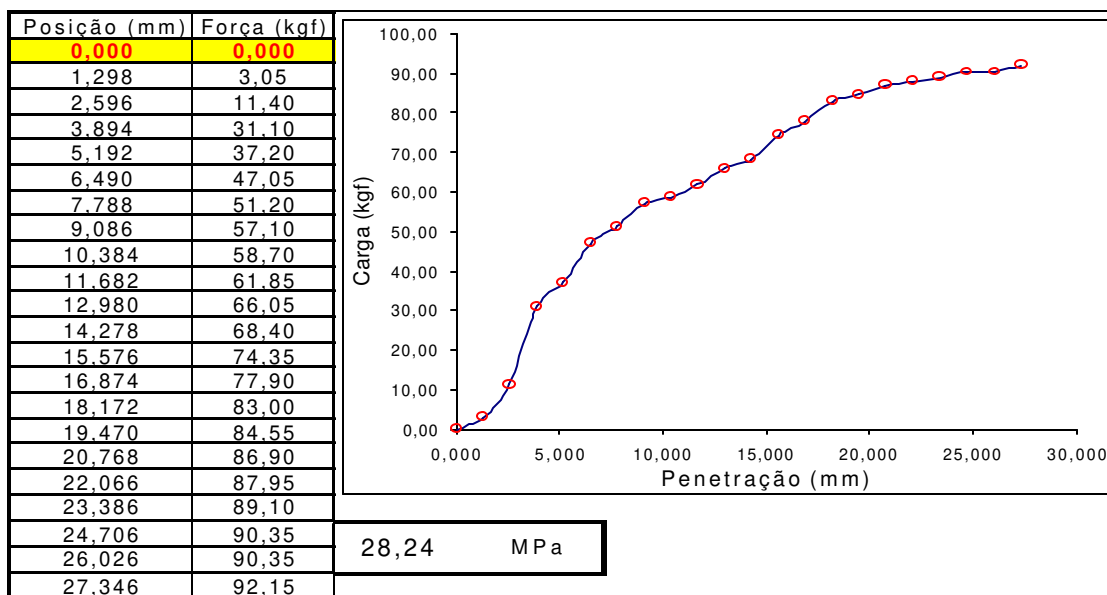


Figura 47: Ensaio de resistência à penetração: um dos pontos do compósito 10 mm-35%.

A Figura 48 apresenta um gráfico com a dispersão dos pontos obtidos nos ensaios de resistência à penetração, plotados sobre o gráfico de evolução da temperatura de hidratação. A equação de regressão apresentada é do tipo exponencial (intervalo de tempo entre 0 h e 14 h).

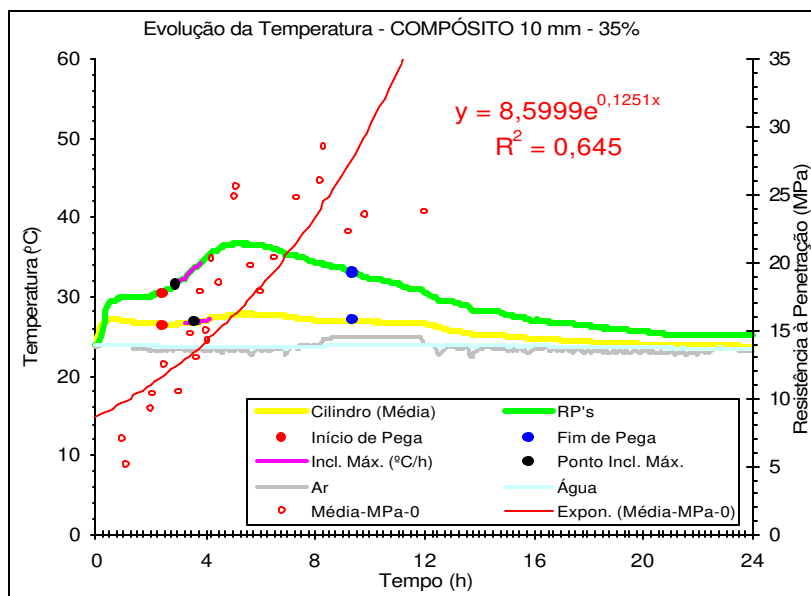


Figura 48: Dispersão dos pontos do ensaio de resistência à penetração.

A escolha deste tipo de equação de regressão deveu-se ao fato de a mesma representar, da melhor forma possível, o comportamento dos pontos coletados nos ensaios (em relação aos formatos disponíveis no aplicativo Excell®), mais especificamente em relação aos valores iniciais e aos valores pós-fim de pega.

A escolha desse procedimento deveu-se pela necessidade de:

- 1) Representar a tendência de crescimento no pós-fim de pega, ou seja, a equação não interrompe sua trajetória de ascensão (muito comum nas expressões polinomiais de segunda ordem, ou superior) em até 24-72 h;
- 2) Representar os valores iniciais, superiores a zero devido à casca de arroz (expressões de potência e expressões logarítmicas, iniciam em valores menores que zero);
- 3) Possuir coeficiente de determinação (R^2) superior a 0,50;
- 4) Poder representar todas as misturas avaliadas.

Com base nestes critérios, definiu-se a equação de regressão do tipo exponencial como padrão, apesar de a norma NBR 9832/1992 recomendar o emprego da equação de regressão do tipo linear.

Destaca-se que a norma NBR 9832/1992 faz referência ao emprego de material granular (alta resistência mecânica, se comparado com a casca de arroz), cuja resistência à penetração é devida ao atrito intergranular (entrosamento das partículas), que aumenta na medida em que a pasta de cimento enrijece o arranjo da estrutura granular.

No caso dos compósitos, a casca de arroz possui baixa resistência mecânica, com alta deformabilidade, de modo que a resistência do compósito é atribuída principalmente ao enrijecimento da pasta de cimento.

Como os valores de resistência à penetração calculados com base na equação de regressão do tipo exponencial são sempre positivos, o que é coerente com os dados experimentais, adotou-se uma nova curva, denominada AJUSTE, para expressar o comportamento inicial da pasta, com valor inicial igual a zero, tendo-se calculado os demais valores de forma proporcional aos valores calculados pela equação de regressão (exponencial).

Desta forma, o tempo necessário para atingir o início ou o fim de pega foram determinados indiretamente através da equação de AJUSTE, tendo a origem correspondente ao valor 0,00 (Zero), com valores subseqüentes calculados através da expressão (4):

$$Val\_AJ_X = Val\_AJ_{X-1} + (ER_X - ER_{X-1}) \quad (4)$$

onde:

Val_AJ_X = Valor da curva de AJUSTE na referência de tempo “X”;

Val_AJ_{X-1} = Valor calculado da curva de AJUSTE na referência de tempo “X-1” (ou 0,00);

ER_X = Valor calculado da Equação de Regressão na referência de tempo “X”;

ER_{X-1} = Valor calculado da Equação de Regressão na referência de tempo “X-1”.

Assim, se os valores calculados com base na equação de regressão (exponencial) exprimem uma tendência da evolução da resistência (valores iniciais maiores que zero).

De maneira análoga, a curva denominada AJUSTE contemplou a tendência de crescimento da resistência dada pela equação de regressão (exponencial) do compósito (Figura 48), procurando representar a evolução da resistência do compósito, atribuída ao enrijecimento da pasta pela interação cimento-cinza-casca.

Assim, os tempos de pega foram determinados considerando-se o valor calculado através da curva de AJUSTE, para os valores de resistência à penetração o mais próximo possível de 3,4 MPa (início de pega) e 27,6 MPa (fim de pega).

Aos valores calculados do tempo para o início de pega (IP_tempo) foram associados os elementos de análise temperatura no início de pega (IP_Temp) e a VPU no início de pega (IP_Vel), obtidos de medições efetuadas diretamente nos cilindros de mistura.

A Figura 49 apresenta o gráfico do compósito 10 mm - 35%, onde uma das curvas refere-se à equação de regressão exponencial (e coeficiente de determinação R^2) e, a outra curva, denominada de AJUSTE, refere-se aos valores teóricos de resistência à penetração.

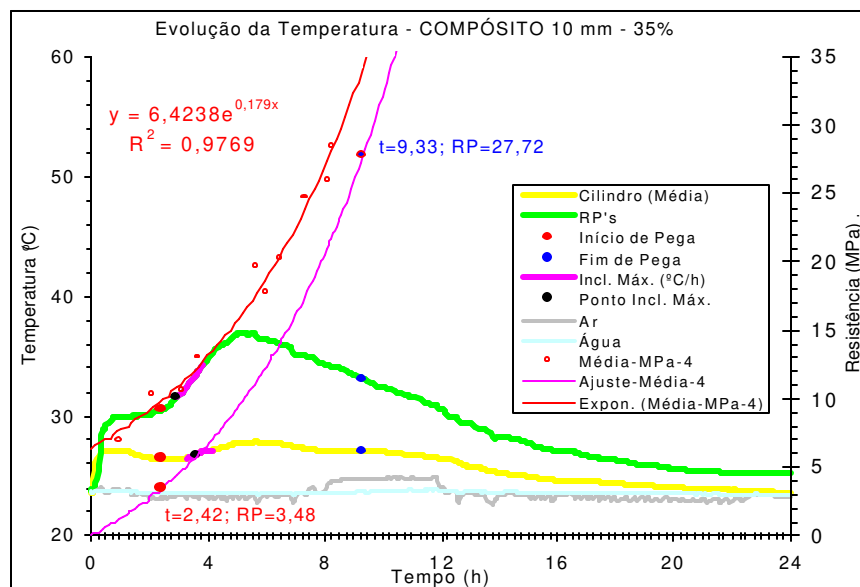


Figura 49: Curva de AJUSTE: estimativa da rigidez da pasta, com evolução da interação cimento-cinza-casca.

A curva denominada AJUSTE refere-se aos valores de resistência à penetração calculados (teóricos), partindo do pressuposto de que a pasta de cimento assume valores de resistência iniciais iguais a zero, tendo-se calculado os demais valores por proporcionalidade entre os valores obtidos através da equação de regressão (exponencial), ajustados à uma origem de valor igual a zero.

O objetivo da curva denominada AJUSTE foi o de destacar o enrijecimento da pasta de cimento nos primeiros instantes, assumindo um comportamento de tendência similar à interação pasta-casca-cinza traduzido pela equação de regressão exponencial.

3.2.5. Relativos ao ensaio dos corpos-de-prova cilíndricos

O procedimento adotado para realizar o ensaio dos corpos-de-prova cilíndricos foi único, independentemente do tipo de mistura (pasta ou compósito). Assim, aos 28 dias de idade, após efetuar as medidas diárias no cilindro (massa e tempo de propagação da onda ultra-sônica/VPU), o mesmo recebia marcações relativas ao comprimento dos corpos-de-prova e uma numeração sequencial de 1 a 8, descontando-se as extremidades, consideradas como descarte. A Figura 50 apresenta cilindros com as marcações dos pontos de corte dos corpos-de-prova (CP's) e dos descartes.



Figura 50: Cilindros de mistura: delimitação dos cortes (10 mm-20% e 10 mm -0%).

A escolha da idade de 28 dias para os ensaios deveu-se principalmente ao fato de não se ter melhores informações sobre o comportamento da mistura cimento-cinza-casca pois todos os ensaios preliminares foram baseados na norma NBR 5752/1992 (Materiais Pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento), que indica a idade de 28 dias para os ensaios (recomenda condições especiais de cura) e, pelas indicações da literatura, que apontam a necessidade de maior tempo de cura em função das possíveis reações cimento-cinza da casca de arroz.

Considerou-se que aos 28 dias de idade a mistura avaliada (pasta ou compósito) estaria apresentando uma estabilidade de comportamento que poderia não ser observada em idades inferiores. Em seguida às marcações, o cilindro foi cortado (mesa de corte com disco diamantado), obtendo-se os corpos-de-prova cilíndricos destinados aos ensaios de compressão simples e de tração por compressão diametral.

Dos corpos-de-prova (Figura 51), anotavam-se as medidas de massa, altura, diâmetro (ensaio à tração por compressão diametral: nas extremidades, na direção do plano de ruptura; compressão simples: na altura média do corpo-de-prova, em duas direções perpendiculares) e o tempo de propagação da onda ultra-sônica (ao longo da altura do corpo-de-prova, que é a sua maior dimensão).



Figura 51: Determinação das dimensões dos corpos-de-prova cilíndricos: diâmetro, para o ensaio de tração por compressão diametral, e altura.

→ **Ensaio à tração por compressão diametral:**

Os corpos-de-prova com numeração ímpar (1, 3, 5 e 7) foram ensaiados à tração por compressão diametral, com base na metodologia descrita na NBR 7222/1994 (Argamassa e Concreto: Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos), tendo-se adotado uma velocidade de carregamento de $(0,05 \pm 0,02)$ MPa/s, para corpos-de-prova cilíndricos medindo 50 mm (diâmetro) x 100 mm (altura).

Especificamente no caso do ensaio dos corpos-de-prova cilíndricos de compósito, houve a necessidade de se empregar duas tiras de madeira, superpostas, em cada uma das posições (diametralmente opostas).

Após o ensaio, coletava-se uma amostra para determinar a umidade do corpo-de-prova ensaiado, sendo considerado que a média dos quatro (04) valores de umidade dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral fosse representativa do cilindro e de todos os corpos-de-prova dele obtidos (incluindo àqueles ensaiados à compressão simples).

A Figura 52 apresenta um corpo-de-prova após o ensaio e o seu gráfico de tração por compressão diametral.

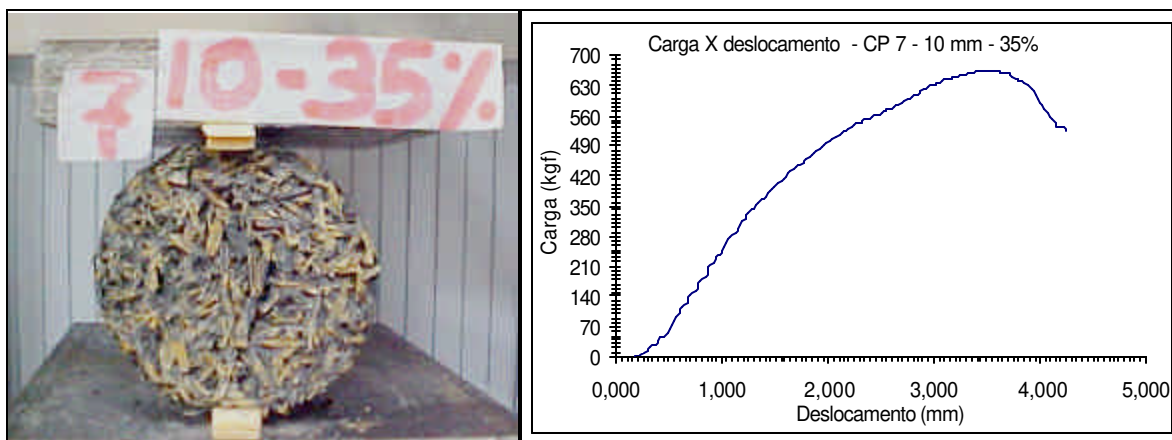


Figura 52: Corpo-de-prova e gráfico do ensaio de tração por compressão diametral.

→ Ensaio à compressão simples:

Os corpos-de-prova com numeração par (2, 4, 6 e 8) foram ensaiados à compressão simples, com base na metodologia descrita na NBR 7215/1996.

Antes de ensaiar os corpos-de-prova à compressão simples, foram feitas anotações referentes às medidas dos corpos-de-prova (massa, comprimento, diâmetro e tempo de propagação da onda ultra-sônica/VPU).

Em seguida, foram capeados (pasta de enxofre+caulin) e, posteriormente, ensaiados, tendo-se adotado uma velocidade de carregamento $(0,25 \pm 0,05)$ MPa/s para corpos-de-prova cilíndricos medindo 50 mm (diâmetro) x 100 mm (altura). A Figura 53 apresenta um corpo-de-prova após o ensaio e o seu gráfico de compressão simples.

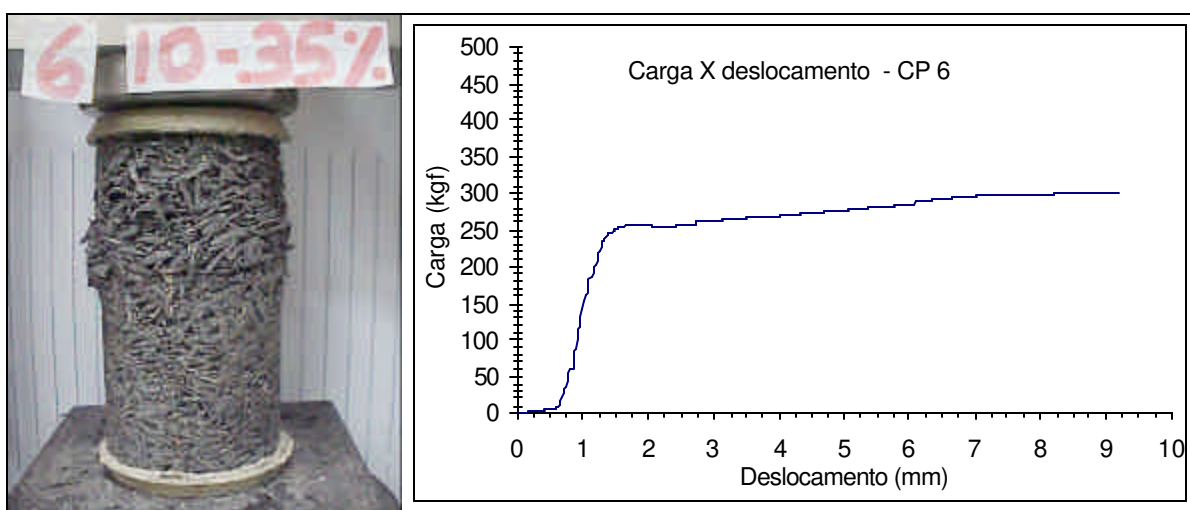


Figura 53: Corpo-de-prova e gráfico do ensaio de compressão simples (10 mm-35%).

Os dados referentes às cargas de ruptura foram convertidos em unidade de tensão (MPa), sendo utilizados nas comparações e correlações entre as misturas.

→ **Massa Específica Aparente (MEAp)**: Determinou-se a massa específica aparente dos corpos-de-prova cilíndricos com base nas equações tradicionais que relacionam a massa do corpo-de-prova com o seu volume.

→ **Módulo de Elasticidade dinâmico (MOEd)**: Determinou-se o módulo de elasticidade dinâmico (ou Constante Elástica), associando-se a massa específica aparente do corpo-de-prova cilíndrico com a sua respectiva VPU, ambos medidos aos 28 dias de idade. A fórmula de cálculo empregada foi referenciada no **item 2.7** como expressão (1).

3.2.6. Métodos relativos ao ensaio das placas.

Ao 28 dias de idade, após efetuarem-se as medições diárias (massa e tempo de propagação da onda ultra-sônica/VPU), as placas foram cortadas, sendo delas extraídos corpos-de-prova para os seguintes ensaios:

→ **Ensaio de Flexão Estática**: De cada placa (ou repetição) foram cortados dois corpos-de-prova, um deles para ser ensaiado na condição seca, e outro na condição úmida (aos 29 dias de idade, após um tempo de imersão em água de 24 horas), totalizando três (03) repetições (por mistura) para cada uma das condições (seca ou úmida) no ensaio.

O comprimento dos corpos-de-prova variou em função da espessura das placas, adotando-se como referência a norma **ASTM D1037-78/1982** (*Evaluating the properties of wood-based fiber and particle panel materials*), na qual o vão livre deve corresponder a 24 vezes a espessura da placa, considerando-se a espessura como uniforme, com base na medida obtida na região onde se pressupôs a ocorrência de ruptura, que é geralmente o centro do vão.

A Figura 54 apresenta um esquema do corte das placas (13 mm de espessura), em função da sua espessura. Destaca-se a posição dos transdutores de ultra-som, empregados na EVPU (mesmo sentido usado nos corpos-de-prova que foram ensaiados à flexão estática).

Na Tabela 17 são apresentados os parâmetros de referência indicados pela norma ASTM D1037-78/1982, em função da espessura da placa. Estes parâmetros serviram de referência na execução dos ensaios de flexão estática, sendo empregado, para os cálculos, os valores reais de espessura e largura.



Figura 54: Esquema do corte das placas para obtenção dos corpos-de-prova e indicação das posições dos transdutores de ultra-som para acompanhar a EVPU.

Tabela 17: Parâmetros de referência empregados no ensaio de flexão estática.

Espessura (mm)	Velocidade (mm/min)	Vão (L, em mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)
13	6,5	312	76	362
14	7,0	336	76	386
15	7,5	360	76	410
16	8,0	384	76	434

A Figura 55 apresenta o esquema de carregamento estático, sendo efetuado o registro do ensaio através de sistema de aquisição de dados, com coleta simultânea da carga aplicada (célula de carga – sensibilidade de 5 g-força) e do deslocamento do cabeçote de ensaio (transdutor linear - precisão de 5 μ m) a cada intervalo de tempo, fixado em 500 milissegundos.

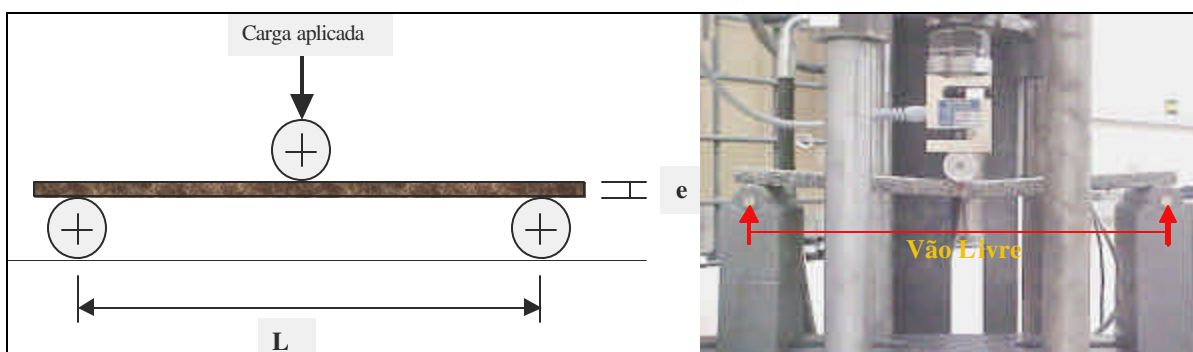


Figura 55: Esquema estático de carregamento e ensaio.

Para o ensaio dos corpos-de-prova na condição úmida (24 h de imersão), considerou-se a espessura do corpo-de-prova antes do processo de imersão em água, para a determinação do vão de ensaio.

Após o ensaio de flexão, efetuava-se a extração de corpos-de-prova (Figura 56) para a determinação da umidade (U %) da placa ensaiada.

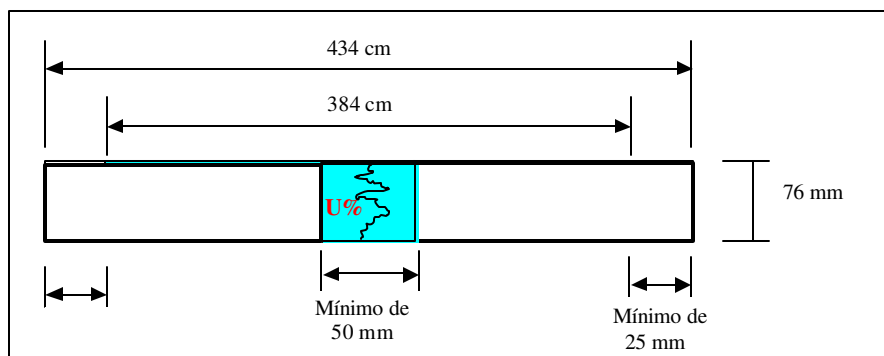


Figura 56: Umidade: extração de corpo-de-prova - placa com 16 mm de espessura.

➔ **Ensaio de Compressão Paralela à superfície (CPS):** Segundo a norma ASTM D1037-78/1982, os corpos-de-prova para o ensaio de compressão paralela à superfície devem possuir cerca de 100 mm de altura e 25,4 mm de largura, com espessura (entre 10 e 25 mm) correspondente à da placa, no caso, variando entre 13 mm e 16 mm. A velocidade de carregamento adotada foi a mesma utilizada no ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos. Os corpos-de-prova obtidos pelo corte das placas (Figura 57) foram ensaiados na condição seca e na condição úmida (aos 29 dias de idade, após imersão em água por 24 h). Antes de serem ensaiados, foram determinadas a massa, o comprimento, a largura, a espessura e a VPU (medida ao longo do seu maior eixo, que é a altura (ZUCCO, 1999)).

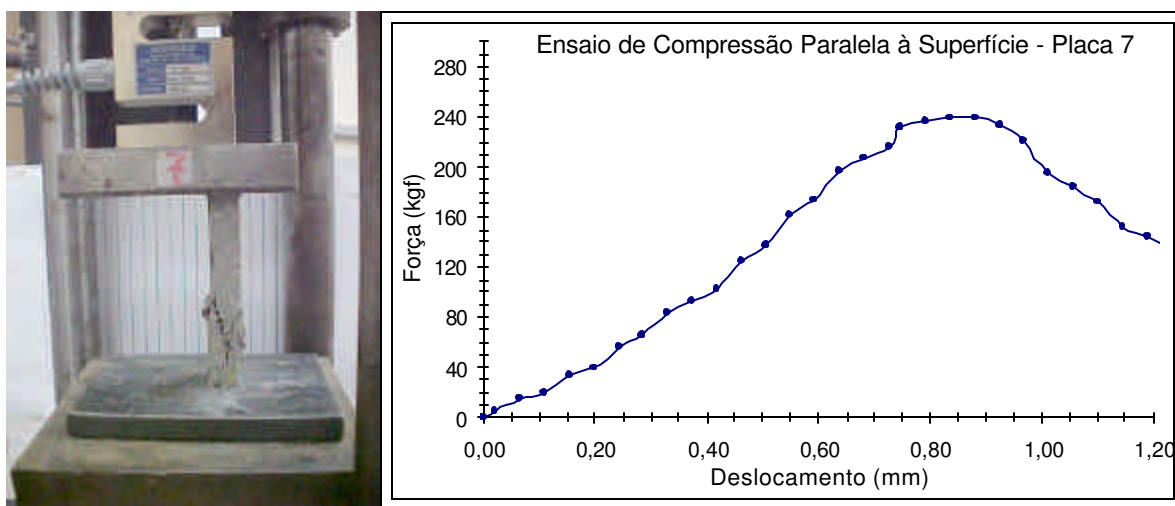


Figura 57: Corpo-de-prova e gráfico do ensaio à compressão paralela à superfície, na condição “seca” (10 mm-35%).

➔ **Ensaio de absorção de água e de variação dimensional das placas:** Em função da impossibilidade de obter peças nas dimensões recomendadas para os ensaios de variação dimensional (76 mm x 304 mm) e de absorção (304 mm x 304 mm ou, de 152 mm x 152 mm), optou-se, com base no trabalho de Zucco (1999), por efetuar os referidos ensaios em corpos-de-prova com dimensões finais de cerca de 76 mm de largura, 152 mm de comprimento e espessura variável, de 13 mm a 16 mm, obtidos a partir do corte das placas (Figura 54).

Os corpos-de-prova extraídos das placas (condição seca) foram numerados, pesados e determinadas as suas dimensões (comprimento, largura e espessura). Em seguida, depositados em recipiente com água, na posição vertical, afastados entre si de forma conveniente (cerca de 10 mm) e permanecendo em imersão por um período de 2 h. A Figura 58 apresenta as formas de obtenção das medidas referentes ao comprimento, largura e espessura das placas.



Figura 58: Ensaio de absorção e variação dimensional: determinação de medidas.

Ao final do período de 2 h, os corpos-de-prova eram retirados e envoltos em toalha de algodão para a remoção do excesso de umidade superficial, sendo então efetuadas as medidas de massa, comprimento, largura e espessura, retornando, em seguida, para o banho de imersão.

O processo foi repetido para os tempos de imersão de 24 h e de 120 h, havendo o cuidado de trocar a água empregada no ensaio uma vez ao dia, até encerrar-se o ciclo de 120 h. Encerrado o experimento, os corpos-de-prova foram secos em estufa, para a determinação da umidade. No cálculo das variações dimensionais, utilizou-se a expressão (5):

$$V_D = \frac{(D_u - D_s)}{D_s} \cdot 100 \quad (\%) \quad (5)$$

onde:

V_D = Variação dimensional (comprimento, largura, espessura ou volume), em porcentagem;

Du = Dimensão da peça (comprimento, largura, espessura ou volume), na condição de umidade em acordo com o tempo de imersão;

Ds = Dimensão da peça (comprimento, largura, espessura ou volume), na condição seca (em condições de laboratório: umidade relativa de $90 \pm 5^\circ\text{C}$ e temperatura de $22 \pm 3^\circ\text{C}$).

No ensaio de absorção de água, a norma ASTM D1037-78/1982 indica que a expressão dos resultados deve ser referenciada em porcentagem de volume e em porcentagem de massa. Considera, ainda, a densidade da água como sendo $1,0 \text{ g/cm}^3$ (temperatura ambiente controlada em $20 \pm 3^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $60 \pm 1\%$).

Para expressar os resultados do incremento em absorção de água, em porcentagem de massa ou de volume, utilizou-se a expressão (6):

$$ABS = \left[\frac{(CP_U - CP_S)}{CP_S} \right] \cdot 100 \quad (\%) \quad (6)$$

onde:

ABS = Porcentagem relativa de absorção de água, em massa ou em volume;

CP_U = Corpo-de-prova nos diferentes tempos de imersão (úmido), em massa ou em volume.

CP_S = Corpo-de-prova seco em estufa, em massa ou em volume.

3.2.7. Métodos relativos à determinação do teor de umidade

A determinação do teor de umidade dos materiais (matérias-primas, pastas e compósitos) foi realizada com base na norma NBR 9939/1987 (Agregados: Determinação do teor de umidade total, por secagem, em agregado graúdo).

A cinza, originalmente com 3,1% de umidade, foi processada e estocada em embalagem hermética de modo que a variação de sua umidade foi considerada desprezível.

A casca de arroz lavada em solução de cal foi, em sua última etapa de secagem, seca em estufa, sendo posteriormente acondicionada em embalagem hermética de modo que sua variação também foi considerada desprezível.

O cimento foi recebido e ensacado imediatamente, de modo que a variação na sua umidade foi considerada desprezível.

A umidade dos corpos-de-prova (pastas e compósitos) foi determinada utilizando-se a expressão (7):

$$h = \frac{(M_I - M_F)}{M_F} \cdot 100 \quad (\%) \quad (7)$$

onde:

h = teor de umidade, em porcentagem;

M_I = massa inicial da amostra (úmida), em g

M_F = massa final da amostra seca em estufa, em g

3.2.8. Métodos relativos à análise estatística.

Tendo em vista a complexidade das interações almejadas, de correlação entre as **FASES I, II, III e IV**, optou-se por uma avaliação estatística desenvolvida por profissional habilitado.

Avaliações de caráter individualizado foram desenvolvidas empregando-se como ferramenta de análise o software STATGRAPHICS Plus (1999), tendo submetido os dados coletados à análise de variância (ANOVA), para avaliar os dois componentes das misturas de interesse, que foram o **FATOR CASCA**, representado pelas faixas de distribuição (#16, #30, #50, #100 e #200) e distribuições em tamanho (definidas como 5 mm, 10+5 mm e 10 mm), e o **FATOR CINZA**, representada pelos diferentes percentuais de adição. No caso da Fase IV (referente às placas prensadas), outro FATOR foi incorporado às análises: a **CONDIÇÃO** (seca ou úmida) do corpo-de-prova (relativo à cada mistura) no ensaio.

Para a comparação das médias empregou-se o teste de TUKEY, com um nível de significância de 0,05 (95% de confiança), para comparar os níveis dentro de cada fator, associados a cada variável resposta (índices físicos, químicos e mecânicos).

As tabelas e gráficos do texto, relativas às análises estatísticas empregando-se o software STATGRAPHICS Plus (1999), são apresentadas da forma como obtidas. Destaca-se que os processos de cálculo relativos às análises da variância, da comparação entre médias (Teste Tukey), da correlação entre os elementos de análise (Pearson) e da regressão, são os especificados pelo software, constando em seu manual de utilização.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultados dos ensaios da FASE I – Estudo das PASTAS envolvendo a adição de cinza (0%, 5%, 20% ou 35%) e casca de arroz (7,5%; faixas de distribuição em tamanho de casca avaliadas: #16, #30, #50, #100 e #200).

4.1.1. Resultados relativos à avaliação do comportamento químico das misturas.

O comportamento químico das misturas foi avaliado através dos parâmetros Área sob a curva, inclinação máxima, ponto de inclinação máxima, tempo para atingir a temperatura máxima e, a temperatura máxima obtidos de curvas de hidratação (Figura 59).

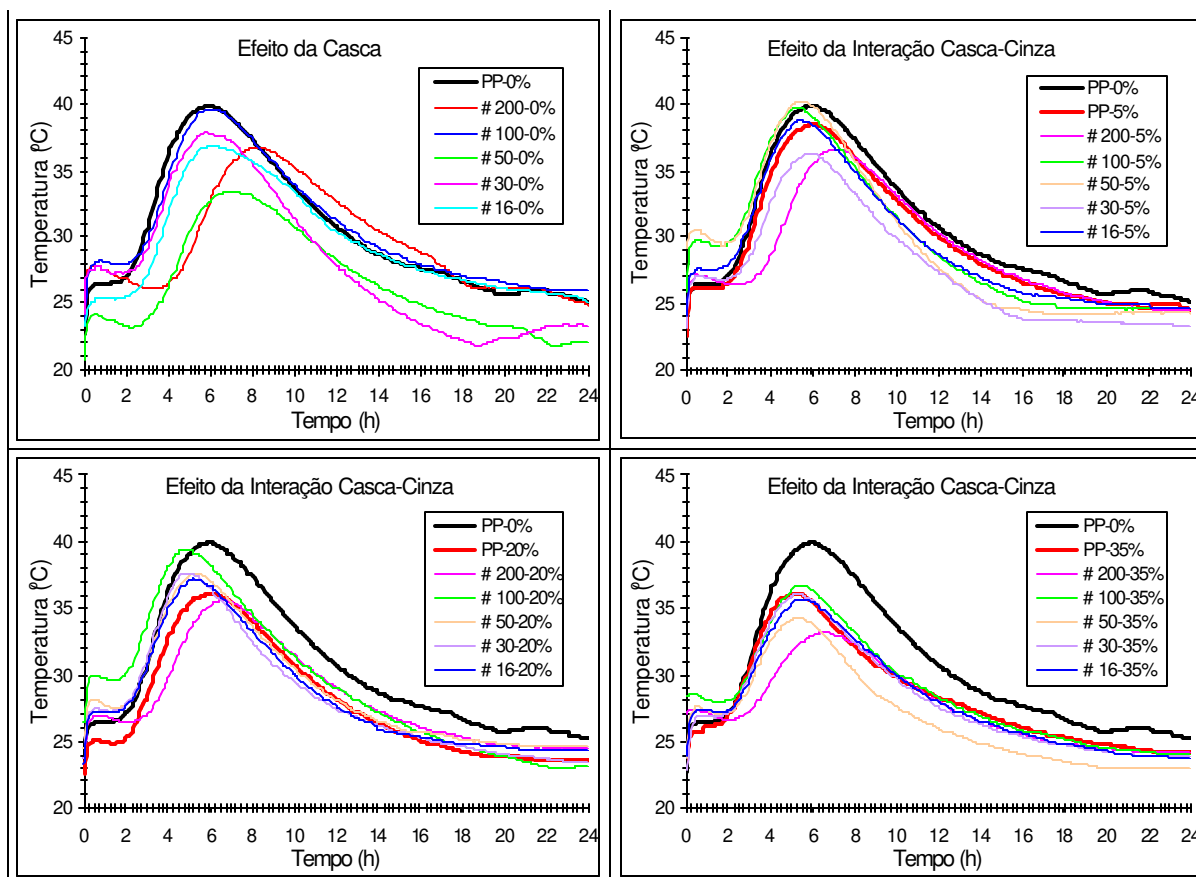


Figura 59: Padrões de referência e efeitos da interação casca-cinza nas diferentes faixas de distribuição em tamanho de casca.

Verificou-se, graficamente, que adições de casca e/ou cinza promoveram uma interferência nos processos químicos de hidratação. A existência ou não de diferença significativa entre as curvas foi verificada através de análise estatística simplificada (Statgraphics Plus, 1999) dos parâmetros numéricos delas obtidos (Teste de Tukey, para comparação entre médias, a um nível de confiança de 95%).

Na Tabelas 18 são apresentados os valores médios dos parâmetros utilizados, de modo a destacar os efeitos da CASCA, da CINZA e, da interação CASCA-CINZA, tendo como padrão de referência relativo, o percentual de adição de CINZA (PP-0%, como padrão geral e para as faixas de distribuição em tamanho de casca com 0% de adição de cinza; PP-5%, para as faixas de distribuição em tamanho de casca com 5% de adição de cinza; PP-20%, para as faixas de distribuição em tamanho de casca com 20% de adição de cinza; PP-35%, para as faixas de distribuição em tamanho de casca com 35% de adição de cinza).

Tabela 18: **FASE I - Avaliação química** (Médias).

MÉDIAS	PP-0%	#200-0%	# 100-0%	# 50-0%	# 30-0%	# 16-0%
AREA (°C.h)	43813	42560	44148	38122	40205	42397
Incl. Max. (°C/h)	5,54	4,01	4,99	4,09	4,69	4,83
Ponto Incl. Max.(°C/h)	0,58	0,43	0,48	0,40	0,48	0,45
Tempo p/ TMax. (h)	5,88	8,10	5,96	6,85	5,75	5,92
Temperatura Max. (°C)	39,88	36,68	39,68	33,45	37,85	36,90
MÉDIAS	PP-5%	#200-5%	# 100-5%	# 50-5%	# 30-5%	# 16-5%
AREA (°C.h)	42495	41568	42486	42123	39716	42115
Incl. Max. (°C/h)	5,07	4,01	3,71	5,02	4,31	4,85
Ponto Incl. Max.(°C/h)	0,52	0,43	0,48	0,50	0,45	0,50
Tempo p/ TMax. (h)	5,90	7,00	5,17	5,35	5,65	5,29
Temperatura Max. (°C)	38,48	36,58	39,63	40,13	36,25	38,70
MÉDIAS	PP-20%	#200-20%	# 100-20%	# 50-20%	# 30-20%	# 16-20%
AREA (°C.h)	40105	40747	42253	41390	40613	40859
Incl. Max. (°C/h)	4,23	3,60	4,75	4,66	4,69	4,36
Ponto Incl. Max.(°C/h)	0,45	0,40	0,48	0,45	0,45	0,45
Tempo p/ TMax. (h)	5,92	6,48	4,71	5,19	4,83	5,17
Temperatura Max. (°C)	36,13	35,50	39,38	37,50	37,60	37,18
MÉDIAS	PP-35%	#200-35%	# 100-35%	# 50-35%	# 30-35%	# 16-35%
AREA (°C.h)	40712	39648	41108	38441	40266	40405
Incl. Max. (°C/h)	4,47	2,62	3,71	3,52	4,06	3,65
Ponto Incl. Max.(°C/h)	0,45	0,30	0,38	0,35	0,45	0,40
Tempo p/ TMax. (h)	4,94	6,46	5,31	5,15	5,17	5,42
Temperatura Max. (°C)	36,08	33,13	36,73	34,28	36,05	35,65

OBS.: #200 = 0,074 mm; #100 = 0,149 mm; #50 = 0,297 mm; #30 = 0,59 mm e #16 = 1,19 mm.

Nas análises estatísticas, os valores das aberturas das peneiras em milímetros foram associados à malha correspondente. Assim, a peneira padrão ABNT com abertura de 0,074 mm, que corresponde à #200 mesh, foi apresentada e empregada nos gráficos e avaliações estatísticas de forma simplificada com a notação 0,074 (#200).

Empregando-se este artifício, foi possível obter gráficos nos quais a referência para as comparações, padrão de referência (PR), sempre foi mantida à esquerda do observador (primeira coluna da esquerda para a direita), sendo que 0 (PR) refere-se à média das pastas padrão de referência (sem receber adição de casca).

No caso das avaliações envolvendo adições de cinza, para obter nos gráficos um escalonamento dos percentuais de adição da cinza, houve a necessidade de se adotar o valor 05% como representativo da adição de 5% de cinza. A referência para as comparações sempre foi mantida à esquerda do observador.

4.1.1.1 Avaliação do parâmetro Área sob a curva (Área, em °C.h).

A Tabela 19 apresenta a análise da variância (ANOVA), para o parâmetro **Área sob a curva**, através da qual verificou-se a existência de diferença significativa no parâmetro Área sob a curva, nos fatores CASCA, CINZA e, na interação CASCA-CINZA.

Tabela 19: ANOVA do parâmetro Área sob a curva (Area).

Analysis of Variance for Area - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	7,16981E7	5	1,43396E7	12,93	0,0000
B:CINZA	4,83763E7	3	1,61254E7	14,54	0,0000
INTERACTIONS					
AB	8,55171E7	15	5,70114E6	5,14	0,0000
RESIDUAL	7,98655E7	72	1,10924E6		
TOTAL (CORRECTED)	2,85457E8	95			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A seguir, são apresentados os resultados relativos à avaliação de cada fator, da interação entre fatores, apresentando igualmente considerações sobre o parâmetro avaliado.

A) Efeito da adição de CASCA.

A Tabela 20 apresenta a análise do fator CASCA, onde se verificou que a média das faixas de distribuição em tamanho #100 e #16 não diferem significativamente da média das pastas referência - 0 (PR), sem adição de casca. Esta reduzida interferência da faixa de distribuição em tamanho #16 foi atribuída a uma maior dificuldade dos extrativos migrarem do interior da casca para a água de amassamento, quando comparada às faixas de distribuição em tamanho #200, # 30 e # 50, compostas de partículas com dimensão inferior a da #16.

Tabela 20: Análise do fator CASCA: parâmetro Area: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Area by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
0,297 (# 50)	16	40018,9	X
0,59 (# 30)	16	40199,9	XX
0,074 (# 200)	16	41130,7	XX
1,19 (# 16)	16	41443,8	XX
0 (PR)	16	41781,3	XX
0,149 (# 100)	16	42498,6	X

Faixas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

No caso da média da faixa de distribuição em tamanho #100, supõe-se que a dupla lavagem tenha promovido uma melhor remoção dos extrativos inibidores da pega e uma maior presença de cal aderida à casca, o que promoveu o desempenho quantitativo superior à média das pastas referência -0 (PR), não havendo, contudo, diferença significativa entre estas médias.

A Tabela 21 apresenta a análise do fator CINZA, onde se verificou que a média das pastas que receberam adição de 5% de cinza, não diferiu significativamente da média das pastas sem adição de cinza (0%).

Tabela 21: Análise do fator CINZA: parâmetro Area: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Area by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
35%	24	40096,5	X
20%	24	40994,4	X
05%	24	41750,5	XX
0%	24	41874,1	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

Adições de 20% e de 35% de cinza apresentaram médias que diferiram significativamente da média das pastas sem adição de cinza (0%), o que se atribuiu ao efeito físico de absorção de parte do calor gerado nas reações de hidratação do cimento, pela cinza, em função do aumento da massa no sistema. Avaliando-se os valores apresentados, foi possível evidenciar uma tendência de redução, no parâmetro área sob a curva, com a elevação dos percentuais de adição de cinza.

A Figura 60 apresenta gráficos da interação casca-cinza, onde se evidencia o comportamento das médias das diferentes faixas de distribuição em tamanho de casca, em função dos percentuais de adição de cinza.

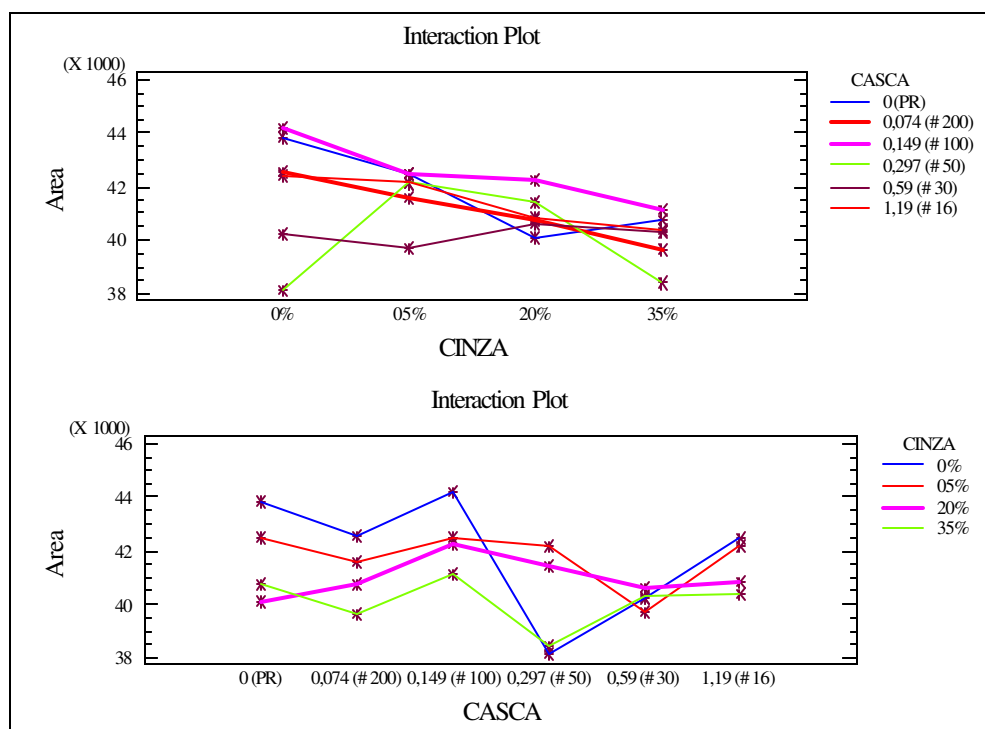


Figura 60: Interação casca-cinza: parâmetro **Area**.

Destaca-se que a faixa de distribuição em tamanho de casca #100 apresenta resultados numéricos superiores àqueles observados nas demais faixas (não diferindo estatisticamente da faixa de distribuição em tamanho # 16 e da média das pastas referência - 0 (PR), sem adição de casca), indicando que a dupla lavagem em solução de cal promoveu melhorias no comportamento químico das misturas com casca de faixa de distribuição em tamanho de #100. O comportamento da faixa de distribuição em tamanho de casca #200 pode ser um indicador do efeito de adição de massa no sistema, uma vez que se espera maior

eficiência do tratamento de lavagem em solução de cal (LSC) em partículas de menor dimensão, pela maior ação da cal na remoção de extrativos, em consequência de sua penetração mais eficiente nas estruturas celulares da casca. Entre as faixas de distribuição em tamanho de casca avaliadas, verificou-se que a faixa de distribuição em tamanho #50 apresentou comportamento diferenciado, por apresentar a menor área sob a curva, indicando um efeito negativo mais intenso do que aquele observado nas demais faixas, efeito este que é suprimido quando da adição de 5% ou 20% de cinza. No caso da adição de 35% de cinza, não houve diferença significativa em relação à pasta sem adição de cinza (0%), o que se atribuiu ao efeito físico de absorção de parte do calor gerado nas reações de hidratação do cimento, pela cinza, em função do aumento da massa no sistema.

D) Considerações a respeito do parâmetro Área sob a curva de hidratação.

A área sob uma curva pode não representar bem um comportamento, tendo em vista que diferentes formatos de curva podem produzir áreas semelhantes. Quando o objetivo é detectar problemas de incompatibilidade (Figura 61: casca de arroz lavada – L e natural - N), o parâmetro Área sob a curva, convertido em percentual de área (FATOR CA), não deixa dúvidas em relação à sua eficácia como elemento auxiliar de análise.

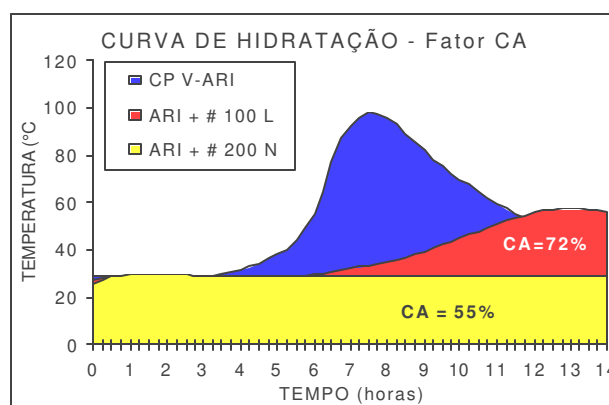


Figura 61: Área sob a curva de hidratação e fator CA.
Fonte: Zucco (1999).

Na presente pesquisa, a casca de arroz foi considerada como sendo compatível com o cimento CP-V-ARI RS, tendo se empregado o parâmetro área sob a curva como elemento de avaliação do comportamento químico.

Contudo, a similaridade no comportamento das curvas dificultou a sua interpretação. As avaliações realizadas, envolvendo o efeito da adição de CASCA no comportamento químico das pastas, apontam que a maioria das faixas de distribuição em tamanho de casca (exceto a faixa de distribuição em tamanho de casca # 100) promoveu redução na área sob a curva de evolução da temperatura de hidratação, podendo tal fato ser atribuído à ação retardante de compostos químicos ainda presentes na casca, não eliminados ou inativados pelo processo de lavagem da casca em solução de cal (Figura 9).

O efeito da dupla lavagem, aplicado à faixa de distribuição em tamanho de casca #100, indica que extrativos ainda presentes na casca podem promover a variabilidade nos resultados, indicando que o processo de lavagem pode ser aperfeiçoado.

Através da avaliação do efeito da adição de CINZA no comportamento químico das pastas, verificou-se que sua adição promoveu redução na área sob a curva de evolução da temperatura de hidratação, podendo-se atribuir tal fato à ação física de adição de massa ao sistema, tendo em vista o fato da cinza promover melhorias, as quais podem ser atribuídas à possível adsorção de compostos químicos de ação retardante, ainda presentes na casca.

4.1.1.2 Avaliação do parâmetro Inclinação Máxima (In_Max, em °C/h)

A Tabela 22 apresenta a análise da variância (ANOVA) para o parâmetro inclinação máxima, que aponta a existência de diferença significativa no parâmetro inclinação máxima, nos fatores CASCA, CINZA e, na interação CASCA-CINZA.

Tabela 22: ANOVA do parâmetro Inclinação Máxima (In_Max).

Analysis of Variance for In_Max - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	13,801	5	2,7602	9,56	0,0000
B:CINZA	14,1441	3	4,71471	16,32	0,0000
INTERACTIONS					
AB	10,784	15	0,718932	2,49	0,0052
RESIDUAL	20,7947	72	0,288815		
TOTAL (CORRECTED)	59,5238	95			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A seguir, são apresentados os resultados relativos a avaliação de cada fator, da interação entre fatores, apresentando-se algumas considerações sobre o parâmetro avaliado.

A) Efeito da adição de CASCA.

A Tabela 23 apresenta a análise do fator CASCA, destacando que a média da faixa de distribuição em tamanho de casca #200 difere significativamente das demais médias, que não diferem significativamente entre si.

Tabela 23: Análise do fator CASCA: parâmetro **In_Max**: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for In_Max by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
0,074 (# 200)	16	3,55875	X
0,149 (# 100)	16	4,28875	X
0,297 (# 50)	16	4,32125	X
1,19 (# 16)	16	4,425	X
0,59 (# 30)	16	4,43875	X
0 (PR)	16	4,8275	X

Faixas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

Esta ausência de diferença significativa entre as médias (exceto #200), sugere que, uma vez superada a fase inicial de inibição atribuída à casca, a velocidade do processo químico de hidratação apresenta alterações que podem ser consideradas como normais, onde a variação pode ser atribuída à interação casca-cinza e/ou adição de massa ao sistema.

O efeito do aumento de massa no sistema é perceptível nas pastas padrão, com apenas adição de cinza (PP-0% = 5,54; PP-5% = 5,07; PP-20% = 4,23 e PP-35% = 4,47).

B) Efeito da adição de CINZA.

A Tabela 24 apresenta a análise do fator CINZA, onde se verifica que a média das pastas com adições de 5% e de 20% de cinza não difere significativamente da média de pastas sem adição de cinza (0%), que é o padrão de referência relativo.

No caso da média das pastas com adição de 35% de cinza, que apresentou diferença significativa em relação às demais médias, atribui-se o fato ao aumento da massa no sistema.

Avaliando-se os valores médios apresentados, verifica-se uma tendência de redução da inclinação máxima, em função da adição de cinza.

Tabela 24: Análise do fator CINZA: parâmetro **In_Max**: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for In_Max by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
35%	24	3,67333	X
20%	24	4,38208	X
05%	24	4,49375	X
0%	24	4,69083	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

Os gráficos de interação evidenciam o comportamento das médias, com destaque para a faixa de distribuição em tamanho de casca #200, que promoveu redução significativa no parâmetro inclinação máxima, sendo um comportamento (redução) similar ao observado na faixa de distribuição em tamanho de casca #16 (Figura 62).

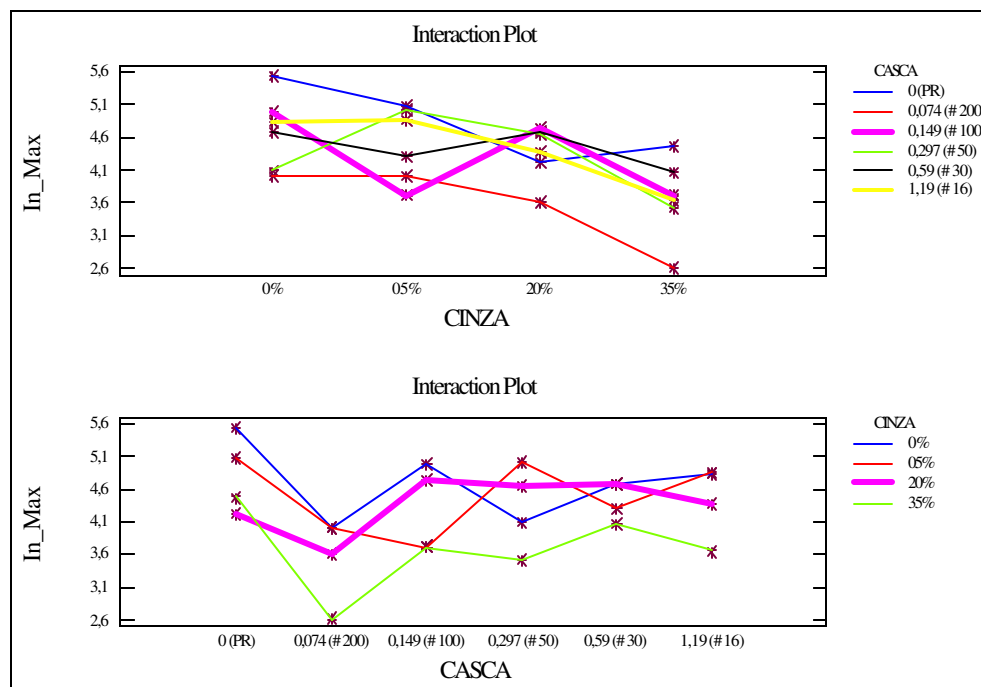


Figura 62: Interação casca-cinza: parâmetro **In_Max**.

Comparando-se os percentuais de adição de 0% e de 35% de cinza, verificou-se que na adição de 35% de cinza ocorreu a maior redução no parâmetro inclinação máxima, e que se atribuiu ao aumento de massa no sistema.

Destaca-se, ainda, que a adição de 20% de cinza promoveu incrementos no parâmetro inclinação máxima, quando se compara a média de cada faixa de distribuição em tamanho de casca (exceto #200) com a pasta de referência relativa (PP-20%).

Com a adição de cinza, houve redução na média do parâmetro inclinação máxima, de 4,23 °C/h (PP-20%) para 3,60 °C/h (#200-20%), redução esta inferior àquela observada nas demais comparações, com destaque para 0% de adição de cinza, cuja redução na média, foi de 5,54 °C/h (PP-0%) para 4,01 °C/h (#200-0%). Tal fato indica que a faixa de distribuição em tamanho de casca #200 foi a que apresentou o maior efeito de redução no parâmetro inclinação máxima.

Estas observações destacam o efeito benéfico da interação casca-cinza, no parâmetro inclinação máxima, quando se emprega o percentual de adição de cinza de 20%, lembrando, contudo, que não se evidenciou diferença significativa entre os percentuais de 0%, 5% e 20% de adição de cinza.

D) Considerações a respeito do parâmetro Inclinação Máxima (°C/h).

A avaliação do efeito da adição de CASCA no comportamento químico das pastas, medido através da Inclinação Máxima das curvas de evolução da temperatura de hidratação, evidencia que, à exceção da média da faixa de distribuição em tamanho de casca #200, as demais médias não diferem significativamente entre si, o que pode ser interpretado como uma indicação de que materiais considerados como compatíveis (casca lavada em solução de cal), podem não apresentar os efeitos evidenciados nos estudos tradicionais, envolvendo partículas passantes em peneira de abertura 0,074 mm (ABNT #200) e que a supressão dos efeitos inibitórios nas fases iniciais possibilitou a manutenção da cinética do processo de hidratação, evidenciando a importância do uso de aceleradores de pega na composição das misturas.

Avaliando-se o efeito da adição de CINZA no comportamento químico das pastas, medido através do parâmetro Inclinação Máxima das curvas de evolução da temperatura de hidratação, evidenciou-se que a adição de cinza promove redução dos efeitos negativos (ação

inibitória) da casca sobre a pasta de cimento e que a variabilidade entre os percentuais (5% e 20% de adição) pode ser atribuída à ação adsorptiva da cinza, combinada com o efeito da adição de massa no sistema (35% de adição).

4.1.1.3 Avaliação do parâmetro Ponto de Inclinação Máxima.(P_In_Max, em °C/h)

A Tabela 25 apresenta a análise da variância (ANOVA) para o parâmetro Ponto de Inclinação Máxima, onde verificou-se a existência de diferença significativa no parâmetro Ponto de Inclinação Máxima para os fatores CASCA e CINZA.

A interação entre os fatores CASCA-CINZA mostrou não ser significativa mas, com base no parâmetro Inclinação Máxima (trecho da curva), onde a interação CASCA-CINZA é estatisticamente significativa, pode-se considerar que a avaliação pontual, representada pelo parâmetro Ponto de Inclinação Máxima, pode não representar satisfatoriamente o comportamento de uma mistura. Em seguida, são apresentados os resultados relativos a avaliação de cada fator, da interação entre fatores, apresentando-se algumas considerações sobre o parâmetro avaliado.

Tabela 25: ANOVA do parâmetro Ponto de Inclinação Máxima (P_In_Max).

Analysis of Variance for P_In_Max - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	0,110521	5	0,0221042	5,35	0,0003
B:CINZA	0,118646	3	0,0395486	9,57	0,0000
INTERACTIONS					
AB	0,0707292	15	0,00471528	1,14	0,3375
RESIDUAL	0,2975	72	0,00413194		
TOTAL (CORRECTED)	0,597396	95			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A) Efeito da adição de CASCA.

A Tabela 26 apresenta a análise do fator CASCA, onde se destacam as médias das faixas de distribuição em tamanho de casca #200 e # 50, que diferem significativamente da média das pastas referência (0-PR) - sem adição de casca.

Tabela 26: Análise do fator CASCA: parâmetro **P_In_Max**: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for P_In_Max by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
0,074 (# 200)	16	0,3875	X
0,297 (# 50)	16	0,425	XX
0,149 (# 100)	16	0,45	XXX
1,19 (# 16)	16	0,45	XXX
0,59 (# 30)	16	0,45625	XX
0 (PR)	16	0,5	X

Faixas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

B) Efeito da adição de CINZA.

A Tabela 27 apresenta a análise do fator CINZA, o que permite evidenciar que as médias das adições de 5% e de 20% de cinza não diferem significativamente da média das pastas referência – 0% (sem adição de cinza). Atribuiu-se ao efeito físico de absorção térmica e pelo aumento da massa no sistema, a existência de diferença significativa entre o percentual de adição de 35% de cinza e as demais médias.

Tabela 27: Análise do fator CINZA: parâmetro **P_In_Max**: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for P_In_Max by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
35%	24	0,3875	X
20%	24	0,445833	X
0%	24	0,466667	X
05%	24	0,479167	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

A Figura 63 apresenta o gráfico da interação casca-cinza, evidenciando o comportamento das médias das diferentes faixas de distribuição em tamanho de casca, em função dos percentuais de adição de cinza. A falta de interação, indicada através da análise de variância (ANOVA) apresentada na Tabela 25, indica que a variabilidade nos dados é atribuída apenas à soma dos efeitos isolados de cada fator.

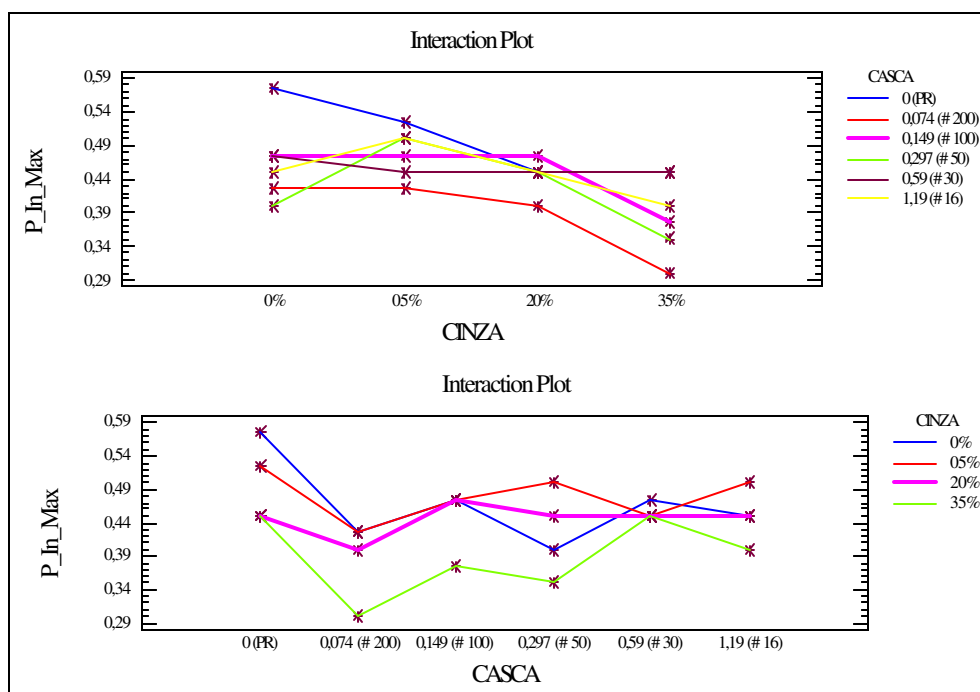


Figura 63: Interação casca-cinza: parâmetro **P_In_Max**.

Contudo, alguns casos chamam, graficamente, a atenção (possível interação positiva: #50-0% → #50-5% e #16-0% → #16-5% ou, possível interação negativa: #200-0% → #200-35% e #100-0% → #100-35%), pois apresentam comportamento que poderia ser interpretado como uma possível interação, tendo se verificado que não há diferença significativa entre os mesmos.

Destaca-se que a faixa de distribuição em tamanho de casca #200 apresentou as maiores reduções no parâmetro Ponto de Inclinação Máxima.

Quando comparadas às faixas de distribuição em tamanho de casca #100 (promove as maiores contribuições) com a #200 (promove as maiores reduções) verificou-se que a adição de 35% de cinza promoveu as maiores alterações no referido parâmetro, o qual pode ser atribuído à adição de massa no sistema.

Verificou-se que o percentual de 20% de adição não difere estatisticamente dos percentuais de 0% e de 5% de adição.

O percentual de adição de 35% de cinza difere significativamente dos demais percentuais de adição, sendo inferior aos mesmos.

D) Considerações a respeito do parâmetro Ponto de Inclinação Máxima.

Através do parâmetro Ponto de Inclinação Máxima, evidencia-se que, à exceção da média da faixa de distribuição em tamanho de casca #200, as demais médias das faixas de distribuição em tamanho de casca não diferem significativamente entre si, o que sugere que o fator CASCA pouco interferiu no parâmetro.

Contudo, considera-se que o parâmetro Ponto de Inclinação Máxima pode não estar representando adequadamente o comportamento da casca no processo químico, inviabilizando seu emprego como ferramenta de análise

No caso da adição de CINZA, seu efeito no comportamento químico das pastas, apresenta similaridade com o parâmetro Inclinação Máxima. A variabilidade observada nos percentuais de 5% e de 20% de adição de cinza foi atribuída à possível ação adsorbtiva da cinza, combinada com o efeito da adição de massa no sistema (35% de adição).

4.1.1.4 Avaliação do parâmetro tempo para atingir a Temperatura Máxima (tempo_TMax, em h).

O parâmetro tempo para atingir a temperatura máxima é um forte indicador da velocidade do processo químico (cinética) de hidratação do cimento, sendo empregado em conjunto com o parâmetro temperatura máxima para indicar a maior ou menor interferência de componentes de uma mistura nos processos de hidratação do cimento.

O parâmetro tempo para atingir a temperatura máxima pode ser adotado como um parâmetro delimitador entre a fase inicial de formação dos compostos químicos associados ao enrijecimento da pasta (tempo anterior à temperatura máxima) e a fase de endurecimento (tempo posterior à temperatura máxima, pelo ganho acelerado de resistência em função da formação das estruturas cristalinas rígidas).

A Tabela 28, que apresenta a análise de variância (ANOVA) do parâmetro tempo para atingir a temperatura máxima, permite evidenciar a existência de diferença significativa nos fatores CASCA, CINZA e na interação CASCA-CINZA.

Em seguida, são apresentados os resultados relativos à avaliação de cada fator, da interação entre fatores, apresentando-se algumas considerações sobre o parâmetro avaliado.

Tabela 28: ANOVA do parâmetro tempo para atingir a temperatura máxima (tempo_TMax).

Analysis of Variance for tempo_TMax - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	33,2018	5	6,64035	359,25	0,0000
B:CINZA	16,5125	3	5,50415	297,78	0,0000
INTERACTIONS					
AB	8,07518	15	0,538345	29,12	0,0000
RESIDUAL	1,33085	72	0,018484		
TOTAL (CORRECTED)	59,1202	95			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A) Efeito da adição de CASCA.

A Tabela 29 apresenta a análise do fator CASCA, onde se verifica que faixa de distribuição em tamanho de casca #200 é superior e significativamente diferente da pasta referência (0 PR), o que indica a ação de agentes retardantes ainda presentes na casca.

Tabela 29: Análise do fator CASCA: parâmetro tempo_TMax: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for tempo_TMax by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
0,149 (# 100)	16	5,28625	X
0,59 (# 30)	16	5,34938	XX
1,19 (# 16)	16	5,44875	X
0,297 (# 50)	16	5,63625	X
0 (PR)	16	5,65625	X
0,074 (# 200)	16	7,01063	X

Faixas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

B) Efeito da adição de CINZA.

A Tabela 30 apresenta a análise do fator CINZA, onde se destaca a existência de diferença significativa entre os percentuais de adição. Verificou-se que as médias das pastas, às quais se fizeram adições de cinza (5%, 20% e 35%), diferiram significativamente da média das pastas referência (sem adição de cinza), o que confirma a ação da cinza no sentido de minimizar os efeitos retardantes atribuídos à casca.

Tabela 30: Análise do fator CINZA: parâmetro **tempo_TMax**: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for tempo_TMax by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
20%	24	5,38167	X
35%	24	5,40708	X
05%	24	5,72625	X
0%	24	6,41	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

Avaliando-se os valores médios apresentados, foi possível evidenciar a redução no parâmetro tempo para atingir a temperatura máxima, com a elevação dos percentuais de adição de cinza.

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

A Figura 64 apresenta o gráfico da interação casca-cinza, onde se destaca o percentual de adição de 20% de cinza.

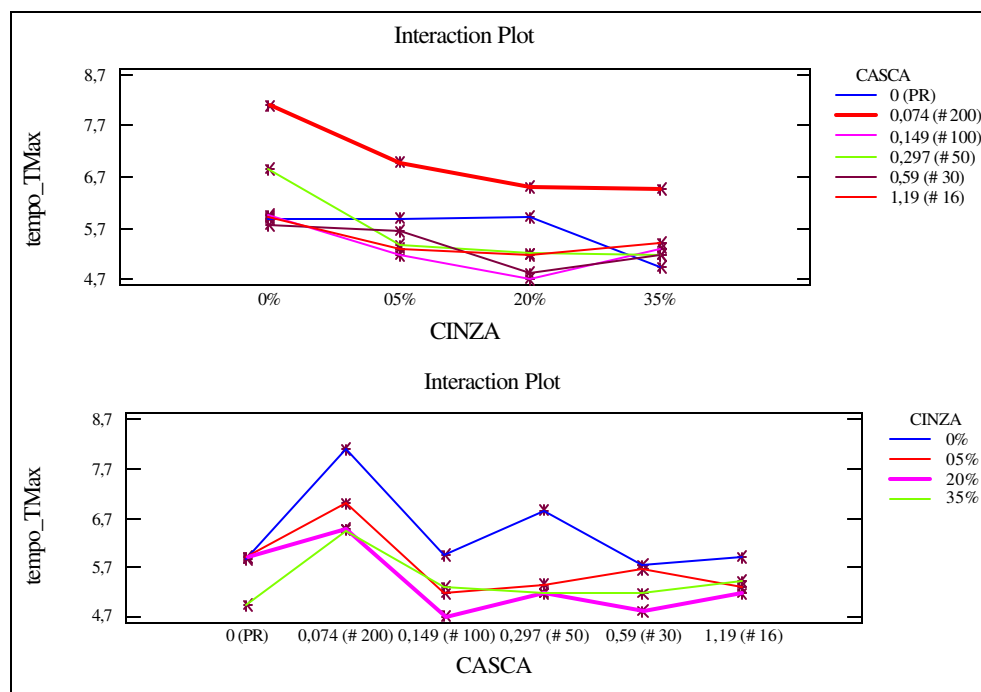


Figura 64: Interação casca-cinza: parâmetro **tempo_TMax**.

Comparando-se as médias das adições de cinza, na faixa de distribuição em tamanho de casca #200, verificou-se que a adição de 20% ou de 35% de cinza, promoveu acentuada redução nas médias dos tempos para atingir a temperatura máxima.

D) Considerações a respeito do parâmetro tempo para atingir a Temperatura Máxima.

Para efeito de avaliação qualitativa, as melhores misturas ou o melhor comportamento estão relacionados ao menor tempo para atingir a temperatura máxima.

Verificou-se que as pastas sem adição de cinza (0%) apresentaram os maiores valores de tempo, considerados os piores resultados, o que evidencia o efeito negativo dos extrativos ainda existentes na CASCA no comportamento químico das pastas, medido através do parâmetro tempo para atingir a temperatura máxima em curvas de evolução da temperatura de hidratação.

Entre as faixas de distribuição em tamanho de casca, destaca-se a de # 200, por evidenciar o comportamento negativo da adição de casca no resultado do parâmetro tempo_TMax, onde também se destaca a forte influência da adição de cinza, cujo percentual de adição de 20% de cinza, promoveu as maiores reduções no parâmetro tempo_TMax, porém não diferindo significativamente do percentual de 35% de adição.

4.1.1.5 Avaliação do parâmetro Temperatura Máxima (Temp_Max, em °C).

O parâmetro temperatura máxima (Temp_Max) é considerado um dos indicadores do comprometimento do processo de hidratação do cimento (características exotérmicas das reações de sua hidratação), sendo que quanto menor for a diferença entre as médias das temperaturas máximas alcançadas (misturas e a pasta referência), menores seriam os problemas de compatibilidade com o cimento.

Na Tabela 31 apresenta-se a análise da variância (ANOVA) para o parâmetro temperatura máxima, onde se verificou a existência de diferença significativa no parâmetro temperatura máxima, nos fatores CASCA, CINZA e, na interação CASCA-CINZA.

Em seguida, são apresentados os resultados relativos a avaliação de cada fator, da interação entre fatores, apresentando-se considerações sobre o parâmetro avaliado.

Tabela 31: ANOVA do parâmetro temperatura máxima (Temp_Max).

Analysis of Variance for Temp_Max - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	105,74	5	21,148	6,71	0,0000
B:CINZA	112,749	3	37,5829	11,93	0,0000
INTERACTIONS					
AB	128,092	15	8,5395	2,71	0,0025
RESIDUAL	226,835	72	3,15049		
TOTAL (CORRECTED)	573,416	95			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A) Efeito da adição de CASCA.

Na Tabela 32 apresenta-se a análise do fator CASCA, onde se verificou que a média da faixa de distribuição em tamanho de casca #100 não difere significativamente da média da faixa de distribuição em tamanho de casca #16 e da média das pastas referência – 0 (PR), sem adição de casca.

Tabela 32: Análise do fator CASCA: parâmetro Temp_Max: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Temp_Max by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
0,074 (# 200)	16	35,4688	X
0,297 (# 50)	16	36,3375	XX
0,59 (# 30)	16	36,9375	XX
1,19 (# 16)	16	37,1062	XXX
0 (PR)	16	37,6375	XX
0,149 (# 100)	16	38,85	X

Faixas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

Com base nestas observações pressupõe-se que cascas com dimensões superiores a #16 ou, que uma dupla lavagem na casca (#100), disponibilizaria menores quantidades de extrativos na água de amassamento, minimizando a interferência da casca nos processos químicos de hidratação do cimento. Com exceção da faixa de distribuição em tamanho de casca #200, as demais faixas não diferem significativamente da pasta referência – 0 (PR), sem adição de casca, sugerindo que o processo de lavagem da casca pode ser aperfeiçoado.

B) Efeito da adição de CINZA.

Na Tabela 33 apresenta-se a análise do fator CINZA, onde se verificou que as médias das adições de 5% e de 20% não diferem significativamente da média da pasta referência (0%, sem adição de cinza).

Tabela 33: Análise do fator CINZA: parâmetro **Temp_Max**: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Temp_Max by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
35%	24	35,3167	X
20%	24	37,2125	X
0%	24	37,4042	X
05%	24	38,2917	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

No caso da média do percentual de 35% de adição de cinza, a existência de diferença significativa, em relação às demais médias, é atribuída ao aumento da massa no sistema.

Avaliando-se os valores apresentados, verificou-se uma tendência de redução no parâmetro temperatura máxima, em função da adição dos percentuais de 20% e de 35% de cinza.

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

A Figura 65 apresenta o gráfico da interação casca-cinza, evidenciando o comportamento das médias das diferentes faixas de distribuição em tamanho de casca, em função dos percentuais de adição de cinza. Destaca-se na figura o comportamento da faixa de distribuição em tamanho de casca #200, e que também evidencia a redução na temperatura máxima, quando se faz a adição de cinza, o que se atribuiu à adição de massa ao sistema.

Em relação à adição de cinza, verificou-se que o percentual de adição de 20% apresentou uma maior estabilidade no comportamento, pois ao comparar as médias com a pasta referência - 0 (PR) (sem adição de casca), verificou-se que na faixa de distribuição em tamanho de casca #200, a redução da média não foi tão pronunciada (em relação à pasta referência), como observado nos demais percentuais.

No caso da faixa de distribuição em tamanho de casca #50 (uma das faixas que apresentaram maior efeito negativo), os valores foram superiores ao da pasta referência, fato também não observado nas demais faixas.

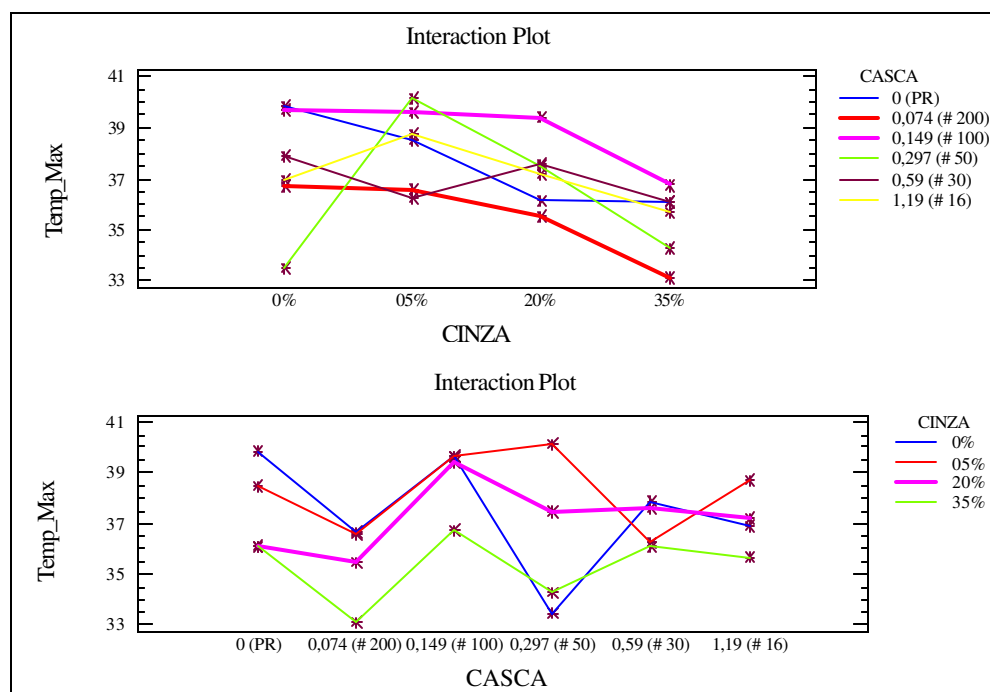


Figura 65: Interação casca-cinza: parâmetro **Temp_Max**.

D) Considerações a respeito do parâmetro Temperatura Máxima.

Através do parâmetro temperatura máxima das curvas de evolução da temperatura de hidratação foi possível destacar o efeito da adição de CASCA no comportamento químico das pastas, principalmente nas faixas de distribuição em tamanho de casca #200 e #100, pela melhor estabilidade no comportamento, quando da adição de cinza.

No caso da adição de CINZA, destaca-se que sua maior influência sobre o parâmetro temperatura máxima pode ser observada quando foi avaliada a faixa de distribuição em tamanho de casca #50 a qual, sem a adição de cinza (#50-0%), apresentou o maior efeito negativo da casca sobre a pasta de cimento (pasta referência-0% ou, **0 (PR)-0%**).

Neste caso, com a adição de cinza, em diferentes teores, verificou-se melhorias no comportamento térmico das misturas. Em geral, o efeito de redução observado pode ser atribuído à adição de massa no sistema

4.1.1.6 Considerações gerais sobre a avaliação química.

Ao analisar os resultados apresentados, verificou-se que os diferentes parâmetros utilizados na avaliação química das misturas apontam para um mesmo tipo de comportamento, podendo-se destacar a influência negativa da casca e a influência positiva da cinza na supressão dos efeitos negativos da casca, mas, apresentando um efeito de redução atribuído à adição de massa no sistema.

Dadas as peculiaridades de cada parâmetro, há necessidade de realizarem-se maiores estudos envolvendo seu aperfeiçoamento. No caso do Ponto de Inclinação Máxima, o mesmo pode ser considerado inadequado para avaliar o comportamento químico, dada a sua característica pontual, pouco representativa, sendo capaz de levar a conclusões errôneas, como é o caso da falta de interação casca-cinza, destacada como significativa em todos os demais parâmetros.

No entanto, não existe a pretensão neste trabalho de considerar os resultados como sendo conclusivos, mas apenas servindo de indicadores com a finalidade de evidenciar a necessidade para o desenvolvimento de métodos eficazes de avaliação, pois a falta de informação associada à evolução do processo químico e as implicações de ordem mecânicas (entre outras) a ela associadas, carecem de melhores estudos e de considerações de ordem técnica.

4.1.2. Resultados relativos à avaliação do comportamento mecânico das misturas.

As misturas dos cilindros de pasta, avaliadas em relação ao comportamento químico, foram também avaliadas em seu comportamento físico-mecânico, através dos parâmetros Início de Pega, Fim de Pega, evolução da velocidade de propagação da onda ultra-sônica (EVPU), resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão simples.

Para isso, os cilindros de mistura foram seccionados de modo a se obter corpos-de-prova (CPs) cilíndricos, sendo que os aqueles numeração ímpar (CPs 1, 3, 5 e 7) foram ensaiados à tração por compressão diametral (Tensão_D), tendo-se efetuado previamente avaliações relativas às características dos mesmos, para verificar a existência de anomalias capazes de interferir na avaliação dos resultados.

Os elementos de análise auxiliares empregados foram a velocidade do pulso ultra-sônico (Vel_D), a massa específica aparente (MEAp_D) e o módulo de elasticidade dinâmico (MOEd_D).

No caso dos corpos-de-prova de numeração par (CPs 2, 4, 6 e 8), os mesmos foram ensaiados à compressão simples (Tensão_Ax), tendo-se efetuado previamente avaliações relativas às características dos mesmos, para verificar a existência de anomalias capazes de interferir na avaliação dos resultados.

Os elementos de análise auxiliares empregados foram a velocidade do pulso ultra-sônico (Vel_Ax), a massa específica aparente (MEAp_Ax) e o módulo de elasticidade dinâmico (MOEd_Ax).

Na determinação da velocidade do pulso ultra-sônico nos corpos-de-prova, foram empregados transdutores de face plana de 45 kHz, calibrados em 20 μ s, acoplados nas bases, de modo a medir a velocidade ao longo de sua maior dimensão.

As medições realizadas nos cilindros possibilitaram a associação dos valores dos corpos-de-prova aos gráficos de evolução da velocidade de propagação do pulso ultra-sônico.

4.1.2.1 Avaliação do parâmetro Início de Pega das misturas.

O parâmetro início de pega, definido em função da profundidade de penetração da agulha (até 1 mm do fundo) no aparelho de Vicat, foi modificado em função do fato das pastas de cimento conterem adições (casca e/ou cinza), de modo a definir o seu limite de manuseio.

Associou-se este parâmetro a um comportamento mecânico, em função de sua natureza experimental, resultante da ação mecânica de puncionamento promovido pela agulha de Vicat na pasta (misturas do tipo pasta).

A este comportamento, foram associados os elementos de avaliação tempo para o início de pega (IP_tempo, em h), temperatura no início de pega (IP_Temp, em °C) e a velocidade do pulso ultra-sônico no início de pega (IP_Vel, em km/s), de modo a auxiliar a avaliação do comportamento das misturas e a compreensão do mecanismo de início de pega.

Na Tabelas 34 são apresentadas as médias dos elementos utilizados nas análises, objetivando destacar o efeito de cada faixa de distribuição em tamanho de CASCA e do percentual de adição de CINZA nas misturas.

Tabela 34: FASE I - Avaliação físico-mecânica - Elemento: Início de Pega (Médias).

MÉDIAS	PP-0%	#200-0%	# 100-0%	# 50-0%	# 30-0%	# 16-0%
IP_tempo (h)	2,25	3,75	3,00	3,00	2,25	2,33
IP_Temperatura (°C)	27,6	26,3	29,7	23,8	27,4	25,8
IP_Velocidade (km/s)	1,965	1,461	1,877	1,457	1,691	1,092
MÉDIAS	PP-5%	#200-5%	# 100-5%	# 50-5%	# 30-5%	# 16-5%
IP_tempo (h)	2,08	3,08	2,25	2,33	2,00	1,75
IP_Temperatura (°C)	26,7	26,7	29,9	29,9	26,8	27,7
IP_Velocidade (km/s)	1,522	1,294	1,937	0,862	1,784	1,616
MÉDIAS	PP-20%	#200-20%	# 100-20%	# 50-20%	# 30-20%	# 16-20%
IP_tempo (h)	2,08	2,50	1,83	1,83	1,42	1,75
IP_Temperatura (°C)	25,4	26,6	29,8	27,6	27,3	27,4
IP_Velocidade (km/s)	1,746	1,537	1,234	1,615	1,143	1,680
MÉDIAS	PP-35%	#200-35%	# 100-35%	# 50-35%	# 30-35%	# 16-35%
IP_tempo (h)	1,75	2,58	2,17	1,83	1,58	1,42
IP_Temperatura (°C)	26,5	26,8	28,2	27,0	26,9	27,2
IP_Velocidade (km/s)	1,442	0,618	1,666	1,231	1,597	0,988

OBS.: #200 =0,074 mm; #100 =0,149 mm; #50 =0,297 mm; #30 =0,59 mm e #16 =1,19 mm.

A Tabela 35 apresenta as análises da variância (ANOVA) do parâmetro Início de Pega, considerando-se os elementos tempo para o início de pega (IP_tempo), temperatura no início de pega (IP_Temp) e velocidade do pulso ultra-sônico no início de pega (IP_Vel).

Verificou-se que em todos os três elementos de análise (IP_tempo, IP_Temp e IP_Vel), o comportamento foi semelhante, apontando a existência de diferença significativa nos fatores CASCA, CINZA e na interação CASCA-CINZA.

Em seguida, são apresentados os resultados da avaliação da casca, da cinza e da interação casca-cinza, apresentando-se algumas considerações sobre o parâmetro avaliado.

Tabela 35: ANOVAs do parâmetro Início de Pega (IP_tempo, IP_Temp e IP_Vel).

Analysis of Variance for IP_tempo - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	11,3715	5	2,27431	331,95	0,0000
B:CINZA	9,10069	3	3,03356	442,77	0,0000
INTERACTIONS					
AB	1,81597	15	0,121065	17,67	0,0000
RESIDUAL	0,328867	48	0,00685139		
TOTAL (CORRECTED)	22,6171	71			
Analysis of Variance for IP_Temp - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	68,439	5	13,6878	1059,70	0,0000
B:CINZA	13,5438	3	4,51458	349,52	0,0000
INTERACTIONS					
AB	65,9637	15	4,39758	340,46	0,0000
RESIDUAL	0,62	48	0,0129167		
TOTAL (CORRECTED)	148,567	71			
Analysis of Variance for IP_Vel - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	2,35472	5	0,470944	4,03	0,0039
B:CINZA	1,10044	3	0,366814	3,14	0,0338
INTERACTIONS					
AB	4,71142	15	0,314095	2,69	0,0048
RESIDUAL	5,60987	48	0,116872		
TOTAL (CORRECTED)	13,7765	71			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A) Efeito da adição de CASCA.

A Tabela 36 apresenta a análise das médias para o fator CASCA, onde destacam-se as faixas de distribuição em tamanho #30 e #16, por apresentarem o menor valor de média de tempo para o início de pega, valores de temperatura superiores à média das pastas referência – 0 (PR) e valor médio de velocidade do pulso ultra-sônico não apresentando diferença estatística significativa em relação às demais médias.

Tabela 36: Análises do fator CASCA: parâmetro Início de Pega (elementos de análise: **IP_tempo**, **IP_Temp** e **IP_Vel**): Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for IP_tempo by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
0,59 (# 30)	12	1,8125	X
1,19 (# 16)	12	1,8125	X
0 (PR)	12	2,04167	X
0,297 (# 50)	12	2,25	X
0,149 (# 100)	12	2,3125	X
0,074 (# 200)	12	2,97917	X
Multiple Range Tests for IP_Temp by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
0 (PR)	12	26,5583	X
0,074 (# 200)	12	26,5917	X
1,19 (# 16)	12	27,05	X
0,297 (# 50)	12	27,1	X
0,59 (# 30)	12	27,1167	X
0,149 (# 100)	12	29,425	X
Multiple Range Tests for IP_Vel by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
0,074 (# 200)	12	1,22775	X
0,297 (# 50)	12	1,29108	XX
1,19 (# 16)	12	1,34392	XX
0,59 (# 30)	12	1,55392	XX
0 (PR)	12	1,66892	X
0,149 (# 100)	12	1,67867	X

Faixas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

No caso da faixa de distribuição em tamanho de casca #200, a média do tempo para o início de pega (IP_tempo-#200) é significativamente maior que a média das pastas referência – 0 (PR), tendo temperatura média de início de pega (IP_Temp-#200) semelhante mas, com média de velocidade de propagação do pulso ultra-sônico (IP_Vel-#200) inferior, ou seja, o pior comportamento em relação ao parâmetro início de pega.

As relações tempo-temperatura-velocidade apresentadas sugerem que a cinética do processo químico (tempo-temperatura) evolui de forma diferenciada da formação das estruturas mecânicas (precipitados formados, estruturas cristalinas ou outros elementos de comportamento mecânico que possibilitam a passagem do pulso ultra-sônico).

B) Efeito da adição de CINZA.

A Tabela 37 apresenta as análises para o fator CINZA, empregando os elementos de análise tempo para o início de pega (IP_tempo), temperatura no início de pega (IP_Temp) e velocidade do pulso ultra-sônico no início de pega (IP_Vel).

Tabela 37: Análises do fator CINZA: parâmetro Início de Pega (elementos de análise: **IP tempo, IP Temp e IP Vel**): Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for IP_tempo by CINZA			

Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups

35%	18	1,88889	X
20%	18	1,90278	X
05%	18	2,25	X
0%	18	2,76389	X

Multiple Range Tests for IP_Temp by CINZA			

Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups

0%	18	26,7944	X
35%	18	27,1111	X
20%	18	27,3444	X
05%	18	27,9778	X

Multiple Range Tests for IP_Vel by CINZA			

Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups

35%	18	1,257	X
20%	18	1,49261	XX
05%	18	1,50267	XX
0%	18	1,59056	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

Comparando-se as médias das adições de cinza com a média da pasta referência - 0% (sem adição de cinza), verificou-se que a adição de cinza promoveu redução no tempo necessário para o início de pega (IP_tempo), associado a melhorias na cinética (velocidade) do processo químico, traduzida pelo aumento significativo nos valores médios de temperatura (IP_Temp), tendo-se uma redução nos valores médios de VPU (IP_Vel). No caso das adições de 20% e de 35% de cinza, verificou-se que as mesmas não apresentaram diferença significativa entre si, exceto no caso da temperatura no início de pega (IP_Temp).

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

A Figura 66 apresenta o gráfico da interação casca-cinza, onde se evidencia o comportamento das diferentes faixas de distribuição em tamanho de casca, em função dos percentuais de adição de cinza, para o tempo para o início de pega (**IP_tempo**).

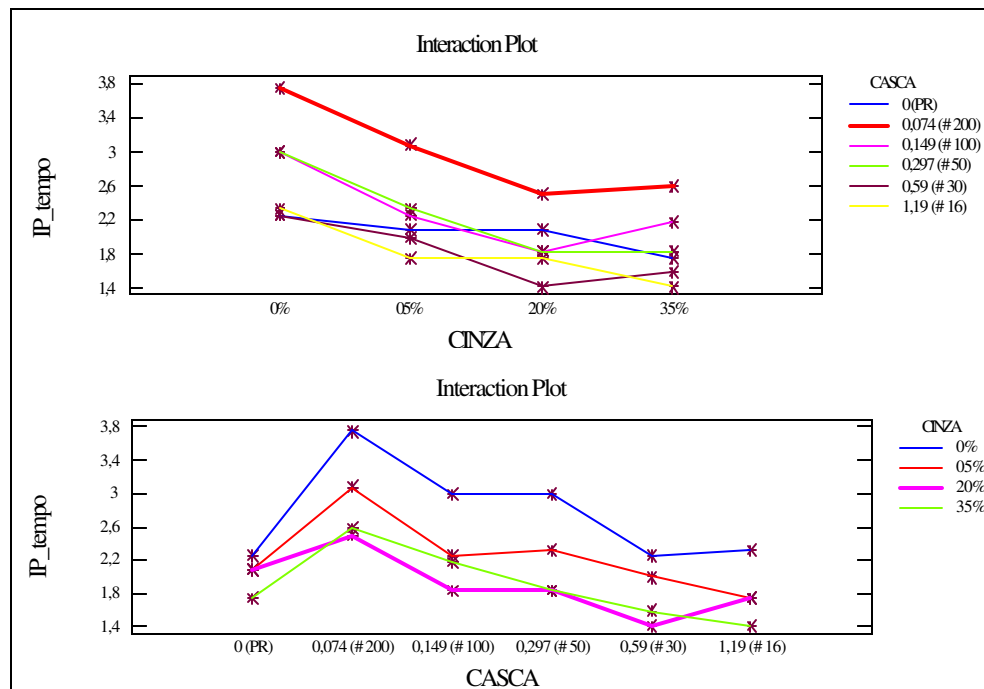


Figura 66: Interação casca-cinza: parâmetro Início de Pega (IP_tempo).

Comparando-se a tendência no comportamento do tempo para o início de pega, (Figura 66 – **IP_tempo**) com a tendência no comportamento do parâmetro tempo para atingir a temperatura máxima (Figura 64 – **tempo_TMax**), foi possível evidenciar a similaridade de tendências, destacando-se, como exceção, a mistura #16-35%. Pode-se então considerar que, uma vez superada a fase inicial com problemas atribuídos à ação da casca-cinza sobre o cimento, a evolução do processo se desenvolve de forma considerada normal, o que sugere a possibilidade de previsão do tempo para atingir a temperatura máxima, em função do tempo para o início da pega. As variações podem ser atribuídas a maior ou menor interação casca-cinza, principalmente quando da adição de 35% de cinza. Deve-se, contudo, considerar que entre os percentuais de 20% e de 35% de adição de cinza, não há diferença estatística significativa, quer seja no parâmetro **IP_tempo**, quer seja no parâmetro **tempo_TMax**.

A Figura 67 apresenta o gráfico da interação casca-cinza, onde se evidencia o comportamento das médias das diferentes faixas de distribuição em tamanho de casca, em função dos percentuais de adição de cinza, para o elemento de análise temperatura de início de pega (IP_Temp).

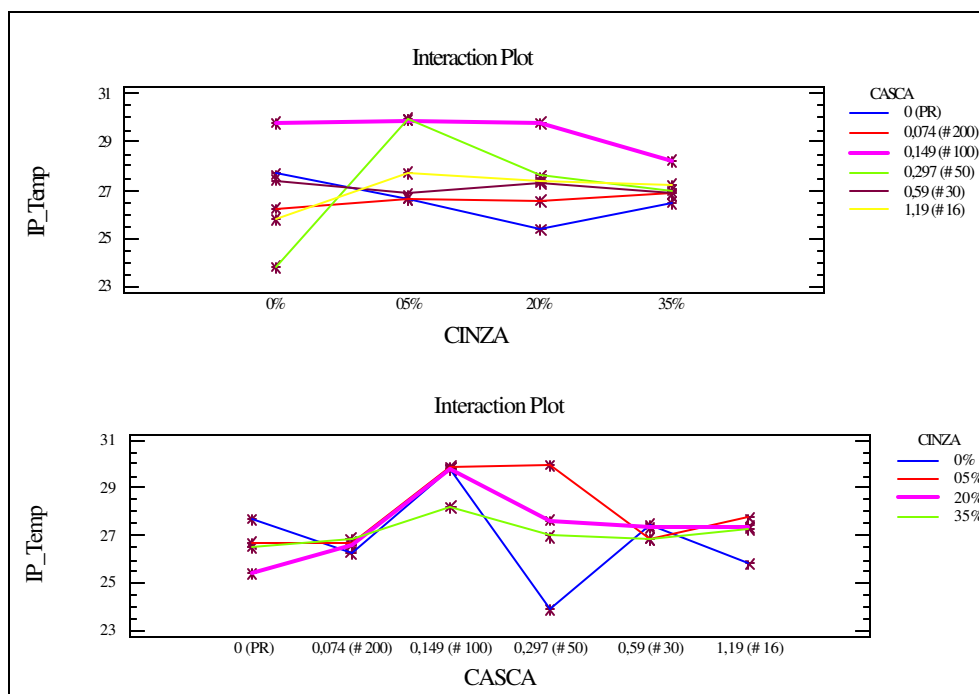


Figura 67: Interação casca-cinza: parâmetro Início de Pega (IP_Temp).

Também nesse caso, a tendência do comportamento da temperatura para o início de pega, segue a tendência do comportamento do parâmetro temperatura máxima (Figura 65), sendo possível evidenciar tendências de comportamento semelhantes, onde as exceções podem ser associadas ao percentual de adição de 35% de cinza, destacando-se as faixas de distribuição em tamanho de casca #200 e #16.

A Figura 68 apresenta o gráfico da interação casca-cinza para o elemento de análise velocidade de propagação do pulso ultra-sônico no início de pega (IP_Vel).

Verificou-se que na faixa de distribuição em tamanho de casca #16 os percentuais de adição de 5% e de 20% de cinza promoveram melhorias, tendo sido o percentual de 35% o mais desfavorável, atribuindo-se tal fato ao aumento de massa no sistema. Quando se compara o comportamento das pastas sem adição de cinza (0%) com as pastas às quais se fez adição de 35% verifica-se que a diferença entre ambas se reduz à medida em que a dimensão das

partículas de casca aumenta. Observa-se um duplo efeito, da supressão dos efeitos negativos da casca e, da adição de “finos”.

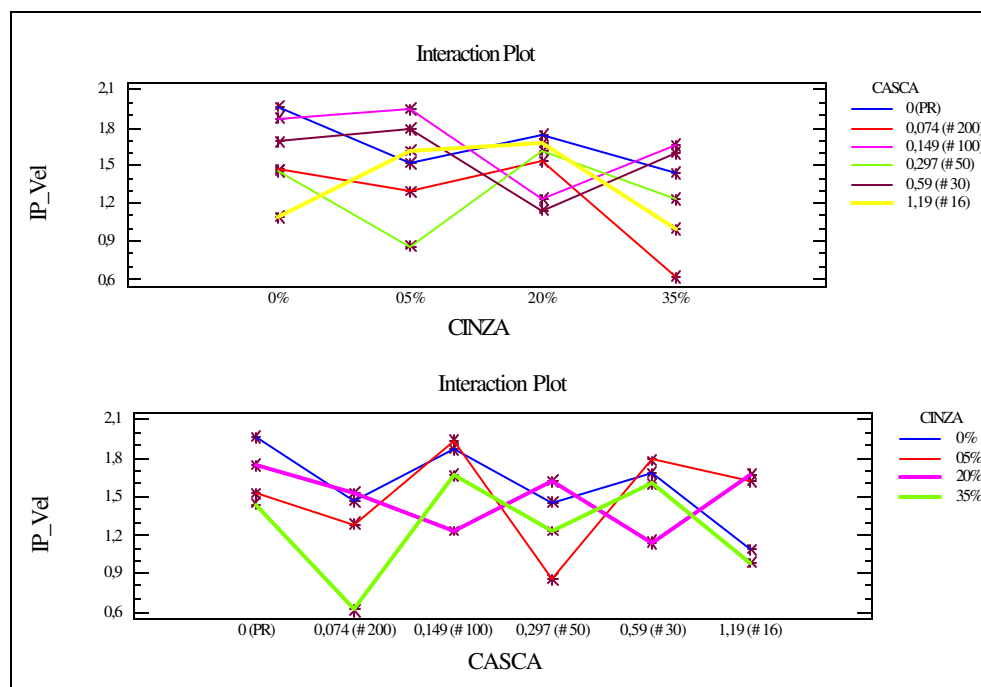


Figura 68: Interação casca-cinza: parâmetro Início de Pega (IP_Vel).

Cascas com dimensão reduzida apresentam maior área superficial e, como consequência, maior área de interferência nos processos químicos-mecânicos, não sendo este fator, no entanto, o único ou o principal responsável pelas modificações no comportamento relativo à propagação do pulso ultra-sônico. A Figura 69 apresenta exemplos de dispersão das partículas de casca, observando-se na pasta #16-35% a maior presença de poros, atribuída a maior dificuldade em compactação da pasta, pelo fato da mistura resultante ser mais “seca”.



Figura 69: Dispersão das partículas de casca #100-20% e #16-35% na pasta de cimento.

D) Considerações a respeito do parâmetro Início de Pega.

Verificou-se que, em geral, o comportamento do parâmetro Início de Pega, evidenciado através dos elementos empregados na sua avaliação (tempo para o início de pega - IP_tempo e temperatura no início de pega - IP_Temp), apresenta similaridades de comportamento quando comparado aos parâmetros temperatura máxima e o tempo necessário para atingi-la, o que sugere a possibilidade de predição do início de pega em função da temperatura máxima (e vice-versa), o que somente poderá ser determinado com análises mais detalhadas, não contempladas neste trabalho que é mais abrangente e de caráter exploratório.

4.1.2.2 Avaliação do parâmetro Fim de Pega das misturas.

Na Tabelas 38 são apresentadas as médias dos elementos utilizados nas análises, de modo a destacar os efeito das faixas de distribuição em tamanho de CASCA e dos diferentes percentuais de adição de CINZA, de forma similar à avaliação do parâmetro Início de Pega.

Tabela 38: **FASE I - Avaliação físico-mecânica:** Parâmetro Fim de Pega (Médias).

MÉDIAS	PP-0%	#200-0%	# 100-0%	# 50-0%	# 30-0%	# 16-0%
FP_tempo (h)	2,75	4,58	3,67	3,58	2,83	3,17
FP_Temperatura (°C)	29,5	27,4	32,7	25,0	28,6	27,8
FP_Velocidade (km/s)	2,035	1,720	2,059	1,762	1,822	1,759
MÉDIAS	PP-5%	#200-5%	# 100-5%	# 50-5%	# 30-5%	# 16-5%
FP_tempo (h)	2,58	3,75	2,75	2,67	2,50	2,42
FP_Temperatura (°C)	28,0	27,8	31,3	30,7	27,3	28,8
FP_Velocidade (km/s)	1,818	1,808	2,073	1,745	1,920	1,871
MÉDIAS	PP-20%	#200-20%	# 100-20%	# 50-20%	# 30-20%	# 16-20%
FP_tempo (h)	2,67	3,25	2,33	2,25	2,08	2,25
FP_Temperatura (°C)	27,1	27,5	30,9	28,1	27,9	28,1
FP_Velocidade (km/s)	1,985	1,959	1,886	1,818	1,829	1,815
MÉDIAS	PP-35%	#200-35%	# 100-35%	# 50-35%	# 30-35%	# 16-35%
FP_tempo (h)	2,50	3,17	2,83	2,17	2,08	1,75
FP_Temperatura (°C)	28,3	27,5	29,5	27,3	27,3	27,2
FP_Velocidade (km/s)	2,241	1,664	1,986	1,727	1,816	1,569

OBS.: #200 =0,074 mm; #100 =0,149 mm; #50 =0,297 mm; #30 =0,59 mm e #16 =1,19 mm.

Na Tabela 39 apresentam-se as análises da variância (ANOVA) do parâmetro Fim de Pega, considerando-se os elementos de análise FP_tempo, FP_Temp e FP_Vel, tendo-se verificado que em todos os três elementos de análise, o comportamento aponta a existência de diferença significativa nos fatores avaliados (CASCA, CINZA e interação CASCA-CINZA).

Tabela 39: ANOVAs do parâmetro Fim de Pega (FP_tempo, FP_Temp e FP_Vel).

Analysis of Variance for FP_tempo - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	14,2231	5	2,84462	411,02	0,0000
B:CINZA	11,697	3	3,89902	563,37	0,0000
INTERACTIONS					
AB	3,09983	15	0,206655	29,86	0,0000
RESIDUAL	0,3322	48	0,00692083		
TOTAL (CORRECTED)	29,3522	71			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					
Analysis of Variance for FP_Temp - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	109,066	5	21,8132	341,42	0,0000
B:CINZA	11,7878	3	3,92926	61,50	0,0000
INTERACTIONS					
AB	69,1106	15	4,60737	72,12	0,0000
RESIDUAL	3,06667	48	0,0638889		
TOTAL (CORRECTED)	193,031	71			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					
Analysis of Variance for FP_Vel - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	0,858266	5	0,171653	89,55	0,0000
B:CINZA	0,0234792	3	0,00782641	4,08	0,0116
INTERACTIONS					
AB	0,656162	15	0,0437441	22,82	0,0000
RESIDUAL	0,0920113	48	0,0019169		
TOTAL (CORRECTED)	1,62992	71			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A) Efeito da adição de CASCA.

Na Tabela 40 apresenta-se a análise das médias obtidas para o fator CASCA, onde, comparando-se os elementos de análise IP_tempo e FP_tempo, verificou-se que a sequência dos valores médios foi mantida (comportamento uniforme) indicando a possibilidade de se estimar o tempo para o fim de pega com base no tempo para o início de pega.

Tabela 40: Análises do fator CASCA: parâmetro Fim de Pega (elementos de análise: **FP_tempo, FP_Temp e FP_Vel**): Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for FP_tempo by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
0,59 (# 30)	12	2,375	X
1,19 (# 16)	12	2,39583	X
0 (PR)	12	2,625	X
0,297 (# 50)	12	2,66667	X
0,149 (# 100)	12	2,89583	X
0,074 (# 200)	12	3,6875	X
Multiple Range Tests for FP_Temp by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
0,074 (# 200)	12	27,5667	X
0,297 (# 50)	12	27,7667	XX
0,59 (# 30)	12	27,8	XX
1,19 (# 16)	12	27,975	XX
0 (PR)	12	28,2333	X
0,149 (# 100)	12	31,125	X
Multiple Range Tests for FP_Vel by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
1,19 (# 16)	12	1,7535	X
0,297 (# 50)	12	1,76333	X
0,074 (# 200)	12	1,78767	X
0,59 (# 30)	12	1,84692	X
0,149 (# 100)	12	2,00092	X
0 (PR)	12	2,02	X

Faixas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

Tal fato sugere que a cinética do processo químico de hidratação é particular e dependente da mistura avaliada. Em geral, o comportamento observado no IP_tempo é similar ao FP_tempo, no que se refere à existência de diferença significativa entre as médias.

Em relação à temperatura no fim de pega (FP_Temp), verificou-se que, enquanto a pasta referência – 0 (PR), sem adição de casca, apresentou o valor médio de temperatura mais baixo em IP_Temp, em FP_Temp observou-se um dos maiores valores de temperatura, sendo inferior apenas à faixa de distribuição em tamanho #100. Atribui-se, como possível explicação para o fato, à cal ainda presente na casca, capaz de interagir com a água de amassamento de modo a se solubilizar e agir como um promotor do início da pega, pela saturação da solução com íons cálcio, o que, no caso das pastas sem adição de casca, ocorrerá posteriormente.

Em relação à velocidade do pulso ultra-sônico (FP_Vel e IP_Vel), a tendência de falta de diferença significativa entre as faixas de distribuição em tamanho da casca #200, #50, #16 e entre #100 e 0 (PR) se manteve. Destaca-se a média da faixa de distribuição em tamanho da casca #30, por apresentar diferença significativa em relação às demais faixas.

B) Efeito da adição de CINZA.

Tabela 41: Análises do fator CINZA: parâmetro Fim de Pega (elementos de análise: **FP_tempo**, **FP_Temp** e **FP_Vel**): Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for FP_tempo by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
35%	18	2,41667	X
20%	18	2,47222	X
05%	18	2,77778	X
0%	18	3,43056	X
Multiple Range Tests for FP_Temp by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
35%	18	27,8611	X
20%	18	28,2889	X
0%	18	28,5111	X
05%	18	28,9833	X
Multiple Range Tests for FP_Vel by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
35%	18	1,834	X
0%	18	1,85961	XX
05%	18	1,8725	XX
20%	18	1,88211	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

A Tabela 41 apresenta as análises efetuadas para o fator CINZA, destacando os elementos de análise tempo para o fim de pega (FP_tempo), temperatura no fim de pega (FP_Temp) e a velocidade do pulso ultra-sônico (VPU) no fim de pega (FP_Vel).

Verificou-se, através da comparação do comportamento do tempo, nos parâmetros início de pega (IP_tempo) e Fim de pega (FP_tempo), que tanto a ordem sequencial como a avaliação estatística, são semelhantes, indicando que para o fator CINZA, o comportamento é uniforme, o que sugere que a evolução do processo químico de hidratação é particular, dependente da mistura avaliada.

Em relação à temperatura no fim de pega (FP_Temp), verificou-se que o percentual de adição de 0% (pasta referência) apresentou o menor valor médio de temperatura em IP_Temp, sendo que em FP_Temp observou-se um dos maiores valores (não diferindo significativamente do percentual de adição de 20%), sendo inferior apenas ao percentual de adição de 5%. Isso é um indicativo de que o parâmetro temperatura é muito mais sensível à ação dos componentes de uma mistura do que o parâmetro tempo.

Comparando-se o comportamento da velocidade do pulso ultra-sônico (VPU) nos parâmetros início de pega (IP_Vel) e Fim de pega (FP_Vel), verificou-se que os percentuais de adição de 0%, 5% e de 20% não diferem entre si, em ambos os parâmetros.

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

Nas Figuras 70 e 71 os gráficos da interação casca-cinza evidenciam o comportamento das médias das diferentes faixas de distribuição em tamanho de casca, em função dos percentuais de adição de cinza, para os elementos de análise tempo para o fim de pega (FP_tempo), temperatura no fim de pega (FP_Temp) e velocidade do pulso ultra-sônico no fim de pega (FP_Vel).

Verificou-se que o comportamento dos diferentes percentuais de adição de cinza, para o elemento de análise tempo para o fim de pega (FP_tempo) é semelhante ao tempo para o início de pega (IP_tempo). No caso do elemento de análise temperatura no fim de pega (FP_Temp), verificou-se que a adição de cinza promoveu uma uniformidade maior no comportamento em relação à pasta referência – 0%, sem adição de cinza. No caso da faixa de distribuição em tamanho de casca #100 (a mais compatível), o percentual de adição de 0% de

cinza se destaca dos demais percentuais por apresentar o maior valor e diferir significativamente dos demais percentuais. No caso da faixa de distribuição em tamanho de casca #50, considerada como a de maior influência negativa, o percentual de adição de 0% de cinza difere significativamente dos demais percentuais, apresentando o menor valor.

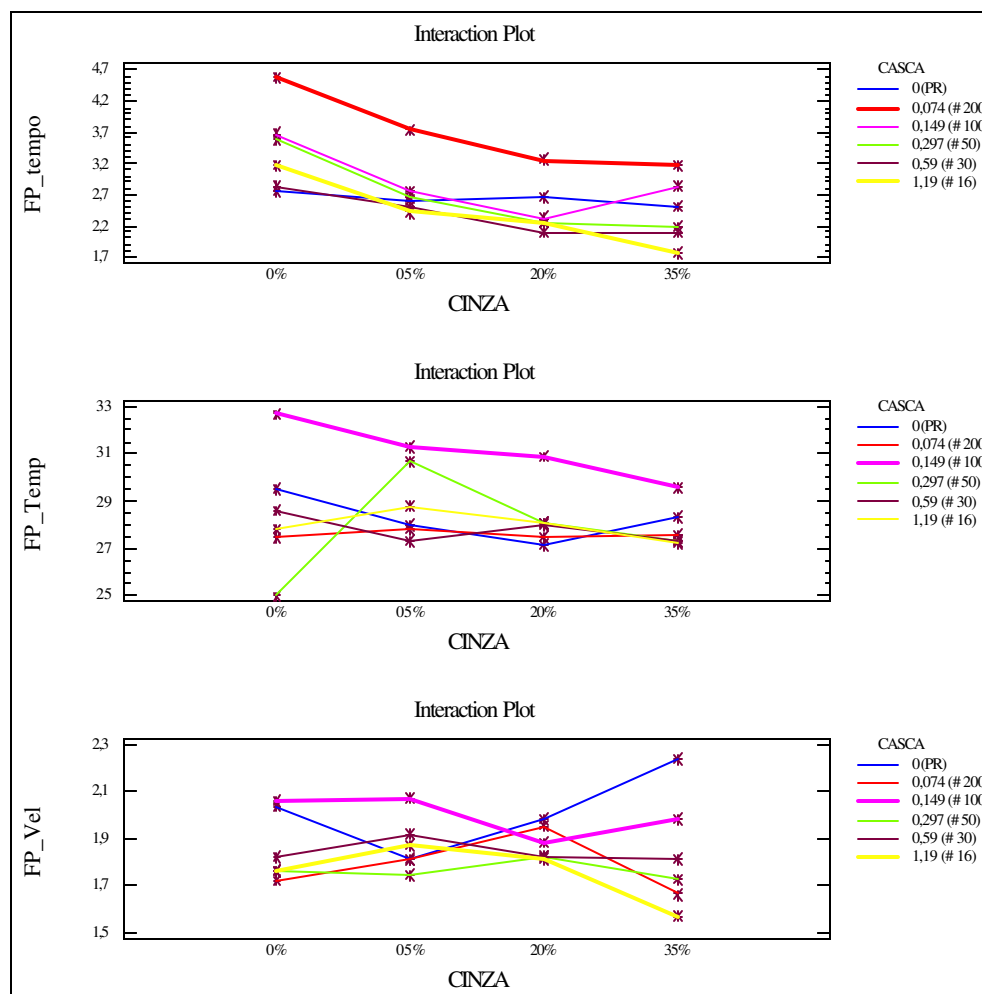


Figura 70: Interação casca-cinza: parâmetro Fim de Pega (FP_tempo, FP_Temp e FP_Vel).

Esse fato pode ser interpretado como uma alta suscetibilidade da pasta de cimento ao fator CASCA, pelas características extremas observadas (entre #100 e #50), o mesmo não ocorrendo quando em interação com a cinza (percentuais de adição de 5% e de 20%, pois no caso da adição de 35% de cinza, o efeito de aumento de massa no sistema se sobressai).

Em relação ao elemento de análise VPU no fim de pega (FP_Vel), verificou-se que ocorrem duas situações interessantes:

a) em relação à adição de CINZA: a adição de 20% se destaca (Figura 71: gráfico FP_Vel:

tendência de linearidade no comportamento com a adição de 20% de cinza) frente às variações impostas pelas diferentes faixas de distribuição em tamanho de casca.

b) em relação à adição de CASCA: a tendência de comportamento verificada sem a adição de cinza (teor de 0%) é acompanhada (com pequenas variações) pelos percentuais de adição de 5% e de 35% de cinza.

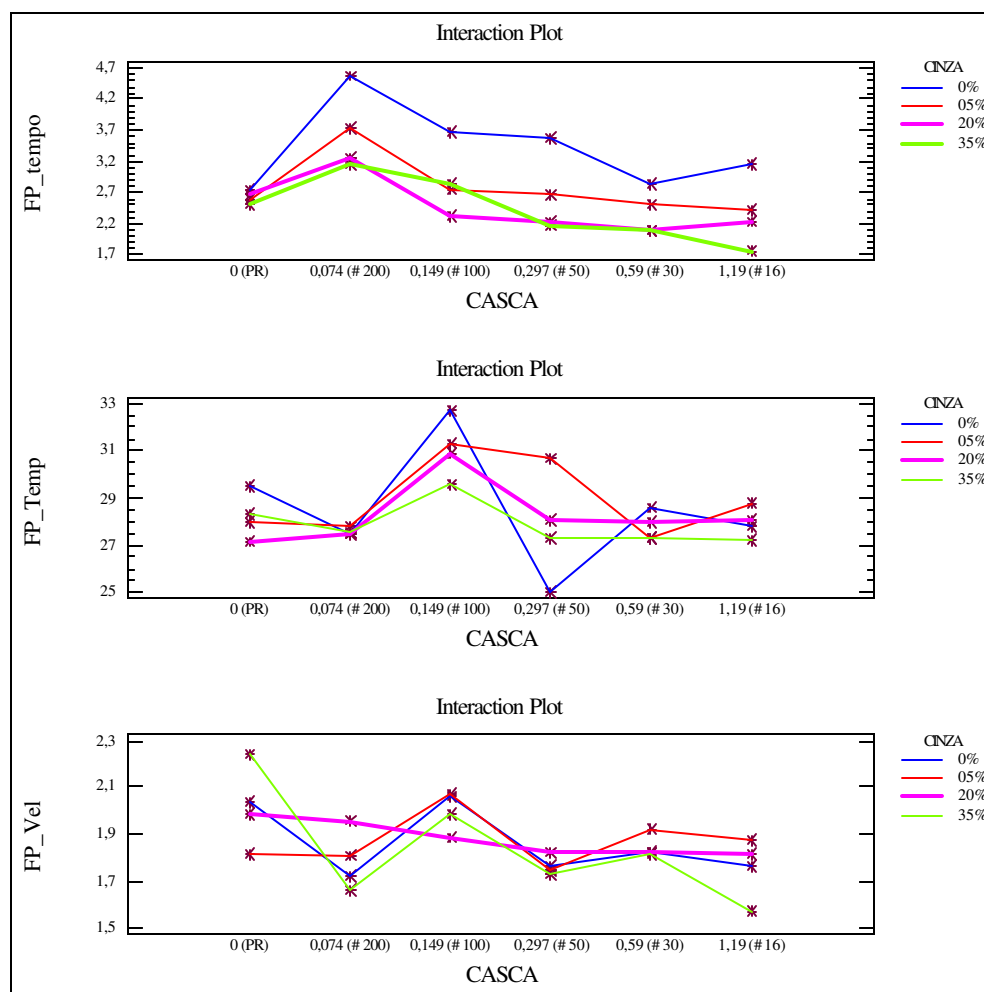


Figura 71: Interação casca-cinza: parâmetro Fim de Pega (FP_tempo, FP_Temp e FP_Vel).

D) Considerações a respeito do parâmetro Fim de Pega.

As correlações FP_tempo/IP_tempo ($R = 0,98$), FP_Temp/IP_Temp ($R = 0,92$) e FP_Vel/IP_Vel ($R = 0,57$) apontam a possibilidade de predição do fim de pega, devendo ser melhor avaliadas em análises mais detalhadas e profundas, não contempladas neste trabalho.

4.1.2.3 Avaliação do parâmetro Resistência à tração por Compressão Diametral das misturas.

Os corpos-de-prova de numeração ímpar (1, 3, 5 e 7), obtidos pelo seccionamento dos cilindros de pasta, foram ensaiados à tração por compressão diametral (Tensão_D, em MPa), tendo se efetuado previamente avaliações relativas às características dos mesmos, empregando os elementos de análise velocidade do pulso ultra-sônico (Vel_D, em km/s), massa específica aparente (MEAp_D, em g/cm³) e módulo de elasticidade dinâmico (MOEd_D, em MPa), buscando-se o controle de qualidade e verificando a existência de anomalias capazes de interferir na avaliação dos resultados.

Restringiram-se as avaliações aos resultados dos ensaios físico-mecânicos, excluída a possibilidade de efetuar-se uma análise conjunta dos comportamentos químicos e mecânicos.

Na Tabelas 42 são apresentadas as médias dos elementos utilizados na análise dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral.

Tabela 42: FASE I - Avaliação físico-mecânica: Parâmetro Compressão Diametral.

MÉDIAS	PP-0%	#200-0%	# 100-0%	# 50-0%	# 30-0%	# 16-0%
Vel_Diam. (km/s)	3,142	2,943	3,162	3,002	3,097	2,920
MEAp_D. (g/cm ³)	1,78	1,74	1,74	1,72	1,75	1,76
MOEd Diam. (MPa)	17623	15041	17392	15515	16798	14983
Tensão_D. (MPa)	1,83	1,84	2,41	3,31	3,14	2,85
MÉDIAS	PP-5%	#200-5%	# 100-5%	# 50-5%	# 30-5%	# 16-5%
Vel_Diam. (km/s)	3,413	3,119	3,063	3,322	3,182	3,115
MEAp_D. (g/cm ³)	1,79	1,70	1,71	1,73	1,72	1,73
MOEd Diam. (MPa)	20814	16555	16020	19071	17471	16827
Tensão_D. (MPa)	2,43	1,83	2,68	2,10	2,56	2,75
MÉDIAS	PP-20%	#200-20%	# 100-20%	# 50-20%	# 30-20%	# 16-20%
Vel_Diam. (km/s)	3,573	3,333	3,315	3,257	3,245	3,273
MEAp_D. (g/cm ³)	1,78	1,75	1,76	1,74	1,76	1,76
MOEd Diam. (MPa)	22754	19455	19294	18428	18522	18863
Tensão_D. (MPa)	2,94	2,81	3,41	3,02	3,53	3,27
MÉDIAS	PP-35%	#200-35%	# 100-35%	# 50-35%	# 30-35%	# 16-35%
Vel_Diam. (km/s)	3,599	3,316	3,482	3,438	3,370	3,225
MEAp_D. (g/cm ³)	1,78	1,66	1,74	1,76	1,74	1,75
MOEd Diam. (MPa)	22990	18241	21040	20763	19796	18160
Tensão_D. (MPa)	2,66	2,61	3,46	3,16	3,83	3,70

OBS.: #200 =0,074 mm; #100 =0,149 mm; #50 =0,297 mm; #30 =0,59 mm e #16 =1,19 mm.

4.1.2.3.1 Avaliação da VPU (Vel_D, em km/s) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à tração por compressão diametral.

A velocidade do pulso ultra-sônico (VPU) nos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral (Vel_D) foi determinada empregando-se transdutores (face plana, 45 kHz, calibrados em 20 μ s) dispostos nas extremidades dos corpos-de-prova, de modo a medir a velocidade ao longo de sua maior dimensão, a exemplo do que foi aplicado nos cilindros de pasta, de modo a possibilitar uma comparação entre cilindros e corpos-de-prova.

Na Tabela 43 apresenta-se a análise da variância (ANOVA) do elemento de análise velocidade do pulso ultra-sônico (VPU) dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral (Vel_D), onde se verificou a existência de diferença significativa nos fatores CASCA, CINZA e, na interação CASCA-CINZA.

Tabela 43: ANOVA do elemento de análise Velocidade Diametral (Vel_D) dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral.

Analysis of Variance for Vel_D - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	0,8402	5	0,16804	30,67	0,0000
B:CINZA	1,81092	3	0,60364	110,16	0,0000
INTERACTIONS					
AB	0,390598	15	0,0260399	4,75	0,0000
RESIDUAL	0,39454	72	0,00547973		
TOTAL (CORRECTED)	3,43626	95			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

Em seguida, são apresentados os resultados da avaliação da casca, cinza e de sua interação, apresentando-se algumas considerações sobre o parâmetro avaliado.

A) Efeito da adição de CASCA.

A Tabela 44 apresenta a análise do fator CASCA, onde se verifica que a redução no valor da VPU está relacionada à presença de casca.

Destaca-se, ainda, a falta de diferença significativa entre as faixas de distribuição em tamanho de casca #200 e #16, o que sugere como possíveis causas da redução na VPU, a presença dos extrativos ainda presentes na casca (interferem nos processos químicos do cimento) e a dimensão da partícula (acredita-se que somente interfere negativamente na VPU quando em dimensão equivalente ou superior a 1,19 mm - #16).

Tabela 44: Análise do fator CASCA: elemento de análise **Vel_D** dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Vel_D by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
1,19 (# 16)	16	3,13313	X
0,074 (# 200)	16	3,17788	XX
0,59 (# 30)	16	3,2235	XX
0,297 (# 50)	16	3,25488	X
0,149 (# 100)	16	3,25544	X
0 (PR)	16	3,43163	X

Faixas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

B) Efeito da adição de CINZA.

A Tabela 45 apresenta a análise do fator CINZA, que evidencia a existência de diferença significativa entre os diferentes percentuais de adição de cinza, com destaque para o aumento na velocidade do pulso ultra-sônico com o aumento no percentual de adição de cinza, o que se atribuiu à possibilidade da existência de vias preferenciais de deslocamento do pulso ultra-sônico propiciado pela cinza.

Tabela 45: Análise do fator CINZA: elemento de análise **Vel_D** dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Vel_D by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
0%	24	3,04421	X
05%	24	3,20225	X
20%	24	3,33283	X
35%	24	3,405	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

A Figura 72 apresenta os gráficos de interação casca-cinza.

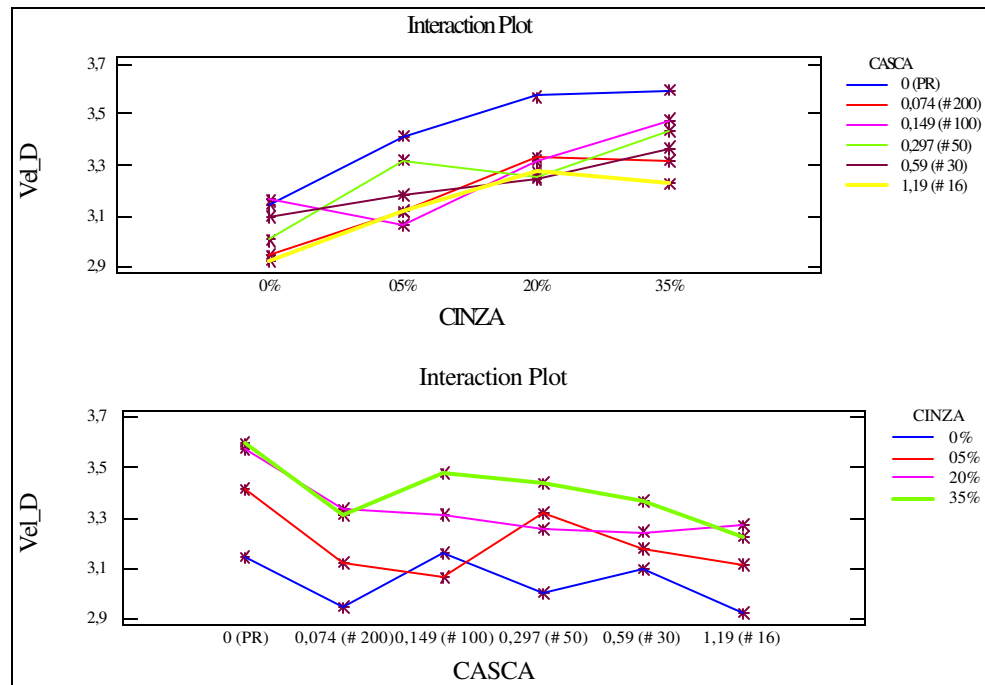


Figura 72: Interação casca-cinza: elemento de análise **Vel_D**.

Em geral, verificou-se que a adição de casca promoveu reduções na velocidade de propagação do pulso ultra-sônico (Vel_D), com destaque para as faixas de distribuição em tamanho de casca #200 e #16, que, quando comparadas à pasta referência, destacam o efeito da adição de casca. Em relação à adição de cinza, destaca-se o percentual de adição de 35%, cujo valor médio de VPU, difere significativamente dos demais percentuais.

D) Considerações a respeito do elemento de análise Velocidade Diametral (Vel_D).

O elemento de análise Velocidade Diametral (Vel_D) foi empregado como elemento de avaliação de comportamento (detectar anomalias) mas, principalmente, para o acompanhar o processo de estabilização mecânica das pastas de cimento-cinza-casca, por meio da observação da evolução da VPU (idades de 0 a 28 dias).

Verificou-se que, enquanto a adição de casca promoveu redução na VPU, a adição de cinza promoveu seu aumento.

4.1.2.3.2 Avaliação da Massa Específica Aparente (MEAp_D, em g/cm³) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à tração por compressão diametral.

Na determinação da massa específica aparente (MEAp_D) dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral, empregou-se a massa do corpo-de-prova na umidade do ensaio, a medida de sua altura e, no caso do diâmetro, a média de duas leituras obtidas uma em cada face do corpo-de-prova, como observado na Figura 50.

A Tabela 46 apresenta a análise da variância (ANOVA) do elemento de análise massa específica aparente dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral (MEAp_D), na qual destaca-se a existência de diferenças significativas nos fatores CASCA, CINZA e, na interação CASCA-CINZA.

Em seguida, são apresentados os resultados da avaliação da casca, da cinza e de sua interação, apresentando-se algumas considerações sobre o parâmetro avaliado.

Tabela 46: ANOVA do elemento de análise Massa Específica Aparente (MEAp_D) dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral.

Analysis of Variance for MEA _p _D - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	0,0403875	5	0,0080775	29,60	0,0000
B:CINZA	0,010125	3	0,003375	12,37	0,0000
INTERACTIONS					
AB	0,0228375	15	0,0015225	5,58	0,0000
RESIDUAL	0,01965	72	0,000272917		
TOTAL (CORRECTED)	0,093	95			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A) Efeito da adição de CASCA.

A Tabela 47 apresenta a análise do fator CASCA, podendo-se verificar que a adição de casca promoveu redução na massa específica (MEAp_D), quando se compara o valor médio das misturas com adição de casca, como o valor médio da pasta referência – 0 (PR).

Tabela 47: Análise do fator CASCA: elemento de análise **MEAp_D** dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for MEdp_D by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
0,074 (# 200)	16	1,71125	X
0,149 (# 100)	16	1,735	X
0,297 (# 50)	16	1,73563	X
0,59 (# 30)	16	1,745	X
1,19 (# 16)	16	1,74812	X
0 (PR)	16	1,78	X

Faixas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

Destaca-se que, em geral, a dimensão da casca pouco interferiu na MEdp_D, pois verifica-se a ausência de diferença significativa entre as misturas com adição de casca, exceto para a #200, cuja redução é atribuída à sua alta superfície específica (maior “inchamento”, com maior formação de espaços vazios pela posterior perda de umidade).

Os valores médios apontam uma tendência de aumento na MEdp_D com o aumento da dimensão das partículas, o que se associou a uma menor formação de espaços vazios.

B) Efeito da adição de CINZA.

Tabela 48: Análise do fator CINZA: elemento de análise **MEAp_D** dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for MEdp_D by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
05%	24	1,73042	X
35%	24	1,73542	XX
0%	24	1,7475	XX
20%	24	1,75667	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

A Tabela 48 apresenta a análise do fator CINZA, onde destaca-se que o percentual de adição de 35% de cinza, mesmo apresentando um dos menores valores de média (não difere significativamente dos percentuais de adição de 5% e de 0% de cinza), apresentou o maior valor de VPU (Tabela 45), o que sugere a existência de vias preferenciais de deslocamento do pulso ultra-sônico atribuídas à cinza.

O percentual de adição de 0% de cinza (sem cinza) apresenta um dos maiores valores médios de massa específica aparente (não difere dos percentuais de adição de 35% e de 20% de cinza) e o menor valor médio de VPU, o que evidencia o efeito de atenuação da onda ultra-sônica promovida pela casca, que se sobressaiu, destacando a falta das vias preferenciais de deslocamento do pulso ultra-sônico propiciado pela cinza.

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

Os gráficos de interação casca-cinza destacam o comportamento da pasta referência – 0 (PR), sem adição de casca, cuja tendência à uniformidade é um indicativo de redução na MEAp_D com o aumento nos percentuais de adição de cinza (Figura 73).

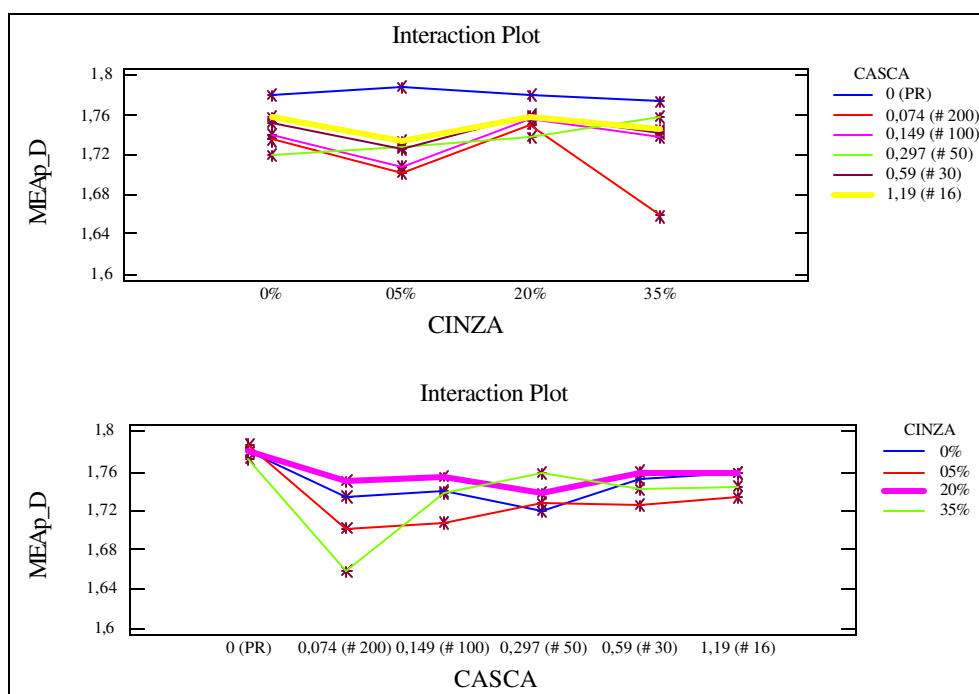


Figura 73: Interação casca-cinza: elemento de análise **MEAp_D**.

Nos corpos-de-prova aos quais se adicionou casca, destaca-se a faixa de distribuição em tamanho de casca #16, por apresentar o maior valor médio de massa específica aparente (MEAp_D), não diferindo significativamente das médias das pastas com adição de casca, à exceção da faixa de distribuição em tamanho de casca #200.

Destaca-se que o comportamento do percentual de adição de 20% de cinza

assemelha-se ao comportamento do percentual de adição de 0% de cinza (sem adição de cinza), apresentando os maiores valores de média, não havendo diferença significativa entre os percentuais de 0% e de 20% de adição de cinza.

D) Considerações a respeito do elemento de análise Massa Específica Aparente.

Verificou-se que a adição de casca interferiu no elemento de análise Massa Específica Aparente dos corpos-de-prova.

Das faixas avaliadas, a que apresentou o maior valor médio foi a faixa de distribuição em tamanho de casca #16, considerada como sendo a de maior interesse por apresentar dimensão de partículas próxima ao das distribuições em tamanho de casca empregadas na fabricação de placas de compósito (5 mm, 10+5 mm e 10 mm).

No caso da faixa de distribuição em tamanho de casca #200, que apresentou o menor valor médio de massa específica, pressupõe-se que tal redução seja em função de sua alta superfície específica, associada a uma maior absorção e adsorção de água (maior “inchamento”), com maior formação de espaços vazios pela posterior perda de umidade.

Em relação à adição de cinza, corpos-de-prova com percentual de 20% de adição apresentam resultados superiores aos corpos-de-prova sem adição de cinza, o que sugere o percentual de 20% como o mais adequado, considerando-se também a uniformidade nas respostas encontradas.

O elemento de análise Massa Específica Aparente dos corpos-de-prova deve ser analisado em conjunto com outros elementos, uma vez que seu comportamento, avaliado de forma isolada, pouca informação acrescenta ao comportamento das misturas avaliadas.

4.1.2.3.3 Avaliação do Módulo de Elasticidade Dinâmico (MOEd_D, em MPa) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à tração por compressão diametral.

A Tabela 49 apresenta a análise da variância (ANOVA) do elemento de análise módulo de elasticidade dinâmico (MOEd_D), onde se destaca a existência de diferença significativa nos fatores CASCA, CINZA e na interação CASCA-CINZA.

Tabela 49: ANOVA do elemento de análise Módulo de Elasticidade dinâmico (MOEd_D) dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral.

Analysis of Variance for MOEd_D - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	1,54218E8	5	3,08436E7	42,42	0,0000
B:CINZA	2,28884E8	3	7,62945E7	104,92	0,0000
INTERACTIONS					
AB	6,03934E7	15	4,02622E6	5,54	0,0000
RESIDUAL	5,2357E7	72	727181,0		
TOTAL (CORRECTED)	4,95852E8	95			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A seguir, são apresentados os resultados da avaliação da casca, da cinza e de sua interação, apresentando-se algumas considerações sobre o parâmetro avaliado.

A) Efeito da adição de CASCA.

Na Tabela 50, apresenta-se a análise do fator CASCA, onde se destaca a pasta referência – 0 (PR), sem adição de casca, por apresentar o maior valor médio de MOEd_D, indicando que a adição de casca promoveu redução no módulo de elasticidade dinâmico da pasta de cimento.

Tabela 50: Análise do fator CASCA: elemento de análise MOEd_D dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for MOEd_D by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
1,19 (# 16)	16	17208,3	X
0,074 (# 200)	16	17323,1	XX
0,59 (# 30)	16	18146,4	XX
0,149 (# 100)	16	18436,6	X
0,297 (# 50)	16	18444,3	X
0 (PR)	16	21045,4	X

Faixas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

Avaliado o comportamento das faixas de distribuição em tamanho de casca #200 e #16, que são os extremos das faixas avaliadas, verificou-se que a dimensão das partículas de casca não influenciou no MOEd_D, atribuindo-se a variabilidade à influência de outras variáveis, como o fator CINZA ou de sua interação com o fator CASCA.

B) Efeito da adição de CINZA.

A Tabela 51 apresenta a análise do fator CINZA, onde se evidencia o aumento no MOE_D com o aumento do percentual de adição de cinza, apontando uma tendência para a estabilidade quando da adição de 35% de cinza.

Destaca-se que o percentual de adição de 0% de cinza apresentou o pior comportamento, atribuído à casca.

No caso dos percentuais de adição de 20% e de 35%, verifica-se que os mesmos não diferem significativamente entre si.

Tabela 51: Análise do fator CINZA: elemento de análise **MOEd_D** dos corpos de prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for MOEd_D by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
0%	24	16225,4	X
05%	24	17792,9	X
20%	24	19552,7	X
35%	24	20165,0	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

Os gráficos de interação casca-cinza evidenciam a redução do Módulo de Elasticidade dinâmico quando se efetua a adição de casca às pastas (Figura 74).

Destacam-se, ainda, os percentuais de adição de 20% e de 35% de cinza como os que apresentaram as maiores médias, nas diferentes faixas de distribuição em tamanho de casca.

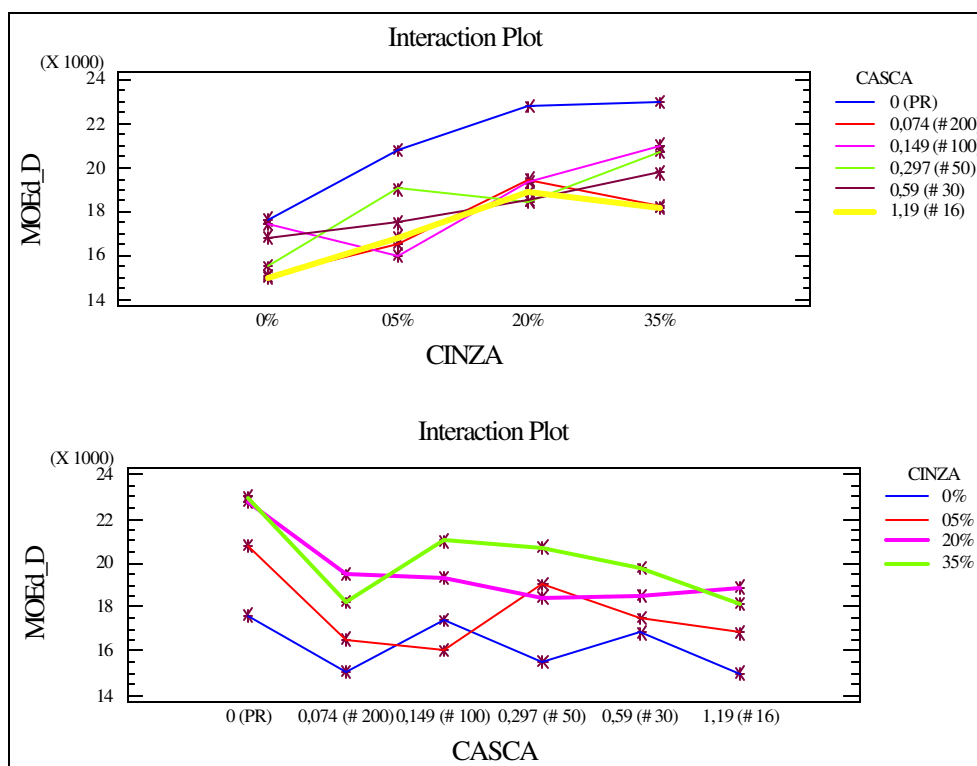


Figura 74: Interação casca-cinza: elemento de análise MOEd_D.

D) Considerações a respeito do elemento de análise Módulo de Elasticidade dinâmico.

O elemento de análise MOEd_D apresenta comportamento similar ao elemento de análise Velocidade Diametral (Vel_D), o que pode ser constatado ao comparar os respectivos gráficos, tendo se verificado um elevado valor de correlação ($R = 0,99$) entre os dois elementos de avaliação.

4.1.2.3.4 Avaliação da Tensão Diametral (Tensao_D, em MPa) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à tração por compressão diametral.

A Tabela 52 apresenta a análise da variância (ANOVA) do elemento de análise Tensão Diametral (Tensao_D), onde se evidencia a existência de diferença significativa nos fatores casca, cinza e, na interação casca-cinza.

Em seguida, são apresentados os resultados da avaliação da casca, cinza e de sua interação, apresentando-se algumas considerações sobre o parâmetro avaliado.

Tabela 52: ANOVA do elemento de análise Tensão Diametral (Tensao_D).

Analysis of Variance for Tensao_D - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	12,2121	5	2,44241	17,63	0,0000
B:CINZA	12,9447	3	4,31491	31,15	0,0000
INTERACTIONS					
AB	5,64326	15	0,376217	2,72	0,0024
RESIDUAL	9,972	72	0,1385		
TOTAL (CORRECTED)	40,7721	95			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A) Efeito da adição de CASCA.

A Tabela 53 apresenta a análise do fator CASCA, onde se destacam a faixa de distribuição em tamanho de casca #200 e a pasta referência – 0 (PR), pois apresentaram os menores valores de resistência à tração por compressão diametral (Tensao_D), não diferindo significativamente entre si.

As médias das demais faixas de distribuição foram superiores e significativamente diferentes das médias da faixa de distribuição #200 e da pasta referência – 0 (PR), apontando um efeito de melhoria na resistência mecânica das pastas, quando da adição de casca com dimensão de partículas superiores a 0,149 mm (#100) e um efeito de redução na resistência, em dimensão inferior a 0,075 mm (#200).

Tabela 53: Análise do fator CASCA: elemento de análise Tensao_D dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Tensao_D by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
0,074 (# 200)	16	2,27125	X
0 (PR)	16	2,46563	X
0,297 (# 50)	16	2,895	X
0,149 (# 100)	16	2,99125	X
1,19 (# 16)	16	3,1425	X
0,59 (# 30)	16	3,26688	X

Faixas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

B) Efeito da adição de CINZA.

A Tabela 54 apresenta a análise do fator CINZA, onde se evidencia que adições de 0% e 5% de cinza não diferem significativamente entre si.

Tabela 54: Análise do fator CINZA: elemento de análise **Tensao_D** dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Tensao_D by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
05%	24	2,39042	X
0%	24	2,565	X
20%	24	3,16292	X
35%	24	3,23667	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

Os gráficos de interação casca-cinza evidenciam o comportamento das médias das faixas de distribuição em tamanho de casca, em função do percentual de cinza (Figura 75).

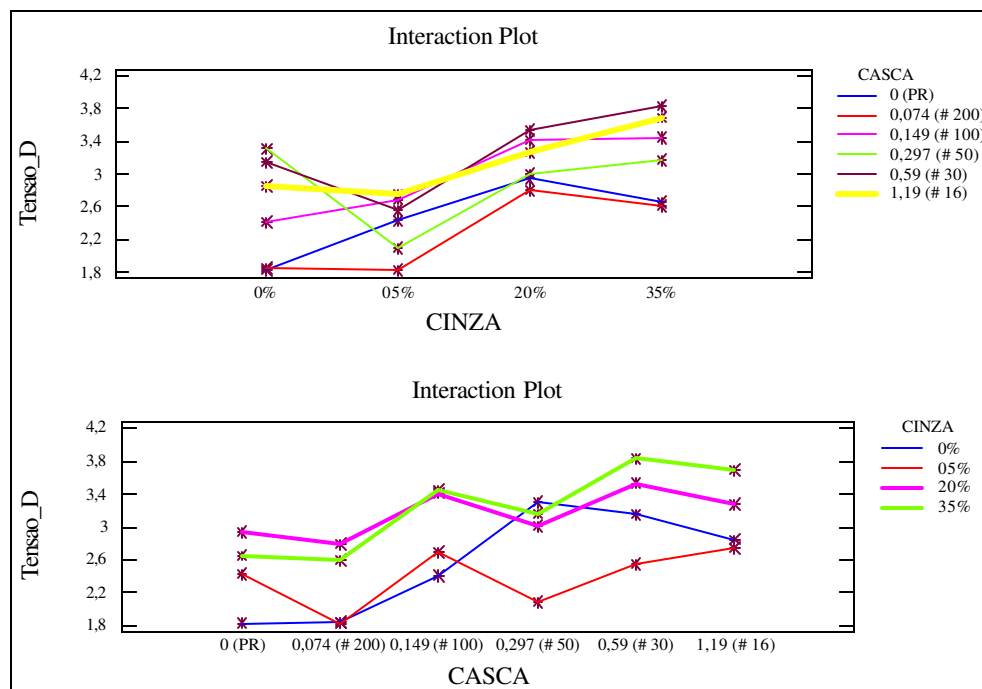


Figura 75: Interação casca-cinza: elemento de análise **Tensao_D**.

Destaca-se que a faixa de distribuição em tamanho de casca #16 não difere significativamente das faixas #30, #50 e #100, apresentando uma das maiores médias de Tensao_D.

Destaca-se, ainda, que na pasta referência – 0 (PR) e na pasta #200, o percentual de adição de 35% de cinza foi inferior ao percentual de adição de cinza de 20%, sendo que tal comportamento reverte-se, a partir da #100, quando em presença de partículas de maior dimensão (#30, #50 e #16), consideradas como sendo pobres em “finos” (partículas passantes em peneira ABNT de malha quadrada de 0,149 mm), o que sugere que o comportamento pode estar associado à quantidade de finos presentes na mistura.

D) Considerações a respeito do elemento de análise Tensão Diametral.

A falta de diferença significativa entre as faixas de distribuição em tamanho de casca #100, #50, #30 e #16 aponta que o desempenho mecânico (tensão diametral) é pouco afetado por estas dimensões de partículas mas, ao compará-las com a pasta referência – 0 (PR) sem adição de casca, verificou-se que apresentaram desempenho mecânico significativamente superior, principalmente nas faixas de distribuição em tamanho de casca, onde a dimensão das partículas é maior. Para a faixa de distribuição em tamanho de casca #16 se verificou que não há diferença significativa entre os percentuais de adição de 20% e de 35% de cinza.

Em relação à faixa de distribuição em tamanho de casca #200, seu efeito sobre a pasta é negativo, com média inferior à pasta referência – 0 (PR), sem adição de casca, porém, não diferindo significativamente desta.

E) Considerações finais sobre a avaliação do parâmetro Resistência à tração por Compressão Diametral das misturas.

Na Tabela 55 apresentam-se os valores dos coeficientes de correlação entre os elementos de análise, calculados pelo software Statgraphics Plus (1999), com destaque para a elevada correlação (0,99) entre os elementos de análise Vel_D e MOEd_D.

Tabela 55: Coeficientes de correlação entre os elementos de análise do parâmetro Resistência à tração por Compressão Diametral.

Correlations	Tensao_D	Vel_D	MEAp_D	MOEd_D
Tensao_D		0,2011 (96) 0,0494	0,1410 (96) 0,1707	0,2052 (96) 0,0449
Vel_D	0,2011 (96) 0,0494		0,2763 (96) 0,0064	0,9875 (96) 0,0000
MEAp_D	0,1410 (96) 0,1707	0,2763 (96) 0,0064		0,4185 (96) 0,0000
MOEd_D	0,2052 (96) 0,0449	0,9875 (96) 0,0000	0,4185 (96) 0,0000	

Legenda
Correlation
(Sample Size)
p-value

Os valores dos coeficientes de correlação apresentados apontam que entre os elementos de análise auxiliares empregados (Vel_D, MEdp_D e MOEd_D), nenhum apresenta condições de predição do comportamento associado aos resultados dos ensaios de tração por compressão Diametral (Tensao_D), caracterizando apenas o comportamento da mistura na condição de produção dos corpos-de-prova.

4.1.2.4 Avaliação do parâmetro Resistência à compressão Simples das misturas.

Os corpos-de-prova de numeração par (2, 4, 6 e 8) foram ensaiados à compressão simples (Tensão_Ax), tendo se efetuado, previamente, avaliações para detectar anomalias capazes de interferir na avaliação global dos resultados, empregando-se os elementos de análise velocidade do pulso ultra-sônico (Vel_Ax), massa específica aparente (MEAp_Ax) e módulo de elasticidade dinâmico (MOEd_Ax).

Tendo em vista o caráter exploratório, análises complexas (interações químico-mecânicas) não foram efetuadas, restringindo-se ao desempenho das misturas com base nos resultados dos ensaios físico-mecânicos.

A Tabelas 56 apresenta as médias dos elementos de análise dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples.

Tabela 56: FASE I - Avaliação físico-mecânica: Parâmetro Compressão Simples.

MÉDIAS	PP-0%	#200-0%	# 100-0%	# 50-0%	# 30-0%	# 16-0%
Vel_Ax. (km/s)	2,898	2,886	3,153	2,992	3,071	2,960
MEAp_Ax. (g/cm ³)	1,79	1,74	1,75	1,73	1,75	1,76
MOEd Ax. (MPa)	15078	14497	17407	15522	16478	15459
Tensão_Ax. (MPa)	32,42	40,40	41,70	38,78	39,14	34,55
MÉDIAS	PP-5%	#200-5%	# 100-5%	# 50-5%	# 30-5%	# 16-5%
Vel_Ax. (km/s)	3,374	3,145	3,054	3,067	3,201	3,159
MEAp_Ax. (g/cm ³)	1,80	1,72	1,73	1,74	1,75	1,76
MOEd Ax. (MPa)	20436	17002	16142	16336	17966	17555
Tensão_Ax. (MPa)	44,64	38,63	37,24	43,03	40,53	34,31
MÉDIAS	PP-20%	#200-20%	# 100-20%	# 50-20%	# 30-20%	# 16-20%
Vel_Ax. (km/s)	3,545	3,332	3,322	3,279	3,252	3,270
MEAp_Ax. (g/cm ³)	1,81	1,75	1,78	1,74	1,77	1,77
MOEd Ax. (MPa)	22781	19416	19638	18680	18753	18893
Tensão_Ax. (MPa)	54,18	41,23	49,13	44,56	44,88	40,70
MÉDIAS	PP-35%	#200-35%	# 100-35%	# 50-35%	# 30-35%	# 16-35%
Vel_Ax. (km/s)	3,611	3,316	3,177	3,430	3,379	3,212
MEAp_Ax. (g/cm ³)	1,80	1,67	1,75	1,76	1,77	1,76
MOEd Ax. (MPa)	23461	18411	17628	20741	20171	18144
Tensão_Ax. (MPa)	50,26	31,49	45,53	49,20	48,22	39,75

OBS.: #200 =0,074 mm; #100 =0,149 mm; #50 =0,297 mm; #30 =0,59 mm e #16 =1,19 mm.

4.1.2.4.1 Avaliação da VPU (Vel_Ax, em km/s) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à compressão simples.

Na determinação da VPU nos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples (Vel_Ax), empregou-se o mesmo procedimento usado na determinação da VPU nos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral (Vel_D), empregando-se os transdutores de face plana de 45 kHz, calibrados em 20 µs, e dispostos nas extremidades planas dos corpos-de-prova.

Na Tabela 57 apresenta-se a análise da variância (ANOVA) do elemento de análise VPU nos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples (Vel_Ax), de modo que se destaca a existência de diferença significativa nos fatores CASCA, CINZA e, na interação CASCA-CINZA.

Em seguida, são apresentados os resultados da avaliação da casca, da cinza e de sua interação, apresentando-se algumas considerações sobre o parâmetro avaliado.

Tabela 57: ANOVA do elemento de análise Velocidade Axial (Vel_Ax) dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples.

Analysis of Variance for Vel_Ax - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	0,456834	5	0,0913668	21,69	0,0000
B:CINZA	2,0357	3	0,678568	161,10	0,0000
INTERACTIONS					
AB	0,761748	15	0,0507832	12,06	0,0000
RESIDUAL	0,303268	72	0,00421206		
TOTAL (CORRECTED)	3,55755	95			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A) Efeito da adição de CASCA.

A Tabela 58 apresenta a análise do fator CASCA, onde se verificou que a média da pasta referência – 0 (PR) apresenta o maior valor médio de Vel_Ax, diferindo significativamente das demais médias, indicando que a adição de casca interfere na VPU.

Tabela 58: Análise do fator CASCA: elemento de análise Vel_Ax dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Vel_Ax by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
1,19 (# 16)	16	3,15006	X
0,074 (# 200)	16	3,16975	XX
0,149 (# 100)	16	3,17638	XX
0,297 (# 50)	16	3,19213	XX
0,59 (# 30)	16	3,22569	X
0 (PR)	16	3,35719	X

Faixas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

Avaliando-se os valores médios das misturas com adição de casca, destaca-se que a faixa de distribuição em tamanho das partículas #16 (uma das mais compatíveis com a pasta de cimento) apresentou o menor valor médio de VPU, fato este também verificado em Vel_D, o que sugere que a dimensão da partícula somente interfere negativamente na VPU quando em dimensão equivalente ou superior a 1,19 mm (#16).

B) Efeito da adição de CINZA.

A Tabela 59 apresenta a análise do fator CINZA, onde se destaca o percentual de adição de 35% de cinza, não diferindo significativamente do percentual de adição de 20% de cinza. Este comportamento não foi evidenciado no elemento Vel_D (os percentuais diferem significativamente entre si), tendo se verificado que em Vel_D e em Vel_Ax, ocorre um aumento na VPU com o aumento no percentual de adição de cinza.

Tabela 59: Análise do fator CINZA: elemento de análise **Vel_Ax** dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Vel_Ax by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
0%	24	2,99333	X
05%	24	3,16658	X
20%	24	3,33338	X
35%	24	3,35417	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

A Figura 76 apresenta gráficos de interação casca-cinza, que evidenciam o comportamento das médias das faixas de distribuição em tamanho de casca, em função do percentual de cinza.

Em geral, verificou-se que a adição de cinza promoveu melhorias no comportamento da média dos corpos-de-prova, no que se refere à VPU (Vel_Ax), com destaque para as pasta referência – 0 (PR), sem adição de casca, tendo-se, ainda, a similaridade no comportamento das faixas de distribuição em tamanho de casca #200 e #16, fato este também observado na análise do elemento Velocidade Diametral (Vel_D).

Comparando-se os gráficos da interação casca-cinza entre os elementos de análise Velocidade Axial e Velocidade Diametral, verificou-se que o percentual de adição de 20% de cinza apresentou o mesmo comportamento, indicando uma homogeneidade para este tipo de mistura, que não foi observada nos demais percentuais.

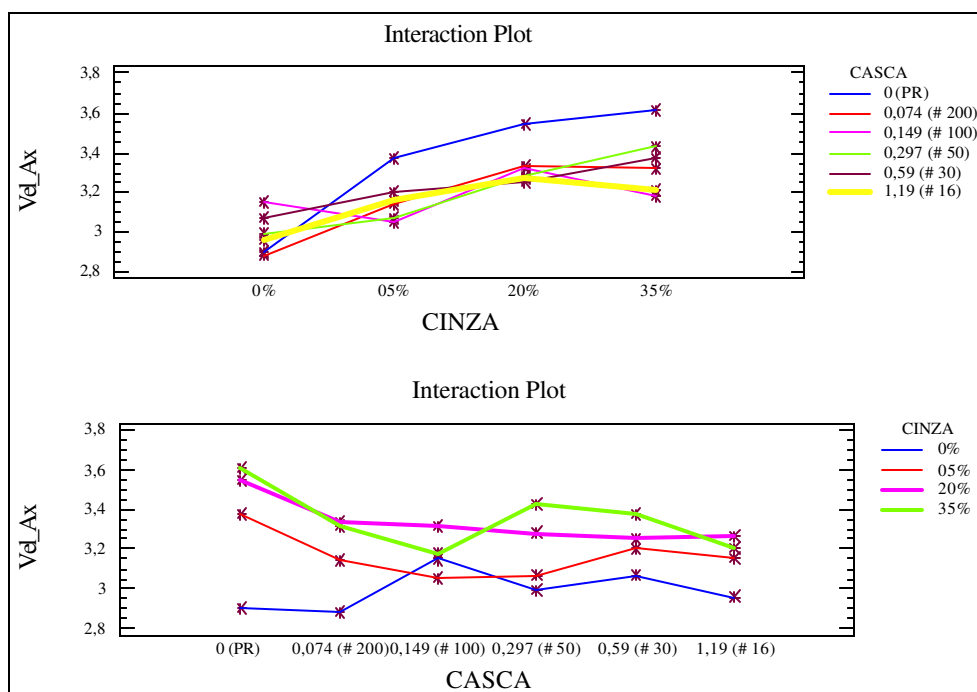


Figura 76: Interação casca-cinza: elemento de análise **Vel_Ax**.

D) Considerações a respeito do elemento de análise Velocidade Axial (**Vel_Ax**).

O elemento de análise Velocidade Axial, empregado como instrumento de avaliação de comportamento, indicou uma variabilidade não esperada no percentual de adição de 35% de cinza.

As implicações de ordem prática ainda não estão evidentes, sendo melhor avaliadas, através da evolução da VPU (EVPU - idades de 0 a 28 dias).

4.1.2.4.2 Avaliação da Massa Específica Aparente (MEAp_D, em g/cm³) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à compressão simples.

A massa específica aparente dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples (MEAp_Ax) foi calculada com base na massa do corpo-de-prova na umidade do ensaio, na altura (medida de face plana a face plana – Figura 50) e no diâmetro médio, sendo as duas medidas do diâmetro efetuadas perpendicularmente entre si na região mediana da altura do corpo-de-prova. Cada cilindro de mistura está representado pela média de quatro (04) corpos-de-prova (2, 4, 6 e 8).

Na Tabela 60 apresenta-se a análise da variância (ANOVA) do elemento de análise massa específica aparente dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples (MEAp_Ax), na qual destaca-se a existência de diferenças significativas nos fatores CASCA, CINZA e na interação CASCA-CINZA.

Em seguida, são apresentados os resultados da avaliação da casca, da cinza e de sua interação, apresentando-se considerações sobre o parâmetro avaliado.

Tabela 60: ANOVA do elemento de análise Massa Específica Aparente (MEAp_Ax) dos corpos de prova ensaiados à compressão simples.

Analysis of Variance for MEA _p A _x - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	0,0551083	5	0,0110217	87,20	0,0000
B:CINZA	0,00648333	3	0,00216111	17,10	0,0000
INTERACTIONS					
AB	0,0156417	15	0,00104278	8,25	0,0000
RESIDUAL	0,0091	72	0,000126389		
TOTAL (CORRECTED)	0,0863333	95			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A) Efeito da adição de CASCA.

A Tabela 61 apresenta a análise do fator CASCA, na qual se evidencia que a adição de casca promoveu redução na MEA_pA_x.

Tabela 61: Análise do fator CASCA: elemento de análise **MEAp_Ax** dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for MEA _p A _x by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
0,074 (# 200)	16	1,72063	X
0,297 (# 50)	16	1,7425	X
0,149 (# 100)	16	1,75063	XX
0,59 (# 30)	16	1,75938	X
1,19 (# 16)	16	1,76188	X
0 (PR)	16	1,8	X

Faixas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

Comparando-se a massa específica aparente dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral (MEAp_D) com aqueles ensaiados à compressão simples (MEAp_Ax) verificou-se que, em geral, a dimensão das partículas da casca pouco interferiu na massa específica aparente, à exceção da faixa de distribuição em tamanho de casca #200, devido à sua alta superfície específica.

B) Efeito da adição de CINZA.

A Tabela 62 apresenta a análise do fator CINZA, destacando-se o percentual de adição de 35% de cinza que, mesmo apresentando um dos menores valores de média de MEA_p_Ax (não difere significativamente dos percentuais de adição de 5% e de 0% de cinza), apresenta o maior valor de VPU, fato este também verificado quando da avaliação de corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral (MEAp_D).

Tabela 62: Análise do fator CINZA: elemento de análise **MEAp_Ax** dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for MEA _p _Ax by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
05%	24	1,74875	X
35%	24	1,75042	X
0%	24	1,75458	X
20%	24	1,76958	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

Destaca-se, ainda, o percentual de adição de 0% de cinza, que apresenta um dos maiores valores médios de MEA_p_Ax, tendo apresentado o menor valor médio de VPU, fato também constatado em corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral (MEAp_D).

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

Os gráficos de interação casca-cinza, apresentados na Figura 77, destacam que o comportamento das médias dos corpos-de-prova com adição de casca apontam uma tendência

à uniformidade, exceto para a faixa de distribuição em tamanho de casca #16, que apresentou o mesmo tipo de comportamento em todos os níveis de cinza (variação máxima de $\pm 0,01 \text{ g/cm}^3$).

Destaca-se, ainda, que o percentual de adição de 20% de cinza apresentou os maiores valores de média, com comportamento similar àquele observado nos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral (MEAp_D).

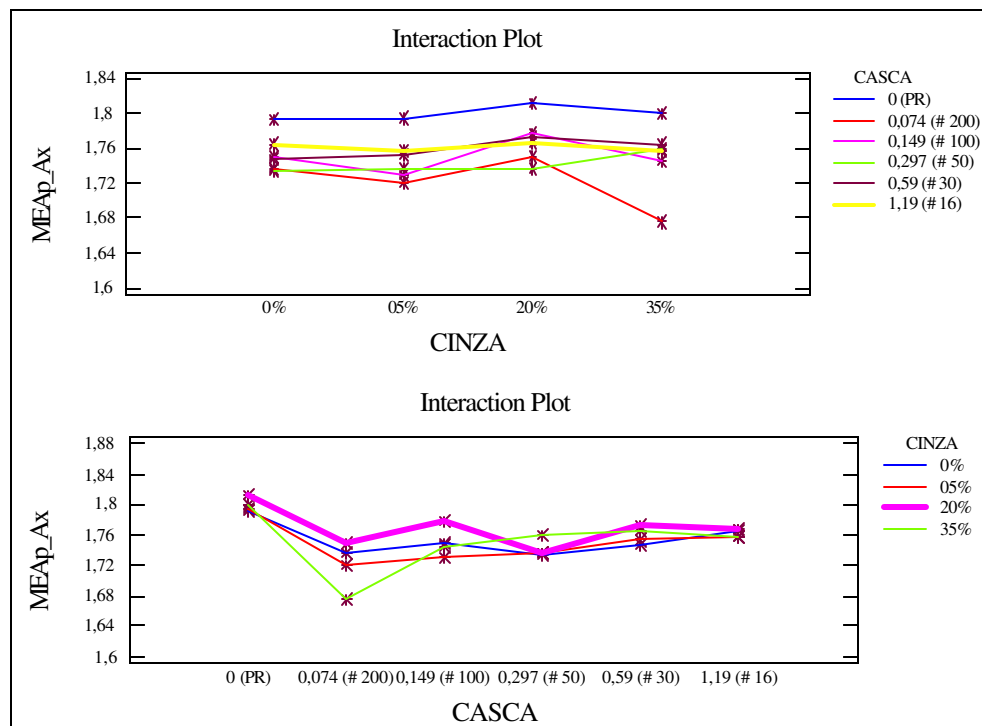


Figura 77: Interação casca-cinza: elemento de análise MEA_p_Ax.

D) Considerações a respeito do elemento de análise Massa Específica Aparente.

O elemento de análise Massa Específica Aparente dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples (MEAp_Ax), de forma similar ao elemento de análise Massa Específica Aparente dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral (MEAp_D), foi empregado como elemento de avaliação de comportamento.

Destaca-se que a adição de casca promove redução na massa específica aparente enquanto que a adição de cinza promove seu aumento.

Em geral, nas misturas às quais se adicionou casca, o efeito da dimensão de suas partículas pouco interferiu na massa específica aparente, apresentando, contudo, uma

tendência de aumento com o aumento da dimensão das partículas.

A faixa de distribuição em tamanho de casca #200 é uma exceção, na medida em que promove redução na massa específica aparente, em função de sua alta superfície específica, resultante da reduzida dimensão de suas partículas (pó).

Em relação à adição de cinza, corpos-de-prova com percentual de 20% de adição apresentaram média de **MEAp** superior às demais médias, tendo apresentado um dos maiores valores médios de **VPU** (valor inferior mas não diferindo significativamente do percentual de 35%).

O elemento de análise Massa Específica Aparente dos corpos-de-prova deve ser analisado em conjunto com outros elementos, uma vez que seu comportamento avaliado de forma isolada pouca informação acrescenta ao comportamento das misturas avaliadas.

4.1.2.4.3 Avaliação do Módulo de Elasticidade Dinâmico (MOEd_Ax, em MPa) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à compressão simples.

A Tabela 63, que apresenta a análise da variância (ANOVA) do elemento de análise MOEd_Ax dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples, destaca a existência de diferença significativa nos fatores CASCA, CINZA e na interação CASCA-CINZA

Tabela 63: ANOVA do elemento de análise Módulo de Elasticidade dinâmico (MOEd_Ax) dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples.

Analysis of Variance for MOEd_D - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	1,54218E8	5	3,08436E7	42,42	0,0000
B:CINZA	2,28884E8	3	7,62945E7	104,92	0,0000
INTERACTIONS					
AB	6,03934E7	15	4,02622E6	5,54	0,0000
RESIDUAL	5,2357E7	72	727181,0		
TOTAL (CORRECTED)	4,95852E8	95			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A seguir, são apresentados os resultados da avaliação da casca, da cinza e de sua interação, apresentando-se algumas considerações sobre o parâmetro avaliado.

A) Efeito da adição de CASCA.

A Tabela 64 apresenta a análise do fator CASCA, onde se verificou que sua adição promoveu redução no módulo de elasticidade dinâmico da pasta de cimento, com base no comportamento apresentado pela pasta referência – 0 (PR) sem adição de casca, que apresentou o maior valor médio de Módulo de Elasticidade dinâmico (MOEd_Ax), diferindo significativamente das demais médias.

Tabela 64: Análise do fator CASCA: elemento de análise **MOEd_Ax** dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for MOEd_Ax by CASCA			

Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups

0,074 (# 200)	16	17331,5	X
1,19 (# 16)	16	17512,9	X
0,149 (# 100)	16	17703,9	XX
0,297 (# 50)	16	17819,8	XX
0,59 (# 30)	16	18342,0	X
0 (PR)	16	20438,9	X

Faixas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

A influência da dimensão das partículas de casca no módulo de elasticidade dinâmico não foi evidenciada (as faixas de distribuição em tamanho de casca #200 e #16 não diferem significativamente entre si). Atribui-se ao fator CINZA, a variabilidade observada.

B) Efeito da adição de CINZA.

A Tabela 65 apresenta a análise do fator CINZA, traduzido pelo incremento promovido e associado ao aumento no percentual de adição de cinza, com destaque para os percentuais de adição de 20% e de 35% de cinza, que não diferiram significativamente entre si.

Verificou-se que esse comportamento se mostrou semelhante ao observado no fator CINZA, para o MOEd_D, avaliado através dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral.

Tabela 65: Análise do fator CINZA: elemento de análise **MOEd_Ax** dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for MOEd_Ax by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
0%	24	15740,3	X
05%	24	17572,9	X
20%	24	19693,4	X
35%	24	19759,4	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

A Figura 78 apresenta os gráficos de interação casca-cinza, onde se destaca a pasta referência – 0(PR), sem adição de casca, pois apresentou os maiores valores médios quando recebeu adição de cinza.

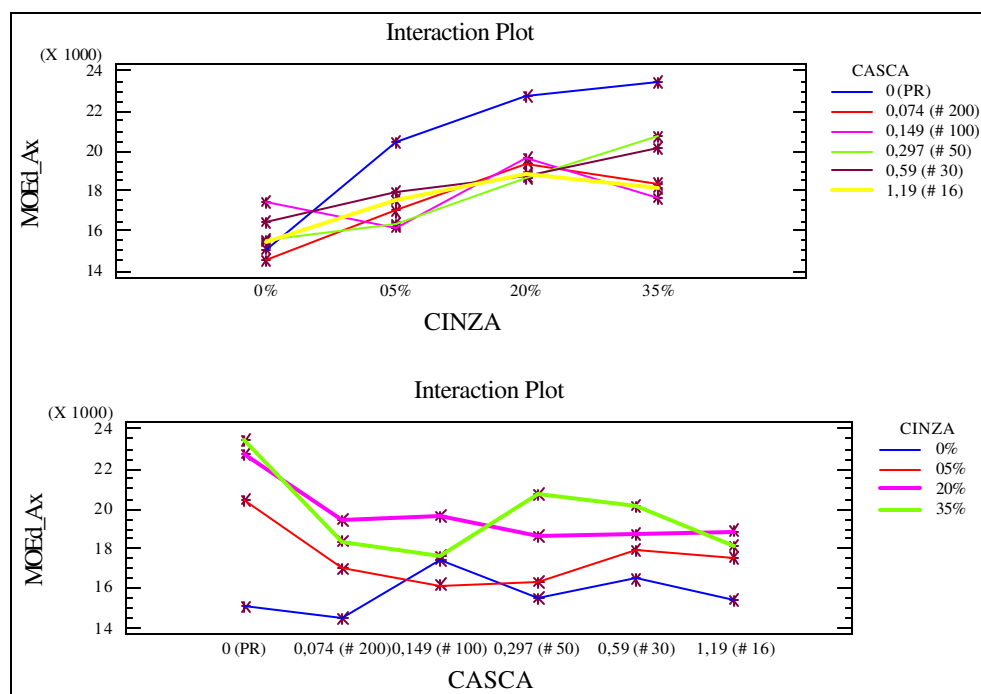


Figura 78: Interação casca-cinza: elemento de análise **MOEd_Ax**.

Destaca-se, ainda, o efeito de redução no **MOEd_Ax** com a adição de casca e o aumento no **MOEd_Ax** com a adição de cinza, onde se verifica que os percentuais de 20% e de 35% de cinza promoveram os maiores valores de **MOEd_Ax**.

D) Considerações a respeito do elemento de análise Módulo de Elasticidade dinâmico.

Os elementos de análise MOEd_Ax e Vel_Ax apresentaram comportamento similar, perceptível ao comparar os respectivos gráficos ou, o seu coeficiente de correlação (0,9882).

A adição de casca afetou negativamente e de forma significativa o elemento de análise MOEd_Ax, enquanto que a adição de cinza promoveu melhorias significativas nessa propriedade.

4.1.2.4.4 Avaliação da Tensão Axial (Tensao_Ax, em MPa) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à compressão simples.

A Tabela 66 apresenta a análise da variância (ANOVA) do elemento de análise Tensão Axial (Tensao_Ax), onde se evidencia a existência de diferença significativa nos fatores CASCA, CINZA e, na interação CASCA-CINZA.

Em seguida, são apresentados os resultados da avaliação da casca, da cinza e da interação casca-cinza, apresentando-se algumas considerações.

Tabela 66: ANOVA do elemento de análise Tensão Axial (Tensao_Ax).

Analysis of Variance for Tensao_Ax - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	904,704	5	180,941	8,73	0,0000
B:CINZA	984,853	3	328,284	15,84	0,0000
INTERACTIONS					
AB	1207,29	15	80,4863	3,88	0,0000
RESIDUAL	1492,37	72	20,7274		
TOTAL (CORRECTED)	4589,22	95			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A) Efeito da adição de CASCA.

A Tabela 67 apresenta a análise do fator CASCA, com destaque para as faixas de distribuição em tamanho de casca #200 e #16, cujos valores médios de resistência são inferiores, diferindo significativamente das demais médias.

Tabela 67: Análise do fator CASCA: elemento de análise **Tensao_Ax** dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Tensao_Ax by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
1,19 (# 16)	16	37,3281	X
0,074 (# 200)	16	37,9381	X
0,59 (# 30)	16	43,1944	X
0,149 (# 100)	16	43,3994	X
0,297 (# 50)	16	43,8919	X
0 (PR)	16	45,3738	X

Faixas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

A adição de casca promoveu redução nos valores médios de resistência à compressão simples, em relação à pasta referência – 0 (PR) sem adição de casca. A baixa resistência à compressão simples (Tensao_Ax) observada na faixa de distribuição em tamanho de casca #16 pode ser atribuída à formação de espaços associados ao aumento na porosidade (Figura 69) ou, a uma possível presença de casca chocha (Figura 113) que apresenta, geralmente, menor dimensão, quando comparada à casca onde houve a formação do grão (casca com dimensão máxima característica de 2,38 mm).

B) Efeito da adição de CINZA.

A Tabela 68 apresenta a análise do fator CINZA, onde se verifica a falta de diferença significativa entre os percentuais de adição de 0% e de 5% de cinza. Uma adição de 5% de cinza representa um ganho de resistência relativamente baixo, razão pela qual o percentual de adição de 5% de cinza foi descartado das demais etapas da pesquisa.

Tabela 68: Análise do fator CINZA: elemento de análise **Tensao_Ax** dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Tensao_Ax by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
0%	24	37,8325	X
05%	24	39,7292	X
35%	24	44,0754	X
20%	24	45,78	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

Destacam-se, ainda, os elevados valores de resistência associados aos percentuais de adição de 20% e de 35% de cinza. Os valores médios dos diferentes percentuais de adição apontam uma tendência de aumento na resistência, com o aumento no percentual de adição.

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

A Figura 79 apresenta gráficos de interação casca-cinza, que evidenciam o comportamento das médias das faixas de distribuição em tamanho de casca, em função do percentual de adição de cinza.

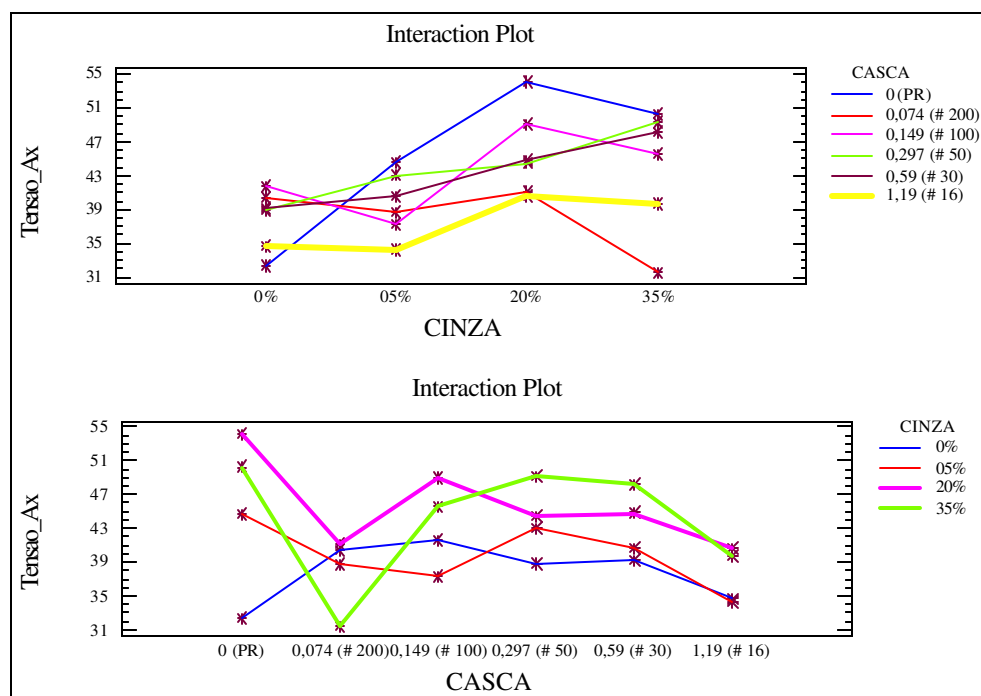


Figura 79: Interação casca-cinza: elemento de análise **Tensao_Ax**.

A faixa de distribuição em tamanho de casca #16 apresenta os menores valores de média e, uma tendência de crescimento, com o aumento no percentual de adição de cinza, o que pode estar associado a maior presença dos “finos” da cinza, promovendo um melhor preenchimento dos espaços entre as partículas de casca.

Destaca-se, ainda, que os percentuais de adição de 20% e de 35% de cinza não diferem significativamente entre si.

D) Considerações a respeito do elemento de análise Tensão Axial.

A adição de casca promoveu redução na resistência dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples, enquanto que a adição de cinza promoveu seu aumento. Considera-se que a interação casca-cinza promoveu modificações no comportamento da tensão axial da pasta de cimento, em função de um efeito atribuído aos “finos” da cinza e à redução dos efeitos negativos dos extrativos ainda presentes na casca.

E) Considerações finais sobre a avaliação do parâmetro Resistência à compressão simples das misturas.

Na Tabela 69 apresentam-se os valores dos coeficientes de correlação entre os elementos de análise, com destaque para a elevada correlação (0,9884) entre os elementos de análise **Vel_Ax** e **MOEd_Ax**.

Tabela 69: Coeficientes de correlação (Pearson) entre os elementos de análise do parâmetro **Resistência à compressão simples**.

Correlations	Tensao_Ax	Vel_Ax	MEAp_Ax	MOEd_Ax
Tensao_Ax		0,5726 (96) 0,0000	0,4644 (96) 0,0000	0,6134 (96) 0,0000
Vel_Ax	0,5726 (96) 0,0000		0,3416 (96) 0,0007	0,9884 (96) 0,0000
MEAp_Ax	0,4644 (96) 0,0000	0,3416 (96) 0,0007		0,4747 (96) 0,0000
MOEd_Ax	0,6134 (96) 0,0000	0,9884 (96) 0,0000	0,4747 (96) 0,0000	

Legenda
Correlation
(Sample Size)
p-value

Os demais valores apresentados indicam uma baixa correlação entre os elementos de análise (variando de 0,4644 a 0,6134) e, por isso, podem ser considerados inadequados para uso como elemento preditivo de comportamento dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples.

4.1.2.5 Avaliação dos resultados dos ensaios mecânicos envolvendo os parâmetros Resistência à tração por Compressão Diametral e Resistência à compressão Simples, dos corpos-de-prova cilíndricos.

Correlacionando os resultados dos ensaios de tração por compressão diametral (elemento de análise: Tensao_D) e de compressão simples (elemento de análise: Tensao_Ax), foi possível evidenciar um baixo coeficiente de correlação ($R = 0,26$) entre estes ensaios.

Verificou-se, ainda, que nos parâmetros Tensao_D e Tensao_Ax, o percentual de adição de 5% de cinza não diferiu significativamente do percentual de adição de 0% (sem adição de cinza) e, por representar um ganho de resistência relativamente baixo, o percentual de adição de 5% de cinza foi descartado das demais etapas da pesquisa (Fases II, III e IV).

4.1.2.6 Evolução da Velocidade de Propagação do Pulso Ultra-Sônico (EVPU).

Nas Figuras 80 a 85 estão representados os comportamentos da EVPU da pasta referência (PP) e de cada faixa de distribuição em tamanho de casca, em função dos diferentes percentuais de adição de cinza, no período de 0-24 horas.

Já nas Figuras 86 a 89 estão representados os comportamentos da EVPU da pasta referência (PP) e das diferentes faixas de distribuição em tamanho de casca, em função do percentual de adição de cinza, no período de 0-24 horas.

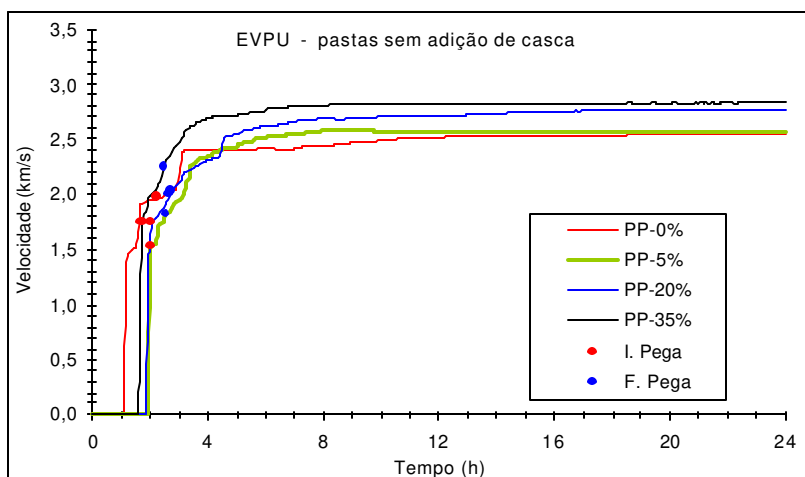


Figura 80: EVPU (0-24 h): Pastas sem adição de casca.

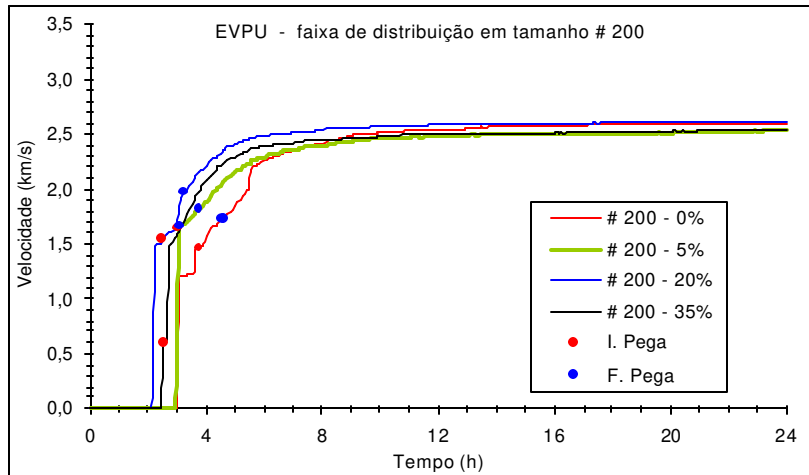


Figura 81: **EVPU** (0-24 h): Faixa de distribuição em tamanho de casca #200.

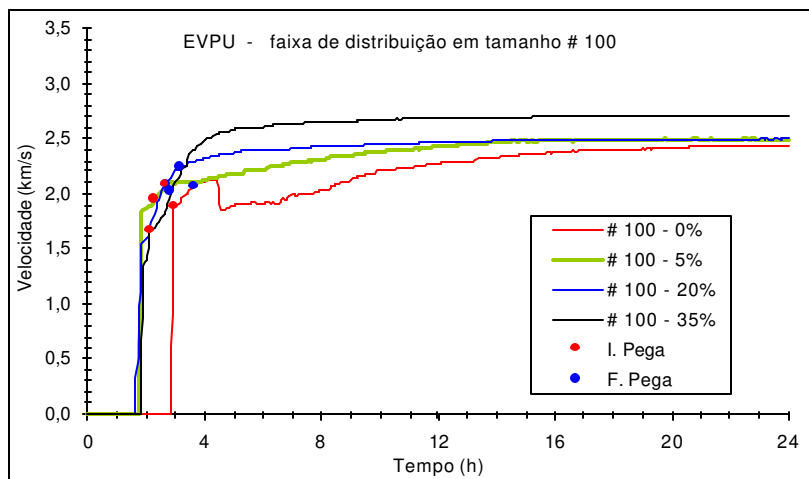


Figura 82: **EVPU** (0-24 h): Faixa de distribuição em tamanho de casca #100.

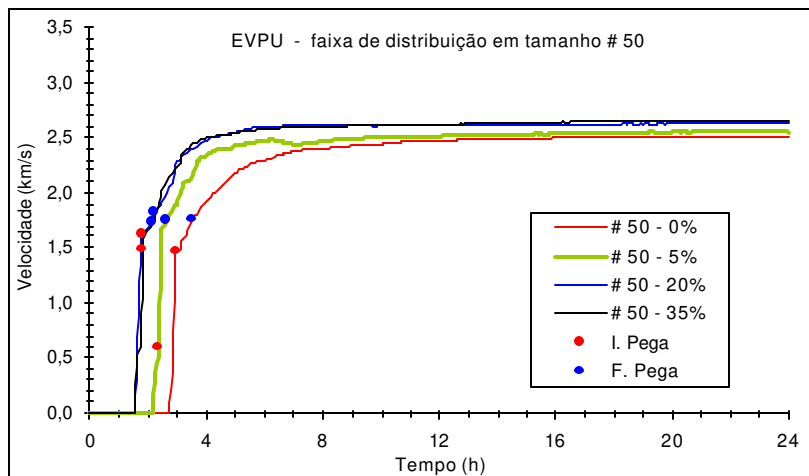


Figura 83: **EVPU** (0-24 h): Faixa de distribuição em tamanho de casca #50.

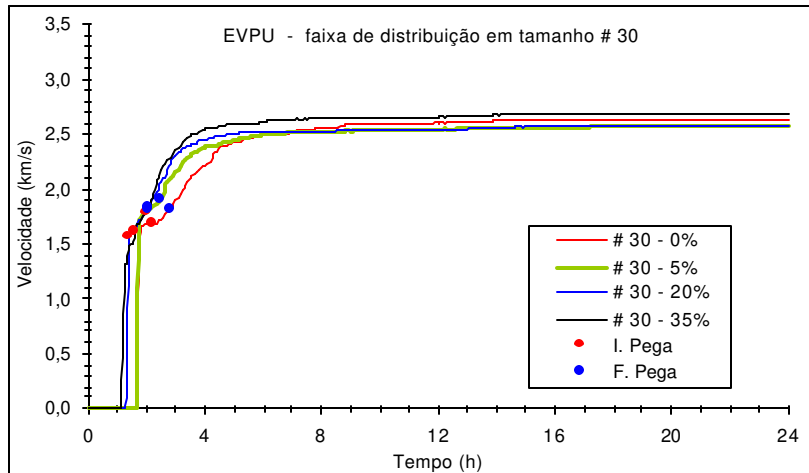


Figura 84: EVPU (0-24 h): Faixa de distribuição em tamanho de casca #30.

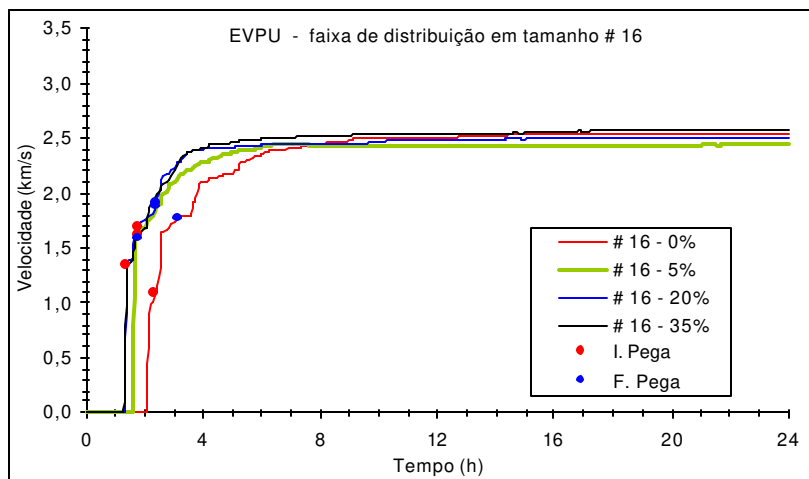


Figura 85: EVPU (0-24 h): Faixa de distribuição em tamanho de casca #16.

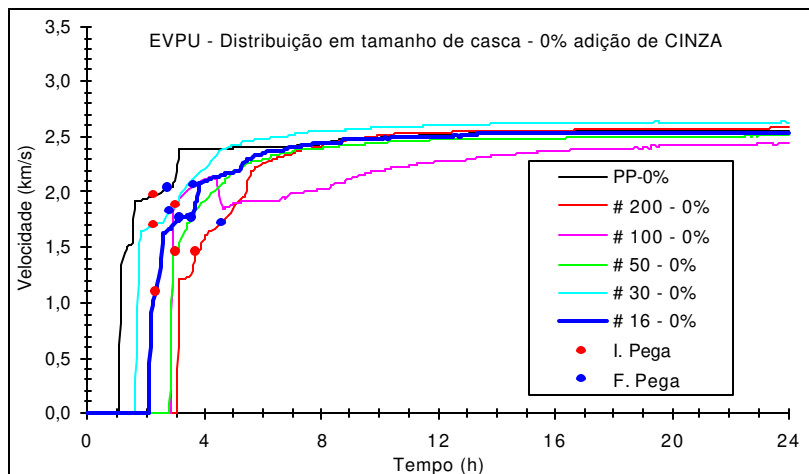


Figura 86: EVPU (0-24 h): Efeito da adição de 0% de cinza.

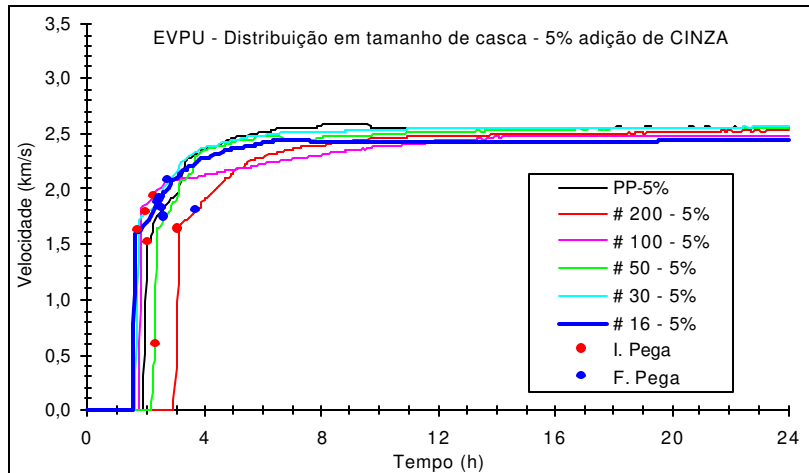


Figura 87: EVPU (0-24 h): Efeito da adição de 5% de cinza.

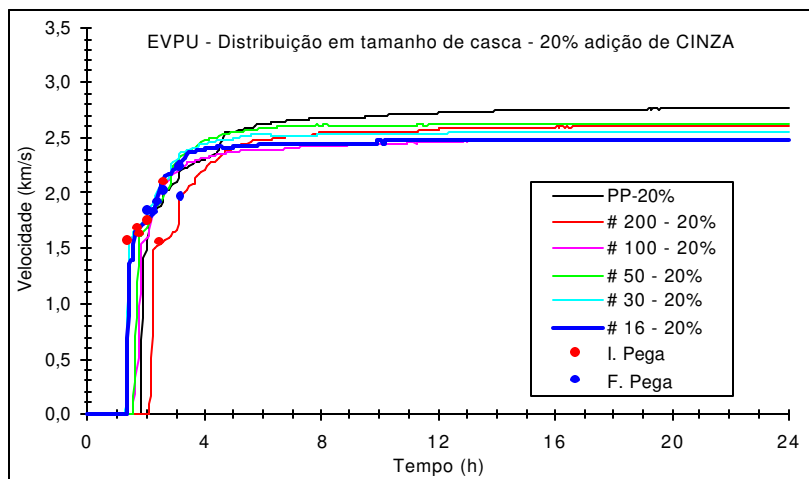


Figura 88: EVPU (0-24 h): Efeito da adição de 20% de cinza.

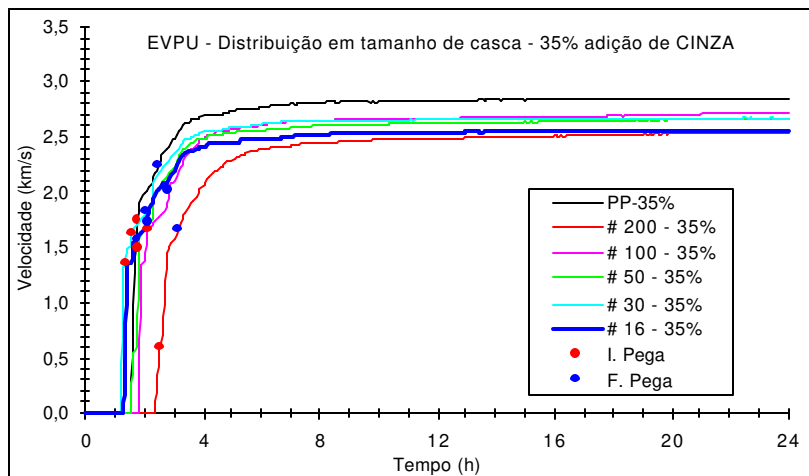


Figura 89: EVPU (0-24 h): Efeito da adição de 35% de cinza.

Avaliando os gráficos das figuras 80 a 89 verificou-se que geralmente o parâmetro Início de Pega está associado às primeiras medidas de VPU, o que possibilita caracterizar o Início de Pega como sendo o instante em que se obtém as primeiras medidas de VPU, uma vez que para que isto ocorra, estruturas mecânicas baseadas na pasta de cimento (precipitados, estruturas cristalinas, entre outros), possibilitariam a formação de elementos capazes de permitir a passagem do pulso ultra-sônico.

Destaca-se que a adição de cinza (20% e de 35%) promoveu, em geral, redução no tempo necessário para a obtenção das primeiras medidas de VPU, como pode ser observado quando se comparam as misturas com adição de cinza e as misturas sem adição de cinza (em geral, os resultados menos adequados para o início das medidas de VPU).

A influência negativa da casca de arroz nas reações de hidratação (possivelmente na formação das estruturas químicas e compostos secundários) é evidenciada através da Figura 86 (EVPU 0-24 h: Efeito da adição de 0% de cinza), quando se compara a VPU da pasta pura (sem adições de casca e cinza) com as demais.

A faixa de distribuição em tamanho de casca #200 destaca-se das demais por apresentar sempre o menor valor de VPU e, a faixa de distribuição em tamanho de casca #16 apresenta, geralmente, os menores tempos para o surgimento das primeiras medidas de VPU.

Nas Figuras 90 a 95 estão representados os comportamentos da EVPU de cada faixa de distribuição em tamanho de casca, em função dos diferentes percentuais de adição de cinza, no período de 0-28 dias, incluindo-se a média dos valores medidos nos corpos-de-prova.

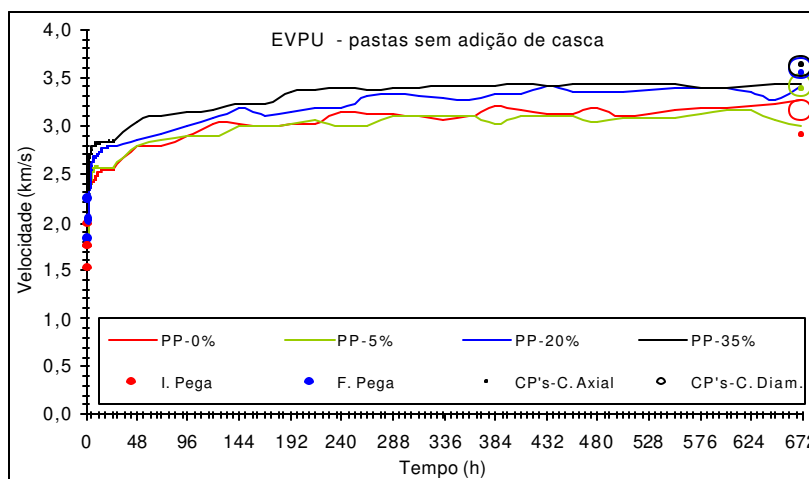


Figura 90: EVPU (0-28 dias): Pastas sem adição de casca.

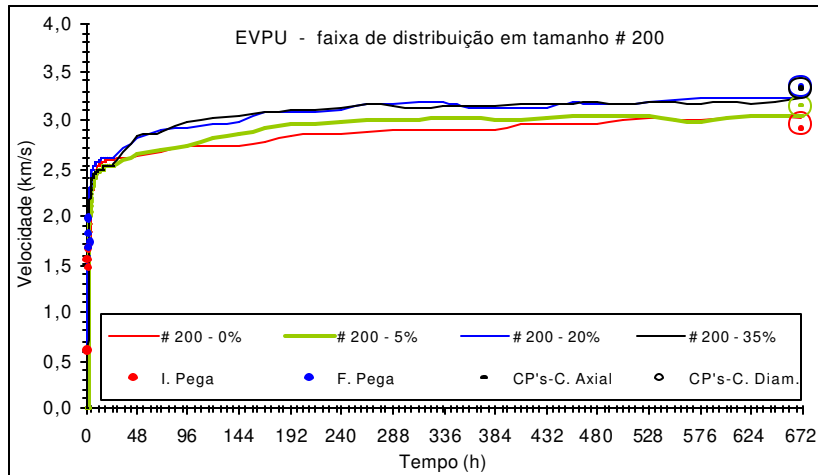


Figura 91: **EVPU** (0-28 dias): Faixa de distribuição em tamanho de casca #200.

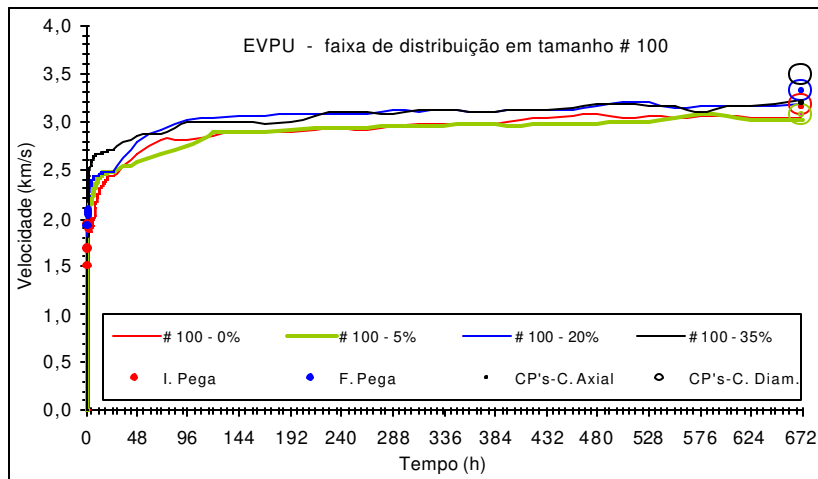


Figura 92: **EVPU** (0-28 dias): Faixa de distribuição em tamanho de casca #100.

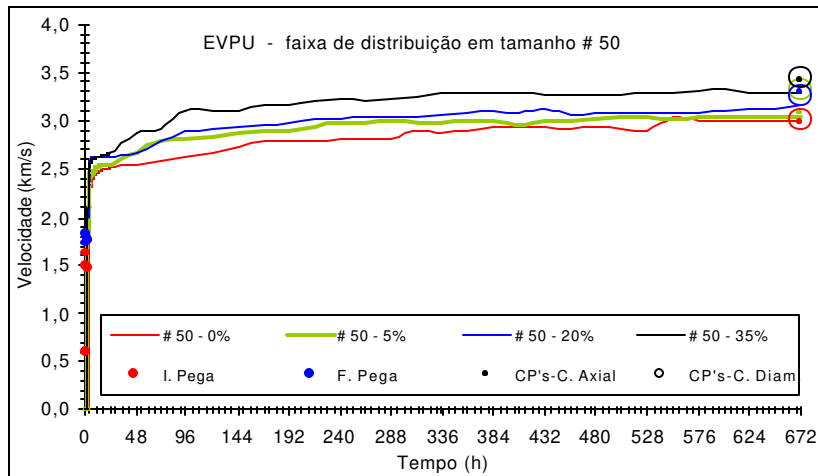


Figura 93: **EVPU** (0-28 dias): Faixa de distribuição em tamanho de casca #50.

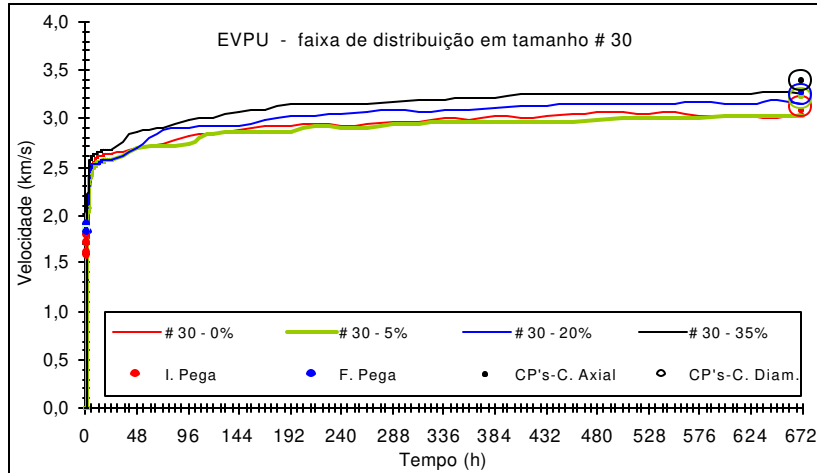


Figura 94: **EVPU (0-28 dias):** Faixa de distribuição em tamanho de casca #30.

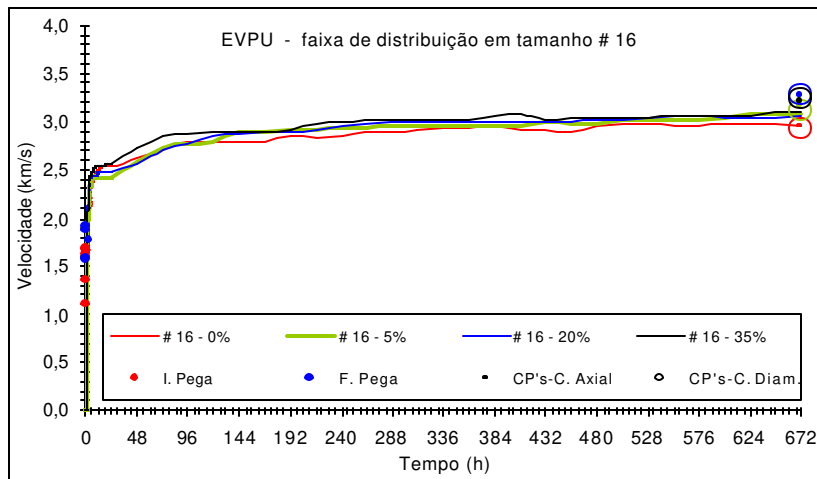


Figura 95: **EVPU (0-28 dias):** Faixa de distribuição em tamanho de casca #16.

Comparando-se a VPU dos cilindros de mistura e a VPU média dos corpos-de-prova, aos 28 dias de idade, apresentados nas Figuras 90 a 95, evidencia-se que em misturas sem adição de cinza - 0%, a VPU dos corpos-de-prova (média) é, em geral, semelhante a VPU dos cilindros. Contudo, na pasta pura (PP-0%) e na mistura #200-0%, à VPU dos corpos-de-prova (média) foi inferior à VPU dos cilindros, porém, não sendo possível estabelecer as causas deste tipo de comportamento.

Nas Figuras 96 a 99 estão representados os comportamentos da EVPU das faixas de distribuição em tamanho de casca, em função do percentual de adição de cinza, no período de 0-28 dias, incluindo-se a média dos valores medidos nos corpos-de-prova.

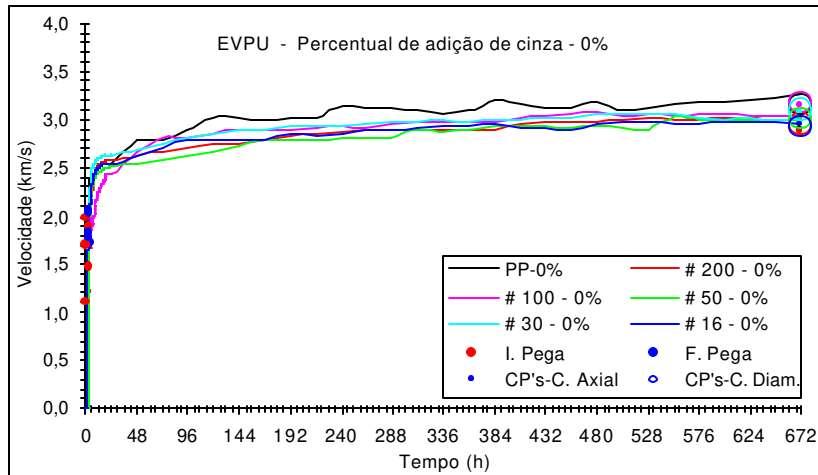


Figura 96: **EVPU** (0-28dias): Efeito da adição de 0% de cinza.

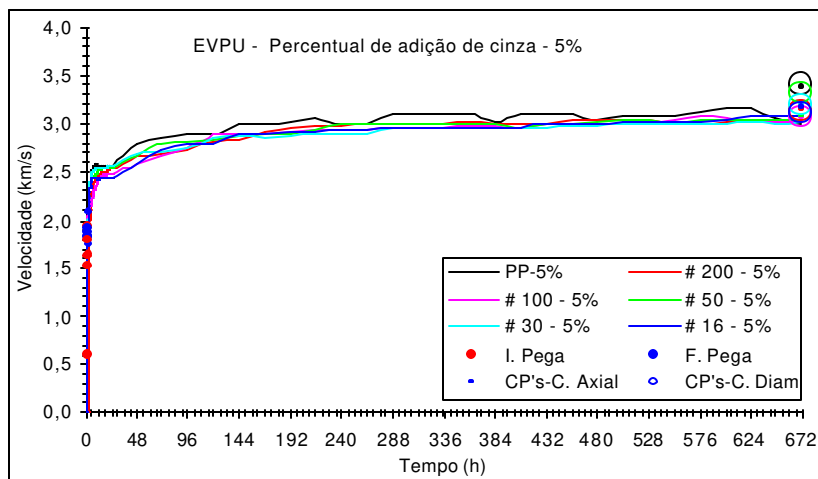


Figura 97: **EVPU** (0-28 dias): Efeito do percentual de adição de 5% de cinza.

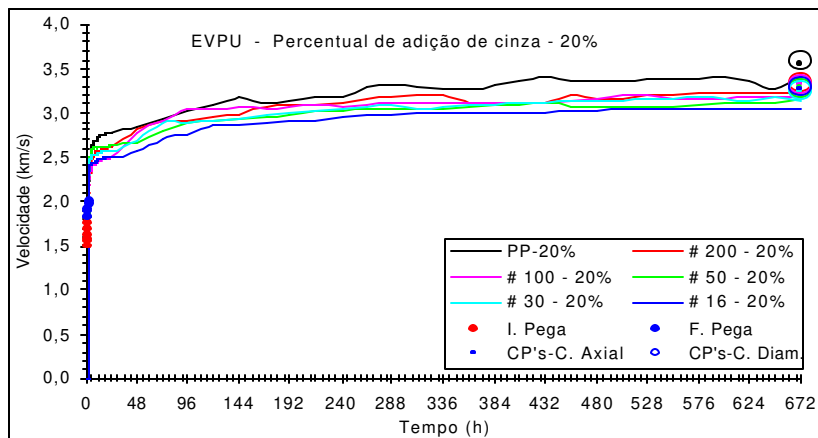


Figura 98: **EVPU** (0-28 dias): Efeito do percentual de adição de 20% de cinza.

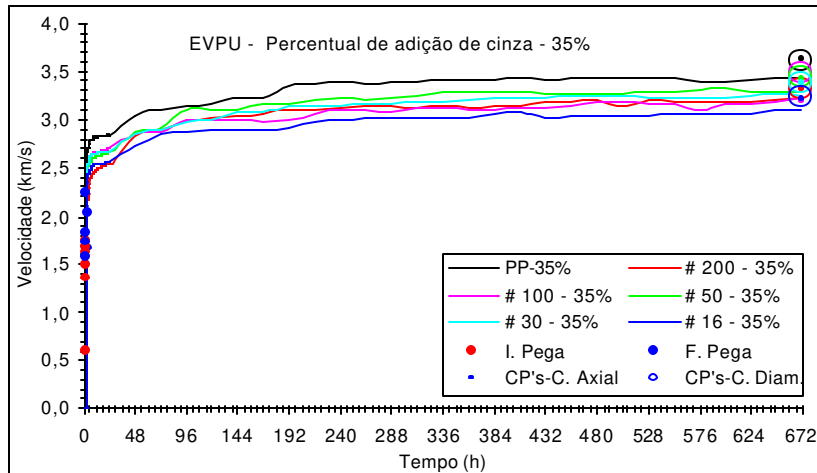


Figura 99: **EVPU** (0-28 dias): Efeito do percentual de adição de 35% de cinza.

Avaliando-se os gráficos das Figuras 96 a 99 verificou-se que as pastas sem adição de casca apresentaram o melhor comportamento em termos de EVPU, confirmando o efeito benéfico da adição de cinza e o efeito redutor da casca de arroz na EVPU. Entre os percentuais de adição de cinza, destacam-se o percentual de 5%, por promover uma uniformidade no comportamento das curvas de EVPU, enquanto que o percentual de adição de 35% de cinza, promoveu uma melhor distinção entre os comportamentos.

No caso dos corpos-de-prova, suas médias apresentaram valores geralmente superiores aos valores medidos nos cilindros aos 28 dias de idade, o que indica um efeito de atenuação (perda gradual de energia da onda mecânica) muito mais pronunciado nos cilindros.

A Figura 100 apresenta o gráfico de médias da VPU dos cilindros (3,13 km/s) e dos corpos-de-prova (3,23 km/s) deles obtidos após o corte, na idade de 28 dias. Na Figura 101 apresenta-se o gráfico do modelo de equação linear entre as duas variáveis.

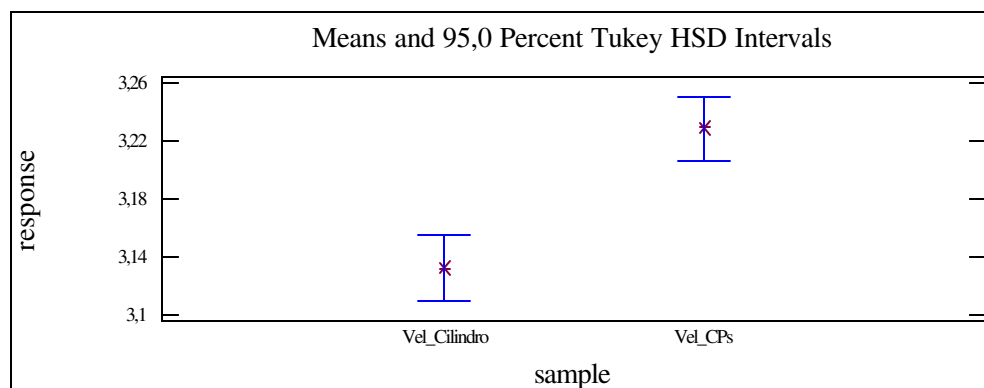


Figura 100: **VPU** aos 28 dias: Médias: cilindros e corpos-de-prova.

A correlação entre as duas variáveis foi de 0,73 e o coeficiente de determinação (R^2) de 53,5%, tendo-se encontrado a expressão (8):

$$\text{Vel\_CP's} = 0,0109432 + 1,02735 \cdot \text{Vel\_Cilindro} \quad (8)$$

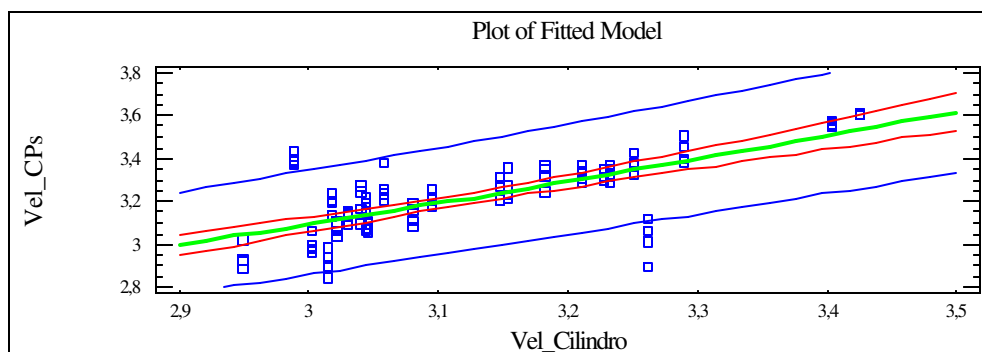


Figura 101: Equação linear, Limites do intervalo de confiança (95%) e Limites dos valores previstos pela equação.

4.1.3. Considerações Finais sobre a FASE I: Estudo das misturas tipo PASTA envolvendo a adição de Cinza e Casca de arroz.

A Tabela 70 apresenta um resumo do comportamento dos parâmetros apresentados, onde em geral, se atribui aos extrativos ainda presentes na casca, as interferências químicas nas reações de hidratação do cimento.

Tabela 70: **FASE I**: Resumo do comportamento dos parâmetros avaliados.

FASE I		Area	In Max	P In Max	tempo Tmax	Temp Max	U (%)	Vel D	Tensão D	MEAp D	MOEd D
Casca	0 (PR)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	0,074 (# 200)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	0,149 (# 100)		X	X	X	X	X	X	X	X	X
	0,297 (# 50)	X		X	X	X	X	X	X	X	X
	0,59 (# 30)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	1,19 (# 16)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Cinza	0%	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	05%	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	20%	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	35%	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
FASE I		IP tempo	IP Temp	IP Vel	FP tempo	FP Temp	FP Vel	Vel Ax	Tensão Ax	MEAp Ax	MOEd Ax
Casca	0 (PR)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	0,074 (# 200)		X	X	X	X	X	X	X	X	X
	0,149 (# 100)		X	X	X	X	X	X	X	X	X
	0,297 (# 50)		X	X	X	X	X	X	X	X	X
	0,59 (# 30)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	1,19 (# 16)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Cinza	0%	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	05%	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	20%	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	35%	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Faixas de distribuição em tamanho marcadas com “x” em uma mesma coluna não difere m estatisticamente.

Percentuais de adição de cinza marcadas com “x” em uma mesma coluna não difere m estatisticamente.

Destaca-se que, em geral, a dimensão das partículas pouco interferiu, não sendo constatada diferença significativa em termos de distribuição em tamanho de casca.

A adição de casca de arroz promoveu redução na resistência à compressão simples, não se evidenciando uma relação direta com a dimensão das partículas, com base no comportamento das faixas de distribuição de tamanho de casca #16 e #200.

O ensaio de tração por compressão diametral evidenciou que a adição de casca promoveu aumentos na resistência, quando foram comparadas as pastas com casca às pastas sem adição de casca – 0 (PR), tendo se observado uma tendência de aumento na resistência com o aumento da dimensão das partículas (exceto #200). As variações observadas podem ser atribuídas aos efeitos negativos da ação de extrativos ainda presentes na casca, tendo por base o comportamento das faixas de distribuição em tamanho de casca #200, #50 e #100, que evidenciam diferenciais de comportamento que não devem ser associados à dimensão das partículas, mas sim, ao tratamento das partículas (redução da incompatibilidade química).

A dupla lavagem aplicada às partículas da faixa de distribuição de tamanho de casca #100 (diâmetro teórico entre 0, 15 mm e 0, 075 mm) aponta uma melhor eliminação dos extrativos contidos na casca de arroz, o que explica o seu desempenho, superior ao da faixa de distribuição de tamanho de casca #200.

A adição de cinza promoveu melhorias significativas nos parâmetros avaliados, destacando-se sua contribuição para a melhoria do comportamento químico das misturas.

O percentual de adição de 5% de cinza foi descartado das demais fases da pesquisa por apresentar comportamento similar ao percentual de adição de 0% de cinza. Destaca-se que os teores de adição de 20% e 35% de cinza não diferem significativamente entre si.

Os resultados sugerem que se considere o percentual de adição de cinza de 20% como o que atenderá melhor as expectativas de melhoria nas propriedades físico-químicas dos compósitos à base de cimento-cinza-casca de arroz, cuja distribuição em tamanho das partículas da casca de arroz seja superior a 1,2 mm (# 16).

O alto teor de carbono da cinza, de cerca de 98%, pode ser a explicação para a melhoria do comportamento químico das misturas com cinza, pois apresenta elevada porosidade interna à qual se atribui uma possível capacidade adsorptiva e, segundo Rodrigues e Ghavami (2004), influi na porosidade total da mistura, podendo reduzir a adesão entre partículas quando empregada em dosagens elevadas.

4.2 Resultados dos ensaios da FASE II – Estudo das PASTAS envolvendo a adição de cinza (0%, 20% ou 35%) e casca de arroz (7,5%; distribuição em tamanho das partículas caracterizadas como 5 mm, 10+5 mm e 10 mm).

4.2.1. Resultados relativos à avaliação do comportamento químico das misturas.

A Figura 102 apresenta o comportamento químico das **misturas tipo pasta** (adição de 7,5% em massa, de casca de arroz), avaliadas através da evolução das curvas de hidratação.

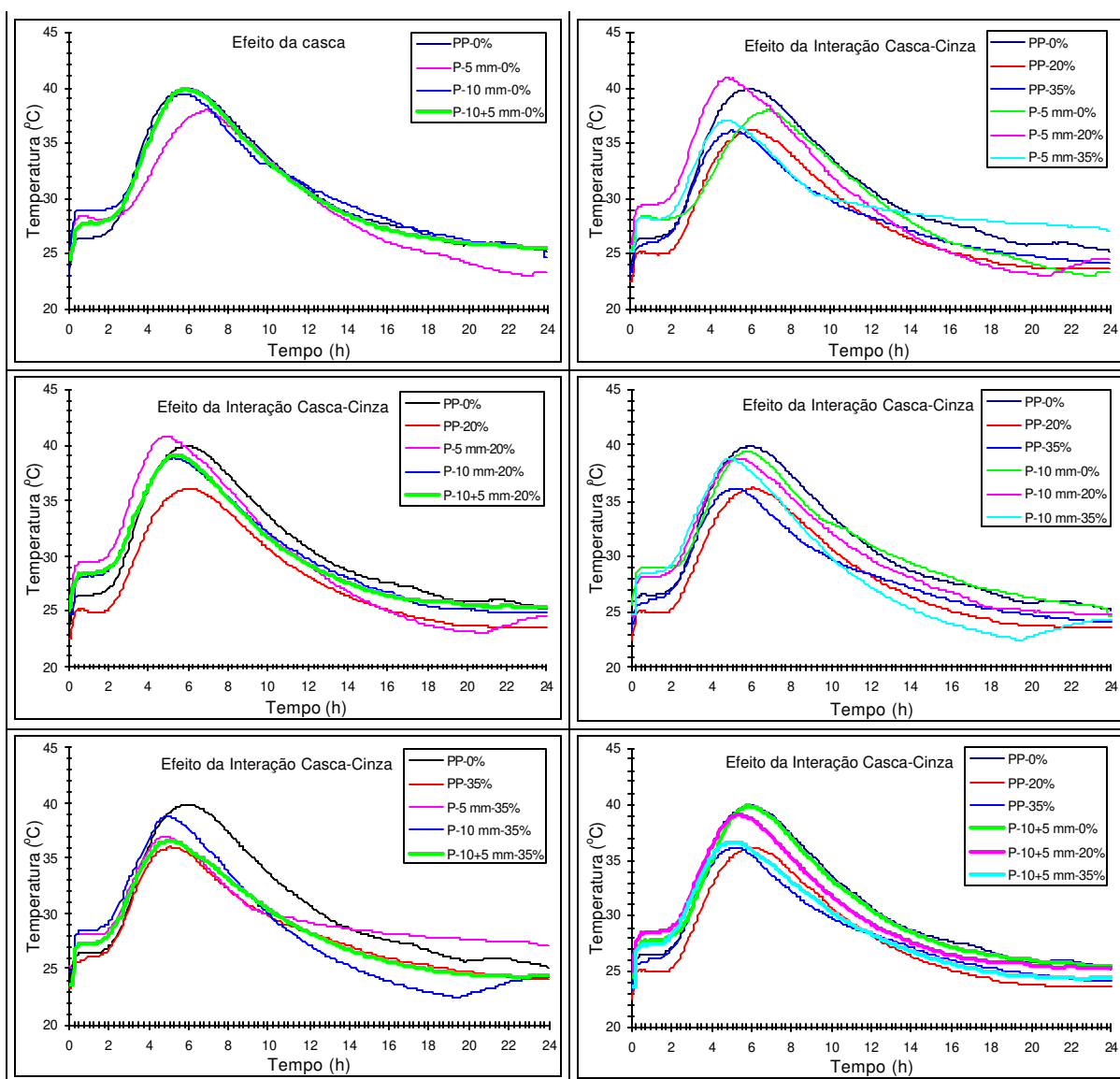


Figura 102: Padrões de referência e efeitos da interação casca-cinza nas diferentes misturas, relativas às distribuições em tamanho das partículas da casca de arroz.

A letra “**P**”, no nome das misturas nos gráficos apresentados, as distingue como misturas tipo **PASTA**.

Os parâmetros área sob a curva, inclinação máxima, ponto de inclinação máxima, tempo para atingir a temperatura máxima e a temperatura máxima alcançada pela mistura, foram empregados na avaliação do comportamento químico das misturas.

Como observado na FASE I, as adições de casca e/ou cinza na pasta promoveram interferências no processo químico de hidratação das misturas.

Para verificar a existência ou não de diferença significativa entre as médias, foram realizadas avaliações dos parâmetros indicados, empregando-se o Teste de Tukey, a um nível de confiança de 95%.

Para obter os gráficos das análises estatísticas com a referência para as comparações (padrão de referência), à esquerda do observador, nomeou-se em ordem crescente de dimensão das partículas as diferentes misturas.

Desta forma, são apresentadas na Tabelas 71 as médias dos parâmetros utilizados, de modo a destacar o efeito de cada distribuição em tamanho de CASCA em função do padrão de referência relativo ao percentual de adição de CINZA, de forma similar à FASE I.

Tabela 71: FASE II - Avaliação química (Médias).

MÉDIAS	A_PP-0%	B_5 mm-0%	C_10+5 mm-0%	D_10 mm-0%
AREA (°C.h)	43813	41971	43670	44024
Incl. Max. (°C/h)	5,54	3,38	4,61	4,45
Ponto Incl. Max.	0,58	0,38	0,50	0,45
Tempo p/ TMax. (h)	5,88	6,79	5,73	5,60
Temperatura Max. (°C)	39,88	37,85	39,83	39,33
MÉDIAS	A_PP-20%	B_5 mm-20%	C_10+5 mm-20%	D_10 mm-20%
AREA (°C.h)	40105	42706	42936	42834
Incl. Max. (°C/h)	4,23	5,21	4,36	4,36
Ponto Incl. Max.	0,45	0,55	0,48	0,45
Tempo p/ TMax. (h)	5,92	4,81	5,38	5,19
Temperatura Max. (°C)	36,13	40,90	39,08	38,83
MÉDIAS	A_PP-35%	B_5 mm-35%	C_10+5 mm-35%	D_10 mm-35%
AREA (°C.h)	40712	43102	41164	40764
Incl. Max. (°C/h)	4,47	4,23	4,09	3,95
Ponto Incl. Max.	0,45	0,45	0,55	0,45
Tempo p/ TMax. (h)	4,94	4,63	4,94	4,77
Temperatura Max. (°C)	36,08	37,03	36,68	38,75

4.2.1.1 Avaliação do parâmetro Área sob a curva (Área, em °C.h).

A Tabela 72 apresenta a análise da variância (ANOVA), para o parâmetro Área sob a curva, onde se verificou a existência de diferenças significativas apenas no fator CINZA e na interação CASCA-CINZA.

Tabela 72: ANOVA do parâmetro Área sob a curva (Area).

Analysis of Variance for Area - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	9,58922E6	3	3,19641E6	2,86	0,0504
B:CINZA	3,06321E7	2	1,5316E7	13,70	0,0000
INTERACTIONS					
AB	3,86878E7	6	6,44796E6	5,77	0,0003
RESIDUAL	4,02366E7	36	1,11768E6		
TOTAL (CORRECTED)	1,19146E8	47			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A seguir, são apresentados os resultados relativos à avaliação de cada fator, a interação entre fatores, tecendo-se algumas considerações.

A) Efeito da adição de CASCA.

A Tabela 73 apresenta a análise do fator CASCA, onde se evidencia a ausência de diferença significativa entre as médias das diferentes distribuições em tamanho de casca.

Tabela 73: Análise do fator CASCA: parâmetro **Area**: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Area by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
A_PP	12	41543,4	X
D_10 mm	12	42540,7	X
C_10+5 mm	12	42589,9	X
B_5 mm	12	42592,8	X

Misturas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

Acredita-se que a ausência de diferença significativa no fator CASCA esteja associada a uma lenta migração dos extrativos para a água de amassamento em função da maior dimensão das partículas e à presença de cal aderida à casca, que suprimiu os efeitos dos extrativos liberados pela casca, para a água de amassamento.

B) Efeito da adição de CINZA.

A Tabela 74 apresenta a análise do fator CINZA, onde se verifica a tendência de redução no parâmetro área sob a curva, com a elevação dos percentuais de adição de cinza, atribuída ao aumento de massa no sistema. Destaca-se, contudo, a falta de diferença significativa entre os percentuais de adição de 20% e de 35% de cinza.

Tabela 74: Análise do fator CINZA: parâmetro Área: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Area by CINZA			

Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups

35%	16	41435,4	X
20%	16	42145,2	X
0%	16	43369,5	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

A Figura 103 apresenta o gráfico da interação casca-cinza, evidenciando o comportamento das médias das diferentes distribuições em tamanho de casca, em função dos percentuais de adição de cinza, com destaque para a distribuição em tamanho de casca 5 mm, que apresentou aumento na média do parâmetro Área, com a adição de cinza.

Este fato, não observado nas distribuições em tamanho de casca 10 mm e 10+5 mm pode estar associado a uma maior presença de cal aderida às partículas (processo de lavagem em solução de cal), pois o material 5 mm possui maior área superficial, em relação aos demais (cerca de 91% de suas partículas são passantes em peneira #16 mesh (ABNT = 1,19 mm); no material 10+5 mm é de cerca de 51% e, no material 10 mm, cerca de 24%, conforme Tabelas 6, 7 e 8.

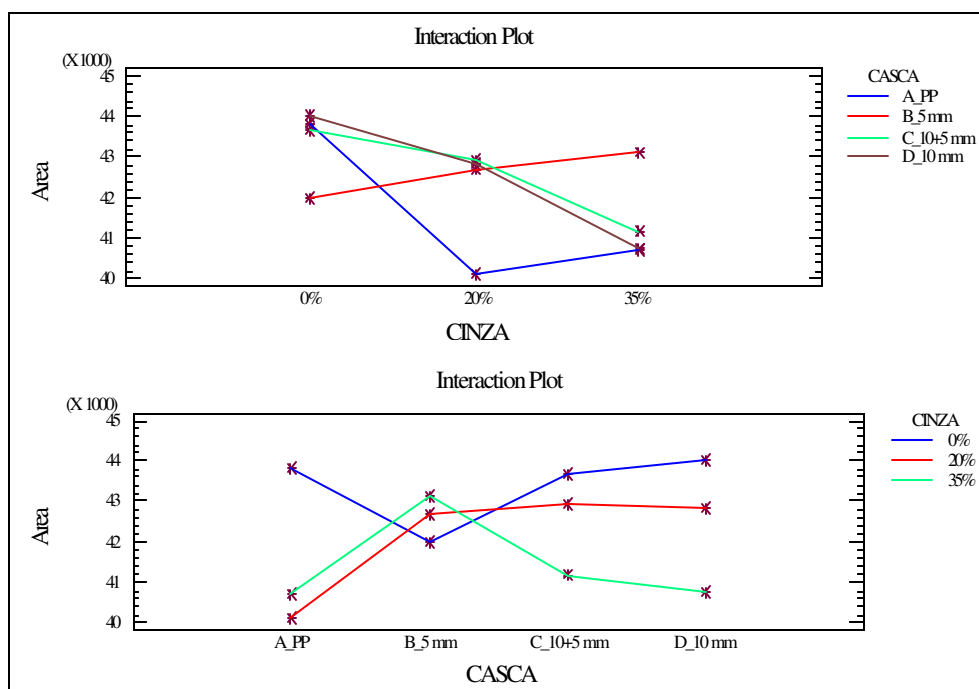


Figura 103: Interação casca-cinza: parâmetro **Área**.

A redução no parâmetro Área, observada nas distribuições em tamanho de casca de 10 mm e 10+5 mm, para o percentual de adição de 35% de cinza, também pode estar associada ao efeito de adição de massa no sistema.

No caso da adição de 20% de cinza, a uniformidade observada nos valores médios de área, para as misturas com casca, pode estar associada a melhor composição das misturas, de modo a minimizar os efeitos dos extrativos ainda presentes na casca e do aumento de massa no sistema.

Na distribuição em tamanho de casca de 5 mm, ocorreu a menor diferença entre as médias (amplitude) e, no percentual de 35% de cinza, a maior diferença (amplitude).

D) Considerações a respeito do parâmetro Área sob a curva de hidratação.

As distribuições em tamanho de casca 5 mm, 10 mm e 10+5 mm, quando comparadas à pasta pura (A_PP-0%), evidenciaram um comportamento atribuído à interação dos efeitos das faixas de distribuição em tamanho de casca, avaliadas individualmente na FASE I, na qual se detectou que a dimensão das partículas pouco interferiu nos processos químicos, fato também observado nesta FASE II, pela ausência de diferença significativa no fator CASCA.

As diferentes distribuições em tamanho de casca (5 mm, 10 mm e 10+5 mm) evidenciaram a importância da reduzida presença de partículas de dimensão inferior a 0,297 mm (#50 mesh), cujos efeitos sobre a pasta de cimento já foram evidenciados no estudo das diferentes faixas de distribuição em tamanho de casca (FASE I).

4.2.1.2 Avaliação do parâmetro Inclinação Máxima (In_Max, em °C/h)

A Tabela 75 apresenta a análise da variância (ANOVA) para o parâmetro inclinação máxima onde se verificou a existência de diferença significativa apenas na interação CASCA-CINZA (p-valor < 0,05).

Tabela 75: ANOVA do parâmetro Inclinação Máxima (In_Max).

Analysis of Variance for In_Max - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	1,91022	3	0,636739	1,79	0,1660
B:CINZA	1,19195	2	0,595975	1,68	0,2010
INTERACTIONS					
AB	10,4656	6	1,74427	4,91	0,0009
RESIDUAL	12,7851	36	0,355142		
TOTAL (CORRECTED)	26,3529	47			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A seguir, são apresentados os resultados relativos à avaliação de cada fator, da interação entre fatores, apresentando-se algumas considerações sobre o parâmetro avaliado.

A) Efeito da adição de CASCA.

A Tabela 76 apresenta a análise do fator CASCA, onde se destaca a ausência de diferença significativa entre as médias apontando, com isso, que o percentual reduzido (menor que 3%) de cascas nas faixas com maior efeito negativo (inferior a 0,297 mm ou #50 mesh) e que compõem as diferentes distribuições em tamanho de casca (5 mm, 10 mm e 10+5 mm), não tenham liberado extrativos em quantidade capaz de interferir significativamente no comportamento das misturas.

Tabela 76: Análise do fator CASCA: parâmetro In_Max: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for In_Max by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
D_10 mm	12	4,255	X
B_5 mm	12	4,2725	X
C_10+5 mm	12	4,35583	X
A_PP	12	4,74667	X

Misturas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

Considera-se que a adição do acelerador de pega cloreto de cálcio, de 3% em relação à massa do cimento, também promoveu melhorias do ponto de vista químico, no sentido de promover a aceleração das reações químicas do cimento.

B) Efeito da adição de CINZA.

A Tabela 77 apresenta a análise do fator CINZA, onde se destaca a ausência de diferença significativa entre as médias dos diferentes percentuais de adição de cinza. Destaca-se, contudo, que uma adição de 20% de cinza apresenta um valor médio de inclinação máxima maior do que os demais percentuais, indicando um efeito sinérgico nas reações de hidratação, enquanto que o percentual de adição de 35% de cinza aponta uma redução no parâmetro inclinação máxima (In_Max), atribuída ao aumento de massa no sistema.

Tabela 77: Análise do fator CINZA: parâmetro In_Max: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for In_Max by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
35%	16	4,18625	X
0%	16	4,495	X
20%	16	4,54125	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

O gráfico da interação casca-cinza (Figura 104) evidencia que na distribuição em

tamanho de casca 5 mm, o percentual de adição de 20% difere significativamente do percentual de adição de 0%. Em relação ao seu percentual de adição de 35% de cinza, destaca-se que o mesmo não diferiu significante dos demais percentuais (0% e de 20%).

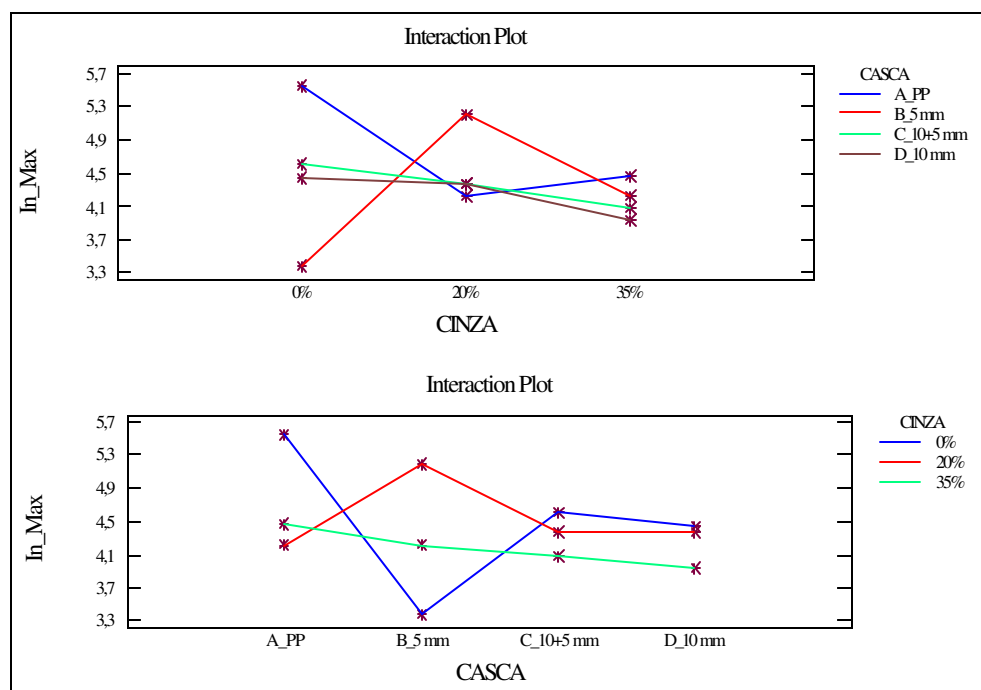


Figura 104: Interação casca-cinza: parâmetro **In_Max**.

Verificou-se, ainda, que na adição de 35% de cinza a amplitude das reduções no parâmetro inclinação máxima foi mínima, se comparada aos percentuais de adição de 0% e de 20%, apontando uma maior homogeneidade em função da distribuição em tamanho de casca.

D) Considerações a respeito do parâmetro Inclinação Máxima (°C/h).

A Inclinação Máxima das curvas de evolução da temperatura de hidratação, utilizada como elemento de avaliação química das misturas, evidenciou que o percentual de adição de 20% promoveu os melhores resultados, quando foi avaliado o efeito da interação CASCA-CINZA, uma vez que nos fatores CASCA e CINZA, não se verificou diferenças significativas.

Contudo, destaca-se o percentual de adição de 35% de cinza pela uniformidade de comportamento apresentado pelas médias das diferentes distribuições em tamanho de casca, porém não diferindo significativamente do percentual de adição de 20% de cinza.

4.2.1.3 Avaliação do parâmetro Ponto de Inclinação Máxima. (P_In_Max, em °C/h)

A Tabela 78 apresenta a análise da variância (ANOVA) para o parâmetro Ponto de Inclinação Máxima, onde se verificou a existência de diferença significativa apenas na interação CASCA-CINZA (p-valor < 0,05).

Tabela 78: ANOVA do parâmetro Ponto de Inclinação Máxima (P_In_Max).

Analysis of Variance for P_In_Max - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	0,0272917	3	0,00909722	1,62	0,2024
B:CINZA	0,000416667	2	0,000208333	0,04	0,9637
INTERACTIONS					
AB	0,114583	6	0,0190972	3,40	0,0093
RESIDUAL	0,2025	36	0,005625		
TOTAL (CORRECTED)	0,344792	47			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A seguir, são apresentados os resultados relativos a avaliação de cada fator, da interação entre os fatores CASCA-CINZA, apresentando-se algumas considerações.

A) Efeito da adição de CASCA.

A Tabela 79 apresenta a análise do fator CASCA, onde se verifica que as médias das distribuições em tamanho de casca não diferem significativamente entre si.

Tabela 79: Análise do fator CASCA: parâmetro P_In_Max: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for P_In_Max by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
D_10 mm	12	0,45	X
B_5 mm	12	0,458333	X
A_PP	12	0,491667	X
C_10+5 mm	12	0,508333	X

Misturas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

B) Efeito da adição de CINZA.

A Tabela 80 apresenta a análise do fator CINZA, destacando-se a ausência de diferença significativa entre as médias dos diferentes percentuais de adição de cinza.

Tabela 80: Análise do fator CINZA: parâmetro **P_In_Max**: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for P_In_Max by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
0%	16	0,475	X
35%	16	0,475	X
20%	16	0,48125	X

Adições marcadas com "x" em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

A Figura 105 apresenta o gráfico da interação casca-cinza, evidenciando o comportamento das médias das diferentes distribuições em tamanho de casca, em função dos percentuais de adição de cinza.

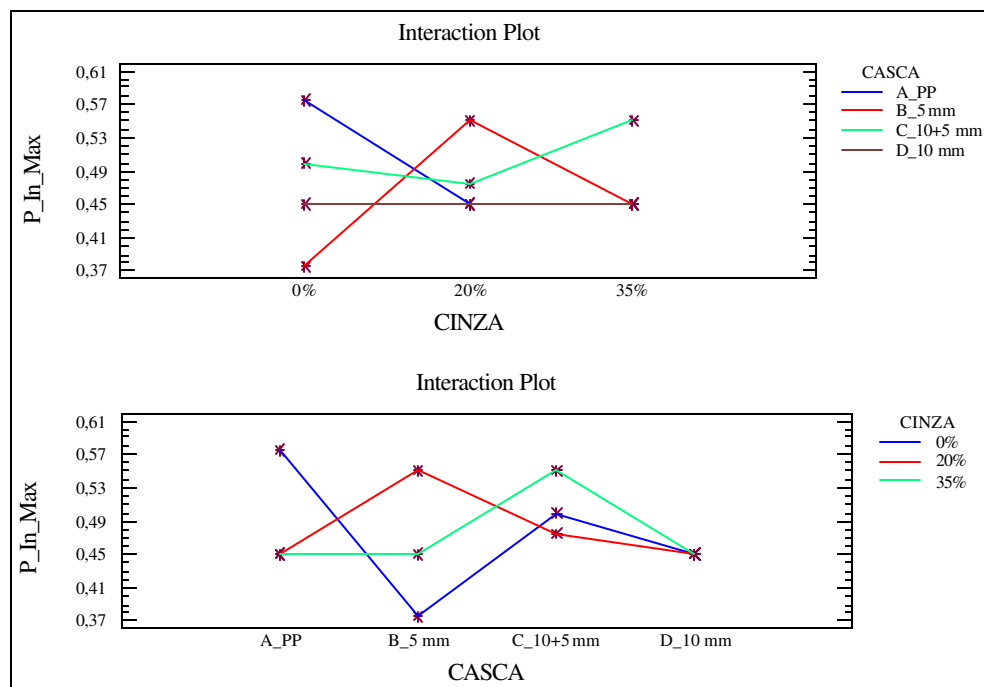


Figura 105: Interação casca-cinza: parâmetro **P_In_Max**.

Destaca-se que a distribuição em tamanho de casca 10 mm apresenta médias que não foram influenciadas pelo teor de adição de cinza. A maior amplitude observada está associada à distribuição em tamanho de casca 5 mm, que apresenta um maior teor de finos em suas misturas. O melhor comportamento observado na distribuição em tamanho de casca 5 mm, está associado à adição de 20% de cinza, enquanto que para a distribuição em tamanho de casca 10+5 mm, está associado ao percentual de 35%, o sugere que o teor de cinza depende da mistura empregada.

D) Considerações a respeito do parâmetro Ponto de Inclinação Máxima.

O parâmetro Ponto de Inclinação Máxima, pelo seu caráter pontual, evidencia uma restrição na análise do comportamento químico, de modo que se considera o mesmo como sendo inadequado.

Contudo, destaca-se que a falta de diferença significativa observada no parâmetro Inclinação Máxima (nos fatores CASCA e CINZA), e também observada no parâmetro Ponto de Inclinação Máxima (nos fatores CASCA e CINZA), não permite fazer melhor juízo, pela impossibilidade de se diferenciar os comportamentos, exceto no caso das interações, que apontam tendências diversas, que podem estar associadas à supressão dos efeitos negativos da casca ou ao aumento de massa no sistema.

A reduzida amplitude entre as médias da distribuição em tamanho de casca 10 mm ou, a grande amplitude observada entre as médias da distribuição em tamanho de casca 5 mm, evidenciam esta interação.

4.2.1.4 Avaliação do parâmetro tempo para atingir a Temperatura Máxima (tempo_TMax, em h).

O parâmetro tempo necessário para atingir a temperatura máxima, um forte indicador da velocidade da reação, pode indicar a maior ou a menor interferência de componentes de uma mistura nos processos de hidratação do cimento.

A Tabela 81 apresenta a tabela de ANOVA, para o parâmetro tempo para atingir a temperatura máxima, onde verificou-se a existência de diferenças significativas no parâmetro

tempo para atingir a temperatura máxima, nos fatores CASCA, CINZA e, na interação CASCA-CINZA.

Tabela 81: ANOVA do parâmetro tempo para atingir a temperatura máxima (**tempo_TMax**).

Analysis of Variance for tempo_TMax - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	0,923923	3	0,307974	14,23	0,0000
B:CINZA	11,2883	2	5,64416	260,78	0,0000
INTERACTIONS					
AB	5,36868	6	0,894781	41,34	0,0000
RESIDUAL	0,779175	36	0,0216437		
TOTAL (CORRECTED)	18,3601	47			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A seguir, são apresentados os resultados relativos à avaliação de cada fator, da interação entre fatores, apresentando-se algumas considerações sobre o parâmetro avaliado.

A) Efeito da adição de CASCA.

Na Tabela 82 apresenta-se a análise do fator CASCA, onde destacou-se a média das pastas puras – A_PP sem adição de casca, que é superior e significativamente diferente das demais médias. Porém, tal fato não permite maiores considerações sem avaliar em conjunto o parâmetro Temperatura Máxima (**T_Max.**), que é o principal indicador da cinética da reação.

Tabela 82: Análise do fator CASCA: parâmetro **tempo_TMax**: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for tempo_TMax by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
D_10 mm	12	5,18833	X
C_10+5 mm	12	5,3475	XX
B_5 mm	12	5,40917	X
A_PP	12	5,57583	X

Misturas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

Destaca-se, contudo, que os valores médios apontam uma tendência de redução no parâmetro tempo_TMax com a redução no percentual de finos, percentual este associado à distribuição em tamanho de casca. Verifica-se que a distribuição em tamanho de casca 10 mm apresenta o menor percentual de finos (Tabela 6) e o menor tempo necessário para atingir a temperatura máxima (tempo_TMax).

B) Efeito da adição de CINZA.

A Tabela 83 apresenta a análise do fator CINZA, que evidencia a existência de diferença significativa entre os diferentes percentuais de adição de cinza, além da redução no parâmetro tempo para atingir a temperatura máxima com o aumento no percentual de adição de cinza.

Tabela 83: Análise do fator CINZA: parâmetro **tempo_TMax**: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for tempo_TMax by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
35%	16	4,81687	X
20%	16	5,32313	X
0%	16	6,00062	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

As diferenças observadas podem ser devidas ao aumento de massa no sistema, reduzindo a temperatura máxima alcançada, o que anteciparia o tempo para atingir a temperatura máxima ou, ao efeito da cinza como agente supressor de compostos retardantes presentes na casca. Em ambos os casos, somente podem ser feitas considerações objetivas após a avaliação conjunta com o parâmetro Temperatura Máxima (**T_Max**).

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

Na Figura 106, o gráfico da interação casca-cinza evidencia que a distribuição em tamanho de casca 5 mm apresentou os maiores valores médios de redução no parâmetro **tempo_TMax**, quando se fez adições de cinza em percentuais de 20% e de 35%.

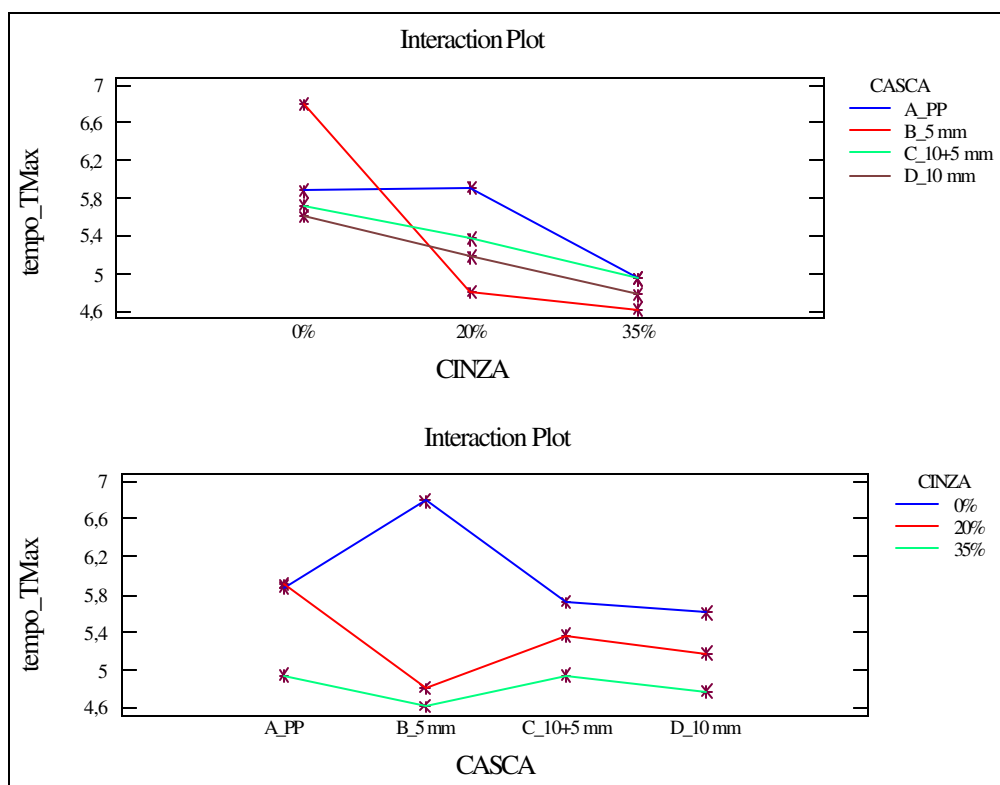


Figura 106: Interação casca-cinza: parâmetro **tempo_TMax**.

Observa-se, ainda, a similaridade do comportamento das distribuições em tamanho de casca 10 mm e 10+5 mm, que também apresentaram reduções no tempo para atingir a temperatura máxima com a adição de cinza, sendo que o percentual de adição de 35% de cinza promoveu as maiores reduções.

Destaca-se que o percentual de adição de 20% de cinza foi o único percentual a promover redução no tempo para atingir a temperatura máxima em todas as distribuições em tamanho de casca (5 mm, 10+5 mm e 10 mm), o que se observa ao empregar a pasta sem adição de casca (A_PP-20%) como parâmetro de comparação.

D) Considerações a respeito do parâmetro tempo para atingir a Temperatura Máxima.

Considera-se que a melhor mistura ou o melhor comportamento está relacionado ao menor tempo para atingir a temperatura máxima. Nessa linha de raciocínio, verificou-se que em geral as pastas sem adição de cinza (0%) apresentaram as maiores médias no tempo para atingir a temperatura máxima, ou seja, o pior comportamento. O efeito negativo da adição de CASCA, no comportamento químico das pastas, se manifestou de forma pontual nas

distribuições em tamanho de casca 5 mm-0% e 10+5 mm-35%. Em todos os demais casos, o tempo necessário para atingir a temperatura máxima foi inferior aos seus respectivos padrões de mistura (A_PP-0%, A_PP-20% ou, A_PP-35%).

4.2.1.5 Avaliação do parâmetro Temperatura Máxima (Temp_Max, em °C).

No parâmetro temperatura máxima (Temp_Max), quanto menor for a diferença entre as médias das temperaturas máximas alcançadas pelas misturas, em relação à pasta referência, provavelmente menores foram os problemas no processo de hidratação do cimento.

A Tabela 84 apresenta a análise da variância (ANOVA) para o parâmetro temperatura máxima, onde se verificou a existência de diferença significativa apenas no fator CINZA e na interação CASCA-CINZA (p-valor < 0,05).

Tabela 84: ANOVA do parâmetro temperatura máxima (**Temp_Max**).

Analysis of Variance for Temp_Max - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	17,4273	3	5,8091	1,76	0,1713
B:CINZA	38,1617	2	19,0808	5,80	0,0066
INTERACTIONS					
AB	55,6183	6	9,26972	2,82	0,0237
RESIDUAL	118,507	36	3,29187		
TOTAL (CORRECTED)	229,715	47			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A seguir, são apresentados os resultados da avaliação de cada fator, da interação entre fatores e algumas considerações.

A) Efeito da adição de CASCA.

A Tabela 85 apresenta a análise do fator CASCA, podendo-se verificar a ausência de diferença significativa entre as diferentes misturas.

Tabela 85: Análise do fator CASCA: parâmetro **Temp_Max**: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Temp_Max by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
A_PP	12	37,3583	X
C_10+5 mm	12	38,525	X
B_5 mm	12	38,5917	X
D_10 mm	12	38,9667	X

Misturas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

B) Efeito da adição de CINZA.

A Tabela 86 apresenta a análise do fator CINZA, onde se destacam os percentuais de adição de 0% e de 20% de cinza, por não diferirem significativamente entre si, atribuindo-se ao aumento de massa no sistema, o comportamento de redução na temperatura máxima (Temp_Max) apresentada pelo percentual de adição de 35% de cinza.

Tabela 86: Análise do fator CINZA: parâmetro **Temp_Max**: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Temp_Max by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
35%	16	37,1313	X
20%	16	38,7313	X
0%	16	39,2187	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

A Figura 107 apresenta o gráfico da interação casca-cinza que destaca que a distribuição em tamanho de casca 10 mm não apresentou redução na temperatura máxima com a adição de cinza, fato que não se verificou nos demais casos. Acredita-se que este comportamento diferenciado deva-se à baixa percentagem de partículas com dimensão inferior a 1,19 mm (#16 mesh), de cerca de 24%. Destaca-se, ainda, que o percentual de adição de 20% de cinza apresentou a menor redução na temperatura máxima das misturas com adição de casca, em relação ao percentual de adição de 35% de cinza.

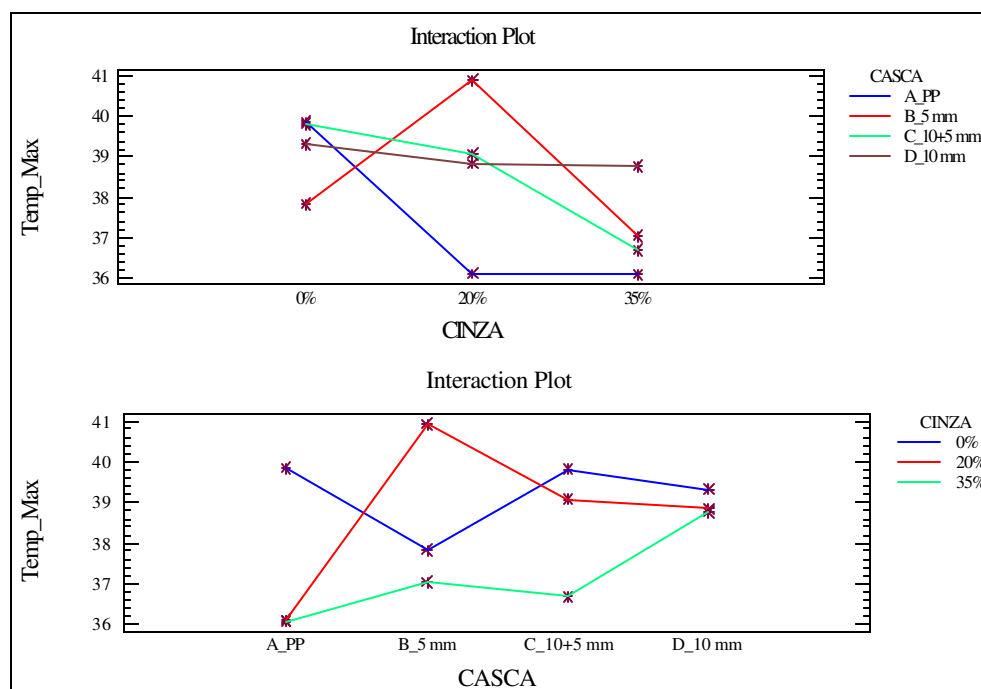


Figura 107: Interação casca-cinza: parâmetro **Temp_Max**.

D) Considerações a respeito do parâmetro Temperatura Máxima.

Através do parâmetro temperatura máxima das curvas de evolução da temperatura de hidratação foi possível verificar que a distribuição em tamanho de casca 10 mm apresenta comportamento pouco influenciado pela adição de cinza, o que não se verifica nos demais casos.

No caso da adição de CINZA, destaca-se que, em geral, o percentual de 20% de adição promoveu as menores reduções no parâmetro temperatura máxima, enquanto que o percentual de adição de 35% de cinza apresentou as maiores reduções, creditadas ao aumento de massa no sistema.

4.2.1.6 Considerações gerais sobre a avaliação química.

Ao analisar os resultados apresentados, verificou-se que dos diferentes parâmetros utilizados na avaliação química das misturas, apenas o parâmetro tempo para atingir a temperatura máxima apontou diferenças significativas entre as diferentes distribuições em tamanho de CASCA.

Destaca-se, neste caso, a distribuição em tamanho de casca 10 mm, pela menor média de tempo necessário para atingir a temperatura máxima e pela maior média de temperatura máxima alcançada.

Em relação à adição de cinza, verificou-se que os percentuais de adição de 20% e de 35% de cinza possuem comportamentos que não permitem destacar, com clareza, o mais adequado.

No caso do parâmetro temperatura máxima, o percentual de 20% de adição de cinza foi superior e significativamente diferente do percentual de 35%, que apresenta média, no parâmetro tempo para atingir a temperatura máxima, inferior e significativamente diferente do percentual de 20% de adição de cinza.

Os demais parâmetros não apontaram diferenças estatísticas significativas entre os percentuais.

A interação CASCA-CINZA apresentou diferença significativa em todos os casos, indicando que o efeito combinado dos dois fatores contribuiu na melhoria do comportamento das misturas, mesmo que cada fator aponte, de forma isolada, a ausência de diferença estatística significativa.

4.2.2. Resultados relativos à avaliação do comportamento mecânico das misturas.

As misturas dos cilindros de pasta, avaliadas em relação ao comportamento químico, foram também avaliadas no seu comportamento mecânico, através dos parâmetros Início de Pega, Fim de Pega e evolução da velocidade de propagação da onda ultra-sônica.

Após o seccionamento de cada cilindro de mistura, foram obtidas amostras – corpos-de-prova cilíndricos (CPs) - representativas do cilindro de pasta, que foram ensaiados à tração por compressão diametral (CPs 1, 3, 5 e 7) e à compressão simples (CPs 2, 4, 6 e 8).

Efetuaram-se avaliações relativas às características dos mesmos, empregando como elementos de análise, a velocidade do pulso ultra-sônico (Vel_D/Vel_Ax), a massa específica aparente ($MEAp\_D/MEAp\_Ax$) e o módulo de elasticidade dinâmico ($MOEd\_D/MOEd\_Ax$), como forma de verificar a existência de possíveis anomalias, capazes de interferir na avaliação dos resultados.

4.2.2.1 Avaliação do parâmetro Início de Pega das misturas.

Como o parâmetro **tempo para o início de pega** do cimento é um ponto definido subjetivamente (depende da perícia do executor), está sendo considerado pelo autor como um parâmetro de comportamento mecânico, em função de sua natureza experimental (ação mecânica de puncionamento de uma força de cerca de 3,0 MPa).

As medidas obtidas no parâmetro início de pega foram o **tempo para o início de pega** (IP_tempo, em h), a **temperatura no início de pega** (IP_Temp, em °C) e a **velocidade do pulso ultra-sônico no início de pega** (IP_Vel, em km/s), de modo a auxiliar na avaliação do comportamento das misturas e na compreensão do mecanismo de início de pega.

Na Tabelas 87 são apresentadas as médias dos elementos utilizados nas análises, de modo a destacar o efeito de cada distribuição em tamanho de CASCA em função do **padrão de referência relativo** ao percentual de adição de CINZA (A_PP-0%, como padrão geral e para as misturas com 0% de adição de cinza; A_PP-20%, para as misturas com 20% de adição de cinza; A_PP-35%, para as misturas com 35% de adição de cinza).

Para manter nos gráficos das análises estatísticas a referência empregada nas comparações à esquerda do observador, nomeou-se as misturas de modo a destacar o aumento da dimensão das partículas como A_PP, B_5 mm, C_10+5 mm e D_10 mm.

Tabela 87: **FASE II - Avaliação físico-mecânica** - Parâmetro Início de Pega (Médias).

MÉDIAS	A_PP-0%	B_5 mm-0%	C_10+5 mm-0%	D_10 mm-0%
IP_tempo (h)	2,25	2,50	2,08	2,25
IP_Temperatura (°C)	27,6	28,5	28,3	29,2
IP_Velocidade (km/s)	1,965	1,852	1,596	1,664
MÉDIAS	A_PP-20%	B_5 mm-20%	C_10+5 mm-20%	D_10 mm-20%
IP_tempo (h)	2,08	1,83	2,17	1,83
IP_Temperatura (°C)	25,4	29,9	29,2	28,5
IP_Velocidade (km/s)	1,746	1,898	1,702	1,713
MÉDIAS	A_PP-35%	B_5 mm-35%	C_10+5 mm-35%	D_10 mm-35%
IP_tempo (h)	1,75	2,00	1,67	1,83
IP_Temperatura (°C)	26,5	28,6	27,7	29,0
IP_Velocidade (km/s)	1,442	1,888	1,676	1,631

Na Tabela 88 apresentam-se as análises da variância (ANOVA) do parâmetro Início de Pega, considerando-se os elementos tempo para o início de pega (IP_tempo), temperatura no início de pega (IP_Temp) e velocidade do pulso ultra-sônico no início de pega (IP_Vel).

Tabela 88: ANOVAs do parâmetro Início de Pega (IP_tempo, IP_Temp e IP_Vel).

Analysis of Variance for IP_tempo - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	0,116319	3	0,0387731	5,63	0,0046
B:CINZA	1,29167	2	0,645833	93,79	0,0000
INTERACTIONS					
AB	0,597222	6	0,099537	14,45	0,0000
RESIDUAL	0,165267	24	0,00688611		
TOTAL (CORRECTED)	2,17047	35			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					
Analysis of Variance for IP_Temp - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	36,7084	3	12,2361	704,46	0,0000
B:CINZA	1,13124	2	0,565619	32,56	0,0000
INTERACTIONS					
AB	15,1053	6	2,51755	144,94	0,0000
RESIDUAL	0,416867	24	0,0173694		
TOTAL (CORRECTED)	53,3618	35			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					
Analysis of Variance for IP_Vel - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	0,285121	3	0,0950403	2,69	0,0691
B:CINZA	0,0934722	2	0,0467361	1,32	0,2854
INTERACTIONS					
AB	0,351674	6	0,0586124	1,66	0,1749
RESIDUAL	0,848687	24	0,035362		
TOTAL (CORRECTED)	1,57895	35			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

Verificou-se que apenas no elemento de análise IP_Vel não existe diferença significativa nos fatores CASCA, CINZA e, na interação CASCA-CINZA (p-valor >0,05), de modo que este elemento de análise aponta o comportamento das diferentes misturas como estatisticamente uniforme.

A seguir, são apresentados os resultados da avaliação da casca, da cinza e da interação casca-cinza, apresentando-se algumas considerações sobre o parâmetro avaliado.

A) Efeito da adição de CASCA.

Na Tabela 89 apresenta-se a análise das médias para o fator CASCA, onde se destaca a distribuição em tamanho de casca 10 mm, por apresentar a menor média de tempo para o início de pega e a maior média de temperatura de início de pega.

Tabela 89: Análises do fator CASCA: parâmetro Início de Pega (elementos de análise: **IP tempo, IP Temp e IP Vel**): Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for IP_tempo by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
D_10 mm	9	1,97222	X
C_10+5 mm	9	1,97222	X
A_PP	9	2,02778	XX
B_5 mm	9	2,11111	X
Multiple Range Tests for IP_Temp by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
A_PP	9	26,5111	X
C_10+5 mm	9	28,3811	X
D_10 mm	9	28,9333	X
B_5 mm	9	29,01	X
Multiple Range Tests for IP_Vel by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
C_10+5 mm	9	1,65767	X
D_10 mm	9	1,66911	X
A_PP	9	1,71789	X
B_5 mm	9	1,88033	X

Misturas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

Comparando-se **IP_tempo** com **tempo_TMax** (Tabela 82), verificou-se que a distribuição em tamanho de casca 10 mm apresentou o menor tempo para o início de pega (IP_tempo) e o menor tempo para atingir a temperatura máxima (tempo_TMax).

Comparando IP_Temp e Temp_Max, verificou-se que as distribuições em tamanho 10 mm e 5 mm apresentaram os maiores valores de temperatura (não diferindo significativamente entre si), indicando que o processo químico no trecho entre o início de pega (IP) e a temperatura máxima (Temp_Max) foi “normal” (anomalias imperceptíveis), tendo a inclinação máxima (In_Max) como controle (indicou ausência de diferença significativa entre as distribuições).

B) Efeito da adição de CINZA.

Tabela 90: Análises do fator CINZA: parâmetro Início de Pega (elementos de análise: **IP_tempo, IP_Temp e IP_Vel**): Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for IP_tempo by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
35%	12	1,8125	X
20%	12	1,97917	X
0%	12	2,27083	X
Multiple Range Tests for IP_Temp by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
35%	12	27,9742	X
20%	12	28,25	X
0%	12	28,4025	X
Multiple Range Tests for IP_Vel by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
35%	12	1,65925	X
20%	12	1,76467	X
0%	12	1,76983	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

A Tabela 90 apresenta as análises para o fator CINZA, empregando-se os elementos de análise tempo do início de pega (IP_tempo), temperatura no início de pega (IP_Temp) e velocidade do pulso ultra-sônico no início de pega (IP_Vel).

Comparando-se as médias das adições de cinza, verificou-se que adições de 20% e de 35% promoveram redução no tempo necessário para o início de pega (IP_tempo) e redução na temperatura média observada no início de pega (IP_Temp), às quais se associou ao aumento de massa no sistema, de modo que a diferença de temperatura encontrada (diferença máxima de 0,5 °C, entre médias) pode ser um indicador da baixa interferência nos processos químicos.

No caso do elemento de análise velocidade do pulso ultra-sônico (VPU), não se encontrou diferença significativa entre percentuais de adição de cinza.

Comparando-se IP_tempo com tempo_TMax (Tabela 83), verificou-se que o comportamento dos diferentes percentuais de adição de cinza foi o mesmo nos dois elementos de análise.

A adição de 35% de cinza promoveu o menor tempo necessário para o início de pega e menor tempo para atingir a temperatura máxima, diferindo significativamente dos demais percentuais.

Em relação a IP_Temp e Temp_Max, verificou-se que os percentuais de adição de 20% e de 35% de cinza se comportaram de forma semelhante, onde o percentual de adição de 35% de cinza apresentou os menores valores médios de temperatura no início de pega (IP_Temp) e de temperatura máxima (Temp_Max), diferindo significativamente dos demais percentuais.

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

Na Figura 108 são apresentados os gráficos de interação que destacam o fator CASCA nos elementos de análise IP_tempo, IP_Temp e IP_Vel.

Na Figura 109 são apresentados os gráficos de interação que destacam o fator CINZA nos elementos de análise IP_tempo, IP_Temp e IP_Vel.

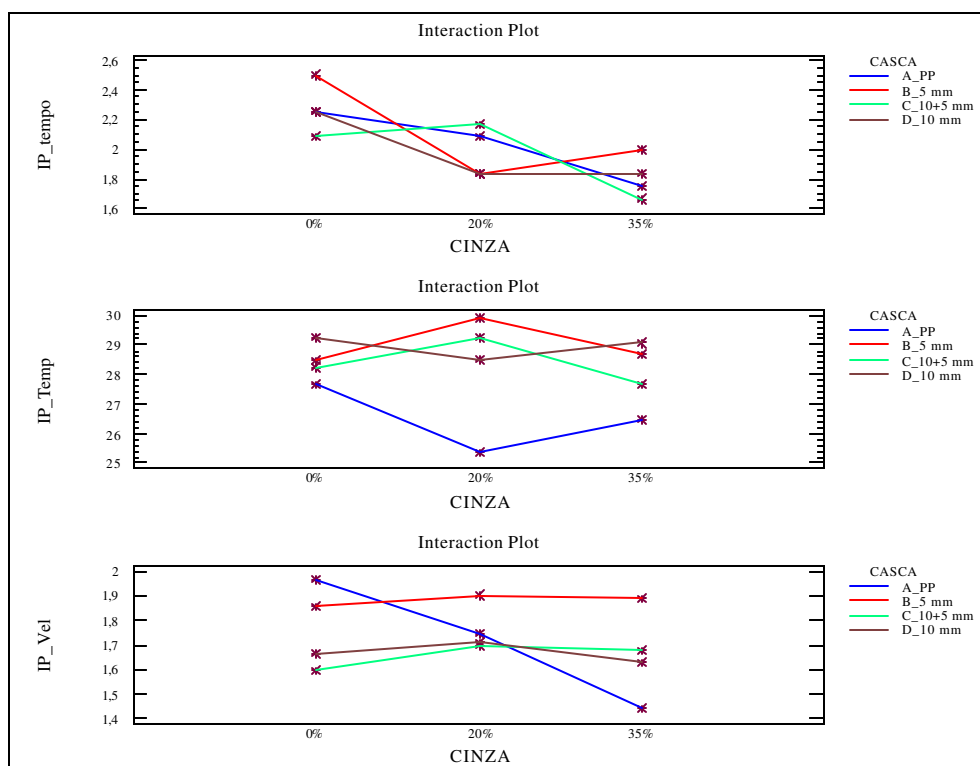


Figura 108: Interação casca-cinza - fator CASCA: parâmetro Início de Pega (IP_tempo, IP_Temp e IP_Vel).

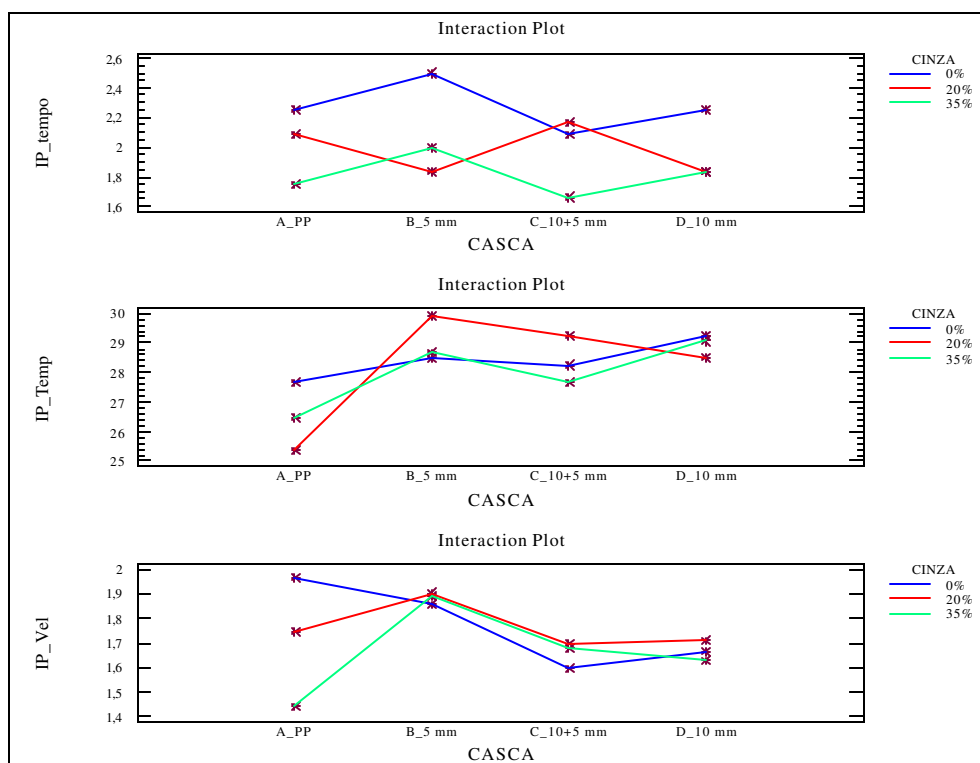


Figura 109: Interação casca-cinza - fator CINZA: parâmetro Início de Pega (IP_tempo, IP_Temp e IP_Vel).

D) Considerações a respeito do parâmetro Início de Pega.

Como observado em avaliações anteriores (FASE I), o tempo para o início de pega (IP_tempo) e a temperatura no início de pega (IP_Temp) são influenciados pela adição de cinza, ocorrendo uma redução significativa nas médias das misturas.

O elemento IP_Vel aponta um comportamento uniforme, onde as diferenças observadas entre as diferentes distribuições em tamanho de casca e, entre os diferentes percentuais de adição de cinza, **não** foram estatisticamente significativas. Nas interações casca-cinza, misturas 10 mm e 10+5 mm e, nos percentuais de adição de 20% e de 35% de cinza, observou-se um comportamento similar.

Desta forma, refinando a análise para a mistura 10 mm com adição de 20% de cinza, verificou-se que seu valor médio foi muito próximo do valor médio de sua pasta referência (A_PP-20%), o que indica que o início de pega (para este tipo de mistura), com base na velocidade do pulso ultra-sônico (VPU), situando-se na faixa de 1,70 km/s a 1,75 km/s.

No caso do conjunto de todas as misturas, a faixa onde pode ser encontrado o ponto do início de pega é muito mais abrangente, variando de 1,44 km/s (PP-35%) a 1,97 km/s (PP-0%), considerando-se a ausência de diferenças significativas entre as misturas avaliadas.

4.2.2.2 Avaliação do parâmetro Fim de Pega das misturas.

A Tabela 91 apresenta as médias dos elementos de análise empregados.

Tabela 91: FASE II - Avaliação físico-mecânica - Parâmetro Fim de Pega (Médias).

MÉDIAS	A_PP-0%	B_5 mm-0%	C_10+5 mm-0%	D_10 mm-0%
FP_tempo (h)	2,75	3,25	2,83	2,83
FP_Temperatura (°C)	29,5	29,7	29,9	30,4
FP_Velocidade (km/s)	2,035	2,105	1,872	1,881
MÉDIAS	A_PP-20%	B_5 mm-20%	C_10+5 mm-20%	D_10 mm-20%
FP_tempo (h)	2,67	2,33	2,67	2,25
FP_Temperatura (°C)	27,1	31,2	30,6	29,3
FP_Velocidade (km/s)	1,985	2,125	2,017	1,896
MÉDIAS	A_PP-35%	B_5 mm-35%	C_10+5 mm-35%	D_10 mm-35%
FP_tempo (h)	2,50	2,58	2,25	2,33
FP_Temperatura (°C)	28,3	30,3	28,8	30,3
FP_Velocidade (km/s)	2,241	2,235	2,049	1,927

A Tabela 92 apresenta as análises da variância (ANOVA) do parâmetro Fim de Pega, considerando-se os elementos de análise FP_tempo, FP_Temp e FP_Vel. Em todos os três elementos de análise (FP_tempo, FP_Temp e FP_Vel), verifica-se a existência de diferença significativa nos fatores (CASCA; CINZA) avaliados. Em seguida, são apresentados os resultados da avaliação dos fatores casca, cinza e de sua interação.

Tabela 92: ANOVAs do parâmetro Fim de Pega (FP_tempo, FP_Temp e FP_Vel).

Analysis of Variance for FP_tempo - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	0,296875	3	0,0989583	14,37	0,0000
B:CINZA	1,78125	2	0,890625	129,34	0,0000
INTERACTIONS					
AB	0,802083	6	0,133681	19,41	0,0000
RESIDUAL	0,165267	24	0,00688611		
TOTAL (CORRECTED)	3,04547	35			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					
Analysis of Variance for FP_Temp - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	22,4658	3	7,48859	86,11	0,0000
B:CINZA	1,09976	2	0,549878	6,32	0,0062
INTERACTIONS					
AB	18,0532	6	3,00886	34,60	0,0000
RESIDUAL	2,08707	24	0,0869611		
TOTAL (CORRECTED)	43,7058	35			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					
Analysis of Variance for FP_Vel - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	0,343824	3	0,114608	69,30	0,0000
B:CINZA	0,126567	2	0,0632835	38,26	0,0000
INTERACTIONS					
AB	0,0688018	6	0,011467	6,93	0,0002
RESIDUAL	0,0396933	24	0,00165389		
TOTAL (CORRECTED)	0,578887	35			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A) Efeito da adição de CASCA.

Na Tabela 93 apresenta-se a análise das médias para o fator CASCA.

Comparando-se IP_tempo e FP_tempo verifica-se que a ordem sequencial dos valores médios foi mantida, indicando uma tendência uniforme para o comportamento tempo, o que indica que a cinética do processo químico de hidratação é característica e dependente da misturas avaliada. Destaca-se que a distribuição em tamanho de casca 10 mm apresentou a menor média de FP_tempo, diferindo significativamente das demais, indicando a possibilidade de uma desforma mais rápida, tendo como base as indicações de Zucco (1999).

Tabela 93: Análises do fator CASCA: parâmetro Fim de Pega (elementos de análise: **FP_tempo, FP_Temp e FP_Vel**): Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for FP_tempo by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
D_10 mm	9	2,47222	X
C_10+5 mm	9	2,58333	X
A_PP	9	2,63889	XX
B_5 mm	9	2,72222	X
Multiple Range Tests for FP_Temp by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
A_PP	9	28,3222	X
C_10+5 mm	9	29,7778	X
D_10 mm	9	30,0111	X
B_5 mm	9	30,4167	X
Multiple Range Tests for FP_Vel by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
D_10 mm	9	1,90122	X
C_10+5 mm	9	1,98078	X
A_PP	9	2,08744	X
B_5 mm	9	2,15611	X

Misturas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

Em relação à temperatura no fim de pega (FP_Temp), verificou-se que, enquanto a pasta referência – A_PP, sem adição de casca, apresentou o menor valor médio de temperatura, a distribuição em tamanho de casca 10 mm, em IP_Temp e em FP_Temp,

apresentou um dos maiores valores de temperatura, sendo que em FP_Temp, foi inferior apenas à distribuição em tamanho de casca 5 mm. Atribui-se à cal presente na casca este diferencial, em relação às pastas sem adição de casca. O efeito dos extrativos da casca não se tornou evidente na FP_Temp, mas pode estar influenciando no FP_tempo ou na FP_Vel.

Em relação à velocidade do pulso ultra-sônico (FP_Vel e IP_Vel) não se encontrou explicação adequada para o baixo valor de VPU da distribuição em tamanho de casca 10 mm, no fim de pega (FP_Vel). A porosidade variável poderia ser uma das possíveis explicações (RODRIGUES & GHAVAMI, 2004), porém não se efetuou este tipo de análise nos corpos-de-prova. Descartou-se o teor de umidade como elemento de influência na VPU, pois ao comparar-se a distribuição em tamanho de casca 10 mm, que apresentou teor de umidade de 22%, observou-se que seu valor médio foi inferior e significativamente diferente do valor médio da pasta referência (A_PP), sem adição de casca, com média de 23,2% de umidade.

Em misturas do tipo pasta, verificou-se que em seu estado fresco (inicial) não se observa a passagem do pulso ultra-sônico, indicando que o teor de umidade resultante da mistura dos materiais (cerca de 25% de umidade), não permitia a passagem do pulso ultra-sônico (frequência de 45 kHz).

B) Efeito da adição de CINZA.

A Tabela 94 apresenta as análises para o fator CINZA, empregando-se os elementos de análise tempo para o fim de pega (FP_tempo), temperatura no fim de pega (FP_Temp) e velocidade do pulso ultra-sônico no fim de pega (FP_Vel).

Comparando-se o comportamento do tempo e da temperatura, nos parâmetros início de pega (IP_tempo) e Fim de pega (FP_tempo), verificou-se que a ordem sequencial foi mantida, tendo como diferencial o fato de que, se no início de pega houve diferença significativa entre os percentuais de adição de 20% e de 35% de cinza, no fim de pega estes percentuais de adição já não apresentavam este comportamento diferenciado.

Em relação à temperatura, verificou-se que o percentual de adição de 0% de cinza (pasta referência, sem adição de cinza) apresentou os maiores valores médios de temperatura, quer seja em IP_Temp ou em FP_Temp, indicando que a adição de cinza promoveu redução nas temperaturas no início e no fim de pega, atribuída ao aumento de massa no sistema.

Comparando-se o comportamento da velocidade do pulso ultra-sônico (VPU) nos parâmetros Início de pega (IP_Vel) e Fim de pega (FP_Vel), verificou-se que os percentuais de adição de 0% e de 20% de cinza não diferiram significativamente entre si, em ambos os parâmetros.

Tabela 94: Análises do fator CINZA: parâmetro Fim de Pega (elementos de análise: **FP_tempo, FP_Temp e FP_Vel**): Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for FP_tempo by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
35%	12	2,41667	X
20%	12	2,47917	X
0%	12	2,91667	X
Multiple Range Tests for FP_Temp by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
35%	12	29,4425	X
20%	12	29,5892	XX
0%	12	29,8642	X
Multiple Range Tests for FP_Vel by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
0%	12	1,97417	X
20%	12	2,00692	X
35%	12	2,11308	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

Em relação ao percentual de adição de 35% de cinza, verificou-se que no início de pega (IP_Vel) apresentou o menor valor médio (não diferindo dos demais percentuais de adição de cinza) e no fim de pega (FP_Vel), além de apresentar o maior valor médio, diferiu significativamente dos demais percentuais de adição de cinza.

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

Nas Figuras 110 e 111 são apresentados os gráficos da interação casca-cinza.

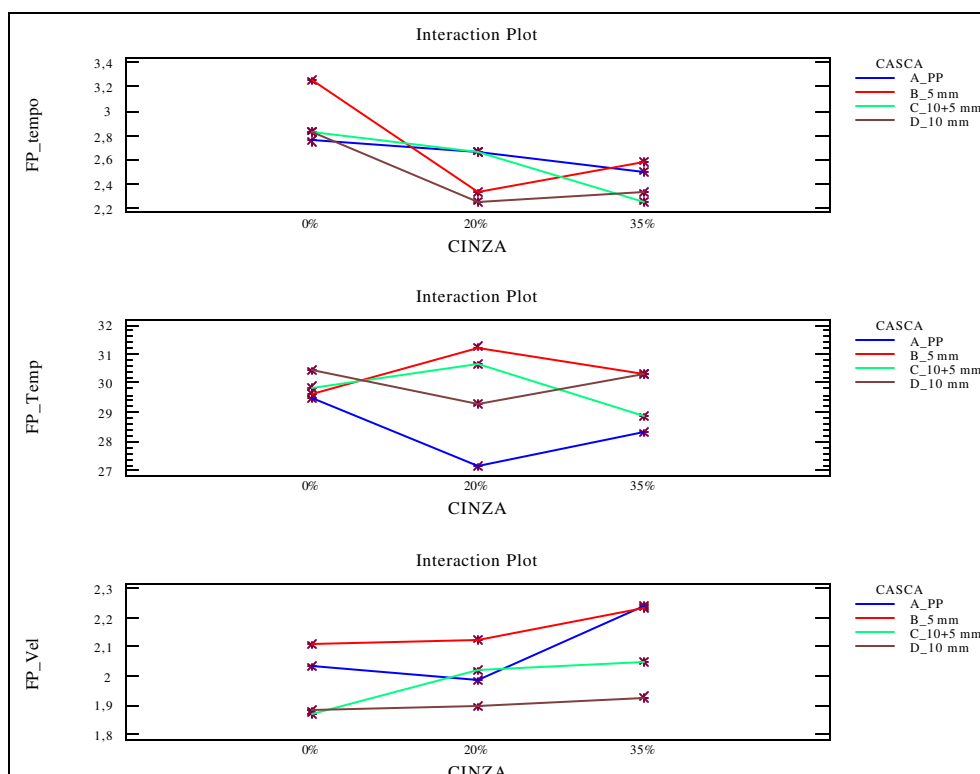


Figura 110: Interação casca-cinza - fator CASCA: parâmetro Fim de Pega (FP_tempo, FP_Temp e FP_Vel).

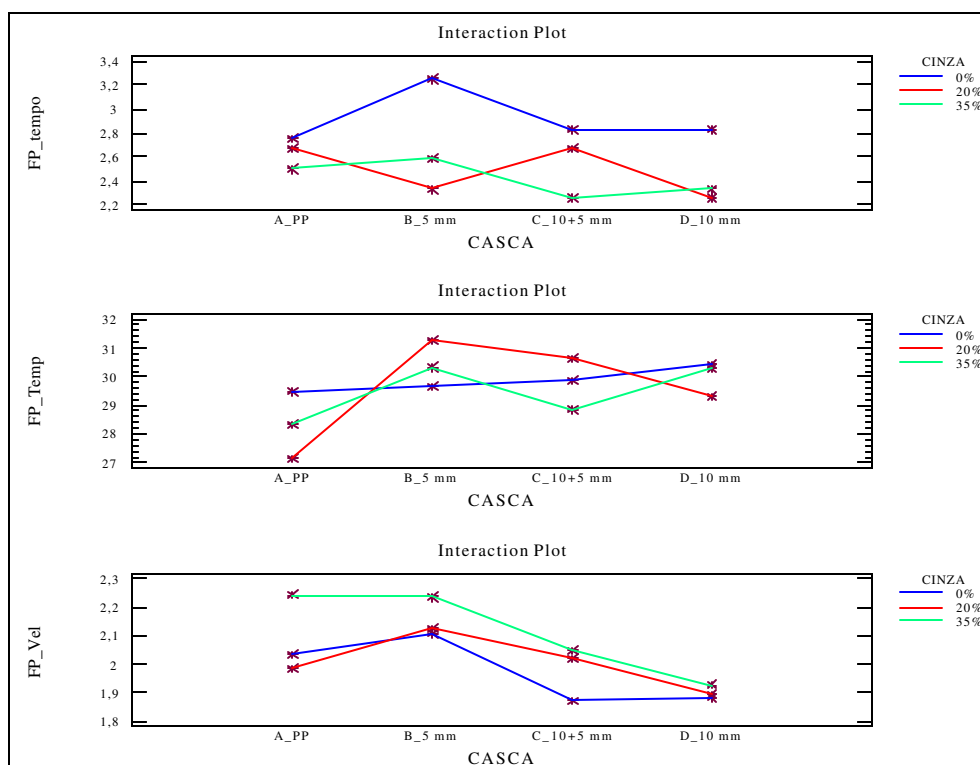


Figura 111: Interação casca-cinza - fator CINZA: parâmetro Fim de Pega (FP_tempo, FP_Temp e FP_Vel).

D) Considerações a respeito do parâmetro Fim de Pega.

Como o parâmetro fim de pega aponta o limiar entre o final do enrijecimento e o rápido desenvolvimento da resistência mecânica, sua utilidade passa de elemento apenas conceitual para um parâmetro importante de definição do pós-fim de pega, a partir do qual estabelece-se um tempo mínimo, em ganho de resistência, necessário à desforma segura de peças de compósitos.

Racionaliza-se em termos de tempo, tendo em vista que após o início de pega, as reações do cimento estabelecem-se de forma “normal”, com pequenas variações, associadas geralmente ao aumento de massa no sistema. No caso das misturas avaliadas, a velocidade no fim de pega variou entre 1,50 km/s e 2,10 km/s, dependendo da mistura analisada.

Zucco (1999) fez referência à possibilidade de desforma de chapas prensadas de compósito cimento-casca de arroz após 14 h da mistura dos componentes, mas não fez referências ao fim de pega ou, a uma faixa de valores de VPU que pudesse caracterizar o pós-fim de pega, valor necessário para efetuar a desforma de forma segura.

Neste trabalho de pesquisa, também não foi possível efetuar-se a determinação segura de uma faixa de valores de VPU que pudesse determinar o pós-fim de pega em chapas prensadas, pelo fato de as mesmas terem apenas controle de VPU após 24 h da realização das misturas dos componentes.

4.2.2.3 Avaliação do parâmetro Resistência à tração por Compressão Diametral das misturas.

Os corpos-de-prova (CPs) de numeração ímpar (1, 3, 5 e 7), obtidos pelo seccionamento dos cilindros de pasta, foram ensaiados à tração por compressão diametral (Tensão_D, em MPa), tendo se efetuado previamente avaliações relativas às características dos mesmos, empregando-se os elementos velocidade do pulso ultra-sônico (Vel_D, em km/s), massa específica aparente (MEAp_D, em g/cm³) e módulo de elasticidade dinâmico (MOEd_D, em MPa), como elementos de controle de qualidade para verificar a existência de possíveis anomalias capazes de interferir na avaliação dos resultados.

Tendo em vista o caráter exploratório, avaliações envolvendo a análise conjunta dos

comportamentos químicos e mecânicos não foram efetuadas, tendo-se avaliado apenas o desempenho das misturas com base nos resultados dos ensaios físico-mecânicos.

Na Tabela 95 são apresentadas as médias dos elementos utilizados na análise dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral, de modo a destacar os efeitos de cada distribuição em tamanho de CASCA e de cada percentual de adição de CINZA.

Tabela 95: FASE II - Avaliação físico-mecânica: Parâmetro Compressão Diametral.

MÉDIAS	A_PP-0%	B_5 mm-0%	C_10+5 mm-0%	D_10 mm-0%
Vel_Diam. (km/s)	3,142	2,990	2,822	2,822
MEAp_D. (g/cm ³)	1,78	1,74	1,69	1,70
MOEd Diam. (MPa)	17623	15522	13423	13562
Tensão_D. (MPa)	1,83	2,65	2,76	2,87
MÉDIAS	A_PP-20%	B_5 mm-20%	C_10+5 mm-20%	D_10 mm-20%
Vel_Diam. (km/s)	3,573	3,028	3,001	2,917
MEAp_D. (g/cm ³)	1,78	1,76	1,74	1,72
MOEd Diam. (MPa)	22754	16104	15709	14608
Tensão_D. (MPa)	2,94	3,82	3,30	3,66
MÉDIAS	A_PP-35%	B_5 mm-35%	C_10+5 mm-35%	D_10 mm-35%
Vel_Diam. (km/s)	3,599	3,211	3,061	3,032
MEAp_D. (g/cm ³)	1,78	1,76	1,75	1,71
MOEd Diam. (MPa)	22990	18116	16469	15769
Tensão_D. (MPa)	2,66	3,99	3,53	3,95

4.2.2.3.1 Avaliação da VPU (Vel_D, em km/s) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à tração por compressão diametral.

A determinação da VPU nos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral (Vel_D - transdutores de face plana, de 45 kHz calibrados em 20 μ s), objetivou a detecção de possíveis anomalias, assim como permitir a indicação dos valores médios nos gráficos de evolução da velocidade de propagação do pulso ultra-sônico (EVPU), de forma similar à FASE I.

A Tabela 96 apresenta a análise da variância (ANOVA) do elemento de análise velocidade do pulso ultra-sônico (VPU) dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral (Vel_D), onde se destaca a existência de diferença significativa nos fatores CASCA, CINZA e, na interação CASCA-CINZA.

Tabela 96: ANOVA do elemento de análise Velocidade Diametral (Vel_D) dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral.

Analysis of Variance for Vel_D - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	1,98002	3	0,660006	72,72	0,0000
B:CINZA	0,658476	2	0,329238	36,28	0,0000
INTERACTIONS					
AB	0,194046	6	0,0323411	3,56	0,0071
RESIDUAL	0,326723	36	0,00907565		
TOTAL (CORRECTED)	3,15926	47			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A seguir, são apresentados os resultados relativos à avaliação de cada fator, da interação entre fatores, apresentando-se algumas considerações sobre o parâmetro avaliado.

A) Efeito da adição de CASCA.

Na Tabela 97 apresenta-se a análise do fator CASCA, onde se pode verificar que a maior média obtida foi relativa à pasta referência – A_PP, sem adição de casca, que diferiu significativamente das demais médias, correspondentes às misturas com adição de casca.

Tabela 97: Análise do fator CASCA: elemento de análise Vel_D dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Vel_D by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
D_10 mm	12	2,92367	X
C_10+5 mm	12	2,96133	X
B_5 mm	12	3,07658	X
A_PP	12	3,43783	X

Misturas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

Entre as distribuições em tamanho de casca, destaca-se que a VPU da distribuição em tamanho de casca 5 mm foi superior e significativamente diferente das de 10 mm e 10+5 mm, que não diferem entre si. Destaca-se, ainda, a redução na velocidade em função do aumento da dimensão das partículas de casca.

B) Efeito da adição de CINZA.

A Tabela 98 apresenta a análise do fator CINZA, onde se destaca o percentual de adição de 35% de cinza, pela maior contribuição ao aumento da VPU.

Tabela 98: Análise do fator CINZA: elemento de análise **Vel_D** dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Vel_D by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
0%	16	2,94375	X
20%	16	3,12994	X
35%	16	3,22588	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

A Figura 112 apresenta os gráficos de interação casca-cinza.

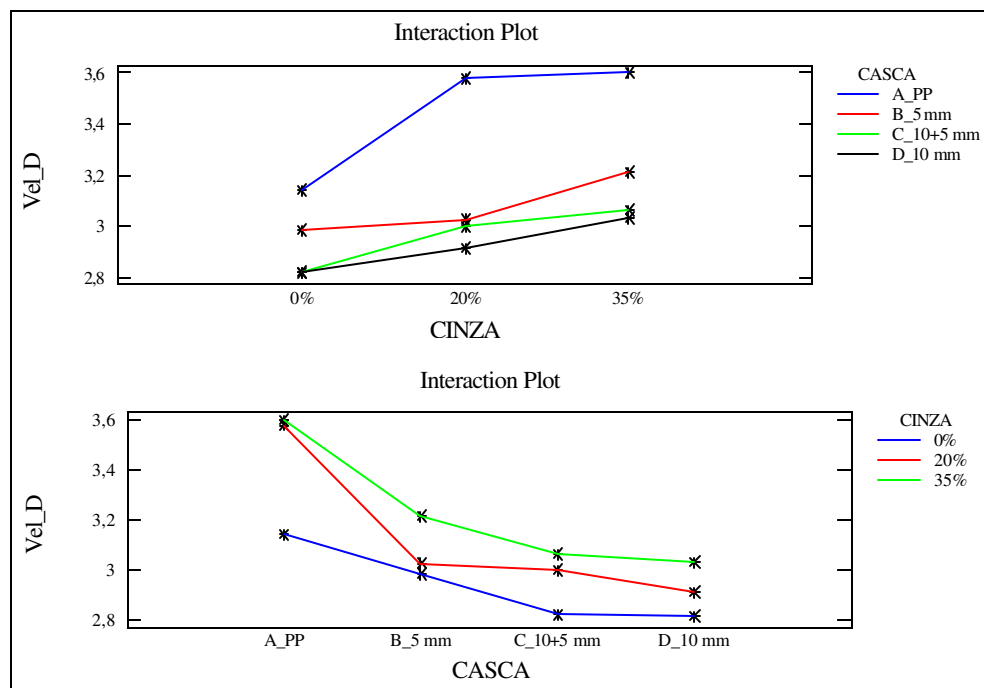


Figura 112: Interação casca-cinza: elemento de análise **Vel_D**.

Os gráficos evidenciam a redução da Vel_D com a adição de casca, onde se destaca a menor redução promovida pela distribuição em tamanho de casca 5 mm, em função da menor dimensão das partículas. No caso da adição de cinza, verificou-se que teores de adição de 20% e de 35% promoveram aumentos significativos na VPU.

D) Considerações a respeito do elemento de análise Velocidade Diametral (Vel_D).

Enquanto a adição de casca promoveu redução na velocidade do pulso ultra-sônico (VPU), a adição de cinza promoveu melhorias tendo, por destaque, o percentual de adição de 35% de cinza, por apresentar os maiores valores médios de VPU.

4.2.2.3.2 Avaliação da Massa Específica Aparente (MEAp_D, em g/cm³) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à tração por compressão diametral.

A Tabela 99 apresenta a análise da variância (ANOVA) do elemento de análise massa específica aparente dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral (MEAp_D), onde se verificou (p-valor < 0,05) a existência de diferença significativa nos fatores CASCA, CINZA e, na interação CASCA-CINZA. Em seguida, são apresentados os resultados da avaliação da casca, da cinza e de sua interação, apresentando considerações sobre o parâmetro avaliado.

Tabela 99: ANOVA do elemento de análise Massa Específica Aparente (MEAp_D) dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral.

Analysis of Variance for MEdp_D - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	0,0285563	3	0,00951875	24,26	0,0000
B:CINZA	0,00555417	2	0,00277708	7,08	0,0026
INTERACTIONS					
AB	0,0069625	6	0,00116042	2,96	0,0189
RESIDUAL	0,014125	36	0,000392361		
TOTAL (CORRECTED)	0,0551979	47			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A) Efeito da adição de CASCA.

A Tabela 100 apresenta a análise do fator CASCA, onde se verifica que a adição de casca promoveu redução na massa específica aparente, sendo que a distribuição em tamanho de casca 10 mm apresentou o menor valor de massa específica aparente, não diferindo significativamente da distribuição em tamanho de casca 10+5 mm.

Tabela 100: Análise do fator CASCA: elemento de análise **MEAp_D** dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for MEdp_D by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
D_10 mm	12	1,7125	X
C_10+5 mm	12	1,7275	XX
B_5 mm	12	1,74833	X
A_PP	12	1,7775	X

Misturas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

As causas da redução na massa específica aparente podem ser atribuídas, em parte, ao formato da casca de arroz que, quando inteira e não fracionada mecanicamente, forma espaços não preenchidos pela pasta de cimento. A Figura 113 permite uma melhor compreensão deste tipo de comportamento, principalmente no caso de grãos “chochos” (2), pois não houve formação de semente ou, onde processo de descascamento do arroz não “abre” a casca (1), separando a Lema (bráctea maior, com 5 nervuras) e a Pálea (bráctea menor, com 3 nervuras), que retornam à sua posição original, após a saída do grão.

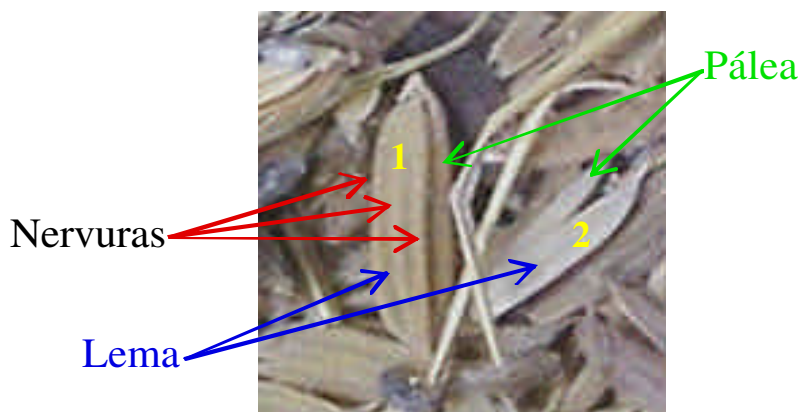


Figura 113: Cascas de arroz “fechada” (1) e “chocha” (2).

B) Efeito da adição de CINZA.

O fator CINZA, analisado na Tabela 101, destaca que os percentuais de adição de 20% e de 35% de cinza diferiram significativamente do percentual de 0% de adição.

Tabela 101: Análise do fator CINZA: elemento de análise **MEAp_D** dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for MEdp_D by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
0%	16	1,72625	X
35%	16	1,74875	X
20%	16	1,74937	X

Adições marcadas com "x" em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

Os gráficos de interação casca-cinza evidenciam que a adição de casca promove redução na MEdp_D, enquanto que a adição de cinza (percentuais de adição de 20% e de 35%) de cinza promove aumento na MEdp_D (Figura 114).

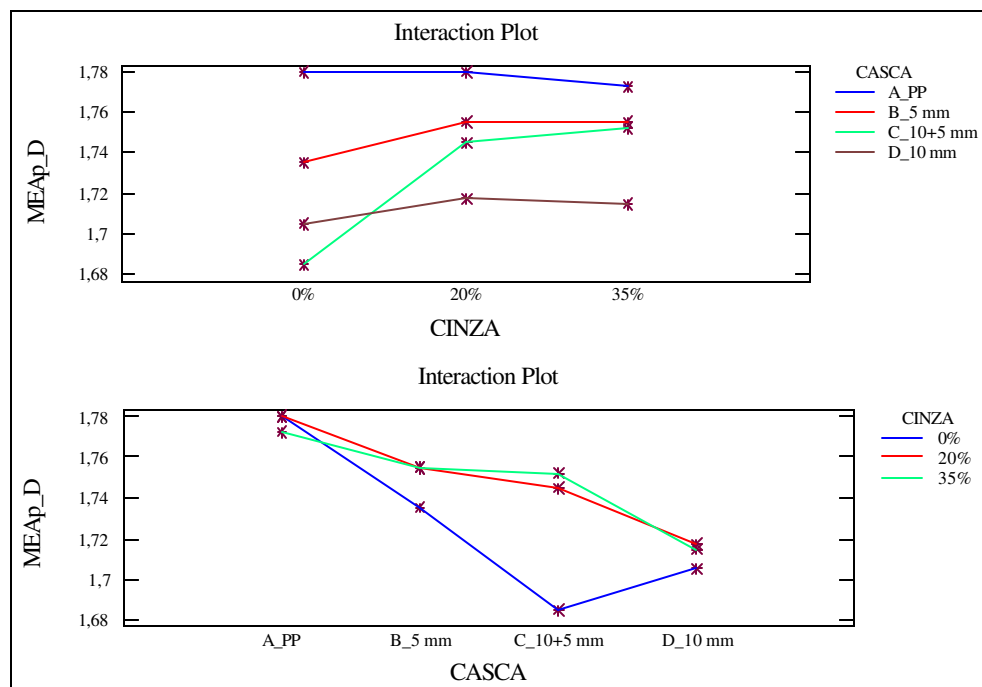


Figura 114: Interação casca-cinza: elemento de análise **MEAp_D**.

D) Considerações a respeito do elemento de análise Massa Específica Aparente.

A adição de casca promoveu uma redução no elemento de análise MEAp_D dos corpos-de-prova. A cinza, em conjunto com a casca, promoveu aumento na MEAp_D.

As reduções na massa específica aparente, associadas aos materiais empregados nas misturas, podem ser facilmente compreendidas quando se compara a massa específica do cimento empregado, de $2,97 \text{ g/cm}^3$, com a da casca, de $0,73 \text{ g/cm}^3$ (estimada por ZUCCO (1999), com base na NBR 9776/87, para casca 10 mm, natural, seca em estufa) ou, com a da cinza, de $1,87 \text{ g/cm}^3$ (NBR 6474/84; Umidade no ensaio = 3,1%).

Desta forma, o diferencial entre as misturas será menor quanto maior for a presença de finos (mistura mais compacta), uma vez que os espaços promovidos pela casca inteira (10 mm) podem ser preenchidos por partículas de menor dimensão (casca, cinza e/ou cimento).

Avaliando-se os valores de MEAp_D apresentados e comparando-se com os valores do elemento de análise Vel_D, verificou-se que a mistura 10 mm destaca-se por apresentar as menores médias (MEAp_D; Vel_D), apresentando, contudo, a maior média de Tensão_D (Tabela 106).

No caso da adição de cinza, verificou-se que o percentual de adição de 35% apresentou a maior média de Vel_D, não diferindo, contudo, do percentual de adição de 20% de cinza, em termos de MEAp_D e de Tensão_D. Tal fato sugere, como verificado na FASE I, a falta de correlação entre Vel_D e Tensão_D ou entre MEAp_D e Tensão_D.

4.2.2.3.3 Avaliação do Módulo de Elasticidade Dinâmico (MOEd_D, em MPa) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à tração por compressão diametral.

A Tabela 102 apresenta a análise da variância (ANOVA) do elemento de análise módulo de elasticidade dinâmico (MOEd_D), que evidencia a existência de diferença significativa nos fatores CASCA, CINZA e, na interação CASCA-CINZA.

Tabela 102: ANOVA do elemento de análise Módulo de Elasticidade dinâmico (MOEd_D) dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral.

Analysis of Variance for MOEd_D - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	3,10817E8	3	1,03606E8	96,42	0,0000
B:CINZA	9,12706E7	2	4,56353E7	42,47	0,0000
INTERACTIONS					
AB	2,69891E7	6	4,49818E6	4,19	0,0027
RESIDUAL	3,86818E7	36	1,07449E6		
TOTAL (CORRECTED)	4,67758E8	47			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A seguir, são apresentados os resultados da avaliação da casca, da cinza e de sua interação, apresentando-se algumas considerações.

A) Efeito da adição de CASCA.

A Tabela 103 apresenta a análise do fator CASCA, onde se evidenciou a pasta referência – A_(PP), sem adição de casca, como a de maior média de MOEd_D, indicando que a adição de casca promoveu redução no MOEd_D, sendo maior esse efeito quanto maior foi a presença de partículas de dimensão equivalente ou superior a 1,19 mm (#16 mesh), como é o caso das distribuições em tamanho de casca 10 mm (Tabela 6) e 10+5 mm (Tabela 8). Este fato foi evidenciado inicialmente na Tabela 50, da FASE I.

Tabela 103: Análise do fator CASCA: elemento de análise MOEd_D dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for MOEd_D by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
D_10 mm	12	14646,1	X
C_10+5 mm	12	15200,2	X
B_5 mm	12	16580,6	X
A_PP	12	21122,6	X

Misturas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

B) Efeito da adição de CINZA.

A Tabela 104 apresenta a análise do fator CINZA, que destaca o aumento do MOEd_D com o aumento no percentual de adição de cinza. Atribuiu-se à adição de casca, o pior desempenho apresentado pelas misturas com adição de 0% de cinza.

Tabela 104: Análise do fator CINZA: elemento de análise **MOEd_D** dos corpos de prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for MOEd_D by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
0%	16	15032,4	X
20%	16	17293,7	X
35%	16	18336,0	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

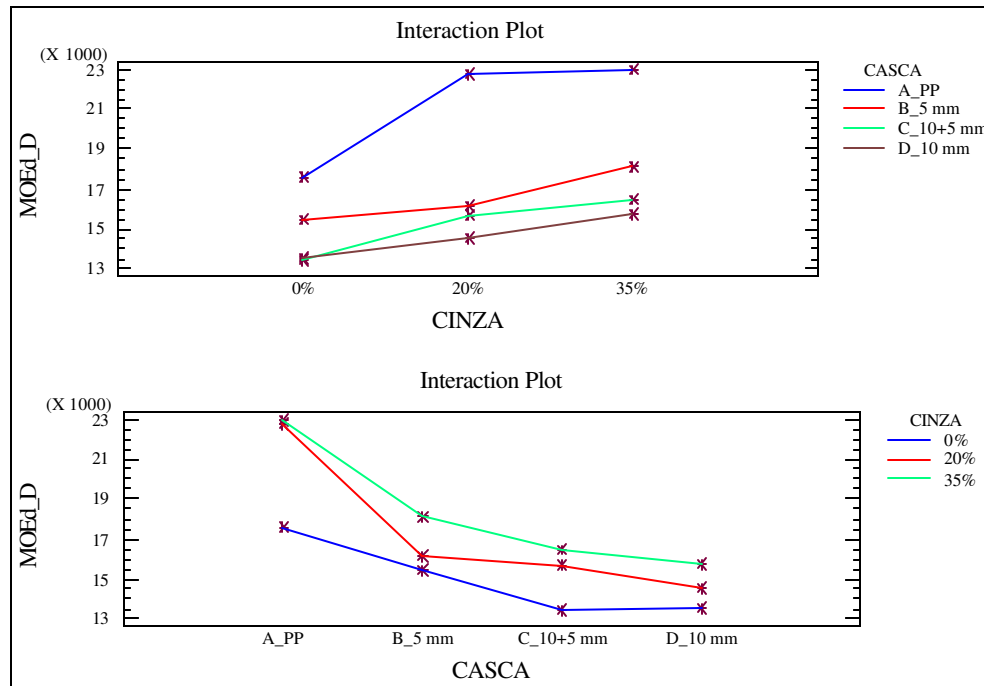


Figura 115: Interação casca-cinza: elemento de análise **MOEd_D**.

Os gráficos de interação casca-cinza da Figura 115 destacam que a adição de casca promove redução no MOEd_D e, a adição de cinza (20% e 35% de adição), aumento.

D) Considerações a respeito do elemento de análise Módulo de Elasticidade dinâmico.

A adição de casca nas misturas promoveu redução no MOEd_D, destacando-se que a distribuição em tamanho de casca 10 mm apresentou a menor média, não diferindo significativamente da distribuição em tamanho de casca 10+5 mm. No caso da adição de cinza, verifica-se um aumento no MOEd_D em função do aumento no percentual de adição.

4.2.2.3.4 Avaliação da Tensão Diametral (Tensao_D, em MPa) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à tração por compressão diametral.

A Tabela 105 apresenta a análise da variância (ANOVA) do elemento de análise Tensão Diametral (Tensao_D), onde se evidencia a existência de diferença significativa apenas nos fatores CASCA e CINZA.

Destaca, ainda, a ausência de diferença significativa na interação CASCA-CINZA (p-valor > 0,05). Em seguida, são apresentados os resultados da avaliação da casca, da cinza e da interação casca-cinza, tecendo-se algumas considerações.

Tabela 105: ANOVA do elemento de análise Tensão Diametral (Tensao_D).

Analysis of Variance for Tensao_D - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	8,21022	3	2,73674	27,12	0,0000
B:CINZA	9,821	2	4,9105	48,66	0,0000
INTERACTIONS					
AB	0,880296	6	0,146716	1,45	0,2217
RESIDUAL	3,63275	36	0,10091		
TOTAL (CORRECTED)	22,5443	47			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A) Efeito da adição de CASCA.

A Tabela 106, que apresenta a análise do fator CASCA, destaca o aumento na resistência à tração por compressão diametral com a adição de casca nas pastas.

Destaca-se, ainda, que a distribuição em tamanho de casca 10 mm apresentou o maior valor de média, porém não diferindo significativamente das demais distribuições em tamanho de casca.

Tabela 106: Análise do fator CASCA: elemento de análise **Tensao_D** dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Tensao_D by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
A_PP	12	2,47833	X
C_10+5 mm	12	3,19417	X
B_5 mm	12	3,48583	X
D_10 mm	12	3,495	X

Misturas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

B) Efeito da adição de CINZA.

A Tabela 107 apresenta a análise do fator CINZA, e evidencia que os teores de 20% e de 35% promoveram aumento significativo na resistência à tração por compressão diametral.

Tabela 107: Análise do fator CINZA: elemento de análise **Tensao_D** dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Tensao_D by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
0%	16	2,52625	X
20%	16	3,43187	X
35%	16	3,53187	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

A Figura 116 apresenta os gráficos de interação casca-cinza que destacam que as misturas D_10mm-35% (média = 3,925; Desvio Padrão = 0,159) e B_5 mm-35% (média = 3,9875; Desvio Padrão = 0,159) não diferem significativamente entre si, da mesma forma que não há diferença significativa entre os percentuais de adição de 20% e de 35% de cinza.

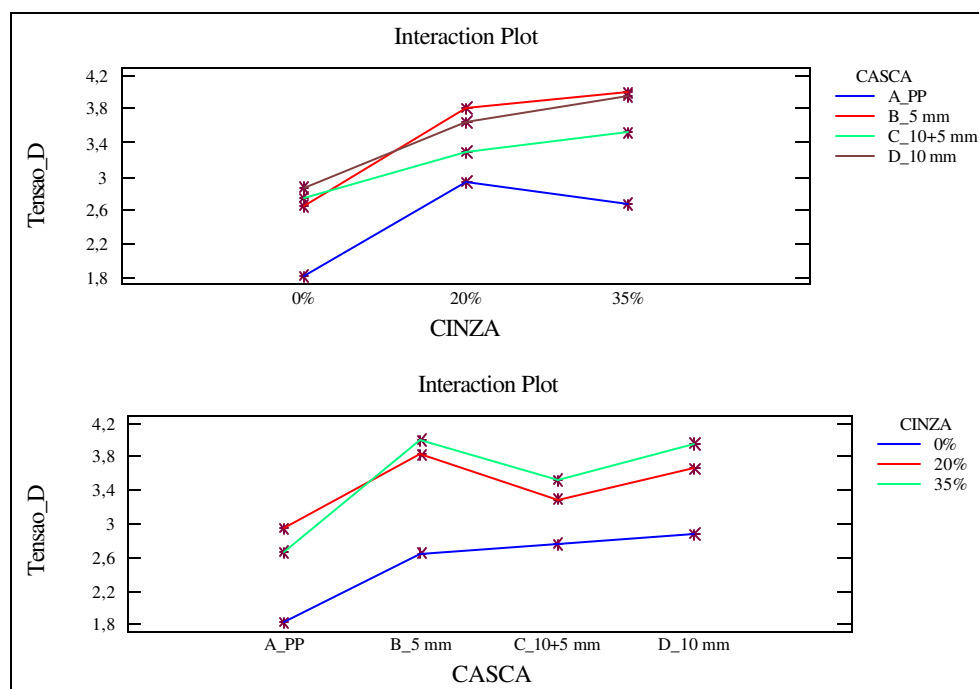


Figura 116: Interação casca-cinza: elemento de análise **Tensao_D**.

D) Considerações a respeito do elemento de análise Tensão Diametral.

A falta de diferença significativa entre as distribuições em tamanho de casca 5 mm, 10+5 mm e 10 mm **pode ser** um indicador de que o desempenho mecânico seja pouco afetado pela dimensão das partículas, mas, ao avaliar as misturas sem adição de cinza, verificou-se que as médias das pastas com casca apresentaram desempenho mecânico superior à pasta referência – A_PP-0%, principalmente na distribuição em tamanho de casca 10 mm, onde há uma maior quantidade de partículas de maior dimensão.

Em relação à adição de cinza, verificou-se que um percentual de adição de 35% de cinza, na distribuição em tamanho de casca 10 mm, promoveu melhoria do desempenho mecânico da mistura, porém não diferindo significativamente do percentual de adição de 20%.

E) Considerações finais sobre a avaliação do parâmetro Resistência à tração por Compressão Diametral das misturas.

Verificou-se que a adição de casca promoveu redução nos elementos de análise Vel_D, MEAp_D e MOEd_D. No entanto, no caso da Tensao_D, a distribuição em tamanho

de casca 10 mm apresentou o maior valor médio de tensão (não diferindo significativamente das demais distribuições em tamanho de casca), mesmo tendo apresentando sempre a menor média nos elementos de análise Vel_D, MEAp_D e de MOEd_D, ao que se associou a melhor ancoragem da casca, capaz de minimizar a expansão das fissuras no ensaio de tração.

Em sentido oposto, verificou-se que a pasta referência – A (PP), sem adição de casca, apresentou sempre os maiores valores médios nos elementos de análise Vel_D, MEAp_D e de MOEd_D, apresentando, porém, o menor valor de média no elemento de análise Tensao_D, diferindo significativamente das demais misturas.

Em relação à adição de cinza, a comparação entre a mistura sem cinza (0%) com aquelas em que se fez adição (20% e 35%) evidenciou melhorias em todos os elementos de análise empregados (Vel_D, MEAp_D, MOEd_D e Tensão_D), sendo que dos percentuais de cinza empregados, a adição de 35% promoveu as maiores médias.

A Tabela 108 apresenta os valores dos coeficientes de correlação entre os elementos de análise.

Tabela 108: Coeficientes de correlação (Pearson) entre os elementos de análise do parâmetro Resistência à tração por Compressão Diametral.

Correlations	Tensao_D	Vel_D	MEAp_D	MOEd_D
Tensao_D		-0,1435 (48) 0,3306	-0,1949 (48) 0,1843	-0,1704 (48) 0,2469
Vel_D	-0,1435 (48) 0,3306		0,6431 (48) 0,0000	0,9968 (48) 0,0000
MEAp_D	-0,1949 (48) 0,1843	0,6431 (48) 0,0000		0,6911 (48) 0,0000
MOEd_D	-0,1704 (48) 0,2469	0,9968 (48) 0,0000	0,6911 (48) 0,0000	

Legenda
Correlation
(Sample Size)
p-value

4.2.2.4 Avaliação do parâmetro Resistência à compressão simples das misturas.

Os corpos-de-prova (2, 4, 6 e 8) obtidos com o seccionamento dos cilindros de pasta foram ensaiados à compressão simples (Tensão_Ax, em MPa), tendo se efetuado previamente avaliações relativas às características dos mesmos.

Empregou-se, para tal, os elementos de análise velocidade do pulso ultra-sônico (Vel_Ax, em km/s), massa específica aparente (MEAp_Ax, em g/cm³) e módulo de elasticidade dinâmico (MOEd_Ax, em MPa), como elementos de controle de qualidade para verificar a existência de possíveis anomalias, capazes de interferir na avaliação dos resultados.

Tendo em vista o caráter exploratório, avaliações envolvendo a análise conjunta dos comportamentos químicos e mecânicos não foram efetuadas, tendo se avaliado apenas o desempenho das misturas com base nos resultados dos ensaios físico-mecânicos.

Na Tabelas 109 são apresentadas as médias dos elementos utilizados na análise dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples, de modo a destacar os efeitos de cada distribuição em tamanho de CASCA e, de cada percentual de adição de CINZA.

Tabela 109: FASE II - Avaliação físico-mecânica: Parâmetro Compressão Simples.

MÉDIAS	A_PP-0%	B_5 mm-0%	C_10+5 mm-0%	D_10 mm-0%
Vel_Ax. (km/s)	2,898	3,000	2,816	2,833
MEAp_Ax. (g/cm ³)	1,79	1,76	1,71	1,70
MOEd Ax. (MPa)	15078	15848	13591	13667
Tensão_Ax. (MPa)	32,42	31,45	25,33	23,74

MÉDIAS	A_PP-20%	B_5 mm-20%	C_10+5 mm-20%	D_10 mm-20%
Vel_Ax. (km/s)	3,545	3,075	2,968	2,990
MEAp_Ax. (g/cm ³)	1,81	1,75	1,74	1,74
MOEd Ax. (MPa)	22781	16583	15349	15566
Tensão_Ax. (MPa)	54,18	38,85	30,40	30,92

MÉDIAS	A_PP-35%	B_5 mm-35%	C_10+5 mm-35%	D_10 mm-35%
Vel_Ax. (km/s)	3,611	3,171	3,070	3,015
MEAp_Ax. (g/cm ³)	1,80	1,76	1,76	1,73
MOEd Ax. (MPa)	23461	17732	16586	15758
Tensão_Ax. (MPa)	50,26	40,87	30,81	33,03

4.2.2.4.1 Avaliação da VPU (Vel_Ax, em km/s) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à compressão simples.

O procedimento adotado na determinação da VPU em corpos-de-prova ensaiados à compressão simples (Vel_Ax) foi o mesmo empregado na determinação da VPU dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral (Vel_D) e na FASE I.

A Tabela 110 apresenta a análise da variância (ANOVA) do elemento de análise VPU dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples (Vel_Ax), onde se destaca a

existência de diferença significativa nos fatores CASCA, CINZA e na interação CASCA-CINZA (p-valor < 0,05). Em seguida, são apresentados os resultados da avaliação da casca, da cinza e de sua interação, apresentando-se algumas considerações.

Tabela 110: ANOVA do elemento de análise Velocidade Axial (Vel_Ax) dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples.

Analysis of Variance for Vel_Ax - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	1,29516	3	0,431721	58,10	0,0000
B:CINZA	0,964221	2	0,48211	64,88	0,0000
INTERACTIONS					
AB	0,544748	6	0,0907914	12,22	0,0000
RESIDUAL	0,267519	36	0,00743108		
TOTAL (CORRECTED)	3,07165	47			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A) Efeito da adição de CASCA.

Na Tabela 111 apresenta-se a análise do fator CASCA, podendo se verificar que dentre as distribuições em tamanho de casca, a de 5 mm foi superior e significativamente diferente das de 10 mm e 10+5 mm, que não diferem entre si.

Este fato também foi observado no elemento de análise Vel_D, o que demonstra a homogeneidade do cilindro de mistura.

Tabela 111: Análise do fator CASCA: elemento de análise Vel_Ax dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Vel_Ax by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
D_10 mm	12	2,94642	X
C_10+5 mm	12	2,95175	X
B_5 mm	12	3,08183	X
A_PP	12	3,35142	X

Misturas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

Observa-se que a redução na Vel_Ax está associada à incorporação de casca na pasta de cimento e à dimensão das partículas. Uma maior redução na Vel_Ax foi observada nas misturas onde as partículas de casca são maiores, como é o caso das distribuições em tamanho de casca 10+5 mm e 10 mm.

B) Efeito da adição de CINZA.

A Tabela 112 apresenta a análise do fator CINZA, onde as médias das adições de cinza evidenciam uma tendência de aumento na VPU com o aumento no percentual de adição de cinza.

Destaca-se, contudo, que os percentuais de adição de 20% e de 35% de cinza não diferem significativamente entre si.

Tabela 112: Análise do fator CINZA: elemento de análise **Vel_Ax** dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Vel_Ax by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
0%	16	2,88675	X
20%	16	3,145	X
35%	16	3,21681	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

A Figura 117 apresenta os gráficos de interação casca-cinza.

Estes gráficos destacam que a adição de cinza promoveu melhorias na velocidade de propagação do pulso ultra-sônico (Vel_Ax), com destaque para as pastas referência – A_PP, sem adição de casca.

Destacam, ainda, a ausência de diferença significativa entre os percentuais de adição de 20% e de 35% de cinza.

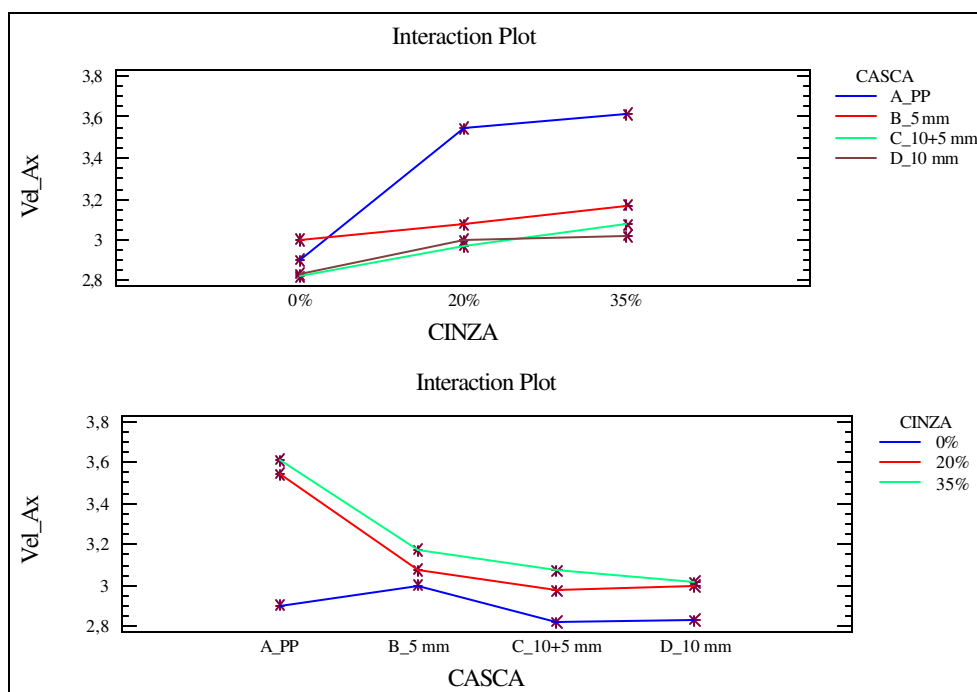


Figura 117: Interação casca-cinza: elemento de análise **Vel_Ax**.

D) Considerações a respeito do elemento de análise Velocidade Axial (**Vel_Ax**).

O comportamento dos corpos-de-prova em relação a **Vel_Ax** foi similar ao comportamento dos corpos-de-prova em relação a **Vel_D**, pois verificou-se que, enquanto a adição de casca promoveu redução na VPU, a adição de cinza promoveu aumentos, tendo por destaque, o percentual de adição de 35% de cinza, por apresentar os maiores valores de VPU, porém não diferindo significativamente do percentual de adição de 20% de cinza.

4.2.2.4.2 Avaliação da Massa Específica Aparente (**MEAp_Ax**, em g/cm³) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à compressão simples.

A Tabela 113 apresenta a análise da variância (ANOVA) do elemento de análise massa específica aparente dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples (**MEAp_Ax**), onde se verificou ($p\text{-valor} < 0,05$) a existência de diferenças significativas apenas nos fatores **CASCA** e **CINZA**. Na interação **CASCA-CINZA** não se evidenciou a existência de diferença significativa ($p\text{-valor} > 0,05$). Em seguida, são apresentados os resultados da avaliação da casca, da cinza e de sua interação, apresentando-se algumas considerações.

Tabela 113: ANOVA do elemento de análise Massa Específica Aparente (**MEAp_Ax**) dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples.

Analysis of Variance for MEdp_Ax - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	0,0411563	3	0,0137188	47,83	0,0000
B:CINZA	0,00455	2	0,002275	7,93	0,0014
INTERACTIONS					
AB	0,00355	6	0,000591667	2,06	0,0822
RESIDUAL	0,010325	36	0,000286806		
TOTAL (CORRECTED)	0,0595813	47			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A) Efeito da adição de CASCA.

A Tabela 114 apresenta a análise do fator CASCA, podendo-se verificar que a adição de casca promoveu redução na massa específica aparente. A distribuição em tamanho de casca 10 mm apresentou o menor valor de média, porém não diferindo significativamente da distribuição em tamanho de casca 10+5 mm.

Tabela 114: Análise do fator CASCA: elemento de análise **MEAp_Ax** dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for MEdp_Ax by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
D_10 mm	12	1,725	X
C_10+5 mm	12	1,73667	X
B_5 mm	12	1,75917	X
A_PP	12	1,80167	X

Misturas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

Como apresentado anteriormente, as causas da redução na massa específica aparente podem ser atribuídas ao formato da casca de arroz, à adição de cinza e à porosidade, sendo que a MEdp_Ax apresenta comportamento similar à MEdp_D.

Destaca-se, ainda, que as médias das distribuições em tamanho de casca evidenciam uma tendência de redução na MEdp_Ax com o aumento da dimensão das partículas de casca.

B) Efeito da adição de CINZA.

A Tabela 115 apresenta a análise do fator CINZA, na qual se aponta a existência de diferença significativa entre as misturas sem adição de cinza (0%) com as misturas com adição de cinza (20% e 35%). Verificou-se que entre os percentuais de adição de 20% e de 35% de cinza não existe diferença significativa.

Tabela 115: Análise do fator CINZA: elemento de análise **MEAp_Ax** dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for MEdp_Ax by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
0%	16	1,74187	X
20%	16	1,76188	X
35%	16	1,76313	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

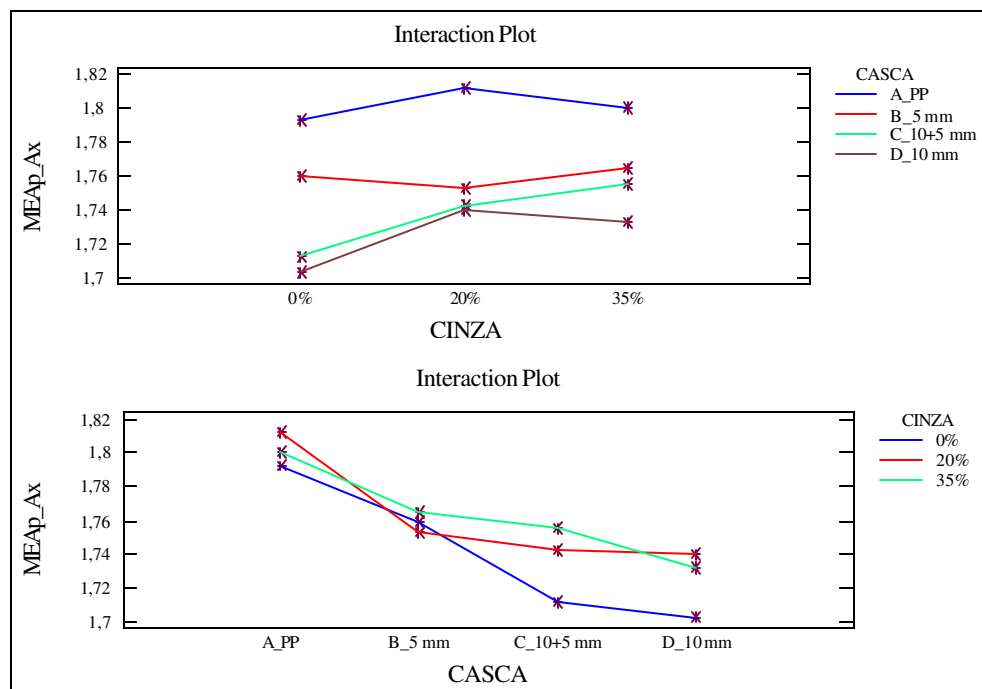


Figura 118: Interação casca-cinza: elemento de análise **MEAp_Ax**.

A Figura 118 destaca a ausência de interação CASCA-CINZA.

D) Considerações a respeito do elemento de análise Massa Específica Aparente.

A adição de casca (massa específica estimada por ZUCCO (1999) em $0,73 \text{ g/cm}^3$, com base na **NBR 9776/87**, para casca 10 mm, natural, seca em estufa) promoveu redução na MEAp_Ax, se associando tal fato à presença de vazios em função de sua baixa massa específica.

A cinza (massa específica de $1,87 \text{ g/cm}^3$, com base na NBR 6474/84; Umidade no ensaio = 3,1%) promoveu aumento na massa específica aparente, pelo preenchimento de vazios deixados pela casca. Ao comparar os elementos de análise MEAp_D e de MEAp_Ax, verificou-se que os mesmos apresentaram comportamento semelhante.

4.2.2.4.3 Avaliação do Módulo de Elasticidade Dinâmico (MOEd_Ax, em MPa) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à compressão simples.

Na Tabela 116 apresenta-se a análise da variância (ANOVA) do elemento de análise módulo de elasticidade dinâmico (MOEd_Ax).

Os dados apresentados destacam a existência de diferença significativa nos fatores CASCA, CINZA e, na interação CASCA-CINZA.

Em seguida, são apresentados os resultados da avaliação da casca, da cinza e de sua interação, apresentando-se algumas considerações.

Tabela 116: ANOVA do elemento de análise Módulo de Elasticidade dinâmico (MOEd_Ax) dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples.

Analysis of Variance for MOEd_Ax - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	2,29666E8	3	7,65553E7	92,68	0,0000
B:CINZA	1,30892E8	2	6,5446E7	79,23	0,0000
INTERACTIONS					
AB	7,8558E7	6	1,3093E7	15,85	0,0000
RESIDUAL	2,97365E7	36	826013,0		
TOTAL (CORRECTED)	4,68852E8	47			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A) Efeito da adição de CASCA.

A Tabela 117 apresenta a análise do fator CASCA, podendo-se verificar, de forma similar à MOEd_D, que a pasta referência – A_(PP), sem adição de casca, apresentou a maior média, indicando que a adição de casca promoveu redução no MOEd_Ax.

Tabela 117: Análise do fator CASCA: elemento de análise **MOEd_Ax** dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for MOEd_Ax by CASCA			

Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups

D_10 mm	12	14997,3	X
C_10+5 mm	12	15175,6	X
B_5 mm	12	16721,1	X
A_PP	12	20439,8	X

Misturas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

Destaca-se, ainda, que entre as misturas com adição de casca, a distribuição em tamanho de casca 5 mm, por possuir em sua composição maior percentual de finos, apresentou o maior valor de MOEd_Ax, diferindo significativamente das demais.

A Tabela 64 (MOEd_Ax – FASE I) não demonstra este fato de forma tão evidente como a Tabela 50 (MOEd_D – FASE I), mas, verificou-se de forma similar a MOEd_D (Tabela 103), que as misturas 10 mm e 5 mm diferem significativamente entre si, onde a mistura 10 mm apresentou as menores médias, ao que se associou à dimensão das partículas, em função da distribuição em tamanho de casca ser característica para cada mistura que, nesta FASE II, está associada a um percentual constante de 7,5% de adição de casca.

B) Efeito da adição de CINZA.

A Tabela 118 apresenta a análise do fator CINZA, podendo se evidenciar a influência da adição de cinza no elemento de análise MOEd_Ax, apontando que a média do percentual de adição de 35% de cinza foi superior e significativamente diferente dos demais percentuais de adição, fato este também constatado no elemento de análise MOEd_D.

Tabela 118: Análise do fator CINZA: elemento de análise **MOEd_Ax** dos corpos de prova ensaiados à compressão simples: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for MOEd_Ax by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
0%	16	14545,9	X
20%	16	17570,0	X
35%	16	18384,4	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

O baixo desempenho das misturas, observado no percentual de adição de 0% de cinza, foi atribuído à presença de casca. Verifica-se, ainda, o aumento na média do MOEd_Ax com o aumento no percentual de adição de cinza.

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

Os gráficos de interação casca-cinza evidenciam o comportamento das diferentes distribuições em tamanho de casca, em função do percentual de cinza (Figura 119).

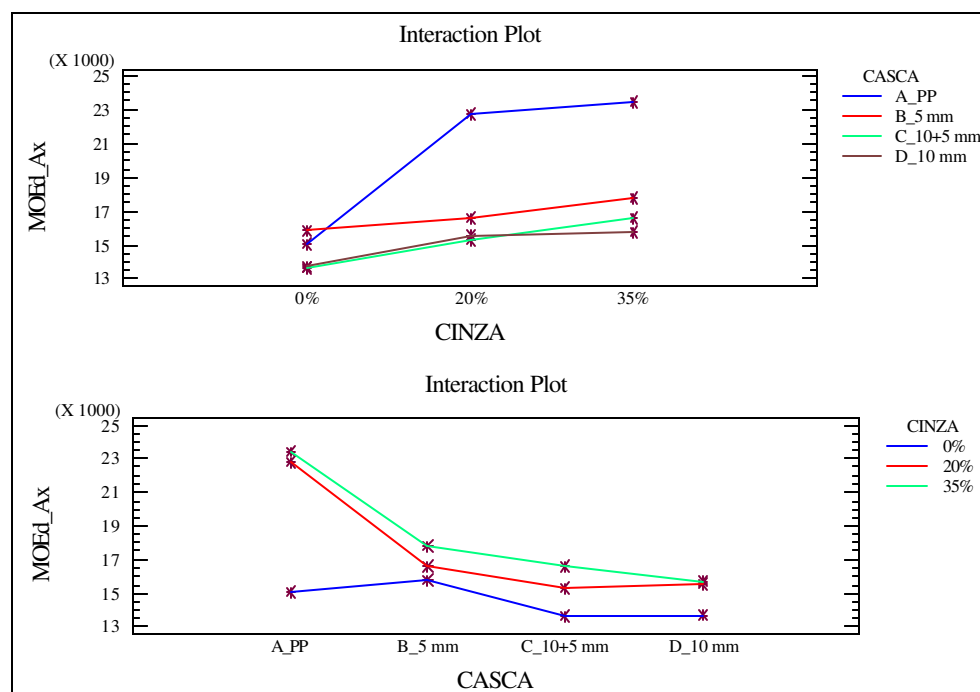


Figura 119: Interação casca-cinza: elemento de análise **MOEd_Ax**.

Verificou-se que a pasta referência – A_PP sem adição de casca – apresentou, em geral, os maiores valores médios de MOEd_Ax, enquanto que a distribuição em tamanho de casca 10 mm apresentou os menores valores médios, porém não diferindo significativamente da distribuição em tamanho de casca 10+5 mm.

Em relação à adição de cinza, o percentual de adição de 35% de cinza apresentou os maiores valores médios de MOEd_Ax. No caso do percentual de adição de 20% de cinza, verificou-se que apresentou uma tendência de comportamento assemelhada ao do percentual de adição de 35% tendo, porém, valores médios inferiores e estatisticamente diferentes.

D) Considerações a respeito do elemento de análise Módulo de Elasticidade dinâmico.

Verificou-se que o comportamento do MOEd_Ax, em relação à adição de casca e de cinza, foi similar àquele observado no MOEd_D, ou seja, a adição de casca promoveu redução nos valores médios, enquanto que a adição de cinza promoveu seu aumento.

Destaca-se que a distribuição em tamanho de casca 10 mm apresentou os menores valores médios de MOEd_Ax (e de MOEd_D). Entre os percentuais de adição de cinza, verificou-se que a adição de 35% de cinza promoveu as maiores médias.

4.2.2.4.4 Avaliação da Tensão Axial (Tensao_Ax, em MPa) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à compressão simples.

Tabela 119: ANOVA do elemento de análise Tensão Axial (Tensao_Ax).

Analysis of Variance for Tensao_Ax - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	2256,18	3	752,061	66,33	0,0000
B:CINZA	1160,77	2	580,386	51,19	0,0000
INTERACTIONS					
AB	376,64	6	62,7734	5,54	0,0004
RESIDUAL	408,202	36	11,339		
TOTAL (CORRECTED)	4201,8	47			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A Tabela 119 apresenta a análise da variância (ANOVA) do elemento de análise Tensão Axial (Tensao_Ax), tendo-se evidenciado a existência de diferença significativa nos fatores CASCA, CINZA e, na interação CASCA-CINZA (p-valor < 0,05). A seguir, são apresentados os resultados da avaliação da casca, da cinza e, da interação casca-cinza, tecendo-se algumas considerações sobre o elemento em análise.

A) Efeito da adição de CASCA.

Tabela 120: Análise do fator CASCA: elemento de análise **Tensao_Ax** dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Tensao_Ax by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
C_10+5 mm	12	28,8475	X
D_10 mm	12	29,23	X
B_5 mm	12	37,0558	X
A_PP	12	45,62	X

Misturas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

A Tabela 120 apresenta a análise do fator CASCA, onde pode-se verificar que a pasta referência – A (PP), sem adição de casca, apresentou o maior valor de Tensão_Ax e que a adição de casca promoveu redução na resistência das misturas, com destaque para a distribuição em tamanho de casca 10 mm, que apresentou um dos menores valores de média, porém, não diferindo significativamente da mistura 10+5 mm.

Comparando-se com os resultados obtidos em corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral (Tensão_D), verificou-se que os resultados (Tabela 106) são, em geral, conflitantes, o que sugere a necessidade de efetuarem-se ensaios mecânicos específicos, em acordo com a aplicação proposta ao material. Destaca-se, ainda, que os valores apresentados apontam para uma redução na resistência à compressão simples, em função do aumento na dimensão das partículas.

B) Efeito da adição de CINZA.

A Tabela 121 apresenta a análise do fator CINZA, onde se evidencia o melhor

desempenho das misturas às quais se adicionou cinza, quando são comparadas com o controle.

Tabela 121: Análise do fator CINZA: elemento de análise **Tensao_Ax** dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Tensao_Ax by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
0%	16	28,2344	X
20%	16	38,5881	X
35%	16	38,7425	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

A Figura 120 apresenta os gráficos de interação casca-cinza que evidenciam o comportamento assemelhado entre as distribuições em tamanho de casca 10 mm e 10+5 mm. Este comportamento, muito inferior à distribuição em tamanho de casca 5 mm, evidencia a influência da dimensão das partículas (que se associou a uma menor porosidade) no desempenho mecânico das misturas.

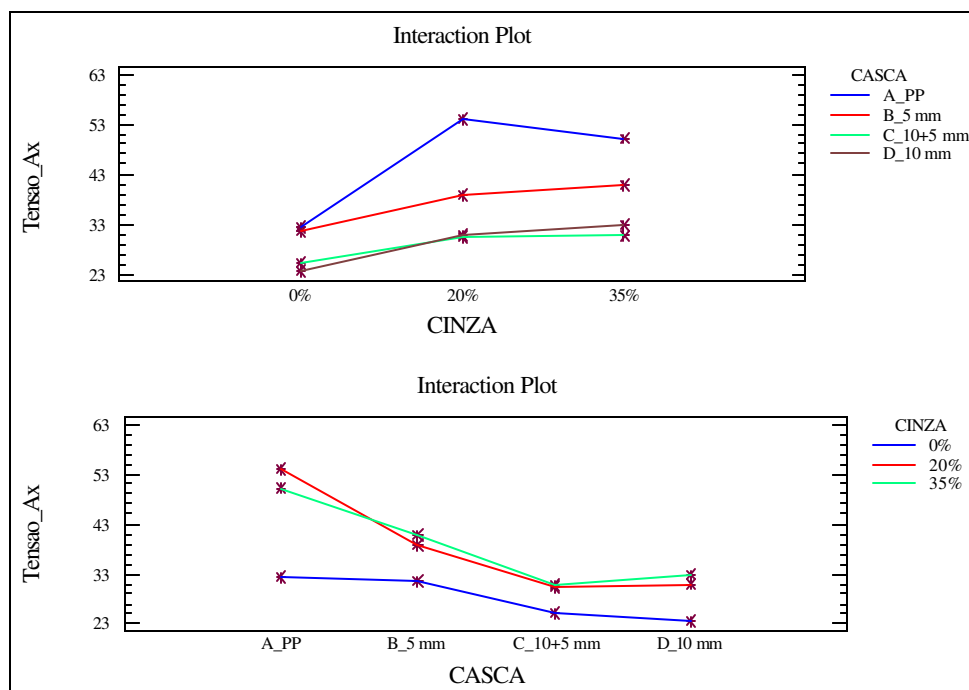


Figura 120: Interação casca-cinza: elemento de análise **Tensao_Ax**.

Destacam-se, ainda, as misturas com adições de 20% e de 35% de cinza, por não diferirem significativamente entre si.

D) Considerações a respeito do elemento de análise Tensão Axial.

Verificou-se que as médias das pastas com casca apresentaram desempenho mecânico inferior à pasta referência (A_PP), principalmente para o caso da distribuição em tamanho de casca 10 mm, que apresenta em sua composição um maior percentual de partículas de maior dimensão (Tabela 6). Em relação à adição de cinza, verificou-se que o percentual de adição de 35%, para a distribuição em tamanho de casca 10 mm, promoveu melhoria na resistência mecânica (Tensao_Ax) das misturas, porém, não diferindo significativamente do percentual de adição de 20%.

A existência de diferença significativa entre a distribuição em tamanho de casca 5 mm e as distribuições em tamanho de casca 10+5 mm e 10 mm mostra-se um indicador de que o desempenho mecânico do material à compressão simples (Tensão_Ax) sofre influência da dimensão das partículas.

Associou-se esta influência da dimensão das partículas a maior ou a menor presença de vazios formados pela casca, conforme já discutido em MEAp_D (Figura 113) ou, aos vazios formados por casca, se considerar-se que a casca possui baixa resistência mecânica ao esmagamento, em relação à pasta de cimento, o que pode ser considerado como um “vazio” capaz de promover um comportamento diferenciado no material.

Este comportamento diferenciado, caracterizado pela ruptura dútil, está sempre precedido de deformações permanentes significativas (Figura 53), o que implica em quebra das ligações entre a pasta e as fibras, o que diminui a capacidade do material deformar-se elásticamente.

E) Considerações finais sobre a avaliação do parâmetro Resistência à compressão simples das misturas.

Verificou-se que a adição de casca promoveu redução nos valores médios dos elementos de análise Vel_Ax, MEAp_Ax, MOEd_Ax e, principalmente, na Tensao_Ax.

Comparando-se o comportamento dos elementos de análise Vel_D, MEAp_D e de MOEd_D dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral, com os elementos de análise Vel_Ax, MEAp_Ax, MOEd_Ax, dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples, verifica-se uma similaridade de comportamento que pode ser interpretada como um indicador da homogeneidade nos cilindros de mistura.

Destaca-se que os ensaios de Tensao_D e de Tensao_Ax apresentaram um comportamento diferenciado e característico de cada ensaio. Assim, enquanto a Tensao_D aponta que a adição de casca promove aumento na resistência, a Tensao_Ax aponta exatamente o contrário.

No caso dos elementos de análise Vel_D, Vel_Ax, MEAp_D, MEAp_Ax, MOEd_D e MOEd_Ax, verificou-se que a distribuição em tamanho de casca 10 mm apresentou sempre a menor média, enquanto que a pasta referência – A (PP), sem adição de casca, apresentou sempre os valores médios mais elevados.

Em relação à adição de cinza, a comparação entre as misturas sem adição de cinza – 0%, com aquelas nas quais se fez adição (20% e 35%), evidenciou melhorias em todos os elementos de análise, inclusive na Tensão_D e na Tensão_Ax, com destaque para o percentual de adição de 35% de cinza.

A Tabela 122 apresenta os valores dos coeficientes de correlação entre os elementos de análise.

Tabela 122: Coeficientes de correlação (Pearson) entre os elementos de análise do parâmetro Resistência à compressão simples.

Correlations	Tensao_Ax	Vel_Ax	MEAp_Ax	MOEd_Ax
Tensao_Ax		0,8548 (48) 0,0000	0,7406 (48) 0,0000	0,8731 (48) 0,0000
Vel_Ax	0,8548 (48) 0,0000		0,6605 (48) 0,0000	0,9958 (48) 0,0000
MEAp_Ax	0,7406 (48) 0,0000	0,6605 (48) 0,0000		0,7163 (48) 0,0000
MOEd_Ax	0,8731 (48) 0,0000	0,9958 (48) 0,0000	0,7163 (48) 0,0000	

Legenda
Correlation
(Sample Size)
p-value

Verificou-se, na avaliação da resistência à tração por compressão diametral, que as correlações (Tabela 109) apontaram que apenas os elementos Vel_D e MEAp_D ($R = 0,6431$), Vel_D e MOEd_D ($R = 0,9968$) e, MEAp_D e MOEd_D ($R = 0,6911$), apresentaram valores de correlação superiores a 0,50.

No caso das correlações envolvendo a resistência à compressão simples, todas as correlações foram superiores a 0,50, o que sugere que o ensaio de tração por compressão diametral é mais sensível à forma com que as partículas da casca de arroz se dispõem na matriz de cimento.

4.2.2.5 Avaliação dos resultados dos ensaios mecânicos envolvendo os parâmetros Resistência à tração por Compressão Diametral e Resistência à compressão simples, dos corpos-de-prova cilíndricos.

Comparando os resultados dos ensaios de tração por compressão diametral (Tensao_D) e de compressão simples (Tensao_Ax), foi possível evidenciar um baixo coeficiente de correlação ($R = 0,02$) entre estes ensaios, fato também constatado na FASE I (coeficiente de correlação $R = 0,26$).

Verificou-se, ainda, que nos parâmetros Tensao_D e Tensao_Ax, o efeito dos percentuais de adição de 20% e de 35% de cinza não propiciaram diferenças estatísticas significativas, quer seja nesta fase (FASE II) como na fase anterior (FASE I).

4.2.2.6 Evolução da Velocidade de Propagação do Pulso Ultra-Sônico (EVPU).

Nas Figuras 121 a 124 estão representados os comportamentos da EVPU da pasta referência (PP) e de cada distribuição em tamanho de casca, em função dos diferentes percentuais de adição de cinza, no período de 0-24 horas.

Nas Figuras 125 a 127 estão representados os comportamentos da EVPU das diferentes misturas, em função do percentual de adição de cinza, no período de 0-24 horas.

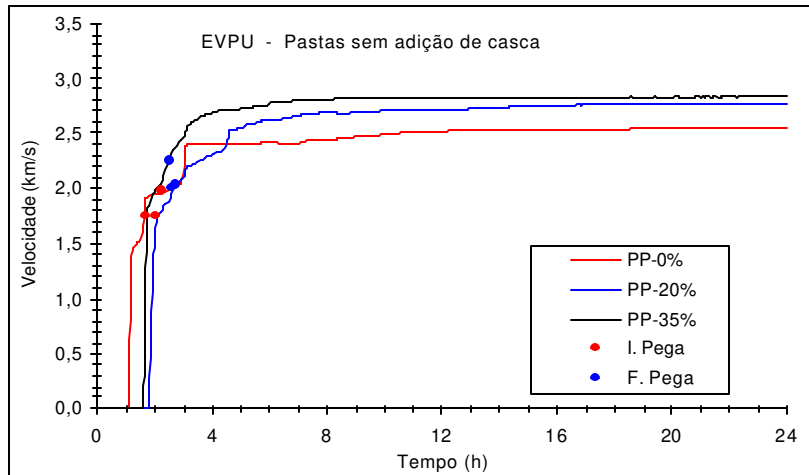


Figura 121: EVPU (0-24 h): Pastas sem adição de casca.

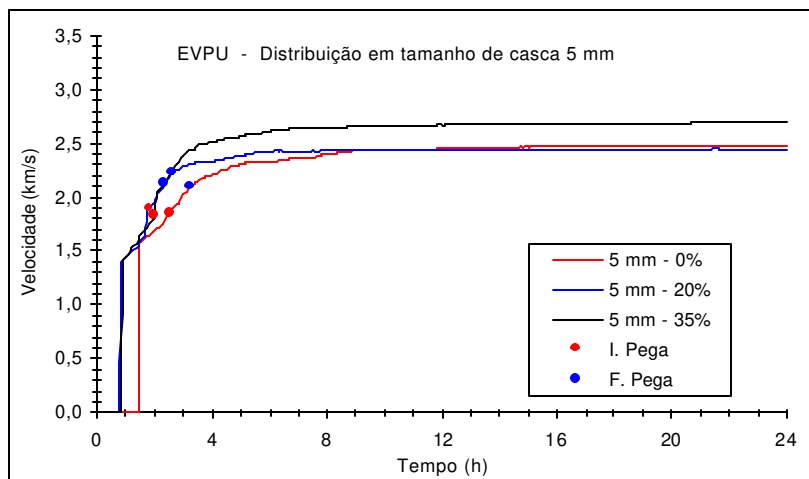


Figura 122: EVPU (0-24 h): distribuição em tamanho de casca 5 mm.

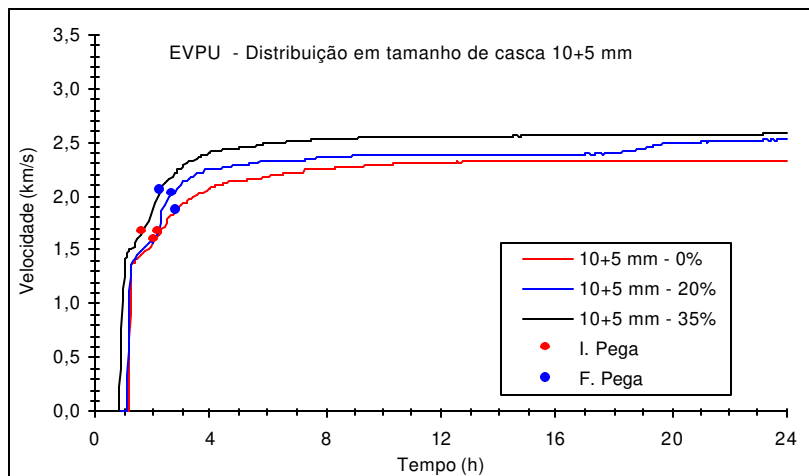


Figura 123: EVPU (0-24 h): distribuição em tamanho de casca 10+5 mm.

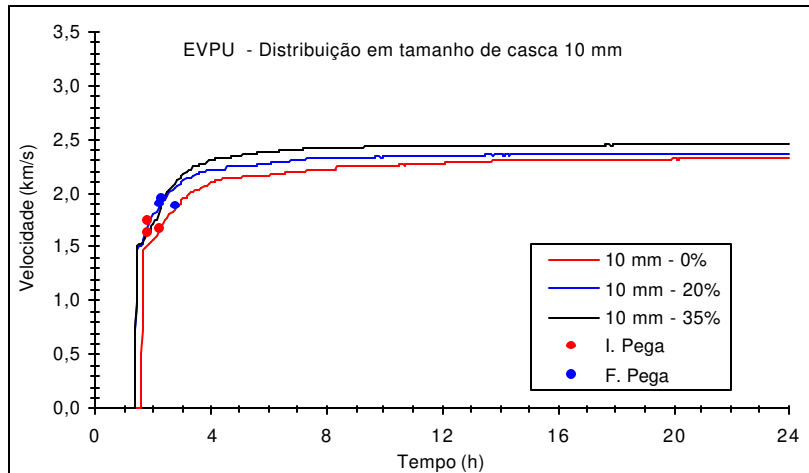


Figura 124: EVPU (0-24 h): distribuição em tamanho de casca 10 mm.

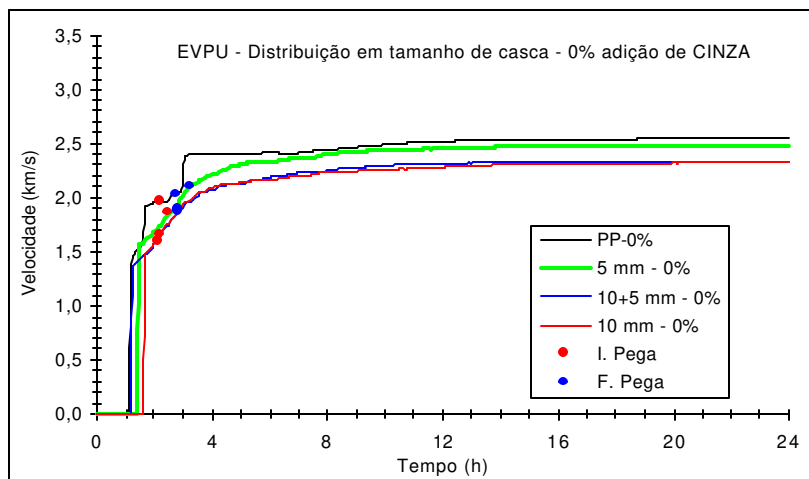


Figura 125: EVPU (0-24 h): Efeito da adição de 0% de cinza.

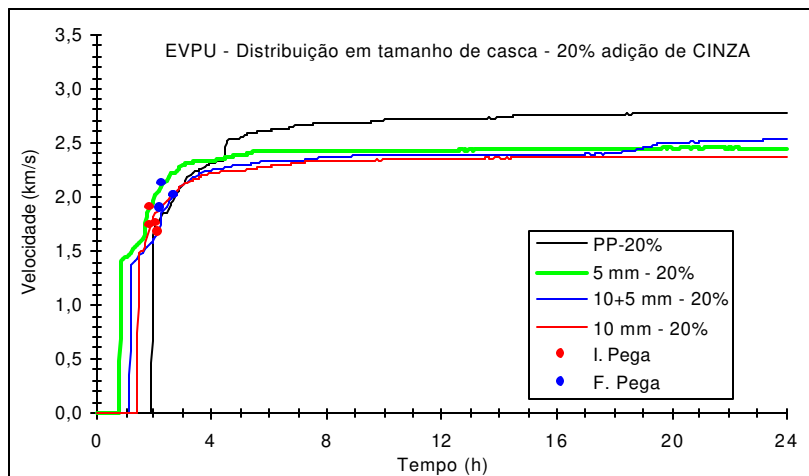


Figura 126: EVPU (0-24 h): Efeito da adição de 20% de cinza.

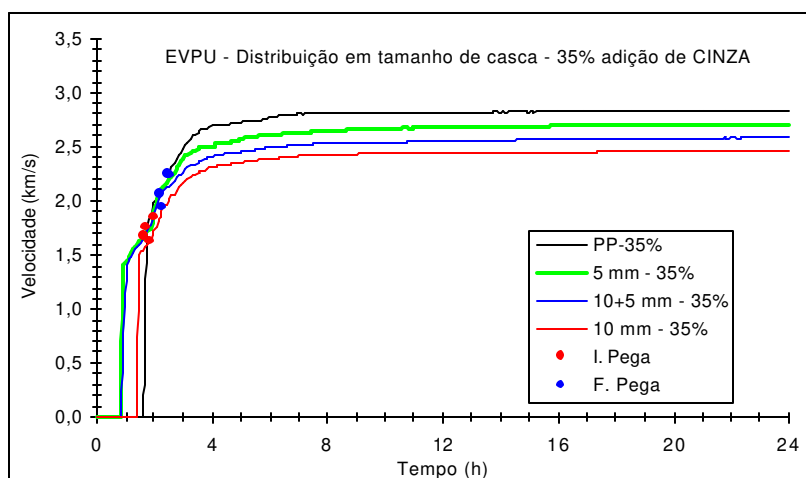


Figura 127: EVPU (0-24 h): Efeito da adição de 35% de cinza.

Avaliando-se as figuras 121 a 127, verificou-se que o parâmetro Início de Pega está associado às primeiras medidas de VPU.

Considerando-se a ausência de diferença significativa entre as misturas 5 mm, 10+5 mm e 10 mm, pode-se indicar que o início de pega das referidas misturas provavelmente se situe dentro de uma faixa que varia de 1,63 km/s (10 mm-35%) a 1,90 km/s (5 mm-20%).

No caso específico da mistura 10 mm, o início de pega pode ser encontrado entre 1,63 km/s (10 mm-35%) e 1,72 km/s (10 mm-20%).

Em relação ao fim de pega, os valores se situam entre 1,87 km/s (10+5 mm-0%) e 2,24 km/s (5 mm-35%).

No caso da mistura 10 mm, o fim de pega variou de 1,88 km/s (10 mm-0%) a 1,93 km/s (10 mm-35%).

Nas Figuras 128 a 131 estão representados os comportamentos da EVPU da pasta referência (PP) e de cada distribuição em tamanho de casca, em função dos diferentes percentuais de adição de cinza, no período de 0-28 dias, incluindo-se os valores médios dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral e à compressão simples.

Nas Figuras 132 a 134 estão representados os comportamentos da EVPU da pasta referência (PP) e das diferentes distribuições em tamanho de casca, em função do percentual de adição de cinza, no período de 0-28 dias, incluindo-se os valores médios dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral e à compressão simples.

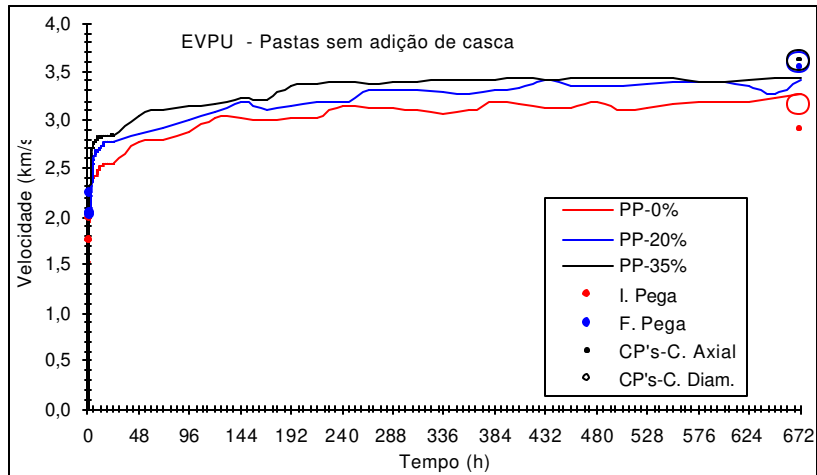


Figura 128: EVPU (0-28 dias): Pastas pura sem adição de casca.

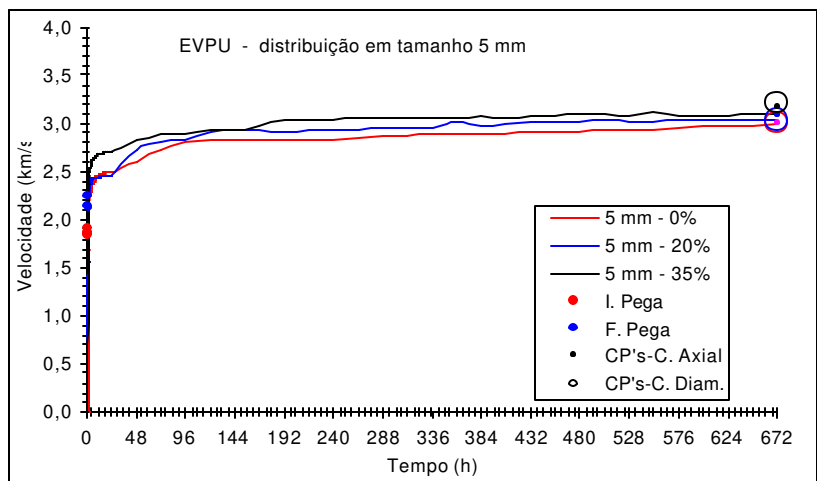


Figura 129: EVPU (0-28 dias): distribuição em tamanho de casca 5 mm.

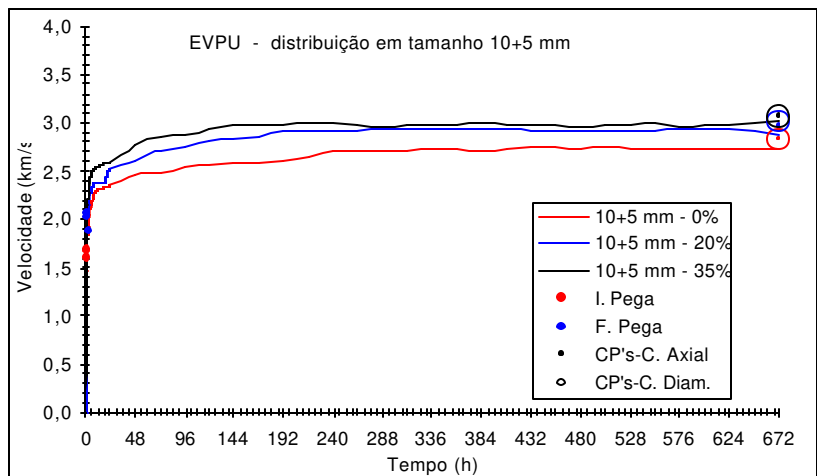


Figura 130: EVPU (0-28 dias): distribuição em tamanho de casca 10+5 mm.

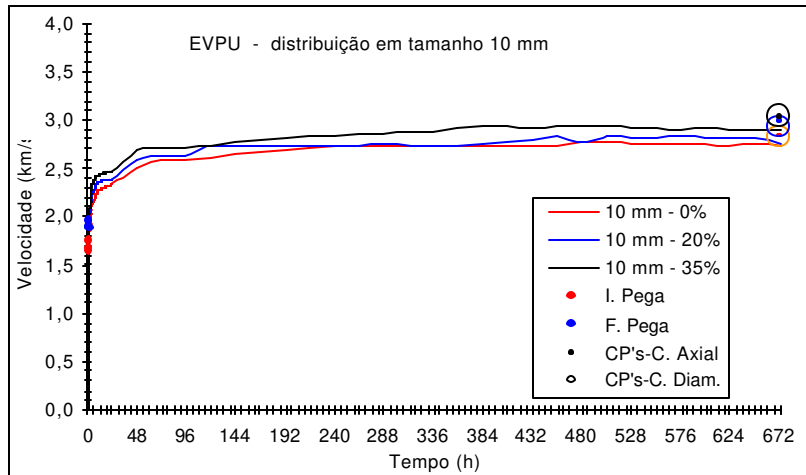


Figura 131: EVPU (0-28 dias): distribuição em tamanho de casca 10 mm.

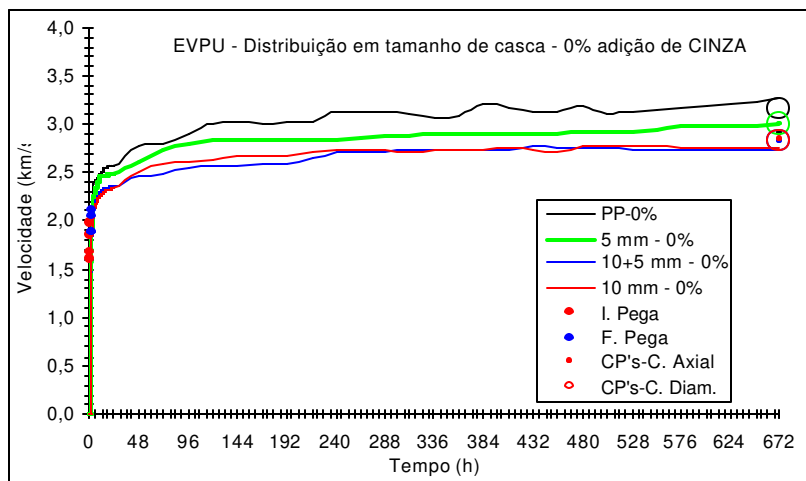


Figura 132: EVPU (0-28dias): Efeito da adição de 0% de cinza.

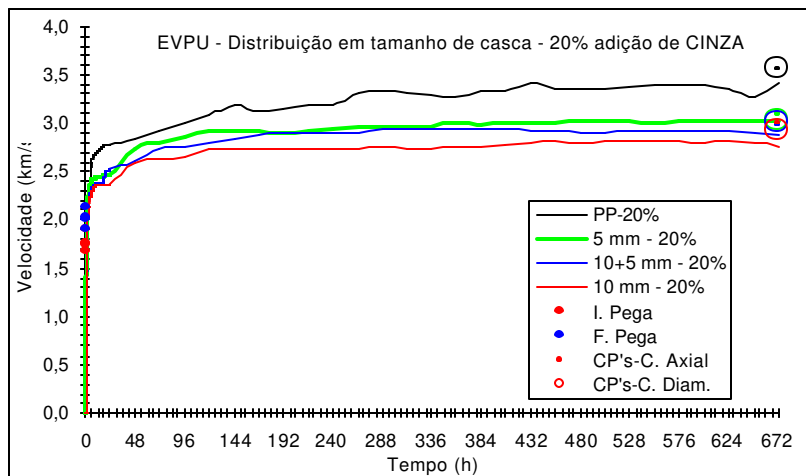


Figura 133: EVPU (0-28 dias): Efeito da adição de 20% de cinza.

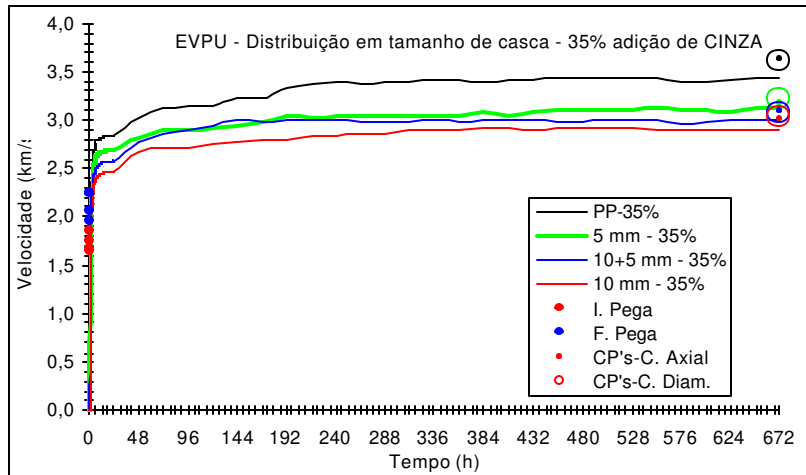


Figura 134: EVPU (0-28 dias): Efeito da adição de 35% de cinza.

Comparando-se o comportamento da VPU dos cilindros aos 28 dias de idade (672 h) com a VPU média dos corpos-de-prova aos 28 dias de idade (672 h), verificou-se, através das Figuras 128 a 131, que a VPU dos corpos-de-prova mostrou-se superior à VPU do cilindro, fato este atribuído à atenuação da onda ultra-sônica.

Avaliando-se os gráficos das Figuras 132 a 134 verificou-se que as pastas sem adição de casca (PP-0%, PP-20% e PP-35%) apresentaram o melhor comportamento em termos de EVPU, confirmando o efeito de atenuação (perda gradual de energia da onda mecânica), muito mais pronunciado nos cilindros, pois os valores medidos nos cilindros aos 28 dias de idade foram inferiores àqueles medidos nos corpos-de-prova.

A Figura 135 apresenta o gráfico de médias da VPU dos cilindros (2,90 km/s) e dos corpos-de-prova (2,99 km/s) deles obtidos após o corte, na idade de 28 dias.

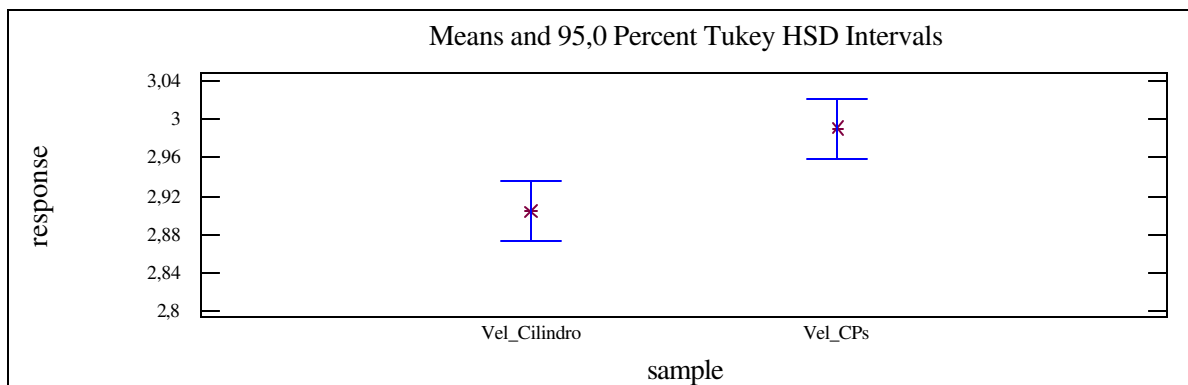


Figura 135: VPU aos 28 dias: Médias: cilindros e corpos-de-prova.

A correlação entre as duas variáveis foi de 0,79 e o coeficiente de determinação (R^2) de 62,3%, tendo-se encontrado a expressão (9):

$$\text{Vel\_CP's} = 0,778436 + 0,761809 \cdot \text{Vel\_Cilindro} \quad (9)$$

A Figura 136 apresenta o gráfico para o modelo de equação linear apresentado.

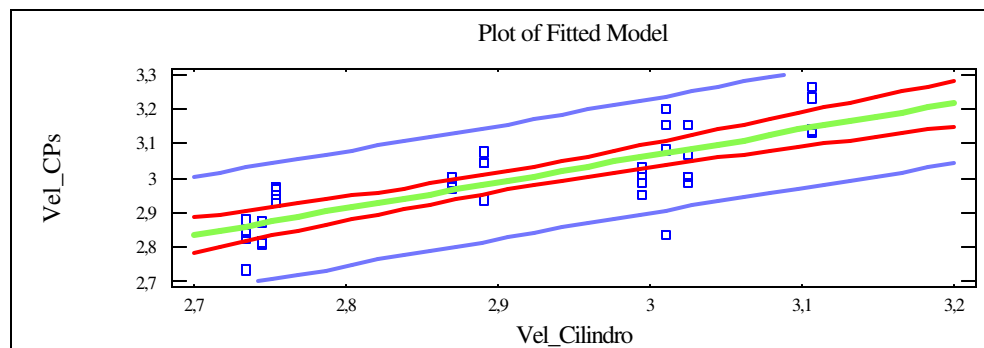


Figura 136: Equação linear, Limites do intervalo de confiança (95%) e, Limites dos valores previstos pela equação.

4.2.3. Considerações finais sobre a FASE II: Estudo das misturas tipo PASTA envolvendo a adição de Cinza e Casca de arroz

A Tabela 123 apresenta um resumo do comportamento dos parâmetros apresentados.

Tabela 123: FASE II: Resumo do comportamento dos parâmetros avaliados.

FASE II		Área	In Max	P In Max	tempo TMax	Temp Max	U (%)	Vel D	Tensão D	MEAp D	MOEd D
Casca	PP	X		X		X		X		X	
	5 mm	X		X		X		X		X	
	10+5 mm	X		X		X		X		X	
	10 mm	X		X		X		X		X	
Cinza	0%	X		X		X		X		X	
	20%	X		X		X		X		X	
	35%	X		X		X		X		X	
FASE II		IP tempo	IP Temp	IP_Vel	FP tempo	FP Temp	FP_Vel	Vel_Ax	Tensão_Ax	MEAp_Ax	MOEd_Ax
Casca	PP	X	X	X		X	X	X		X	
	5 mm	X		X		X		X		X	
	10+5 mm	X		X		X		X		X	
	10 mm	X		X		X		X		X	
Cinza	0%		X	X		X		X		X	
	20%	X		X		X		X		X	
	35%	X		X		X		X		X	

Distribuições em tamanho de casca marcadas com “x” em uma mesma coluna não difere m estatisticamente.

Percentuais de adição de cinza marcados com “x” em uma mesma coluna não difere m estatisticamente.

Em geral, verificou-se que a casca de arroz lavada em solução de cal apresentou boa compatibilidade química com o cimento, pouco interferindo nas suas reações de hidratação, o

que pode ser constatado pela falta de diferença significativa entre as diferentes distribuições em tamanho de casca, nos parâmetros Area, In_Max e P_In_Max.

Contudo, esta constatação pode também ser interpretada como uma falta de sensibilidade do parâmetro para avaliar o comportamento químico, uma vez que os principais problemas evidenciados em estudos anteriores (ZUCCO, 1999), apontaram a falta de “pega” (perda da plasticidade, com enrijecimento da mistura) como o principal elemento caracterizador da incompatibilidade química cimento-casca (Figura 2).

A falta de pega está associada ao período inicial do processo químico, que abrange desde o primeiro pico de temperatura (posição A, na Figura 40) atribuído ao calor de dissociação de aluminatos (C_3A – aluminato tri-cálcio) e sulfatos ($CaSO_4.2H_2O$ - gesso), até o início de pega, considerado como sendo o trecho “crítico”.

Conforme comentado na análise dos parâmetros In_Max e P_In_Max, após o início da pega, a cinética do processo químico é pouco influenciada pelos componentes das misturas, de modo que se caracteriza o trecho anterior ao início da pega como sendo o trecho “sensível” à presença de agentes químicos capazes de interferir na concentração de íons cálcio. Os íons cálcio são considerados os responsáveis pela formação de pontos de nucleação e, conseqüentemente, pelo enrijecimento das pastas (início de pega), uma vez que também se depositam na forma de cristais de hidróxido de cálcio na superfície dos agregados, sendo considerados por Mehta e Monteiro (1994), como os responsáveis pela fissuração na zona de transição. As práticas da “calagem” e da “estabilização de solos com cal” apontam a influência benéfica dos íons cálcio na estrutura químico-mecânica dos solos, razão de seu emprego.

Destaca-se, com isso, que o elemento de análise IP_tempo mostra maior sensibilidade para a detecção de influências negativas da casca do que os demais parâmetros empregados.

Em relação à adição de cinza, verificou-se que a adição de massa ao sistema é o principal fator para a redução em parâmetros envolvendo temperatura (Temp_Max), sendo que no elemento de análise IP_tempo, sua redução (em relação às misturas sem adição de cinza) pode estar associada à possível capacidade adsorptiva da cinza, capaz de promover a neutralização de extrativos ainda presentes na casca, conforme apresentado nas Figuras 9 e 11.

Entre os percentuais de adição de 20% e de 35% de cinza não se evidenciou a existência de diferença estatística significativa nos parâmetros químicos Area, In_Max e P_In_Max e nos parâmetros mecânicos Tensão_D e Tensão_Ax.

4.3 Resultados dos ensaios da FASE III – Estudo dos COMPÓSITOS à base de casca de arroz (distribuição em tamanho das partículas caracterizadas como 5 mm (42% de casca), 10+5 mm (39% de casca) e 10 mm (35% de casca)) com adições de cinza (0%, 20% ou 35%).

4.3.1. Resultados relativos à avaliação do comportamento químico das misturas.

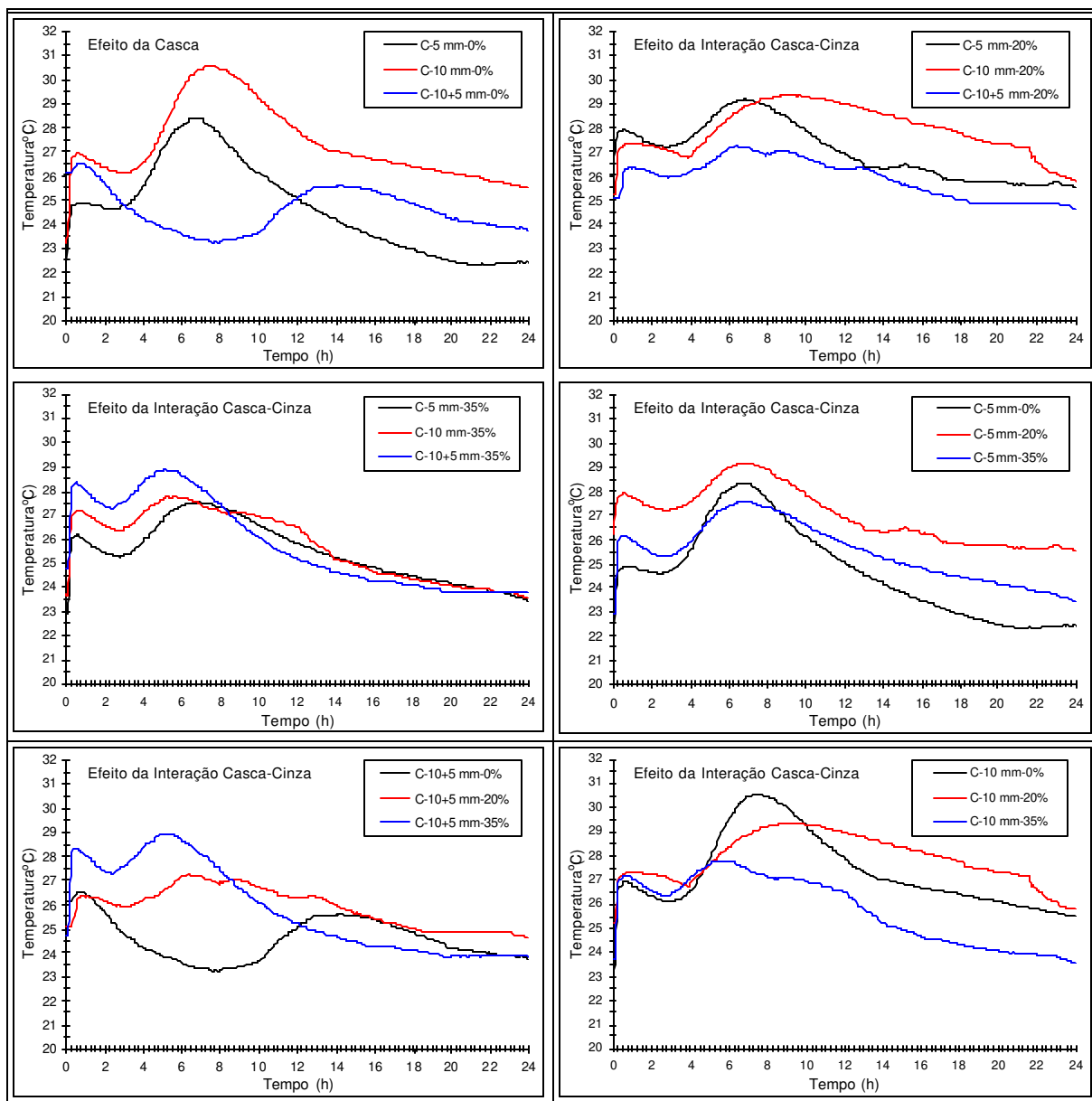


Figura 137: Padrão de referência (0% de Cinza) e efeitos da interação casca-cinza nas diferentes **misturas** tipo **COMPÓSITO**, para as distribuições em tamanho de casca 5 mm (42% de casca), 10+5 mm (39% de casca) e 10 mm (35% de casca).

A Figura 137 apresenta o comportamento químico das misturas tipo COMPÓSITO, onde a letra “C”, no nome das misturas nos gráficos apresentados, distingue-as como misturas tipo COMPÓSITO, pois as misturas do tipo PASTA (FASE II), diferem pela quantidade de massa de casca empregada, que passou de 7,5% (percentual comum a todas as misturas da FASE II), para 42%, 39% e 36%, respectivamente, para as misturas com distribuição em tamanho de casca 5 mm, 10+5 mm e 10 mm.

Os parâmetros de avaliação foram os mesmos utilizados nas FASES I e II. Assim, como foi observado nos estudos anteriores, adições de casca e/ou cinza promoveram interferências nos processos químicos de hidratação do cimento. Nesta fase, deseja-se verificar como se apresenta o comportamento químico das misturas, em função da elevação dos teores de casca, determinando a existência ou não de diferença significativa entre comportamentos (curvas), através de análise estatística simplificada (Teste de Tukey, para comparação entre médias, a um nível de confiança de 95%) dos parâmetros numéricos obtidos das curvas.

Os gráficos das análises estatísticas obedecem à ordem da menor dimensão das partículas para a maior dimensão, empregando-se o mesmo artifício da Fase II, renomeando-se as misturas com as letras de A, (A_5mm), B (B_10+5 mm) e C (C_10 mm). Desta forma, são apresentadas na Tabelas 124 as médias dos parâmetros utilizados.

Tabela 124: **FASE III - Avaliação química (Médias).**

MÉDIAS	A_5 mm - 0 %	B_10+5 mm - 0 %	C_10 mm - 0 %
AREA (°C.h)	3 5 5 1 5	3 5 1 2 5	3 9 3 6 3
Incl. Max. (°C/h)	0,46	0,95	1,69
Ponto Incl. Max.	0,10	0,18	0,20
Tempo p/ TMax. (h)	4,98	0,58	7,21
Temperatura Max. (°C)	28,35	26,33	30,55
MÉDIAS	A_5 mm - 20 %	B_10+5 mm - 20 %	C_10 mm - 20 %
AREA (°C.h)	3 8 8 8 6	3 7 2 9 6	4 0 1 8 9
Incl. Max. (°C/h)	0,79	0,60	0,85
Ponto Incl. Max.	0,13	0,13	0,15
Tempo p/ TMax. (h)	6,46	6,25	8,75
Temperatura Max. (°C)	29,15	27,25	29,35
MÉDIAS	A_5 mm - 35 %	B_10+5 mm - 35 %	C_10 mm - 35 %
AREA (°C.h)	3 6 6 7 7	3 7 1 5 2	3 7 1 1 4
Incl. Max. (°C/h)	0,27	0,85	0,76
Ponto Incl. Max.	0,10	0,13	0,10
Tempo p/ TMax. (h)	4,98	5,04	5,27
Temperatura Max. (°C)	27,55	28,93	27,80

4.3.1.1 Avaliação do parâmetro Área sob a curva (Área, em °C.h).

A Tabela 125 apresenta a análise da variância (ANOVA) para o parâmetro Área sob a curva, onde se verificou a existência de diferenças significativas nos fatores CASCA, CINZA e, na interação CASCA-CINZA. Em seguida, são apresentados os resultados relativos à avaliação de cada fator e da interação entre fatores, apresentando-se algumas considerações.

Tabela 125: ANOVA do parâmetro Área sob a curva (**Area**).

Analysis of Variance for Area - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	3,72318E7	2	1,86159E7	115,93	0,0000
B:CINZA	3,15098E7	2	1,57549E7	98,11	0,0000
INTERACTIONS					
AB	2,39953E7	4	5,99884E6	37,36	0,0000
RESIDUAL	4,3357E6	27	160582,0		
TOTAL (CORRECTED)	9,70726E7	35			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A) Efeito da adição de CASCA.

A Tabela 126 apresenta a análise do fator CASCA, onde se pode verificar a existência de diferença significativa entre as diferentes distribuições em tamanho de casca, atribuída à ação dos extrativos ainda presentes na casca, e ao aumento de massa de casca nas misturas, uma vez que tal fato não foi observado na FASE II.

Tabela 126: Análise do fator CASCA: parâmetro **Area**: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Area by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
B_10+5 mm	12	36524,2	X
A_5 mm	12	37026,2	X
C_10 mm	12	38888,2	X

Misturas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

B) Efeito da adição de CINZA.

A Tabela 127 apresenta a análise do fator CINZA, podendo se verificar que a adição de 20% de cinza promoveu aumento significativo na área sob a curva de hidratação, diferindo significativamente do percentual de 35% de adição, fato este não observado na FASE II. A tendência de os valores de adição de 35% de cinza serem inferiores aos valores de adição de 20% de cinza manteve-se, associando-se tal fato ao aumento de massa no sistema.

Tabela 127: Análise do fator CINZA: parâmetro **Area**: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Area by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
0%	12	36667,5	X
35%	12	36980,9	X
20%	12	38790,2	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

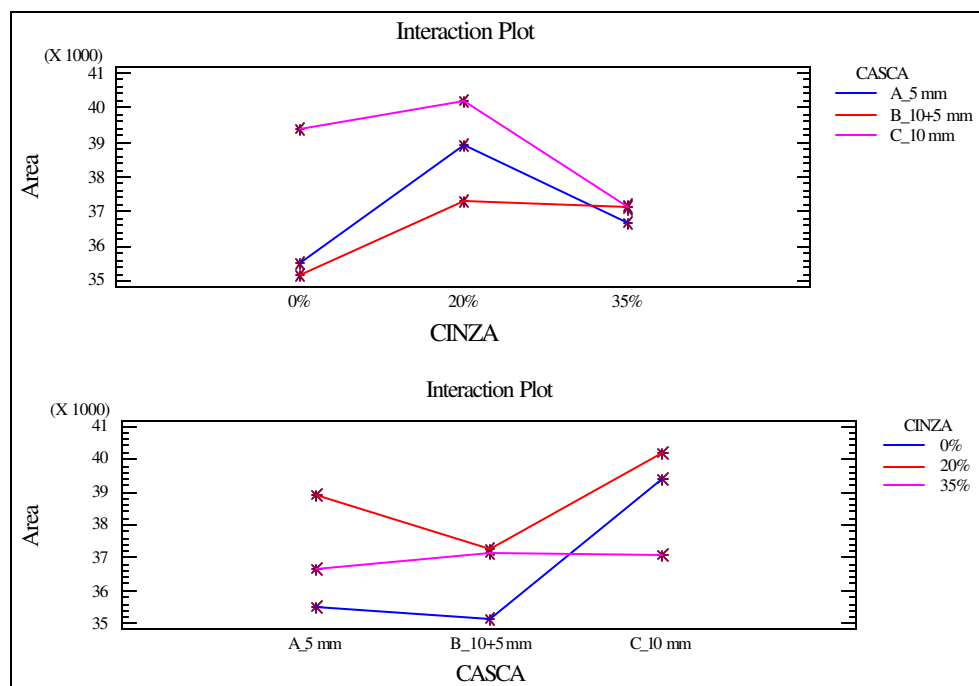


Figura 138: Interação casca-cinza: parâmetro **Area**.

Os gráficos da interação casca-cinza permitem evidenciar que a distribuição em tamanho de casca 10 mm e o percentual de adição de 20% foram os que promoveram os maiores valores médios de Área (Figura 138). Destaca-se, ainda, que a mistura 10 mm-20% apresentou o maior valor médio de Área, dentre todas as misturas avaliadas.

D) Considerações a respeito do parâmetro Área sob a curva de hidratação.

Comparando-se as áreas médias sob as curvas de hidratação das FASES I, II e III, verificou-se que a área sob a curva de hidratação das misturas na FASE I (Tabela 18) variou de 38122 °C.h a 44148 °C.h; na FASE II (Tabela 71) variou de 40105 °C.h a 44024 °C.h e, na FASE III (Tabela 124), variou de 35125 °C.h a 40189 °C.h, o que evidencia o efeito de redução da área associado ao aumento de massa (casca; cinza) no sistema.

Nesta fase, relativa aos compósitos, verificou-se que o maior valor médio da área sob a curva de hidratação observado na mistura 10 mm-20%, não se traduziu em melhor desempenho mecânico, pois tanto em Tensao_D (Tabela 150), como em Tensao_Ax (Tabela 164), os resultados evidenciaram que a avaliação químico-mecânica é algo mais complexa do que o que fora originalmente previsto.

4.3.1.2 Avaliação do parâmetro Inclinação Máxima (In_Max, em °C/h)

Tabela 128: ANOVA do parâmetro Inclinação Máxima (In_Max).

Analysis of Variance for In_Max - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	2,08294	2	1,04147	61,45	0,0000
B:CINZA	1,07454	2	0,537269	31,70	0,0000
INTERACTIONS					
AB	1,85451	4	0,463628	27,36	0,0000
RESIDUAL	0,457575	27	0,0169472		
TOTAL (CORRECTED)	5,46956	35			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A Tabela 128 apresenta a análise da variância (ANOVA) e destaca a existência de

diferença significativa nos fatores CASCA, CINZA e na interação CASCA-CINZA (p-valor < 0,05). A seguir, são apresentados os resultados relativos à avaliação de cada fator, da interação entre fatores, apresentando-se algumas considerações sobre o parâmetro avaliado.

A) Efeito da adição de CASCA.

A Tabela 129 apresenta a análise do fator CASCA, onde se evidencia o aumento no valor médio da In_Max com o aumento da dimensão das partículas de casca.

Verifica-se, ainda, a existência de diferença significativa entre as misturas avaliadas, fato este não observado na FASE II, o que sugere que a ação dos extrativos ainda presentes na casca se torna mais evidente com o aumento na dosagem de casca empregada.

Assim, atribuiu-se o menor valor médio associado à distribuição em tamanho de casca 5 mm, à combinação da quantidade de massa de casca (42%) com a reduzida dimensão das partículas de casca (91,1% das partículas com dimensão inferior a 1,19 mm / #16 mesh).

Tabela 129: Análise do fator CASCA: parâmetro **In_Max**: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for In_Max by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
A_5 mm	12	0,509167	X
B_10+5 mm	12	0,798333	X
C_10 mm	12	1,09833	X

Misturas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

B) Efeito da adição de CINZA.

A Tabela 130 apresenta a análise do fator CINZA, podendo se destacar a ausência de diferença significativa entre as médias dos percentuais de adição de 20% e de 35% de cinza, inferiores e significativamente diferentes do percentual de adição de 0% de cinza.

Avaliando-se os valores médios do parâmetro In_Max associados à adição de cinza, foi possível evidenciar que a redução apresentada pode estar associada ao aumento de massa no sistema.

Tabela 130: Análise do fator CINZA: parâmetro **In_Max**: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for In_Max by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
35%	12	0,625833	X
20%	12	0,743333	X
0%	12	1,03667	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

Os gráficos da interação casca-cinza evidenciam o comportamento das médias das diferentes distribuições em tamanho de casca, em função dos percentuais de adição de cinza (Figura 139).

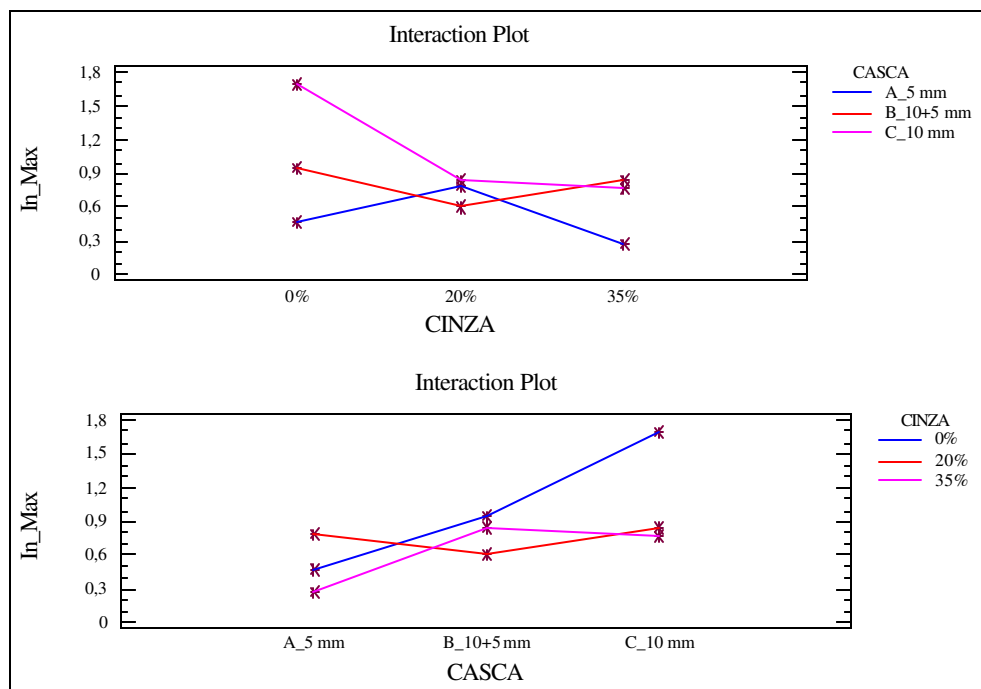


Figura 139: Interação casca-cinza: parâmetro **In_Max**.

Destaca-se que a distribuição em tamanho de casca 10 mm, sem a adição de cinza, apresentou o maior valor de inclinação máxima, sendo que, com a adição de 20% de cinza, a amplitude entre as distribuições em tamanho de casca foi mínima, se comparada aos demais percentuais de adição.

Verificou-se, ainda, que na adição de 0% de cinza, o parâmetro **In_Max** aumenta com a redução da presença de partículas de menor dimensão na mistura. A distribuição em tamanho de casca 5 mm apresenta 91,1% de casca passante em peneira 1,19 mm (#16 mesh), a distribuição em tamanho de casca 10+5 mm apresenta 51,1% de casca passante em peneira 1,19 mm (#16 mesh) e a distribuição em tamanho de casca 10 mm apresenta 23,7% de casca passante em peneira 1,19 mm (#16 mesh).

D) Considerações a respeito do parâmetro Inclinação Máxima (°C/h).

O parâmetro Inclinação Máxima das curvas de evolução da temperatura de hidratação evidenciou que a distribuição em tamanho de casca 10 mm apresentou resultados considerados como sendo os mais homogêneos, pela menor amplitude obtida nas variações, nos percentuais de adição de 20% e de 35% de cinza. Supõe-se que tal fato esteja ligado ao menor percentual de “finos” de casca (associados aos extrativos inibidores) apresentado por esta mistura.

4.3.1.3 Avaliação do parâmetro Ponto de Inclinação Máxima. (P_In_Max, em °C/h)

A Tabela 131 apresenta a análise da variância (ANOVA) para o parâmetro Ponto de Inclinação Máxima, podendo se verificar a existência de diferença significativa apenas nos fatores CASCA e CINZA (p-valor < 0,05). Em seguida, são apresentados os resultados da avaliação de cada fator e da interação entre os fatores, apresentando-se algumas considerações.

Tabela 131: ANOVA do parâmetro Ponto de Inclinação Máxima (P_In_Max).

Analysis of Variance for P_In_Max - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	0,0116667	2	0,00583333	3,94	0,0316
B:CINZA	0,015	2	0,0075	5,06	0,0136
INTERACTIONS					
AB	0,0133333	4	0,00333333	2,25	0,0900
RESIDUAL	0,04	27	0,00148148		
TOTAL (CORRECTED)	0,08	35			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A seguir, são apresentados os resultados da avaliação de cada fator e da interação entre os fatores, apresentando-se algumas considerações.

A) Efeito da adição de CASCA.

A Tabela 132 apresenta a análise do fator CASCA, podendo se verificar que a média da distribuição em tamanho de casca 10 mm apresenta desempenho superior, porém não diferindo significativamente da distribuição em tamanho de casca 10+5 mm.

Destaca-se, ainda, o aumento dos valores médios em função do aumento na dimensão das partículas de casca.

Tabela 132: Análise do fator CASCA: parâmetro **P_In_Max**: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for P_In_Max by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
A_5 mm	12	0,108333	X
B_10+5 mm	12	0,141667	XX
C_10 mm	12	0,15	X

Misturas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

B) Efeito da adição de CINZA.

A Tabela 133 apresenta a análise do fator CINZA, podendo se verificar que o percentual de adição de 0% de cinza diferiu significativamente apenas do percentual de adição de 35% de cinza.

Tabela 133: Análise do fator CINZA: parâmetro **P_In_Max**: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for P_In_Max by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
35%	12	0,108333	X
20%	12	0,133333	XX
0%	12	0,158333	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

Avaliando-se os valores médios, torna-se evidente a redução no parâmetro P_{In_Max} com o aumento no percentual de adição de cinza, o que se associou ao aumento de massa no sistema.

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

A Figura 140 apresenta o gráfico da interação casca-cinza no qual se destaca a distribuição em tamanho de casca 10 mm, por apresentar os maiores valores médios, exceto para o percentual de adição de 35% de cinza, o que se atribui ao aumento de massa no sistema.

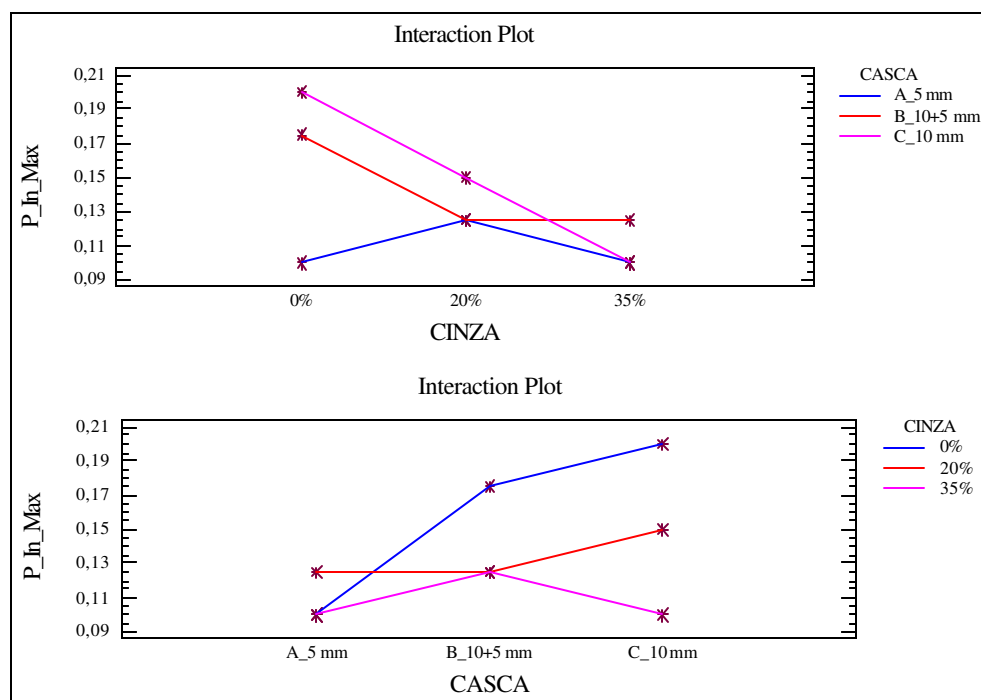


Figura 140: Interação casca-cinza: parâmetro P_{In_Max} .

D) Considerações a respeito do parâmetro Ponto de Inclinação Máxima.

O parâmetro Ponto de Inclinação Máxima evidencia que a distribuição em tamanho de casca 10 mm apresenta uma maior amplitude de variação, para os percentuais de adição de 20% e de 35% de cinza, fato que se contrapõe ao parâmetro Inclinação Máxima.

Considera-se que este tipo de avaliação, de forma pontual, não representa adequadamente o comportamento observado e apresentado na Figura 137, evidenciando sua

inadequação para a avaliação das misturas.

Não se sabe a extensão da validade das considerações efetuadas para os compósitos pois a variabilidade obtida nos resultados em função de dosagens e da distribuição em tamanho de casca pôde ser evidenciada quando se compararam as diferentes misturas.

4.3.1.4 Avaliação do parâmetro tempo para atingir a Temperatura Máxima (tempo_TMax, em h).

A Tabela 134 apresenta a tabela de ANOVA para o parâmetro tempo para atingir a temperatura máxima, onde se evidencia a existência de diferença significativa nos fatores CASCA, CINZA e, na interação CASCA-CINZA (p-valor < 0,05).

Tabela 134: ANOVA do parâmetro tempo para atingir a temperatura máxima (**tempo_Tmax**).

Analysis of Variance for tempo_TMax - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	58,3917	2	29,1959	896,78	0,0000
B:CINZA	53,3127	2	26,6564	818,77	0,0000
INTERACTIONS					
AB	48,1475	4	12,0369	369,72	0,0000
RESIDUAL	0,879025	27	0,0325565		
TOTAL (CORRECTED)	160,731	35			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A seguir, são apresentados os resultados relativos à avaliação de cada fator, da interação entre fatores, apresentando-se algumas considerações.

A) Efeito da adição de CASCA.

A Tabela 135 apresenta a análise do fator CASCA, evidenciando-se a distribuição em tamanho de casca 10 mm, que apresentou o maior valor de tempo necessário para atingir a temperatura máxima, embora na FASE II, tenha sido obtido o menor tempo (5,18 h).

Tabela 135: Análise do fator CASCA: parâmetro **tempo Tmax: Médias (Tukey, 95%).**

Multiple Range Tests for tempo_TMax by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
B_10+5 mm	12	3,9575	X
A_5 mm	12	5,47167	X
C_10 mm	12	7,07667	X

Misturas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

B) Efeito da adição de CINZA.

A Tabela 136 apresenta a análise do fator CINZA, podendo se verificar a existência de diferença significativa entre os diferentes percentuais de adição, tendo o percentual de adição de 20% de cinza, indicando o maior valor médio, considerado como o resultado menos adequado em termos de tempo necessário para atingir a temperatura máxima.

Tabela 136: Análise do fator CINZA: parâmetro **tempo Tmax: Médias (Tukey, 95%).**

Multiple Range Tests for tempo_TMax by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
0%	12	4,25667	X
35%	12	5,09583	X
20%	12	7,15333	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

Destaca-se que, com a adição de cinza, ocorre um aumento de massa no sistema e, em consequência, ocorre uma redução na temperatura máxima alcançada pela mistura. Esta redução na temperatura máxima induz a uma redução no tempo necessário para atingí-la, o que torna a análise muito mais complexa do que o observado nas fases anteriores. Este fato pode ser melhor compreendido quando se analisa os gráficos da Figura 137, que destacam a heterogeneidade de comportamentos das misturas avaliadas.

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

A Figura 141 apresenta o gráfico da interação casca-cinza, onde se evidencia o

comportamento dos valores médios das diferentes distribuições em tamanho de casca, em função dos percentuais de adição de cinza.

Destaca-se a distribuição em tamanho de casca 10 mm, que apresentou os maiores valores médios, considerados como os resultados menos adequados no parâmetro tempo para atingir a temperatura máxima.

Destaca-se, ainda, o percentual de adição de 20% de cinza, pelo comportamento inadequado (maiores valores médios), tendo o percentual de adição de 35% de cinza apresentado um comportamento considerado uniforme, independentemente da distribuição em tamanho de casca.

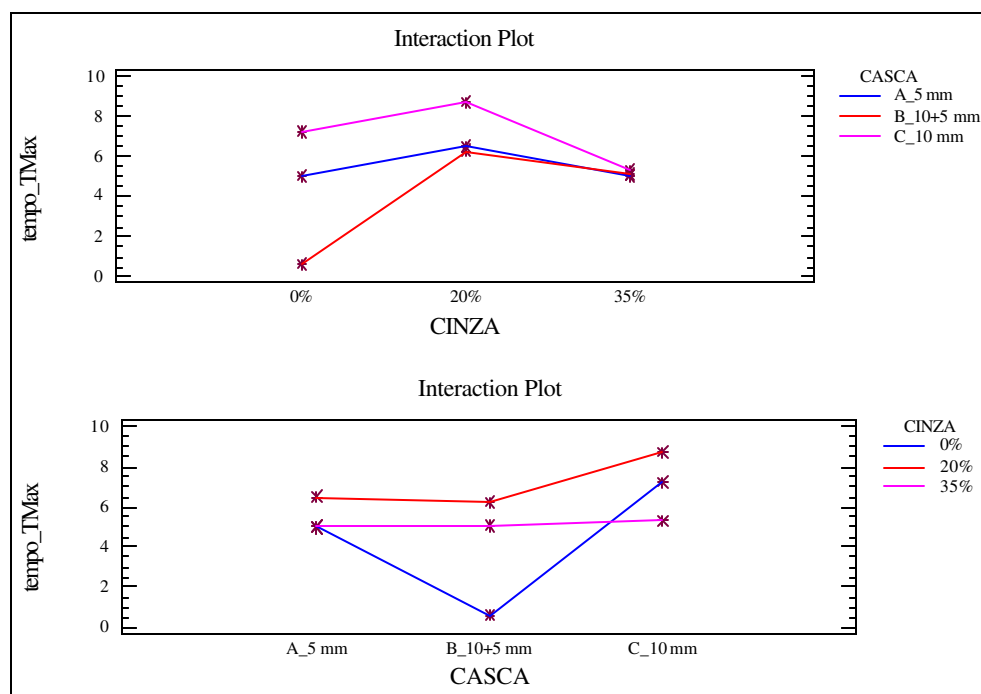


Figura 141: Interação casca-cinza: parâmetro **tempo_Tmax**.

D) Considerações a respeito do parâmetro tempo para atingir a Temperatura Máxima.

Verificou-se que as curvas de hidratação (Figura 137) possuem aspectos muito distintos, onde o pico de temperatura máxima pode estar na fase inicial do processo de hidratação ou, até com valores abaixo do primeiro pico (pico atribuído à hidratação de C_3A), como é o caso da curva de hidratação da mistura 10+5 mm-0%.

Este tipo de erro ocorre devido ao processo automatizado utilizado na detecção da

temperatura máxima alcançada e, conseqüentemente, do tempo necessário para atingí-la, por tratar-se de critério único (programação no Excell®), ou seja, a primeira leitura do maior valor de temperatura registrado no intervalo medido, de 24 h.

Assim, o parâmetro tempo para atingir a temperatura máxima (tempo_Tmax), da forma como foi empregado, demonstra não ser capaz de representar adequadamente o comportamento das diferentes misturas, pelo fato de as mesmas apresentarem formas muito heterogêneas de comportamento associado à evolução da temperatura de hidratação.

Destaca-se que ainda não foi possível evidenciar uma metodologia de análise que permitisse avaliar os comportamentos e especificidades observadas.

4.3.1.5 Avaliação do parâmetro Temperatura Máxima (Temp_Max, em °C).

A Tabela 137 apresenta a análise da variância (ANOVA) do parâmetro temperatura máxima, evidenciando a existência de diferenças significativas no fator CASCA e na interação CASCA-CINZA. Em relação ao fator CINZA, não se evidenciou a existência de diferença significativa (p -valor > 0,05). Em seguida, são apresentados resultados relativos à avaliação de cada fator, da interação entre fatores, apresentando-se algumas considerações.

Tabela 137: ANOVA do parâmetro temperatura máxima (Temp_Max).

Analysis of Variance for Temp_Max - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	18,0289	2	9,01444	30,83	0,0000
B:CINZA	1,49056	2	0,745278	2,55	0,0968
INTERACTIONS					
AB	32,7311	4	8,18278	27,98	0,0000
RESIDUAL	7,895	27	0,292407		
TOTAL (CORRECTED)	60,1456	35			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A) Efeito da adição de CASCA.

A Tabela 138 apresenta a análise do fator CASCA, podendo-se verificar que a distribuição em tamanho de casca 10 mm apresentou os maiores valores de média, diferindo

significativamente das demais distribuições em tamanho de casca.

Tabela 138: Análise do fator CASCA: parâmetro Temp_Max: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Temp_Max by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
B_10+5 mm	12	27,5	X
A_5 mm	12	28,35	X
C_10 mm	12	29,2333	X

Misturas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

B) Efeito da adição de CINZA.

A Tabela 139 apresenta a análise do fator CINZA, evidenciando-se a ausência de diferença significativa entre os diferentes percentuais empregados.

Tabela 139: Análise do fator CINZA: parâmetro Temp_Max: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Temp_Max by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
35%	12	28,0917	X
0%	12	28,4083	X
20%	12	28,5833	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

Os gráficos da interação casca-cinza evidenciam o comportamento das médias das diferentes distribuições em tamanho de casca, em função dos percentuais de adição de cinza (Figura 142).

A distribuição em tamanho de casca 10 mm destacou-se dentre as demais por apresentar, em geral, os maiores valores médios de temperatura máxima, onde a redução observada em sua temperatura máxima está associada ao aumento de massa no sistema, pela adição de cinza em percentuais de 20% e de 35% (não diferem significativamente entre si).

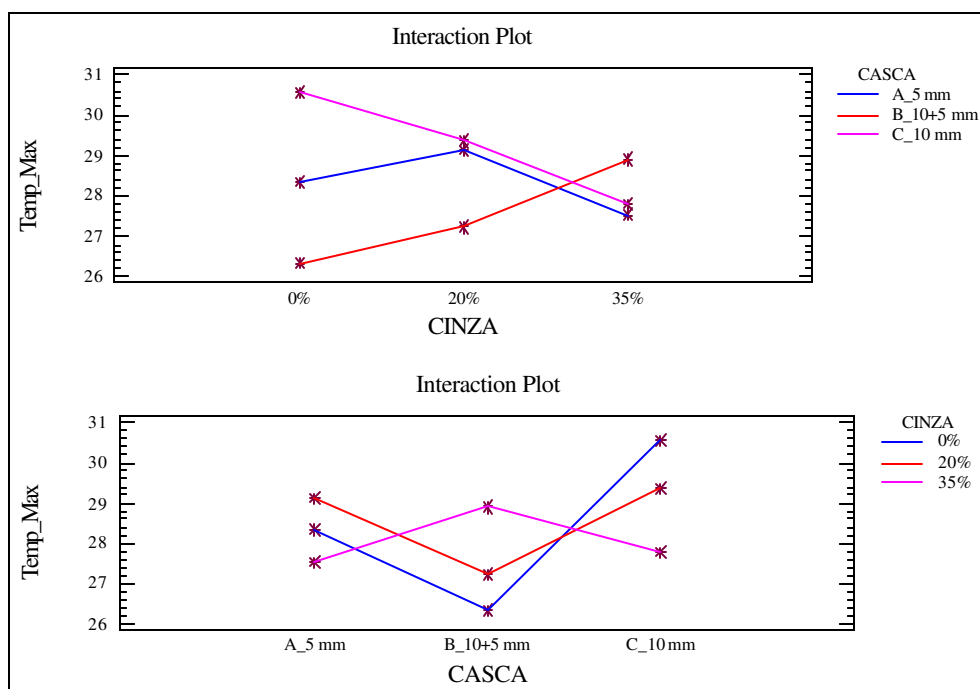


Figura 142: Interação casca-cinza: parâmetro **Temp_Max**.

D) Considerações a respeito do parâmetro Temperatura Máxima.

O parâmetro temperatura máxima destaca a distribuição em tamanho de casca 10 mm por apresentar os maiores valores médios. Em relação à adição de cinza, destaca-se a falta de diferença significativa entre os percentuais avaliados.

Destaca-se que o parâmetro temperatura máxima alcançada representa apenas o máximo de energia térmica sensível, perceptível pelos sensores, correspondendo a uma parcela da energia liberada nos processos químicos, em função do aquecimento global da mistura.

4.3.1.6 Considerações gerais sobre a avaliação química.

Verificou-se que a distribuição em tamanho de casca 10 mm apresentou os maiores valores médios em todos os parâmetros avaliados (Area, In_Max, P_In_Max, tempo_TMax e Temp_Max). Em relação à adição de cinza, verificou-se que o percentual de adição de 20% apresentou os maiores valores de média, diferindo significativamente do percentual de adição de 35%, apenas nos parâmetros Area e tempo_TMax.

A dificuldade em avaliar o comportamento químico das misturas se tornou evidente quando foram observados os diferentes comportamentos das curvas de evolução do calor de hidratação em compósitos, o que aponta para a necessidade estudos mais profundos envolvendo o comportamento químico de compósitos.

4.3.2. Resultados relativos à avaliação do comportamento mecânico das misturas.

Após a avaliação do comportamento químico, as misturas que compõem os cilindros de compósito foram avaliadas em seu comportamento mecânico. Como forma de verificar a existência de possíveis anomalias capazes de interferir na avaliação dos resultados, empregou-se como elementos de análise, a velocidade do pulso ultra-sônico (Vel_D ou Vel_Ax), a massa específica aparente (MEAp_D ou MEd_Ax) e o módulo de elasticidade dinâmico (MOEd_D ou MOEd_Ax).

4.3.2.1 Avaliação do parâmetro Início de Pega das misturas.

Na Tabela 140 são apresentadas as médias dos elementos utilizados nas análises. Para que os gráficos das análises estatísticas apresentassem os valores obedecendo a ordem da menor dimensão das partículas para a maior dimensão, empregou-se o mesmo artifício da FASE II, nomeando-se as misturas como A_5 mm, B_10+5 mm e C_10 mm.

Tabela 140: FASE III - Avaliação físico-mecânica: Parâmetro Início de Pega (Médias).

MÉDIAS	A_5 mm - 0 %	B_10+5 mm - 0 %	C_10 mm - 0 %
IP_tempo (h)	2,42	3,58	3,00
IP_Temperatura (°C)	24,6	24,5	26,1
IP_Velocidade (km/s)	0,249	0,553	0,780
MÉDIAS	A_5 mm - 20 %	B_10+5 mm - 20 %	C_10 mm - 20 %
IP_tempo (h)	2,25	2,17	2,58
IP_Temperatura (°C)	27,3	26,1	27,1
IP_Velocidade (km/s)	0,709	0,127	0,678
MÉDIAS	A_5 mm - 35 %	B_10+5 mm - 35 %	C_10 mm - 35 %
IP_tempo (h)	2,58	1,75	2,42
IP_Temperatura (°C)	25,3	27,5	26,4
IP_Velocidade (km/s)	0,554	0,574	0,559

Na Tabela 141 apresentam-se as análises da variância (ANOVA) do parâmetro Início de Pega, considerando-se os elementos de análise tempo para o início de pega (IP_tempo), temperatura no início de pega (IP_Temp) e VPU no início de pega (IP_Vel).

Tabela 141: ANOVAs do parâmetro Início de Pega (IP_tempo, IP_Temp e IP_Vel).

Analysis of Variance for IP_tempo - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	0,291667	2	0,145833	20,97	0,0000
B:CINZA	3,04167	2	1,52083	218,65	0,0000
INTERACTIONS					
AB	3,20833	4	0,802083	115,32	0,0000
RESIDUAL	0,1252	18	0,00695556		
TOTAL (CORRECTED)	6,66687	26			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					
Analysis of Variance for IP_Temp - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	3,19282	2	1,59641	1377,10	0,0000
B:CINZA	15,3841	2	7,69203	6635,30	0,0000
INTERACTIONS					
AB	11,5616	4	2,89041	2493,33	0,0000
RESIDUAL	0,0208667	18	0,00115926		
TOTAL (CORRECTED)	30,1594	26			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					
Analysis of Variance for IP_Vel - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	0,319238	2	0,159619	43,80	0,0000
B:CINZA	0,0217176	2	0,0108588	2,98	0,0762
INTERACTIONS					
AB	0,902932	4	0,225733	61,94	0,0000
RESIDUAL	0,0655973	18	0,0036443		
TOTAL (CORRECTED)	1,30948	26			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

Destaca-se que apenas no elemento de análise IP_Vel, para o fator CINZA, não se verifica a existência de diferença significativa entre os percentuais de adição de cinza. A seguir, são apresentados os resultados da avaliação da casca, da cinza e da interação casca-cinza, apresentando-se algumas considerações.

A) Efeito da adição de CASCA.

A Tabela 142 apresenta a análise das médias para o fator CASCA, onde se destaca a distribuição em tamanho de casca 10 mm, por apresentar sempre os maiores valores médios (IP_tempo, IP_Temp e IP_Vel), diferindo significativamente das demais distribuições em tamanho de casca.

Tabela 142: Análises do fator CASCA: parâmetro Início de Pega (elementos de análise: **IP_tempo, IP_Temp e IP_Vel**): Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for IP_tempo by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
A_5 mm	9	2,41667	X
B_10+5 mm	9	2,5	X
C_10 mm	9	2,66667	X
Multiple Range Tests for IP_Temp by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
A_5 mm	9	25,7344	X
B_10+5 mm	9	26,0133	X
C_10 mm	9	26,5622	X
Multiple Range Tests for IP_Vel by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
B_10+5 mm	9	0,417778	X
A_5 mm	9	0,476444	X
C_10 mm	9	0,672111	X

Misturas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

Destaca-se que no parâmetro tempo para o início de pega (IP_tempo), quanto maior

foi o valor médio, maior foi o problema associado ao desempenho químico da mistura. Em consequência, considera-se que a mistura apresenta um desempenho químico inadequado, tendo em vistas a necessidade de uma desforma rápida da mistura.

Ao comparar **IP_tempo** com **tempo_TMax** e, **IP_Temp** com **Temp_Max**, verificou-se que a distribuição em tamanho de casca 10 mm apresentou o maior valor médio nestes parâmetros, diferindo significativamente das demais distribuições em tamanho de casca.

B) Efeito da adição de CINZA.

A Tabela 143 apresenta as análises para o fator CINZA, empregando-se os elementos de análise tempo para o início de pega (IP_tempo), temperatura no início de pega (IP_Temp) e VPU no início de pega (IP_Vel).

Tabela 143: Análises do fator CINZA: parâmetro Início de Pega (elementos de análise: **IP_tempo, IP_Temp e IP_Vel**): Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for IP_tempo by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
35%	9	2,25	X
20%	9	2,33333	X
0%	9	3,0	X
Multiple Range Tests for IP_Temp by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
0%	9	25,0611	X
35%	9	26,4244	X
20%	9	26,8244	X
Multiple Range Tests for IP_Vel by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
0%	9	0,499556	X
20%	9	0,504667	X
35%	9	0,562111	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

Verificou-se que adições de 20% e de 35% de cinza promoveram redução no tempo necessário para o início de pega (IP_tempo), porém não diferindo significativamente entre si. Essas adições de cinza promoveram, ainda, aumento na temperatura média observada no início de pega (IP_Temp), tendo se verificado que os percentuais avaliados diferiram significativamente entre si.

Comparando-se IP_tempo com o tempo_TMax, verificou-se que o comportamento dos diferentes percentuais de adição de cinza foi distinto, não apresentando uma tendência definida de comportamento, o que aponta para a existência de “anomalias”, atribuídas a quantidade empregada de casca e/ou cinza.

Destaca-se que a adição de cinza, em percentuais de 20% e de 35%, promoveu redução no tempo para o início de pega (IP_tempo), aumento na temperatura no início de pega (IP_Temp) e aumento na VPU do início de pega (IP_Vel).

Tal fato permite concluir que a cinza promoveu melhorias no processo químico e na formação de estruturas físicas que permitiram a passagem do pulso ultra-sônico.

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

As Figuras 143 e 144 apresentam gráficos da interação casca-cinza, podendo se evidenciar o comportamento das médias das diferentes distribuições em tamanho de casca, em função dos percentuais de adição de cinza, para os elementos de análise tempo (IP_tempo), temperatura (IP_Temp) e velocidade do pulso ultra-sônico (IP_Vel).

A distribuição em tamanho de casca 10 mm apresentou, com a adição de cinza, redução no elemento de análise tempo para o início de pega (IP_tempo) e aumento da temperatura no início de pega (IP_Temp).

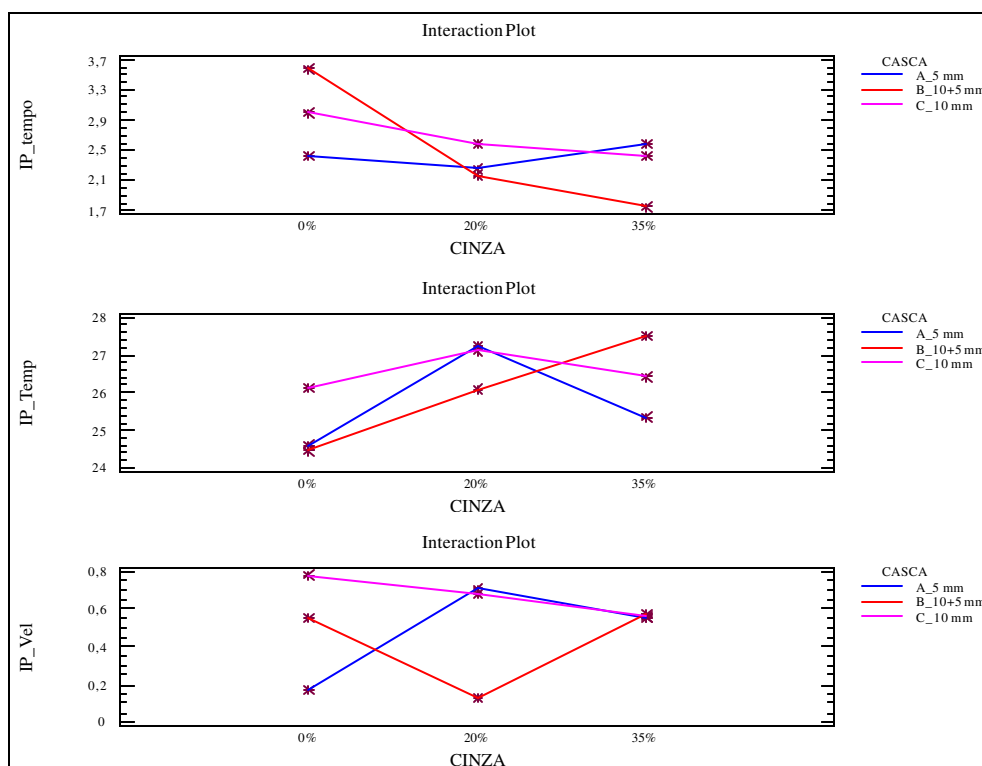


Figura 143: Interação casca-cinza - fator CASCA: parâmetro Início de Pega (IP_tempo, IP_Temp e IP_Vel).

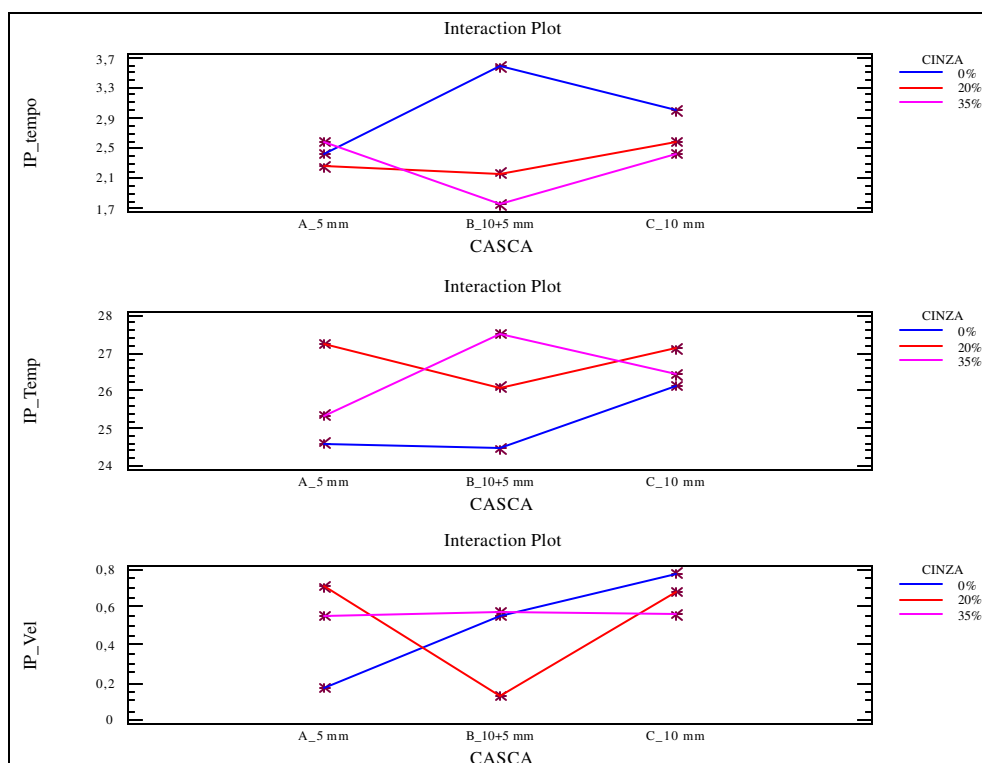


Figura 144: Interação casca-cinza - fator CINZA: parâmetro Início de Pega (IP_tempo, IP_Temp e IP_Vel).

D) Considerações a respeito do parâmetro Início de Pega.

A determinação do tempo para o início de pega foi realizada de forma indireta, através da equação de AJUSTE, que representa uma tendência de evolução da resistência da mistura.

Este artifício se faz necessário, uma vez que as misturas estudadas apresentaram uma maior dispersão nos resultados de resistência à penetração, quando comparadas às argamassas.

Tal fato pode ser explicado pela dificuldade em distribuir adequadamente a mistura no interior do molde (dificuldade esta associada à casca, mesmo sob a ação de compactação), o que foi evidenciado quando repetições apontavam, para uma mesma idade, a ocorrência de valores de resistência muito diferentes entre pontos de penetração da agulha.

Esta forma de determinar o tempo para o início de pega possibilita agregar o conhecimento do comportamento mecânico das misturas empregadas na produção de compósitos (tendência de resistência) a outros parâmetros de avaliação.

Torna-se possível efetuar uma avaliação relativa à evolução da resistência mecânica ao longo do tempo, contemplando as informações obtidas no período de 0-24 h aos valores medidos quando efetuados ensaios mecânicos de compressão (axial, diametral) dos corpos-de-prova cilíndricos em diferentes idades (de 1 dia a 28 dias ou mais), possibilitando a determinação de idades adequadas para o emprego seguro dos materiais compósitos produzidos.

Em relação aos resultados encontrados, destaca-se que a distribuição em tamanho de casca 10 mm apresentou os maiores valores médios, sendo que no caso do elemento de análise IP_tempo, este maior valor **poderia** ser considerado como sendo inadequado, pelo maior tempo necessário ao desenvolvimento da resistência mecânica.

Estaria, ainda, associado a um desempenho químico inadequado (considerado como um pior comportamento); entretanto, a complexidade das inter-relações químico-físico-mecânicas não permitiu tecer melhores considerações.

Em relação ao elemento de análise IP_Temp, verificou-se que a adição de cinza produziu comportamentos diferenciados em função da maior ou da menor presença de casca.

Destaca-se que em baixas quantidades de casca (7,5%, no caso de pastas – FASE II), a adição de cinza promoveu redução na temperatura (atribuída ao aumento de massa no

sistema) e, em maior dosagem de casca (36%, para a distribuição em tamanho de casca 10 mm), observou-se um aumento na temperatura, o que pode ser interpretado como sendo uma indicação da necessidade de adequação da quantidade de cinza, em função da quantidade de casca.

Acredita-se que esse diferencial de comportamento esteja relacionado com uma possível ação de competição da cinza com o sistema químico do cimento, através da adsorção de compostos químicos presentes na água de amassamento.

No caso do elemento de análise IP_Vel, verificou-se que o efeito da distribuição em tamanho de casca 10 mm foi mais significativo em relação às demais.

No caso da adição de cinza, não se verificou a existência de diferença significativa entre os diferentes percentuais de adição. Para a distribuição em tamanho de casca 10 mm, o início de pega pode ser encontrado dentro da faixa de VPU que vai de 0,48 km/s a 0,85 km/s.

No caso da distribuição em tamanho de casca 10 mm com adição de 20% de cinza, a faixa onde pode ser encontrado o ponto do início de pega varia de 0,60 km/s a 0,75 km/s e, no caso da distribuição em tamanho de casca 10 mm com adição de 35% de cinza, a faixa onde pode ser encontrado o ponto do início de pega varia de 0,48 km/s a 0,63 km/s.

4.3.2.2 Avaliação do parâmetro Fim de Pega das misturas.

O tempo para o fim da pega em misturas do tipo PASTA é caracterizado quando a agulha de vicat não penetra na pasta em altura igual ou superior a 38 mm, em relação à placa base (vidro). Este tempo representa um ponto teórico, a partir da mistura do cimento com a água, em que há o desenvolvimento da resistência mecânica a uma taxa significativa.

No caso de misturas com agregados (argamassa e compósito), há fatores específicos (condutibilidade e inércia térmica dos agregados, água livre na região do ensaio de penetração, perdas térmicas e volume empregado, como os principais observados) que interferem no processo de determinação do tempo para o fim de pega.

Como consequência, houve uma maior dispersão nos valores de resistência medidos, razão principal para a determinação, de forma indireta (equação de AJUSTE), dos tempos para o início e o fim de pega. Assumiu-se como característica “teórica” da equação de AJUSTE, a de exprimir uma tendência da resistência, possibilitando apontar o final do enrijecimento com

o “início” de um rápido desenvolvimento da resistência mecânica.

Seu caráter prático reside na possibilidade de determinação de um tempo mínimo para a desforma segura das peças de compósito, no pós-fim de pega. Os elementos auxiliares de análise associados ao fim de pega são a temperatura no fim de pega (FP_Temp) e a velocidade do pulso ultra-sônico no fim de pega (FP_Vel). Estes elementos de análise foram obtidos através de medições efetuadas diretamente nos cilindros de mistura.

A Tabela 144 apresenta as médias dos elementos utilizados nas análises, para as diferentes distribuições em tamanho de casca, associadas aos diferentes percentuais de adição de cinza.

Para que nos gráficos das análises estatísticas os valores obedecessem à ordem da menor dimensão das partículas para a maior dimensão, empregou-se o mesmo artifício da FASE II, nomeando-se as misturas como A_5mm, B_10+5 mm e C_10 mm.

Tabela 144: **FASE III - Avaliação físico-mecânica: Parâmetro Fim de Pega (Médias).**

MÉDIAS	A_5 mm - 0 %	B_10+5 mm - 0 %	C_10 mm - 0 %
FP_tempo (h)	5,58	13,42	9,08
FP_Temperatura (°C)	27,8	25,5	30,0
FP_Velocidade (km/s)	0,969	0,641	0,941
MÉDIAS	A_5 mm - 20 %	B_10+5 mm - 20 %	C_10 mm - 20 %
FP_tempo (h)	7,67	10,33	9,33
FP_Temperatura (°C)	29,0	26,6	29,3
FP_Velocidade (km/s)	0,784	0,669	0,766
MÉDIAS	A_5 mm - 35 %	B_10+5 mm - 35 %	C_10 mm - 35 %
FP_tempo (h)	8,17	6,75	9,33
FP_Temperatura (°C)	27,3	28,3	27,1
FP_Velocidade (km/s)	0,630	0,665	0,646

Na Tabela 145 apresentam-se as análises da variância (ANOVA) do parâmetro Fim de Pega, considerando-se o elemento de análise tempo para o fim de pega (FP_tempo), ao qual foram associados os elementos de análise temperatura no fim de pega (FP_Temp) e a VPU no fim de pega (FP_Vel).

Destaca-se que em todos os três elementos de análise (FP_tempo, FP_Temp e FP_Vel), o comportamento aponta a existência de diferença significativa nos fatores avaliados (p-valor < 0,05).

Tabela 145: ANOVAs do parâmetro Fim de Pega (FP tempo, FP Temp e FP_Vel).

Analysis of Variance for FP_tempo - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	43,3935	2	21,6968	3038,45	0,0000
B:CINZA	8,25463	2	4,12731	578,00	0,0000
INTERACTIONS					
AB	69,9259	4	17,4815	2448,13	0,0000
RESIDUAL	0,128533	18	0,00714074		
TOTAL (CORRECTED)	121,703	26			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					
Analysis of Variance for FP_Temp - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	17,9805	2	8,99027	3717,26	0,0000
B:CINZA	2,84245	2	1,42123	587,64	0,0000
INTERACTIONS					
AB	26,9891	4	6,74728	2789,84	0,0000
RESIDUAL	0,0435333	18	0,00241852		
TOTAL (CORRECTED)	47,8556	26			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					
Analysis of Variance for FP_Vel - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	0,103668	2	0,0518341	77751,17	0,0000
B:CINZA	0,186943	2	0,0934714	140207,17	0,0000
INTERACTIONS					
AB	0,11964	4	0,0299099	44864,83	0,0000
RESIDUAL	0,000012	18	6,66667E-7		
TOTAL (CORRECTED)	0,410263	26			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A seguir, são apresentados os resultados da avaliação dos fatores casca, cinza e de sua interação, apresentando-se algumas considerações.

A) Efeito da adição de CASCA.

A Tabela 146 apresenta a análise das médias para o fator CASCA.

Tabela 146: Análises do fator CASCA: parâmetro Fim de Pega (elementos de análise: **FP_tempo**, **FP_Temp** e **FP_Vel**): Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for FP_tempo by CASCA			

Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups

A_5 mm	9	7,13889	X
C_10 mm	9	9,25	X
B_10+5 mm	9	10,1667	X

Multiple Range Tests for FP_Temp by CASCA			

Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups

B_10+5 mm	9	26,8089	X
A_5 mm	9	28,03	X
C_10 mm	9	28,79	X

Multiple Range Tests for FP_Vel by CASCA			

Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups

B_10+5 mm	9	0,658111	X
C_10 mm	9	0,784333	X
A_5 mm	9	0,794222	X

Misturas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

Comparando-se o comportamento dos parâmetros início de pega (IP_tempo) e Fim de pega (FP_tempo), verificou-se que a sequência dos valores médios não se manteve, indicando a existência de interferências no processo químico em alguma das misturas.

Através da Figura 212, torna-se possível verificar que a distribuição em tamanho de casca 10+5 mm apresentou o comportamento menos adequado em termos de evolução da temperatura de hidratação (comparada à curva 10 mm-0% ou, a uma curva típica, como aquela apresentada na Figura 47). Tal fato também pode ser constatado quando são comparados os valores médios de IP_Temp (26,01 °C), FP_Temp (26,81 °C) e de Temp_Max (27,5 °C).

A Tabela 147 destaca os valores médios referentes ao desempenho térmico das diferentes distribuições em tamanho de casca.

Tabela 147: CASCA: Média dos Parâmetros **IP_Temp**, **FP_Temp** e **Temp_Max**.

Casca	5 mm	10+5 mm	10 mm
IP_Temp	25,73	26,01	26,56
FP_Temp	28,03	26,81	28,79
Temp_Max	28,35	27,5	29,23

Destaca-se que a distribuição em tamanho de casca 10 mm apresentou os maiores valores médios, diferindo significativamente das demais distribuições.

Em relação à VPU (FP_Vel e IP_Vel), verificou-se que a distribuição em tamanho de casca 5 mm, no fim de pega (FP_Vel), foi superior à distribuição em tamanho de casca 10 mm, que apresentou resultado superior no início de pega (IP_Vel).

Tal fato sugere a existência de uma melhor formação das estruturas mecânicas favoráveis à passagem do pulso ultra-sônico, quando do uso da distribuição em tamanho de casca 5 mm.

B) Efeito da adição de CINZA.

Na Tabela 148 apresentam-se as análises para o fator CINZA, empregando-se os elementos de análise tempo para o fim de pega (FP_tempo), temperatura no fim de pega (FP_Temp) e VPU no fim de pega (FP_Vel).

Tabela 148: Análises do fator CINZA: parâmetro Fim de Pega (elementos de análise: **FP_tempo, FP_Temp e FP_Vel**): Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for FP_tempo by CINZA			

Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups

35%	9	8,08333	X
20%	9	9,11111	X
0%	9	9,36111	X

Multiple Range Tests for FP_Temp by CINZA			

Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups

35%	9	27,5444	X
0%	9	27,7678	X
20%	9	28,3167	X

Multiple Range Tests for FP_Vel by CINZA			

Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups

35%	9	0,646778	X
20%	9	0,739556	X
0%	9	0,850333	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

Comparando-se o comportamento do tempo para o início de pega (IP_tempo) com o do tempo para o fim de pega (FP_tempo), verificou-se que a ordem sequencial foi mantida, destacando-se que o percentual de adição de 35% de cinza apresentou o menor tempo necessário para o início de pega (IP_tempo) e para o fim de pega (FP_tempo). O percentual de adição de 0% de cinza apresentou os maiores valores de tempo, quer seja para atingir o início de pega (IP_tempo) como para alcançar o fim de pega (FP_tempo).

Em relação à temperatura, a tabela 149 apresenta a comparação entre as médias dos parâmetros IP_Temp, FP_Temp e Temp_Max, onde se destaca o percentual de 20%, por apresentar os maiores valores médios.

Tabela 149: CINZA: Média dos parâmetros **IP_Temp, FP_Temp e Temp_Max.**

Cinza	0%	20%	35%
IP_Temp	25,06	26,82	26,42
FP_Temp	27,77	28,32	27,54
Temp_Max	28,41	28,58	28,09

Comparando-se o comportamento da velocidade do pulso ultra-sônico (VPU) nos parâmetros início de pega (IP_Vel) e Fim de pega (FP_Vel), verificou-se que o percentual de adição de 0% apresentou o menor valor médio no IP_Vel, passando a apresentar o maior valor de média no FP_Vel. No caso do percentual de adição de 35%, verificou-se que seu emprego apresentava o maior valor médio no IP_Vel, porém passando a apresentar o menor valor de média no FP_Vel. Estas indicações apontam um diferencial de comportamento atribuído às anomalias no processo químico, associadas à quantidade de casca e/ou cinza adicionadas, bem como da interação entre as mesmas.

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

Através das Figuras 145 e 146 evidencia-se o comportamento das médias das diferentes distribuições em tamanho de casca, em função dos percentuais de adição de cinza (interação casca-cinza), para os elementos de análise FP_tempo, FP_Temp e FP_Vel.

O parâmetro fim de pega aponta que as diferentes distribuições em tamanho de casca apresentam comportamento diferenciado (anomalias no processo químico), destacando-se que a seqüência de comportamentos observada em IP_tempo não se manteve em FP_tempo.

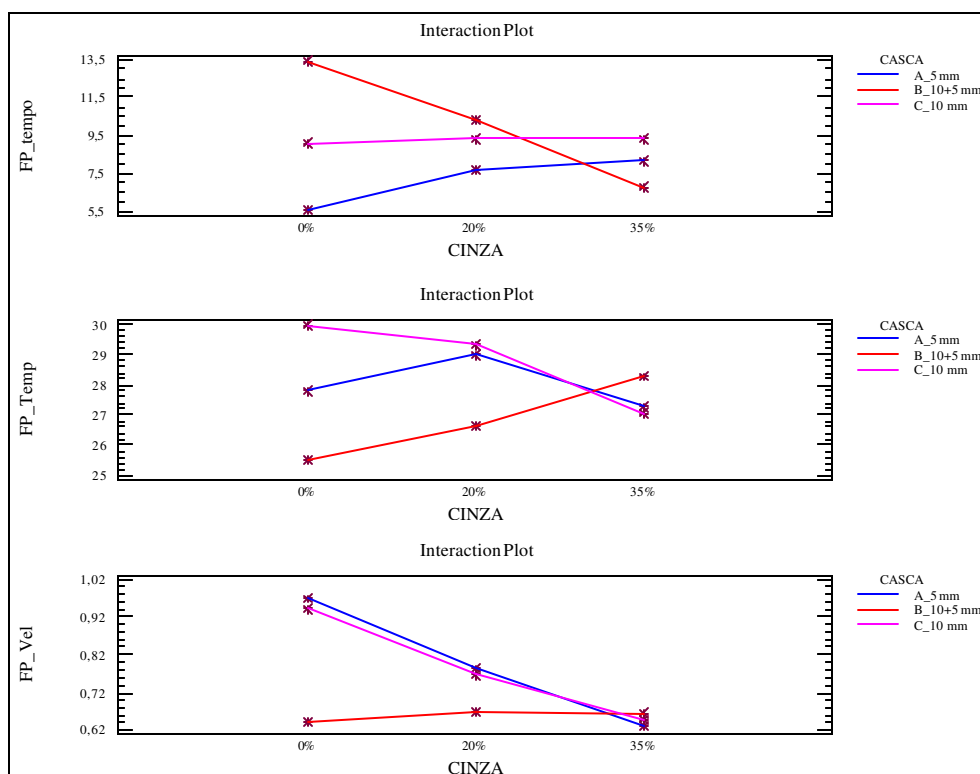


Figura 145: Interação casca-cinza - fator CASCA: parâmetro Fim de Pega (FP_tempo, FP_Temp e FP_Vel).

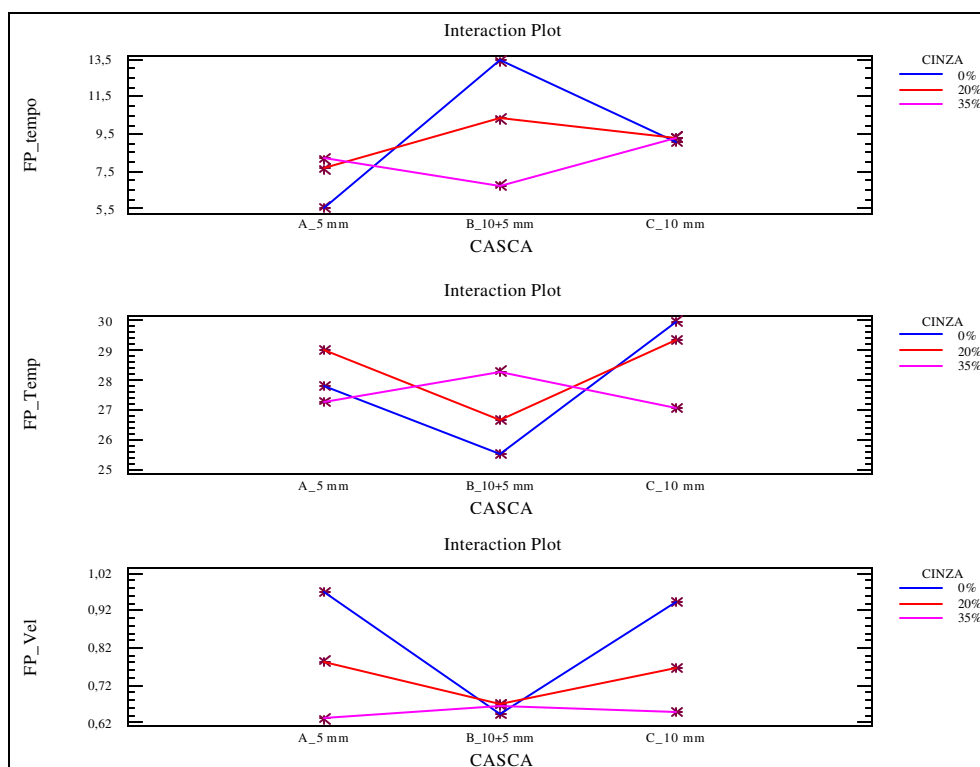


Figura 146: Interação casca-cinza - fator CINZA: parâmetro Fim de Pega (FP_tempo, FP_Temp e FP_Vel).

D) Considerações a respeito do parâmetro Fim de Pega.

Verificou-se que a distribuição em tamanho de casca 10 mm promoveu as maiores médias de temperatura no início de pega (IP_Temp), de temperatura no fim de pega (FP_Temp) e de temperatura máxima alcançada (Temp_Max).

No caso do elemento de análise IP_Vel, verificou-se a existência de diferenças significativas entre as misturas, sendo que a distribuição em tamanho de casca 10 mm foi superior às demais.

Em relação à adição de cinza, destaca-se que o percentual de adição de 20% promoveu os maiores valores médios de temperatura no início de pega (IP_Temp), de temperatura no fim de pega (FP_Temp) e, de temperatura máxima alcançada (Temp_Max). Contudo, destaca-se que o percentual de adição de 20% não diferiu significativamente dos demais percentuais de adição de cinza.

Para a distribuição em tamanho de casca 10 mm, o fim de pega pode ser localizado dentro da faixa de 0,783 km/s e 0,785 km/s.

No caso da distribuição em tamanho de casca 10 mm com adição de 20% de cinza, a faixa onde pode ser encontrado o ponto do fim de pega variou de 0,765 km/s a 0,767 km/s.

No caso da distribuição em tamanho de casca 10 mm com adição de 35% de cinza, a faixa onde pôde ser encontrado o ponto do fim de pega variou de 0,645 km/s a 0,647 km/s.

4.3.2.3 Avaliação do parâmetro Resistência à tração por Compressão Diametral das misturas.

Os corpos-de-prova das misturas do tipo COMPÓSITO, obtidos pelo seccionamento dos cilindros de mistura e que receberam numeração ímpar (1, 3, 5 e 7), foram ensaiados à tração por compressão diametral (Tensão_D, em MPa), tendo se efetuado previamente avaliações relativas às características dos mesmos.

Os parâmetros de avaliação empregados foram a determinação da VPU (Vel_D, em km/s), da massa específica aparente (MEAp_D, em g/cm³) e do módulo de elasticidade dinâmico (MOEd_D, em MPa), empregados como elementos de análise auxiliar no controle da qualidade, como forma de verificar a existência de possíveis anomalias capazes de interferir

na avaliação dos resultados.

O caráter exploratório das informações obtidas atende às necessidades mais imediatas, tendo se restringido a avaliação aos resultados dos ensaios físico-mecânicos, não sendo realizadas análises envolvendo a combinação dos comportamentos químicos e mecânicos.

Na Tabela 150 são apresentadas as médias dos elementos utilizados na análise dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral, de modo a destacar os efeitos de cada distribuição em tamanho de casca e de cada percentual de adição de cinza.

Tabela 150: FASE III - Avaliação físico-mecânica: Parâmetro Compressão Diametral

MÉDIAS	A_5 mm - 0 %	B_10+5 mm - 0 %	C_10 mm - 0 %
Vel_Diam. (km/s)	1,258	1,197	1,226
MEAp_D. (g/cm ³)	0,96	1,12	0,98
MOEd Diam. (MPa)	1557	1754	1491
Tensão_D. (MPa)	0,69	1,10	0,98
MÉDIAS	A_5 mm - 20 %	B_10+5 mm - 20 %	C_10 mm - 20 %
Vel_Diam. (km/s)	1,086	1,100	1,010
MEAp_D. (g/cm ³)	0,85	1,14	0,86
MOEd Diam. (MPa)	1010	1423	892
Tensão_D. (MPa)	0,49	1,00	0,57
MÉDIAS	A_5 mm - 35 %	B_10+5 mm - 35 %	C_10 mm - 35 %
Vel_Diam. (km/s)	0,942	0,990	0,932
MEAp_D. (g/cm ³)	0,83	0,77	0,86
MOEd Diam. (MPa)	764	762	752
Tensão_D. (MPa)	1,02	0,34	1,11

4.3.2.3.1 Avaliação da VPU (Vel_D, em km/s) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à tração por compressão diametral.

A Tabela 151 apresenta a análise da variância (ANOVA) do elemento de análise velocidade do pulso ultra-sônico (VPU) dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral (Vel_D), onde se destaca a existência de diferença significativa apenas no fator CINZA.

Destaca-se que as medidas de velocidade do pulso ultra-sônico (VPU) efetuadas nos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral (Vel_D) objetivaram a detecção

de possíveis anomalias além de possibilitar a comparação com os valores medidos nos cilindros de mistura, e de apresentá-los nos gráficos de evolução da velocidade de propagação do pulso ultra-sônico (EVPU), como apresentado nas FASES I e II.

Tabela 151: ANOVA do elemento de análise Velocidade Diametral (**Vel_D**) dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral.

Analysis of Variance for Vel_D - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	0,0124321	2	0,00621603	0,34	0,7179
B:CINZA	0,45006	2	0,22503	12,15	0,0002
INTERACTIONS					
AB	0,0213756	4	0,0053439	0,29	0,8829
RESIDUAL	0,500258	27	0,0185281		
TOTAL (CORRECTED)	0,984125	35			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A seguir, são apresentados os resultados da avaliação da casca, cinza e de sua interação, tecendo-se algumas considerações.

A) Efeito da adição de CASCA.

Na Tabela 152 apresenta-se a análise do fator CASCA, podendo-se verificar a ausência de diferença significativa entre as diferentes misturas.

Tabela 152: Análise do fator CASCA: elemento de análise **Vel_D** dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Vel_D by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
C_10 mm	12	1,05625	X
A_5 mm	12	1,09533	X
B_10+5 mm	12	1,096	X

Misturas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

B) Efeito da adição de CINZA.

A Tabela 153 apresenta a análise do fator CINZA, onde se evidencia que o percentual de adição de 0% de cinza difere significativamente dos percentuais de adição de 20% e de 35% de cinza.

Tabela 153: Análise do fator CINZA: elemento de análise **Vel_D** dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Vel_D by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
35%	12	0,95475	X
20%	12	1,06575	X
0%	12	1,22708	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

Avaliando-se os valores médios apresentados, destaca-se uma tendência de redução na VPU com o aumento do percentual de adição de cinza, sendo que os percentuais de adição de 20% e de 35% de cinza não diferem significativamente entre si.

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

Os gráficos de interação casca-cinza, apresentados na Figura 147, evidenciam o comportamento das médias das distribuições em tamanho de casca, em função dos percentuais de adição de cinza, tendo-se verificado que a adição de cinza promoveu redução no valor médio de VPU (Vel_D) dos corpos-de-prova.

Já havia sido verificado que a adição de cinza em percentuais de 20% e de 35%, promovera melhorias no comportamento da VPU nas FASES I e II, fato este não observado nesta fase, provavelmente devido ao elevado teor de massa de casca de arroz empregada nas misturas, o que confirma a necessidade de efetuar-se a dosagem de cinza em função da dosagem e da distribuição em tamanho de casca de arroz.

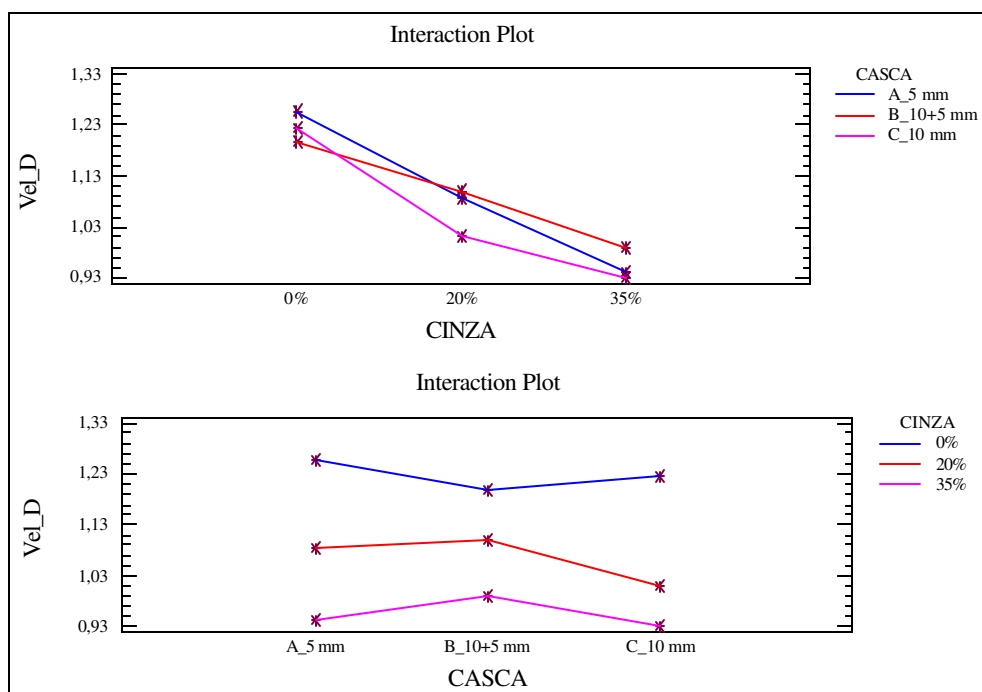


Figura 147: Interação casca-cinza: elemento de análise **Vel_D**.

D) Considerações a respeito do elemento de análise Velocidade Diametral (Vel_D).

Verificou-se que, enquanto na FASE II a adição de casca promoveu redução e a cinza melhorias na VPU, nesta fase, a adição de casca aparentemente não afetou a VPU e a adição de cinza promoveu reduções na VPU.

4.3.2.3.2 Avaliação da Massa Específica Aparente (MEAp_D, em g/cm³) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à tração por compressão diametral.

A Tabela 154 apresenta a análise da variância (ANOVA) do elemento de análise massa específica aparente dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral (MEAp_D), podendo se verificar a existência de diferenças significativas nos fatores casca, cinza e, na interação casca-cinza (p-valor < 0,05).

Em seguida, são apresentados os resultados da avaliação da casca, da cinza e, de sua interação, apresentando-se algumas considerações sobre o parâmetro avaliado.

Tabela 154: ANOVA do elemento de análise Massa Específica Aparente (MEAp_D) dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral.

Analysis of Variance for MEdp_D - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	0,119817	2	0,0599083	5,13	0,0129
B:CINZA	0,243217	2	0,121608	10,42	0,0004
INTERACTIONS					
AB	0,178017	4	0,0445042	3,81	0,0139
RESIDUAL	0,315025	27	0,0116676		
TOTAL (CORRECTED)	0,856075	35			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A) Efeito da adição de CASCA.

A Tabela 155 apresenta a análise do fator CASCA, onde se verificou que a distribuição em tamanho de casca 10+5 mm apresentou a maior massa específica aparente, diferindo significativamente das demais distribuições em tamanho de casca, que não diferiram significativamente entre si.

Tabela 155: Análise do fator CASCA: elemento de análise MEAp_D dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for MEdp_D by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
A_5 mm	12	0,879167	X
C_10 mm	12	0,898333	X
B_10+5 mm	12	1,01	X

Misturas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

B) Efeito da adição de CINZA.

A Tabela 156 apresenta a análise do fator CINZA, que evidencia a ausência de diferença significativa entre os percentuais de adição de 0% e de 20%, ambos superiores e significativamente diferentes do percentual de 35% de adição. Os valores médios apontam para uma tendência de redução na MEdp_D com o aumento do percentual de adição de cinza.

Tabela 156: Análise do fator CINZA: elemento de análise **MEAp_D** dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for MEdp_D by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
35%	12	0,82	X
20%	12	0,949167	X
0%	12	1,01833	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

A Figura 148 apresenta os gráficos de interação casca-cinza, destacando-se a redução na MEdp_D com o aumento no percentual de adição de cinza.

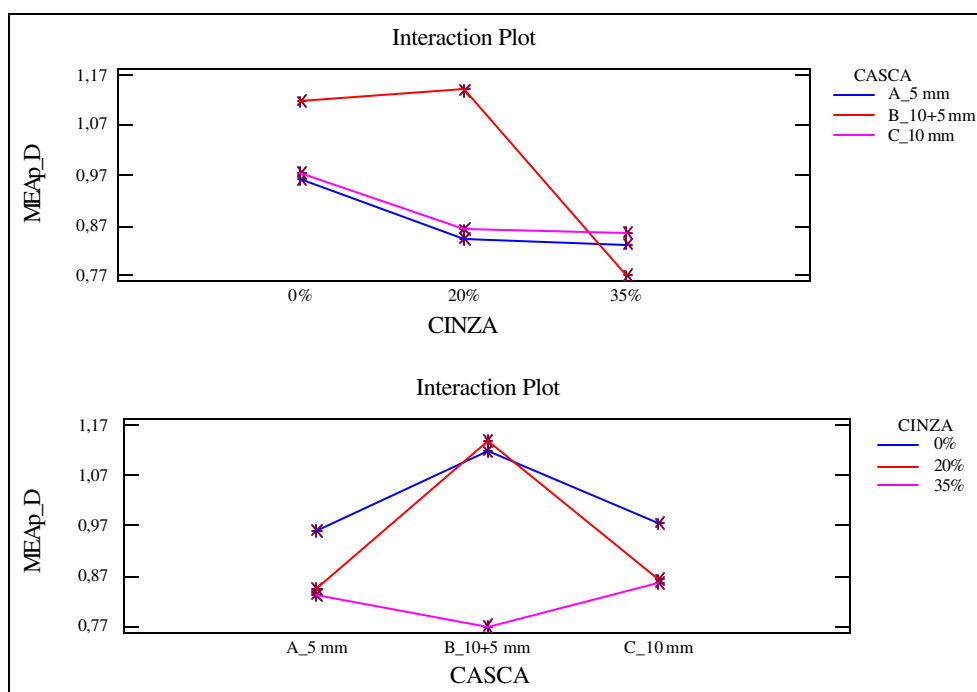


Figura 148: Interação casca-cinza: elemento de análise **MEAp_D**.

D) Considerações a respeito do elemento de análise Massa Específica Aparente.

As distribuições em tamanho de casca 5 mm e 10 mm apresentaram os menores valores de MEdp_D, valores estes diferenciados da distribuição em tamanho de casca 10+5

mm, podendo tal fato possivelmente estar associado ao processo de compactação das misturas.

A adição de cinza em percentual de 35% promoveu as maiores reduções na MEAp_D. Não se evidenciou interferência da MEAp_D no desempenho mecânico dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral.

4.3.2.3.3 Avaliação do Módulo de Elasticidade Dinâmico (MOEd_D, em MPa) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à tração por compressão diametral.

A Tabela 157 apresenta a análise da variância (ANOVA) do elemento de análise módulo de elasticidade dinâmico (MOEd_D), destacando-se a existência de diferença significativa apenas no fator CINZA (p-valor < 0,05).

Tabela 157: ANOVA do elemento de análise Módulo de Elasticidade dinâmico (MOEd_D) dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral.

Analysis of Variance for MOEd_D - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	468680,0	2	234340,0	1,04	0,3670
B:CINZA	4,2878E6	2	2,1439E6	9,52	0,0007
INTERACTIONS					
AB	303245,0	4	75811,1	0,34	0,8508
RESIDUAL	6,07989E6	27	225181,0		
TOTAL (CORRECTED)	1,11396E7	35			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A seguir, são apresentados os resultados da avaliação da casca, da cinza e de sua interação, apresentando-se algumas considerações.

A) Efeito da adição de CASCA.

A Tabela 158 apresenta a análise do fator CASCA, onde destaca-se a ausência de diferença significativa entre as diferentes misturas.

Tabela 158: Análise do fator CASCA: elemento de análise **MOEd_D** dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for MOEd_D by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
C_10 mm	12	1045,28	X
A_5 mm	12	1110,23	X
B_10+5 mm	12	1313,17	X

Misturas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

B) Efeito da adição de CINZA.

A Tabela 159 apresenta a análise do fator CINZA, evidenciando-se a existência de diferença significativa entre as misturas sem adição (0%) de cinza com aquelas com adição de 20% e de 35%.

Tabela 159: Análise do fator CINZA: elemento de análise **MOEd_D** dos corpos de prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for MOEd_D by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
35%	12	759,58	X
20%	12	1108,26	X
0%	12	1600,85	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

Avaliando-se os valores médios, evidencia-se a redução das médias no MOEd_D com o aumento no percentual de adição de cinza, destacando-se que a redução no valor do MOEd_D foi expressiva, superior a 50%, no caso do percentual de adição de 35%, e de cerca de 30% no percentual de adição de 20% de cinza.

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

Os gráficos de interação casca-cinza (Figura 149) evidenciam o comportamento das diferentes distribuições em tamanho de casca, em função do percentual de adição de cinza.

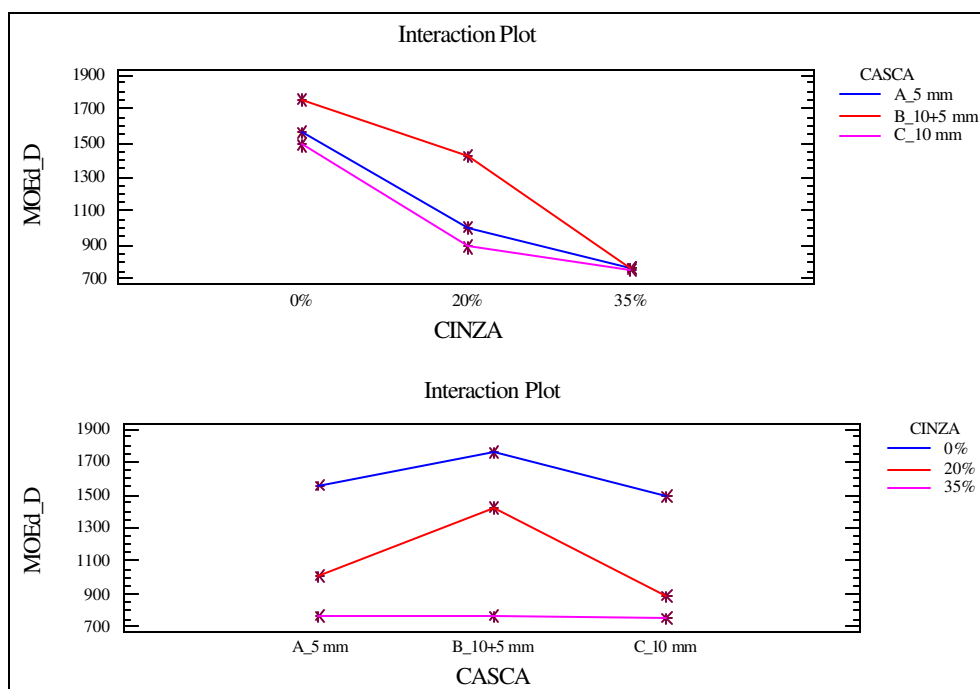


Figura 149: Interação casca-cinza: elemento de análise MOEd_D.

Destaca-se que as distribuições em tamanho de casca 5 mm e 10 mm apresentam um comportamento que pode ser considerado como similar, em função da reduzida diferença apresentada entre seus valores médios, para cada percentual de adição de cinza. Destacou-se, ainda, o percentual de adição de 0% de cinza, pelos maiores valores médios alcançados e o percentual de adição de 35% de cinza, pela uniformidade no comportamento das médias.

D) Considerações a respeito do elemento de análise Módulo de Elasticidade dinâmico.

Verificou-se que a adição de cinza foi o único fator a apresentar diferença significativa, com destaque para o percentual de adição de 35%, por promover as maiores reduções nas médias do MOEd_D.

4.3.2.3.4 Avaliação da Tensão Diametral (Tensao_D, em MPa) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à tração por compressão diametral.

A Tabela 160 apresenta a análise da variância (ANOVA) do elemento de análise Tensão Diametral (Tensao_D), evidenciando-se a ausência de diferença significativa nos

fatores CASCA e CINZA. Já na interação CASCA-CINZA, verificou-se a existência de diferença significativa ($p\text{-valor} < 0,05$). Em seguida, são apresentados os resultados da avaliação da casca, da cinza e da interação casca-cinza, apresentando-se algumas considerações.

Tabela 160: ANOVA do elemento de análise Tensão Diametral (Tensao_D**).**

Analysis of Variance for Tensao_D - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	0,152039	2	0,0760194	0,76	0,4762
B:CINZA	0,336039	2	0,168019	1,69	0,2043
INTERACTIONS					
AB	2,25361	4	0,563403	5,65	0,0019
RESIDUAL	2,6915	27	0,0996852		
TOTAL (CORRECTED)	5,43319	35			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A) Efeito da adição de CASCA.

A Tabela 161 apresenta a análise do fator CASCA, verificando-se que as diferentes distribuições em tamanho de casca não diferem significativamente entre si, sendo que a distribuição em tamanho de casca 10 mm apresentou o maior valor de média.

Tabela 161: Análise do fator CASCA: elemento de análise **Tensao_D dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%).**

Multiple Range Tests for Tensao_D by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
A_5 mm	12	0,729167	X
B_10+5 mm	12	0,810833	X
C_10 mm	12	0,888333	X

Misturas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

Avaliando-se os valores médios apresentados, evidencia-se a tendência de aumento na resistência à tração por compressão diametral com o aumento no percentual das partículas

de maior dimensão (redução de finos) de casca de arroz (10 mm = 3,67%; 10+5 mm = 9,07 e, 5 mm = 14,57%).

B) Efeito da adição de CINZA.

A Tabela 162 apresenta a análise do fator CINZA, destacando-se a ausência de diferença significativa entre os diferentes percentuais de adição de cinza.

Tabela 162: Análise do fator CINZA: elemento de análise **Tensao_D** dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Tensao_D by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
20%	12	0,685833	X
35%	12	0,820833	X
0%	12	0,921667	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

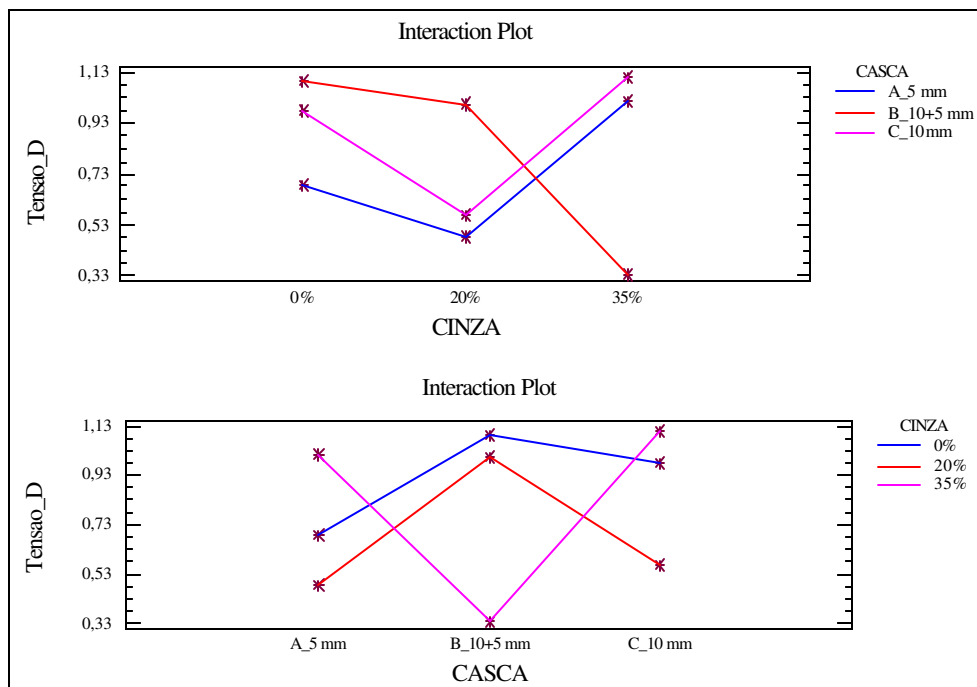


Figura 150: Interação casca-cinza: elemento de análise **Tensao_D**.

Os gráficos de interação casca-cinza, apresentados na Figura 150, evidenciam o comportamento das médias das distribuições em tamanho de casca, em função do percentual de adição de cinza, com destaque para a distribuição em tamanho de casca 10 mm, associada ao percentual de adição de 35% de cinza.

D) Considerações a respeito do elemento de análise Tensão Diametral.

A falta de diferença significativa observada (entre médias das distribuições em tamanho de casca e entre médias dos percentuais de adição de cinza) evidencia que o comportamento geral das misturas é similar, sendo as variações observadas derivadas basicamente do elemento de análise MEAp_D.

Ao comparar o desempenho mecânico das diferentes misturas, verificou-se que a combinação da distribuição em tamanho de casca 10 mm com o percentual de adição de 35% de cinza promoveu o maior valor médio de resistência à tração por compressão diametral, diferindo significativamente apenas da mistura 10+5 mm-35%.

E) Considerações finais sobre a avaliação do parâmetro Resistência à tração por Compressão Diametral das misturas.

Em geral, não se verificou a existência de diferença significativa entre as diferentes distribuições em tamanho de casca.

No caso da cinza, verificou-se que o percentual de adição de 35% de cinza promoveu as maiores reduções na Vel_D, na MEAp_D e no MOEd_D, sendo que tal fato não foi verificado na avaliação dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral.

Avaliando-se a correlação entre os parâmetros Vel_D, na MEAp_D, MOEd_D e Tensao_D, verificou-se que apenas na correlação entre os elementos Tensao_D e Vel_D (0,41) o valor foi inferior a 0,50.

As demais correlações apresentam valores que podem ser considerados como pouco adequados para exprimir relações de interesse prático.

Assim, para avaliar a resistência à tração por Compressão Diametral, verificou-se que nenhum dos elementos utilizados no controle de qualidade (Vel_D, MEAp_D e MOE_D)

pôde ser empregado como ferramenta preditiva de comportamento mecânico (Tabela 163).

Tabela 163: Coeficientes de correlação (Pearson) entre os elementos de análise do parâmetro Resistência à tração por Compressão Diametral.

Correlations				
	Tensao_D	Vel_D	MEAp_D	MOEd_D
Tensao_D		0,4068 (36) 0,0138	0,6787 (36) 0,0000	0,5715 (36) 0,0003
Vel_D	0,4068 (36) 0,0138		0,6972 (36) 0,0000	0,9513 (36) 0,0000
MEAp_D	0,6787 (36) 0,0000	0,6972 (36) 0,0000		0,8486 (36) 0,0000
MOEd_D	0,5715 (36) 0,0003	0,9513 (36) 0,0000	0,8486 (36) 0,0000	

Legenda
Correlation
(Sample Size)
p-value

4.3.2.4 Avaliação do parâmetro Resistência à compressão simples das misturas.

Os corpos-de-prova das misturas do tipo COMPÓSITO, obtidos pelo seccionamento dos cilindros de mistura e que receberam numeração par (2, 4, 6 e 8), foram ensaiados à compressão simples (Tensao_Ax, em MPa).

Efetuar-se-iam previamente avaliações relativas às características dos mesmos, empregando-se os elementos VPU (Vel_Ax, em km/s), massa específica aparente (MEAp_Ax, em g/cm³) e o módulo de elasticidade dinâmico (MOEd_Ax, em MPa).

Estes elementos de análise auxiliar foram utilizados como controle da qualidade, como forma de verificar a existência de possíveis anomalias, capazes de interferir na avaliação dos resultados.

As avaliações dos resultados dos ensaios ficaram restritas aos ensaios físico-mecânicos, destacando-se a possibilidade futura de uma análise conjunta dos comportamentos químicos e mecânicos.

Na Tabela 164 são apresentadas as médias dos elementos utilizados na análise dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples, de modo a destacar os efeitos de cada distribuição em tamanho de CASCA e de cada percentual de adição de CINZA.

Tabela 164: **FASE III - Avaliação físico-mecânica: Parâmetro Compressão Simples.**

MÉDIAS	A_5 mm-0%	B_10+5 mm-0%	C_10 mm-0%
Vel_Ax. (km/s)	1,242	1,071	1,227
MEAp_Ax. (g/cm ³)	0,96	1,07	1,00
MOEd Ax. (MPa)	1515	1363	1515
Tensão_Ax. (MPa)	2,61	3,35	3,08
MÉDIAS	A_5 mm-20%	B_10+5 mm-20%	C_10 mm-20%
Vel_Ax. (km/s)	1,143	0,939	1,030
MEAp_Ax. (g/cm ³)	0,91	0,99	0,89
MOEd Ax. (MPa)	1235	940	964
Tensão_Ax. (MPa)	2,74	2,32	1,78
MÉDIAS	A_5 mm-35%	B_10+5 mm-35%	C_10 mm-35%
Vel_Ax. (km/s)	0,903	1,052	0,923
MEAp_Ax. (g/cm ³)	0,83	0,90	0,87
MOEd Ax. (MPa)	674	1011	743
Tensão_Ax. (MPa)	3,08	2,21	3,35

4.3.2.4.1 Avaliação da VPU (Vel_Ax, em km/s) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à compressão simples.

A Tabela 165 apresenta a análise da variância (ANOVA) do elemento de análise velocidade do pulso ultra-sônico dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples (Vel_Ax), evidenciando-se a existência de diferença significativa apenas no fator CINZA (p-valor < 0,05).

Tabela 165: ANOVA do elemento de análise Velocidade Axial (**Vel_Ax**) dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples.

Analysis of Variance for Vel_Ax - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	0,0339127	2	0,0169563	1,05	0,3637
B:CINZA	0,300899	2	0,150449	9,32	0,0008
INTERACTIONS					
AB	0,174081	4	0,0435203	2,70	0,0520
RESIDUAL	0,435846	27	0,0161425		
TOTAL (CORRECTED)	0,944739	35			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A seguir, são apresentados os resultados da avaliação da casca, da cinza e de sua interação, apresentando-se algumas considerações.

A) Efeito da adição de CASCA.

A Tabela 166 apresenta a análise do fator CASCA, evidenciando-se que entre as médias das diferentes distribuições em tamanho de casca não existe diferença significativa, o que aponta para uma uniformidade na velocidade de propagação do pulso ultra-sônico (VPU) nas misturas avaliadas. Este fato também foi observado no elemento de análise Vel_D, o que demonstra a homogeneidade do cilindro de mistura.

Tabela 166: Análise do fator CASCA: elemento de análise **Vel_Ax** dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Vel_Ax by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
B_10+5 mm	12	1,02092	X
C_10 mm	12	1,05975	X
A_5 mm	12	1,09608	X

Misturas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

B) Efeito da adição de CINZA.

A Tabela 167 apresenta a análise do fator CINZA, verificando-se que a adição de cinza promoveu redução na VPU.

Tabela 167: Análise do fator CINZA: elemento de análise **Vel_Ax** dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Vel_Ax by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
35%	12	0,959417	X
20%	12	1,03717	X
0%	12	1,18017	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

Entre os percentuais de adição de 20% e de 35% de cinza, não se verificou a existência de diferença significativa.

Avaliando-se os valores médios apresentados, evidenciou-se uma tendência de redução na VPU com o aumento no percentual de adição de cinza.

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

Os gráficos de interação casca-cinza, apresentados na Figura 151, evidenciam o comportamento das médias das distribuições em tamanho de casca, em função do percentual de cinza, verificando-se que, em geral, a adição de cinza promoveu reduções nos valores médios da VPU (Vel_Ax) dos corpos-de-prova.

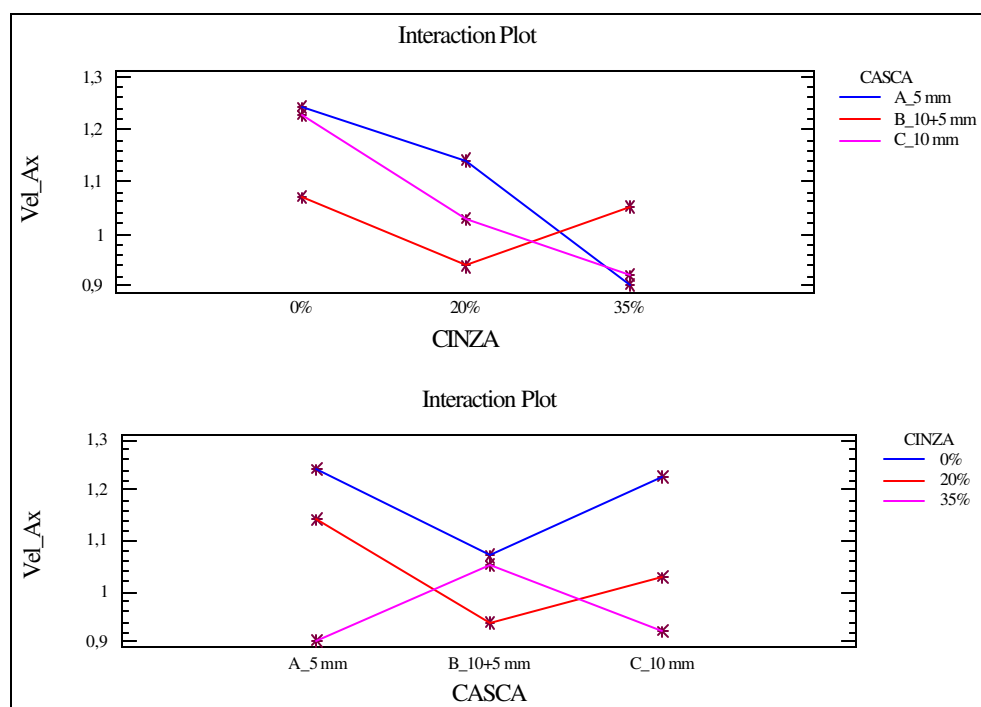


Figura 151: Interação casca-cinza: elemento de análise **Vel_Ax**.

Destacou-se também que o percentual de adição de 35% de cinza apresentou as maiores reduções nos valores médios de VPU (Vel_Ax), quando foi combinado com as distribuições em tamanho de casca 5 mm e 10 mm.

D) Considerações a respeito do elemento de análise Velocidade Axial (Vel_Ax).

O comportamento da Vel_Ax mostrou-se similar ao comportamento da Vel_D, o que sugere uma homogeneidade de comportamento para os cilindros de mistura. A adição de 35% de cinza promoveu as maiores reduções nos valores médios de VPU (Vel_Ax), porém não diferindo significativamente do percentual de adição de 20%.

4.3.2.4.2 Avaliação da Massa Específica Aparente (MEAp_Ax, em g/cm³) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à compressão simples.

A Tabela 168 apresenta a análise da variância (ANOVA) do elemento de análise massa específica aparente dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples (MEAp_Ax), verificando-se a existência de diferenças significativas apenas no fator CINZA. Em seguida, são apresentados os resultados da avaliação da casca, da cinza e, de sua interação, apresentando-se algumas considerações.

Tabela 168: ANOVA do elemento de análise Massa Específica Aparente (MEAp_Ax) dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples.

Analysis of Variance for MEA _p A _x - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	0,0467056	2	0,0233528	1,49	0,2432
B:CINZA	0,121906	2	0,0609528	3,89	0,0328
INTERACTIONS					
AB	0,00866111	4	0,00216528	0,14	0,9666
RESIDUAL	0,423025	27	0,0156676		
TOTAL (CORRECTED)	0,600297	35			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A) Efeito da adição de CASCA.

A Tabela 169 apresenta a análise do fator CASCA, podendo se verificar a ausência de diferença significativa entre as distribuições em tamanho de casca.

Tabela 169: Análise do fator CASCA: elemento de análise **MEAp_Ax** dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for MEdp_Ax by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
A_5 mm	12	0,900833	X
C_10 mm	12	0,92	X
B_10+5 mm	12	0,985	X

Misturas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

B) Efeito da adição de CINZA.

A Tabela 170 apresenta a análise do fator CINZA, onde se verificou a falta de diferença significativa entre os percentuais de adição de 20% e de 35% de cinza, comportamento similar ao observado em MEdp_D.

Avaliando-se os valores médios apresentados, evidenciou-se uma redução da MEdp_Ax com o aumento da adição de cinza

Tabela 170: Análise do fator CINZA: elemento de análise **MEAp_ax** dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for MEdp_Ax by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
35%	12	0,865	X
20%	12	0,933333	XX
0%	12	1,0075	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

Os gráficos de interação casca-cinza, apresentados na Figura 152, evidenciam o comportamento das médias das diferentes distribuições em tamanho de casca em função dos percentuais de adição de cinza, com destaque para a redução na massa específica aparente, em função do aumento no percentual de adição de cinza.

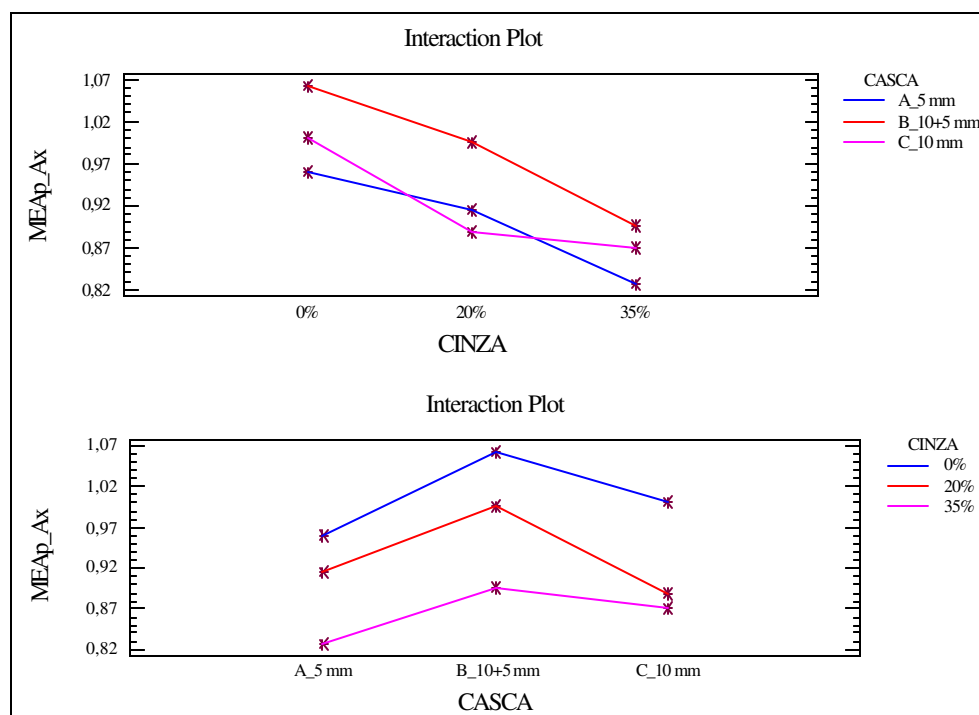


Figura 152: Interação casca-cinza: elemento de análise **MEAp_Ax**.

D) Considerações a respeito do elemento de análise Massa Específica Aparente.

Nos corpos-de-prova que foram ensaiados à compressão simples, verificou-se que a MEAp_Ax não sofreu influência da adição de casca, tendo sido afetada pela adição de 35% de cinza, que promoveu sua redução.

Destaca-se que o percentual de adição de 20% de cinza não diferiu significativamente dos demais percentuais.

Verificou-se, ainda, que a distribuição em tamanho de casca 10+5 mm apresentou comportamento diferenciado em MEAp_D, enquanto que na MEAp_Ax não se observou a existência de diferença significativa.

Este fato evidencia uma variação no cilindro da mistura 10+5 mm, atribuída à adição de 20% de cinza (10+5 mm-20%), não se tendo constatado alteração significativa no comportamento mecânico (Tensao_Ax), em função da ausência de diferença significativa entre as diferentes distribuições em tamanho de casca, e da ausência de diferença significativa entre os percentuais de adição de cinza.

4.3.2.4.3 Avaliação do Módulo de Elasticidade Dinâmico (MOEd_Ax, em MPa) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à compressão simples.

A Tabela 171 apresenta a análise da variância (ANOVA), que destaca a existência de diferença significativa apenas no fator CINZA (p-valor < 0,05). Em seguida, são apresentados os resultados da avaliação da casca, da cinza e, de sua interação, apresentando-se algumas considerações.

Tabela 171: ANOVA do elemento de análise Módulo de Elasticidade dinâmico (MOEd_Ax) dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples.

Analysis of Variance for MOEd_Ax - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	27199,6	2	13599,8	0,08	0,9273
B:CINZA	2,64149E6	2	1,32075E6	7,35	0,0028
INTERACTIONS					
AB	503380,0	4	125845,0	0,70	0,5987
RESIDUAL	4,85422E6	27	179786,0		
TOTAL (CORRECTED)	8,02629E6	35			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A) Efeito da adição de CASCA.

Tabela 172: Análise do fator CASCA: elemento de análise MOEd_Ax dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for MOEd_Ax by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
C_10 mm	12	1074,15	X
B_10+5 mm	12	1104,78	X
A_5 mm	12	1141,39	X

Misturas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

A Tabela 172 apresenta a análise do fator CASCA, verificando-se, de forma similar ao MOEd_D, a ausência de diferença significativa entre as diferentes misturas.

Avaliando-se os valores médios apresentados, evidenciou-se uma tendência de redução no MOE_Ax com a redução no percentual de adição de casca e com o aumento na dimensão das partículas de casca.

B) Efeito da adição de CINZA.

A Tabela 173 apresenta a análise do fator CINZA, destacando-se o valor médio da adição de 35% de cinza como sendo inferior e significativamente diferente do valor médio da adição de 0% de cinza, fato este também constatado no elemento de análise MOEd_D, o que representa uma tendência de redução no MOEd_Ax com o aumento no percentual de adição de cinza.

Tabela 173: Análise do fator CINZA: elemento de análise **MOEd_Ax** dos corpos de prova ensaiados à compressão simples: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for MOEd_Ax by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
35%	12	809,303	X
20%	12	1046,47	XX
0%	12	1464,54	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

Os gráficos de interação casca-cinza evidenciam o comportamento das médias dos corpos-de-prova para as diferentes distribuições em tamanho de casca, em função do percentual de cinza (Figura 153).

Destaca-se a mistura 10+5 mm-35%, que apresentou uma menor redução no MOEd_Ax, que a mistura 10+5 mm-20%. Contudo, a tendência de redução do MOEd_Ax com a adição de cinza se manteve.

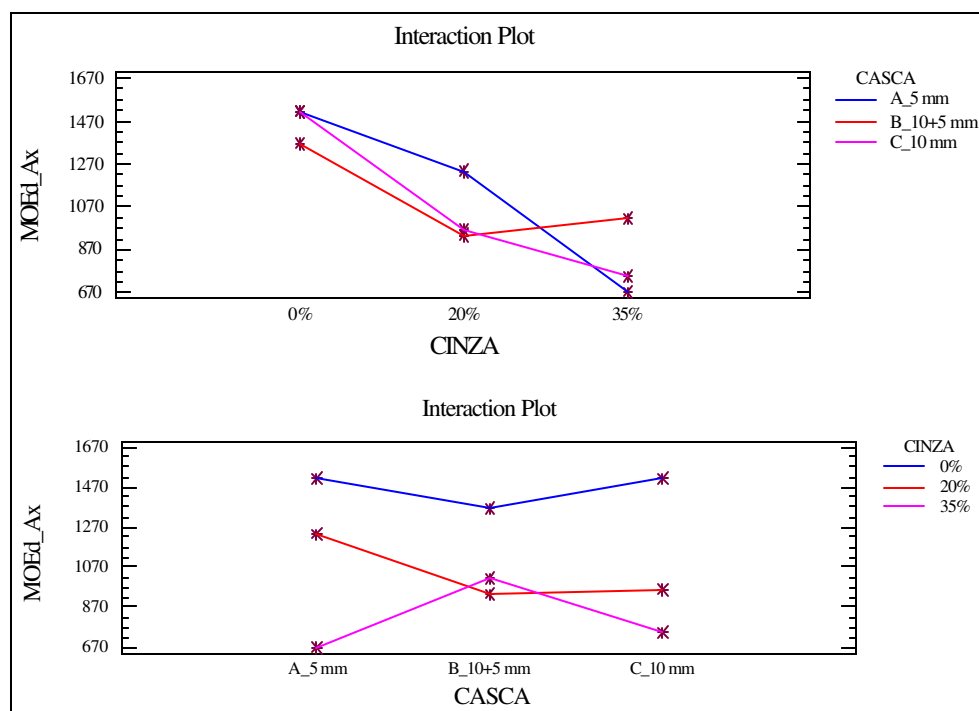


Figura 153: Interação casca-cinza: elemento de análise MOEd_Ax.

D) Considerações a respeito do elemento de análise Módulo de Elasticidade dinâmico.

Verificou-se que o comportamento do MOEd_Ax, em relação à distribuição em tamanho de casca foi similar àquele observado no MOEd_D. No caso da adição de cinza, considera-se que o comportamento foi equivalente ao MOEd_D, por promover a redução no módulo de elasticidade.

4.3.2.4.4 Avaliação da Tensão Axial (Tensao_Ax, em MPa) em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à compressão simples.

A Tabela 174 apresenta a análise da variância (ANOVA) do elemento de análise Tensão Axial (Tensao_Ax), evidenciando-se a ausência de diferença significativa nos fatores CASCA e CINZA, assim como na interação CASCA-CINZA (p-valor > 0,05).

Em seguida, são apresentados os resultados da avaliação da casca, da cinza e da interação casca-cinza, apresentando-se algumas considerações.

Tabela 174: ANOVA do elemento de análise Tensão Axial (Tensao_Ax).

Analysis of Variance for Tensao_Ax - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	0,204117	2	0,102058	0,05	0,9470
B:CINZA	3,60335	2	1,80167	0,96	0,3946
INTERACTIONS					
AB	5,53073	4	1,38268	0,74	0,5738
RESIDUAL	50,5383	27	1,87179		
TOTAL (CORRECTED)	59,8765	35			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A) Efeito da adição de CASCA.

A Tabela 175 apresenta a análise do fator CASCA, verificando-se que as diferentes distribuições em tamanho de casca não diferem significativamente entre si.

Tabela 175: Análise do fator CASCA: elemento de análise Tensao_Ax dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Tensao_Ax by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
B_10+5 mm	12	2,6275	X
C_10 mm	12	2,73667	X
A_5 mm	12	2,81083	X

Misturas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

B) Efeito da adição de CINZA.

Tabela 176: Análise do fator CINZA: elemento de análise Tensao_Ax dos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Tensao_Ax by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
20%	12	2,28417	X
35%	12	2,87917	X
0%	12	3,01167	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

A Tabela 176 apresenta a análise do fator CINZA, evidenciando-se que os percentuais de adição de cinza não diferem significativamente entre si.

C) Efeito da Interação CASCA-CINZA.

Os gráficos de interação casca-cinza evidenciam o comportamento das médias das distribuições em tamanho de casca, em função do percentual de adição de cinza (Figura 154).

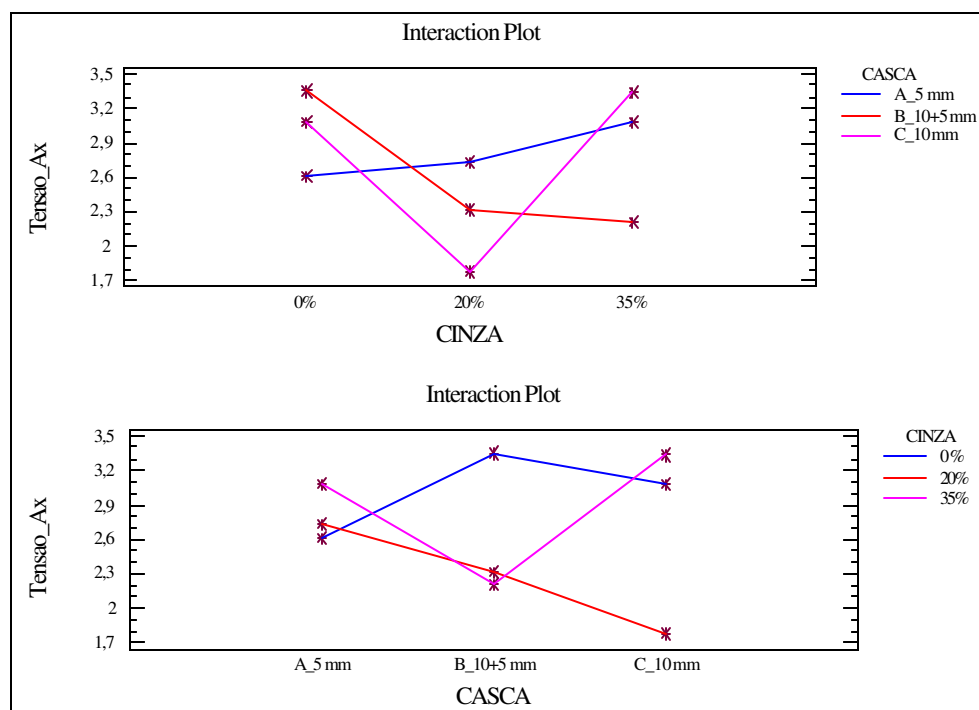


Figura 154: Interação casca-cinza - fator CASCA: elemento de análise Tensao_Ax.

D) Considerações a respeito do elemento de análise Tensão Axial.

A ausência de diferença significativa observada nos fatores CASCA (entre as distribuições em tamanho de casca) e CINZA (entre os percentuais de adição de cinza), assim como na interação CASCA-CINZA, também foram evidenciados no parâmetro Tensao_D.

E) Considerações finais sobre a avaliação do parâmetro Resistência à compressão simples das misturas.

Assim como no ensaio de tração por compressão diametral, verificou-se que entre as médias das diferentes distribuições em tamanho de casca e, entre as médias das diferentes percentuais de cinza, não se verificou a existência de diferença significativa, ou seja, o comportamento das diferentes misturas foi estatisticamente semelhante.

Contudo, destacam-se algumas particularidades, como é o caso da distribuição em tamanho de casca 5 mm, que apresentou o menor valor de média em Tensão_D (não houve diferença significativa entre as misturas), mas apresentou, em Tensão_Ax, o maior valor médio. Já a distribuição em tamanho de casca 10 mm, apresentou valores médios de Tensão_D e de Tensão_Ax, superiores à distribuição em tamanho de casca 10+5 mm.

Em relação à adição de cinza, verificou-se que o comportamento das misturas em Tensão_D e em Tensão_Ax foi semelhante, havendo o percentual de adição de 0% de cinza apresentado o maior valor de média (não houve diferença significativa entre as misturas), seguido do percentual de adição de 35% de cinza.

Na Tabela 177 são apresentados os valores dos coeficientes de correlação entre os elementos de análise empregados.

Tabela 177: Coeficientes de correlação (Pearson) entre os elementos de análise do parâmetro resistência à compressão simples.

Correlations				
	Tensao_Ax	Vel_Ax	MEAp_Ax	MOEd_Ax
Tensao_Ax		0,4479 (36) 0,0062	0,6233 (36) 0,0000	0,5689 (36) 0,0003
Vel_Ax	0,4479 (36) 0,0062		0,7175 (36) 0,0000	0,9525 (36) 0,0000
MEAp_Ax	0,6233 (36) 0,0000	0,7175 (36) 0,0000		0,8820 (36) 0,0000
MOEd_Ax	0,5689 (36) 0,0003	0,9525 (36) 0,0000	0,8820 (36) 0,0000	

Legenda
Correlation
(Sample Size)
p-value

As correlações entre os elementos de análise empregados na avaliação da resistência à compressão simples apontam que apenas na correlação entre os elementos Tensao_Ax e Vel_Ax (0,45) o valor foi inferior a 0,50.

Assim, para avaliar a resistência à compressão simples (Tensao_Ax), verificou-se que nenhum dos elementos utilizados no controle de qualidade (Vel_Ax, MEAp_Ax e MOE_Ax) pôde ser empregado como ferramenta preditiva de comportamento mecânico (Tabela 177).

4.3.2.5 Avaliação dos resultados dos ensaios mecânicos envolvendo os parâmetros Resistência à tração por Compressão Diametral e Resistência à compressão simples, dos corpos-de-prova cilíndricos.

Avaliando-se as tabelas de correlação (Tabelas 163 e 177), verificou-se a existência de similaridade no comportamento observado em relação à avaliação da resistência à tração por compressão diametral e, da resistência à compressão simples.

Ambas apontam que apenas entre os elementos Tensao_D e Vel_D (0,4068) e, Tensao_Ax e Vel_Ax (0,4479), os valores da correlação foram inferiores a 0,50.

A Tabela 178 apresenta o valor do coeficiente de correlação entre Tensao_D e Tensao_Ax.

Tabela 178: Coeficientes de correlação entre os parâmetros **Tensao_D** e **Tensao_Ax**.

Correlations		Tensao_D	Tensao_Ax
Tensao_D			0,6213 (36) 0,0001
Tensao_Ax	0,6213 (36) 0,0001		

Legenda
Correlation
(Sample Size)
p-value

Nos compósitos, atribui-se a maior correlação entre Tensao_D e Tensao_Ax ao fato de que neste tipo de mistura as elevadas adições de casca promoveriam melhorias na resistência à tração por compressão diametral, tendo-se, em contrapartida, uma redução na resistência à compressão simples.

A base para análise deste comportamento vem das misturas tipo pasta, estudadas na

FASE II, na qual pastas sem adições de casca apresentam baixa resistência à tração por compressão diametral e alta resistência à compressão simples; com a incorporação de casca, ocorre um aumento na resistência à tração por compressão diametral e uma redução na resistência à compressão simples.

A Tabela 179 exemplifica o comportamento de misturas tipo pasta e tipo compósito, para a distribuição em tamanho de casca 10 mm, para o percentual de adição de 35% de cinza e, para a interação casca-cinza.

Tabela 179: Valores dos parâmetros **Tensão_D** (MPa) e **Tensão_Ax** (MPa).

Ensaio	Casca 10 mm	Cinza - 35 %	Interação 10 mm-35 %
Pasta - Tensao_D	3,5	3,53	3,95
Pasta - Tensao_Ax	29,23	38,74	33,03
Compósito - Tensao_D	0,88	0,82	1,11
Compósito - Tensao_Ax	2,74	2,88	3,34

Evidenciou-se que para as misturas tipo pasta (adição de 7,5% de massa de casca), o valor da resistência média no ensaio de tração por compressão diametral correspondeu à cerca de 9% da resistência média à compressão simples.

No caso de compósitos (adição de 35%, 39% ou 42% de massa de casca), o valor médio das resistências à tração por compressão diametral correspondeu à cerca de 30% da resistência média à compressão simples.

Confirma-se, portanto, que com a incorporação de maior quantidade de massa de casca de arroz, ocorre um aumento na resistência à tração por compressão diametral e uma redução na resistência à compressão simples.

4.3.2.6 Evolução da Velocidade de Propagação do Pulso Ultra-Sônico (EVPU).

Nas Figuras 155 a 157 estão representados os comportamentos da EVPU de cada distribuição em tamanho de casca, em função dos diferentes percentuais de adição de cinza, no período de 0-24 horas.

Nas Figuras 158 a 160 estão representados os comportamentos da EVPU das diferentes misturas, em função do percentual de adição de cinza, no período de 0-24 horas.

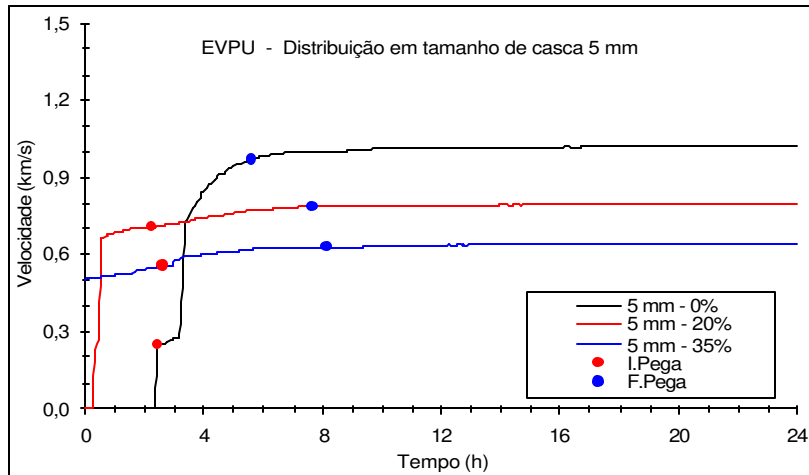


Figura 155: EVPU (0-24 h): distribuição em tamanho de casca 5 mm.

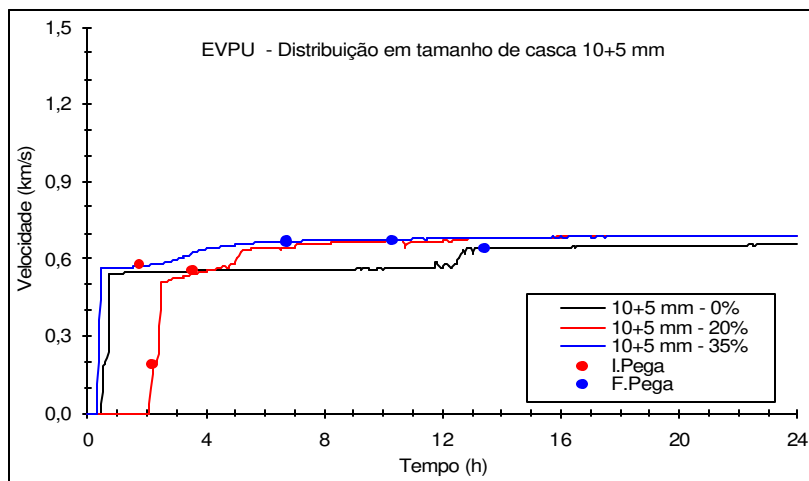


Figura 156: EVPU (0-24 h): distribuição em tamanho de casca 10+5 mm.

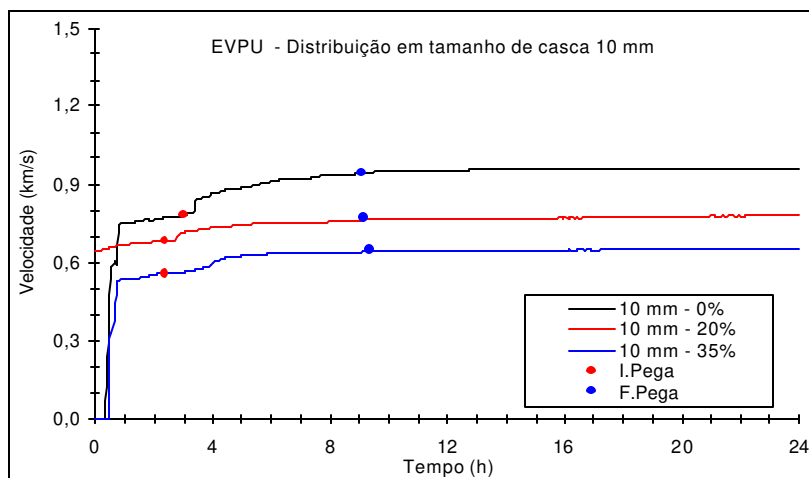


Figura 157: EVPU (0-24 h): distribuição em tamanho de casca 10 mm.

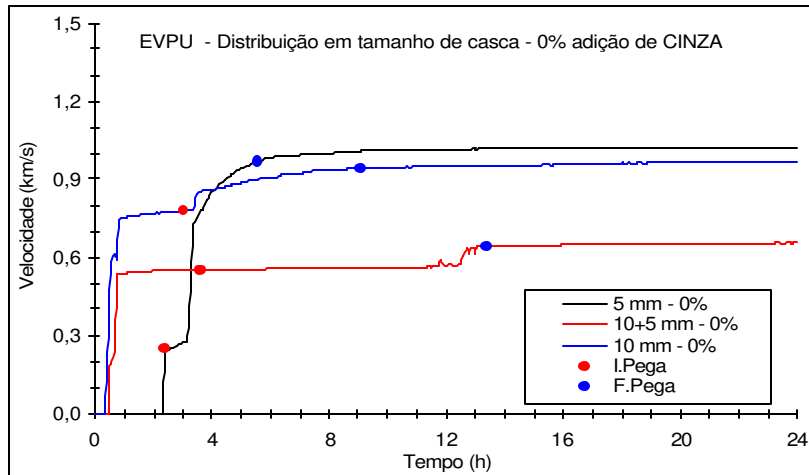


Figura 158: EVPU (0-24 h): Efeito da adição de 0% de cinza.

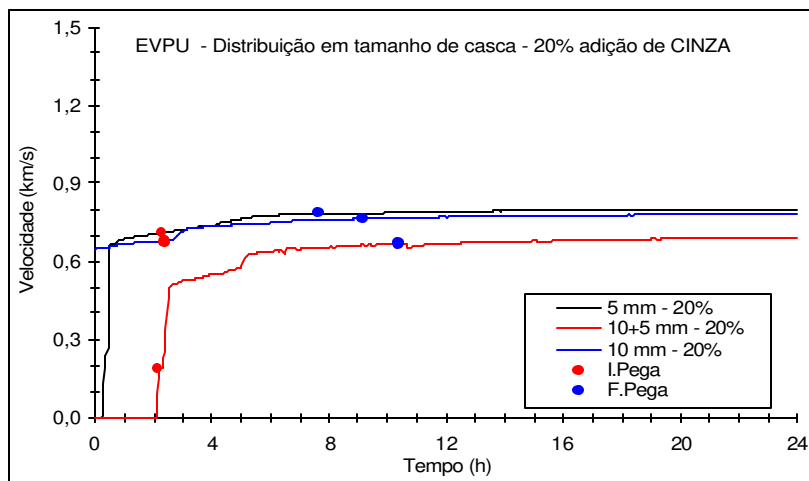


Figura 159: EVPU (0-24 h): Efeito da adição de 20% de cinza.

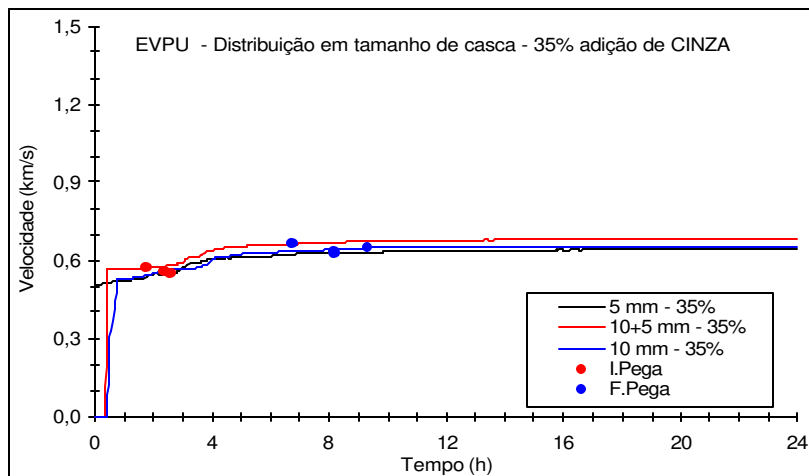


Figura 160: EVPU (0-24 h): Efeito da adição de 35% de cinza.

Considerando que IP_Vel aponta ausência de diferença significativa entre as misturas 5 mm e 10+5 mm, indica-se que seu início de pega pode ser encontrado na faixa que varia de 0,12 km/s a 0,71 km/s e, no caso do fim de pega, entre 0,62 km/s e 0,97 km/s.

Para a mistura 10 mm, o início de pega pode ser encontrado entre 0,55 km/s (10 mm-35%) e 0,78 km/s (10 mm-0%) e, o fim de pega, entre 0,64 km/s (10 mm-35%) e 0,94 km/s (10 mm-0%).

Nas Figuras 161 a 163 apresentam-se os gráficos de EVPU de cada distribuição em tamanho de casca, em função dos diferentes percentuais de adição de cinza, no período de 0-28 dias, incluindo a média dos valores medidos nos corpos-de-prova por ocasião dos ensaios de tração por compressão diametral e de compressão simples.

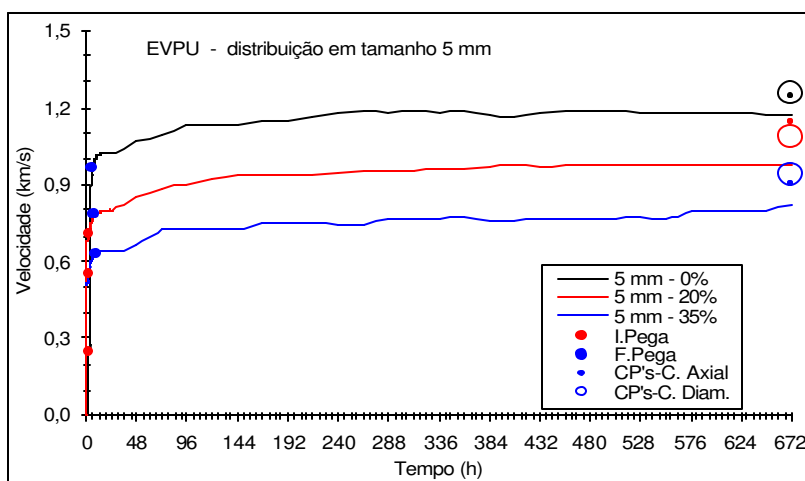


Figura 161: EVPU (0-28 dias): distribuição em tamanho de casca 5 mm.

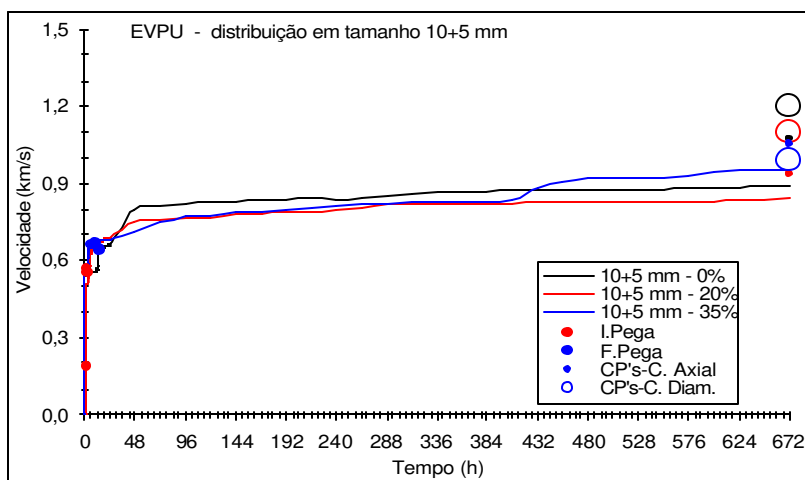


Figura 162: EVPU (0-28 dias): distribuição em tamanho de casca 10+5 mm.

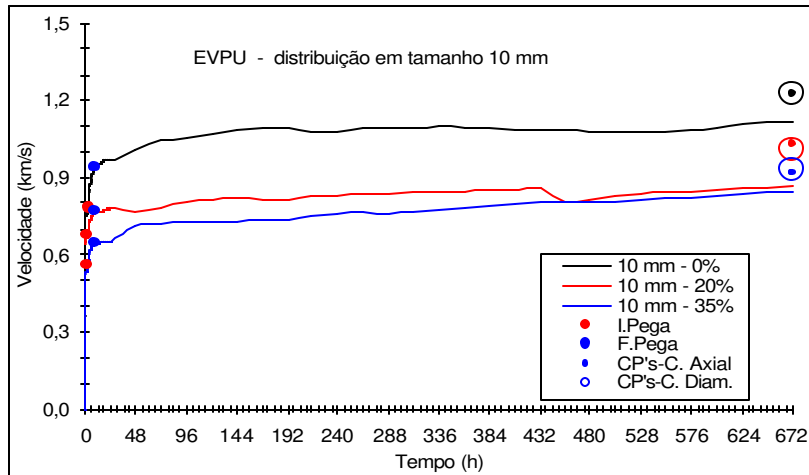


Figura 163: EVPU (0-28 dias): distribuição em tamanho de casca 10 mm.

Comparando-se o comportamento da VPU dos cilindros com aquele dos corpos-de-prova (média), ambos aos 28 dias de idade (672 h), verificou-se, através das Figuras 161 a 163, que a VPU dos corpos-de-prova foi superior à VPU do cilindro. Essa menor VPU do cilindro pode ser explicada pela atenuação sofrida pelo pulso ultra-sônico, promovida pela casca. Tal fato se torna muito mais evidente no cilindro em função de seu comprimento (cerca de 900 mm), do que nos corpos-de-prova (cerca de 100 mm).

Nas Figuras 164 a 166 estão representados os comportamentos da EVPU para os diferentes percentuais de adição de cinza, no período de 0-28 dias, incluindo-se os valores médios dos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral e à compressão simples.

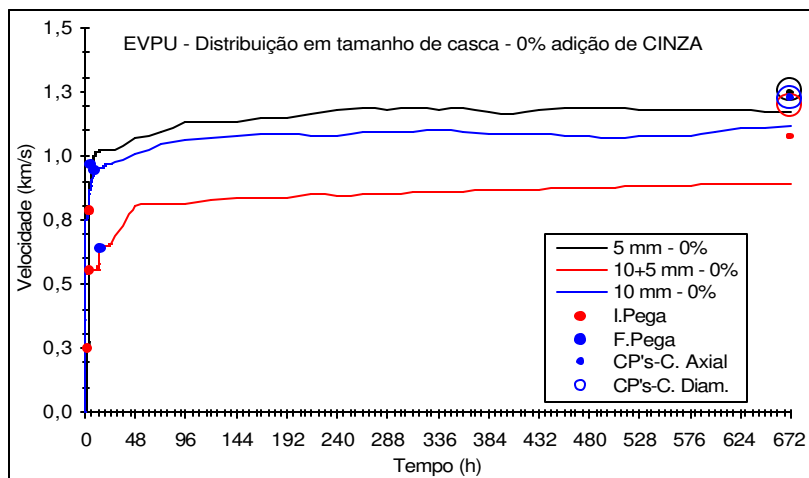


Figura 164: EVPU (0-28dias): Efeito da adição de 0% de cinza.

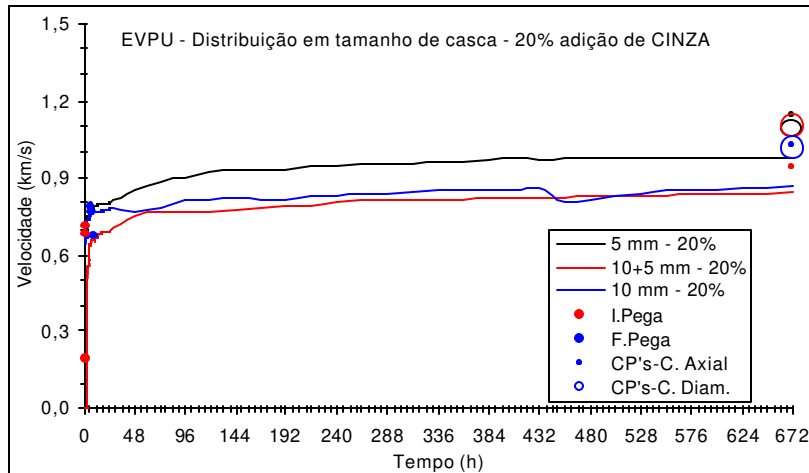


Figura 165: EVPU (0-28 dias): Efeito do percentual de adição de 20% de cinza.

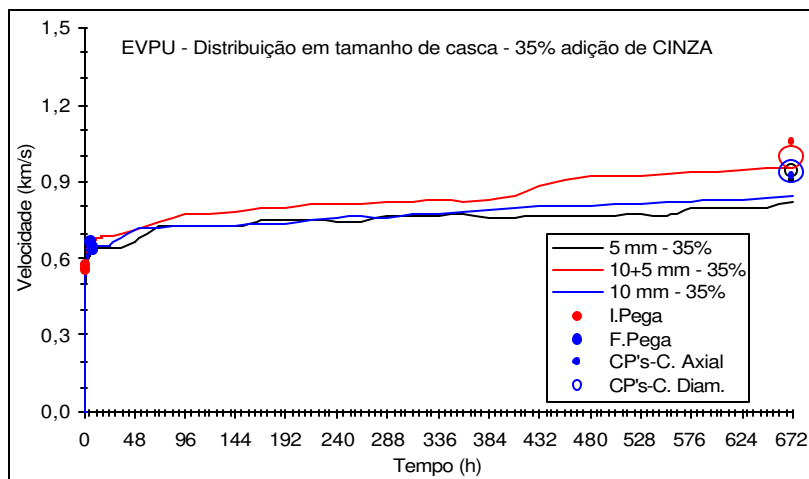


Figura 166: EVPU (0-28 dias): Efeito do percentual de adição de 35% de cinza.

Avaliando-se as Figuras 164 a 166 verificou-se que a adição de cinza promove uma maior uniformidade no comportamento das misturas, porém promovendo a redução nos valores da VPU.

A Figura 167 apresenta o gráfico de médias da **VPU** dos cilindros de compósito (0,94 km/s) e dos corpos-de-prova (1,07 km/s) deles obtidos após o corte, na idade de 28 dias. A correlação entre as duas variáveis foi de 0,65 e o coeficiente de determinação (R^2) de 43%, tendo se encontrado a expressão (10):

$$\text{Vel\_CP's} = 0,778436 + 0,761809 \cdot \text{Vel\_Cilindro} \quad (10)$$

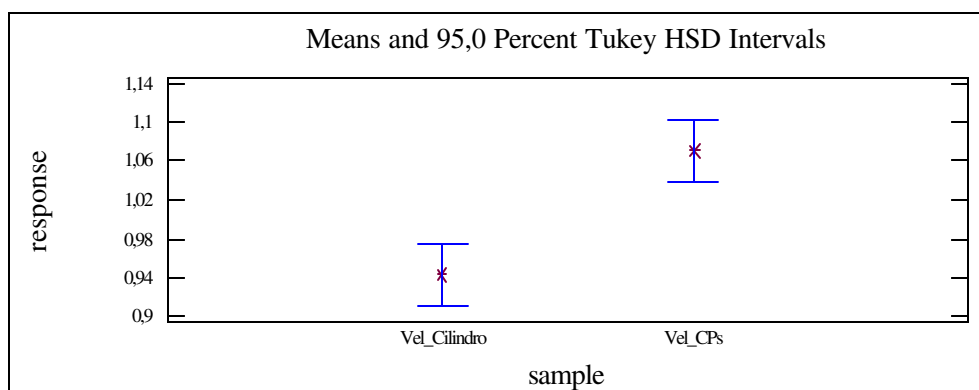


Figura 167: **VPU** aos 28 dias: Médias: cilindros e corpos-de-prova.

A Figura 168 apresenta o gráfico para o modelo de equação linear apresentado.

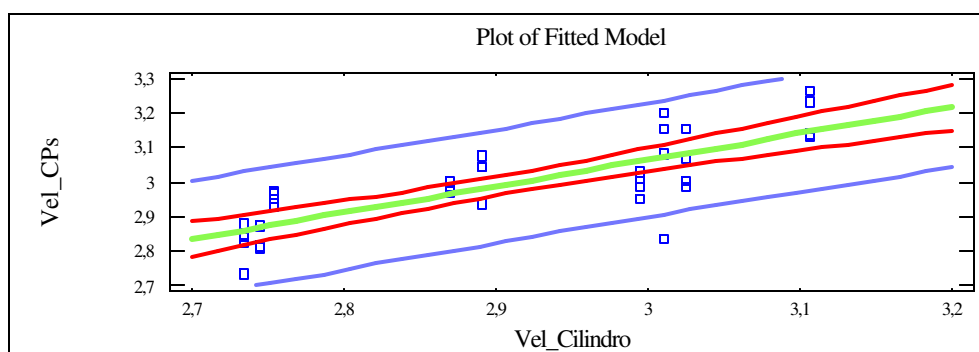


Figura 168: **Equação linear**, **Limites do intervalo de confiança (95%)** e, **Limites dos valores previstos pela equação**.

4.3.3. Considerações finais sobre a FASE III: Estudo dos COMPÓSITOS à base de casca de arroz (corpos-de-prova cilíndricos) com adições de cinza (0%, 20% ou 35%)

Entre as distribuições em tamanho de casca, a de 10 mm apresentou uma melhor compatibilidade química com o cimento, pois apresentou o maior valor de média em cada um dos parâmetros empregados na avaliação do comportamento químico, que foram a área sob a curva de evolução da temperatura de hidratação (Area), a Inclinação Máxima da curva de evolução da temperatura de hidratação (In_Max), o Ponto de Inclinação Máxima na curva de evolução da temperatura de hidratação (P_In_Max), o tempo para atingir a Temperatura Máxima da curva de evolução da temperatura de hidratação (tempo_TMax) e a Temperatura Máxima alcançada na curva de evolução da temperatura de hidratação (Temp_Max).

A Tabela 180 apresenta um resumo do comportamento dos parâmetros avaliados.

Tabela 180: **FASE III: Resumo do comportamento dos parâmetros avaliados.**

FASE III		Area	In_Max	P_In_Max	tempo_TMax	Temp_Max	U(%)	Vel_D	Tensao_D	MEAp_D	MOEd_D
Casca	5 mm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	10+5 mm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	10 mm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Cinza	0%	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	20%	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	35%	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
FASE III		IP_tempo	IP_Temp	IP_Vel	FP_tempo	FP_Temp	FP_Vel	Vel_Ax	Tensao_Ax	MEAp_Ax	MOEd_Ax
Casca	5 mm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	10+5 mm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	10 mm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Cinza	0%	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	20%	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	35%	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Distribuições em tamanho de casca marcadas com “x” em uma mesma coluna não difere m estatisticamente.

Percentuais de adição de cinza marcadas com “x” em uma mesma coluna não difere m estatisticamente.

Em relação ao desempenho mecânico, sintetizado pelas resistências à tração por compressão diametral (Tensao_D) e à compressão simples (Tensao_Ax), verificou-se que não existe diferença estatística significativa entre as diferentes distribuições em tamanho de casca, podendo-se destacar a distribuição em tamanho de casca 10 mm-35%, que apresentou o maior valor de média (1,11 MPa) na resistência à tração por compressão diametral (Tensao_D) e uma das maiores médias (3,34 MPa) na resistência à compressão simples (Tensao_Ax).

4.3.4. Comparação entre a FASE II - PASTAS e a FASE III – COMPÓSITOS.

Para efetuar esta comparação, suprimiu-se do banco de dados da FASE II, a pasta referência (PP), empregada como parâmetro de referência nas FASES I e II.

Esta supressão, da variável PP do banco de dados da FASE II, evidenciou diferenças significativas na distribuição em tamanho de casca 10+5 mm (tempo_TMax) e na adição de cinza (tempo_TMax e Temp_Max), como pode ser constatado comparando-se a Tabela 123 com a Tabela 181.

Esta supressão se fez necessária em função da necessidade de uma base comum de comparação, ou seja, apenas as distribuições em tamanho de casca 5 mm, 10+5 mm e 10 mm.

A Tabela 181 apresenta o resumo do comportamento químico observado na FASE II (suprimida a variável PP) e na FASE III, apresentando uma comparação entre as mesmas, definida como “PASTA X COMPÓSITO”, onde se evidenciou, em geral, a existência de diferenças significativas entre os dois tipos de mistura.

Tabela 181: Comparação entre a FASE II e a FASE III: **Avaliação Química:**
Pastas x Compósitos (Tukey, 95%).

FASE II x FASE III		Área		Inclinação Máxima		Ponto de In. Máxima		tempo p/ T. Máxima		T. Máxima	
		Pasta	Compósito	Pasta	Compósito	Pasta	Compósito	Pasta	Compósito	Pasta	Compósito
Casca	5 mm	X		X		X		X		X	
	10+5 mm	X		X		X		X		X	
	10 mm	X		X		X		X		X	
Cinza	0%	X		X		X		X		X	
	20%	X		X		X		X		X	
	35%	X		X		X		X		X	
Pasta X Compósito			X		X		X		X		X
		X		X		X		X		X	

Distribuições em tamanho de casca marcadas com “x” em uma mesma coluna não difere m estatisticamente.

Percentuais de adição de cinza marcados com “x” em uma mesma coluna não difere m estatisticamente.

Pasta X Compósito marcados com “x” em uma mesma linha não difere m estatisticamente.

Em geral, verificou-se que, no caso das misturas tipo pasta, a adição de casca não afetou diretamente os parâmetros térmicos (área sob a curva, inclinação máxima, ponto de inclinação máxima e temperatura máxima). Destaca-se que o parâmetro tempo necessário para atingir a temperatura máxima (tempo_TMax) não evidenciou a existência de diferença estatística significativa (Tukey, 95%) entre o comportamento das pastas e o comportamento dos compósitos.

No caso das misturas tipo compósito, a adição de casca com menor quantidade de finos (mistura 10 mm) apresentou os melhores resultados em desempenho térmico, destacando, contudo, que no caso do tempo necessário para atingir a temperatura máxima, quanto maior foi o valor do parâmetro tempo_TMax, menos adequado foi considerado o comportamento. Tal fato deve ser avaliado cuidadosamente, uma vez que os formatos das curvas de evolução da temperatura de hidratação não apresentaram, em geral, um comportamento considerado como “normal” (Figura 40), em função das oscilações observadas e apresentadas na Figura 137.

Avaliando-se o efeito da adição de cinza nas misturas tipo pasta, verificou-se que sua adição em percentual elevado (35% de adição) promoveu uma redução nos parâmetros Área e tempo_TMax. No caso das misturas tipo compósito, a adição de 35% de cinza promoveu redução nos parâmetros In_Max e P_In_Max. Considerou-se que o efeito da adição da massa de cinza ao sistema como sendo a principal causa da redução nos parâmetros avaliados, podendo também ocorrer uma possível adsorção de compostos químicos do cimento, dada a característica adsorviva da cinza, atribuída ao seu elevado teor de carbono, cujas melhorias na compatibilidade química foram destacadas na Figura 9.

A avaliação química das misturas, através das curvas de evolução do calor de hidratação, possibilitou destacar a contribuição de cada um dos materiais empregados nas misturas, o que é melhor evidenciado em misturas do tipo pasta, que apresentam um comportamento muito mais apropriado por apresentarem maior uniformidade nos parâmetros de avaliação.

No caso dos compósitos, a percepção da influência de cada um dos materiais pode não ser bem interpretada, ou mesmo bem definida, em função dos altos teores de casca e de cinza empregados.

Como as avaliações químicas estão associadas à evolução do processo de hidratação, estão limitadas ao período de tempo de 24 h, de modo que as conclusões obtidas referem-se apropriadamente a maior ou a menor interferência química dos materiais empregados nas misturas com o cimento nas primeiras idades. As conseqüências do comportamento químico podem refletir no desempenho mecânico nas idades mais avançadas, o que não foi avaliado no presente trabalho.

Destaca-se que, em geral, as interferências observadas em pastas situam-se na fase inicial do processo de hidratação (antes do início de pega), uma vez que a cinética do processo químico no seu trecho máximo (Inclinação Máxima) se desenvolveu de forma considerada normal, tendo como base a ausência de diferença significativa entre as misturas, no parâmetro Inclinação Máxima (In_Max).

No caso dos compósitos, as interferências podem ser observadas em várias etapas do processo de hidratação (dentro do período avaliado de 24 h), de modo que não há uma região específica que mereça ser observada. Os reflexos desta maior ou menor interferência química poderiam ser evidenciados através dos ensaios mecânicos, aos 28 dias de idade, se houvesse uma forma de correlacionar os ensaios, o que não foi abordado no presente trabalho.

Na Tabela 182 apresenta-se o resumo do comportamento mecânico observado na FASE II e na FASE III, apresentando-se uma comparação entre as fases, definida como “PASTA X COMPÓSITO”, podendo se evidenciar a existência de diferenças significativas entre os dois tipos de mistura.

Nas misturas tipo pasta, verificou-se que o tempo para o Início de Pega (IP_tempo) e o tempo para o Fim de Pega (FP_tempo) foram inferiores aos referidos tempos, relacionados aos compósitos. Considera-se que o melhor comportamento está relacionado ao menor tempo

necessário para a ocorrência do início de pega, ou para o fim de pega. Nos demais parâmetros, a pasta se destaca por apresentar os maiores valores, diferindo significativamente dos compósitos.

Tabela 182: Comparação entre a FASE II e a FASE III: **Avaliação Físico-Mecânica:**
Pastas x Compósitos (Tukey, 95%).

FASE II x FASE III		IP tempo		IP Temp		IP Vel		Vel D		Tensao D		MEAp D		MOEd D	
		Pasta	Compósito	Pasta	Compósito	Pasta	Compósito	Pasta	Compósito	Pasta	Compósito	Pasta	Compósito	Pasta	Compósito
Casca	5 mm	X		X		X		X		X		X		X	
	10+5 mm	X		X		X		X		X		X		X	
	10 mm	X		X		X		X		X		X		X	
Cinza	0%		X		X		X		X		X		X		X
	20%	X		X		X		X		X		X		X	
	35%	X		X		X		X		X		X		X	
Pasta X Compósito		X		X		X		X		X		X		X	
			X		X		X		X		X		X		X
FASE II x FASE III		FP tempo		FP Temp		FP Vel		Vel Ax		Tensao Ax		MEAp Ax		MOEd Ax	
		Pasta	Compósito	Pasta	Compósito	Pasta	Compósito	Pasta	Compósito	Pasta	Compósito	Pasta	Compósito	Pasta	Compósito
Casca	5 mm		X		X		X		X		X		X		X
	10+5 mm	X		X		X		X		X		X		X	
	10 mm	X		X		X		X		X		X		X	
Cinza	0%		X		X		X		X		X		X		X
	20%	X		X		X		X		X		X		X	
	35%	X		X		X		X		X		X		X	
Pasta X Compósito		X		X		X		X		X		X		X	
			X		X		X		X		X		X		X

Distribuições em tamanho de casca marcadas com “x” em uma mesma coluna não difere m estatisticamente.

Percentuais de adição de cinza marcados com “x” em uma mesma coluna não difere m estatisticamente.

Pasta X Compósito marcados com “x” em uma mesma linha não difere m estatisticamente.

O fato de as misturas tipo pasta apresentarem comportamento superior (maior valor médio) ao das misturas tipo compósito já era esperado, uma vez que a adição de elevados teores de casca (compósitos) diminui a quantidade de aglomerante e, conseqüentemente, há uma redução no desempenho mecânico. O melhor comportamento está relacionado a melhor mistura, que pode ser traduzida como o máximo de adição de casca-cinza para uma resistência considerada como mínima, o que depende da aplicação da mistura.

Nas misturas tipo pasta, verificou-se que uma maior presença de partículas de menor dimensão (mistura 5 mm) promoveu aumento nos parâmetros tempo para o início da pega (IP_tempo), tempo para o fim da pega (FP_tempo) e no tempo para atingir a temperatura máxima (tempo_TMax). No caso das misturas tipo compósito, a adição de casca com menor quantidade de finos (mistura 10 mm) apresentou os melhores resultados, exceto para os parâmetros IP_tempo e FP_tempo.

Nas misturas tipo pasta, a adição de cinza em percentual de 35% de adição promoveu uma redução nos parâmetros IP_tempo, FP_tempo e IP_Temp, ao passo que, no caso das misturas tipo compósito, a redução foi observada nos parâmetros IP_tempo e FP_tempo.

Entre as médias dos corpos-de-prova das misturas tipo pasta, ensaiados à tração por

compressão diametral (Tensao_D), não se verificou a existência de diferença significativa entre as distribuições em tamanho de casca empregadas (5 mm, 10+5 mm e 10 mm).

No caso dos elementos de análise associados aos corpos-de-prova ensaiados à tração por compressão diametral (Vel_D, MEAp_D e MOEd_D), verificou-se que o material 5 mm apresentou um comportamento mecânico superior, diferindo significativamente dos demais, o que se atribuiu à melhor distribuição das partículas da casca na pasta de cimento, com uma reduzida formação de vazios ou macroporos, atribuídos ao formato da casca.

Em relação ao efeito da adição de cinza no comportamento mecânico das misturas tipo pasta, verificou-se que teores de 20% e de 35% promoveram melhorias significativas no seu comportamento (Figura 169), sendo superiores ao comportamento das pastas sem adição de cinza.

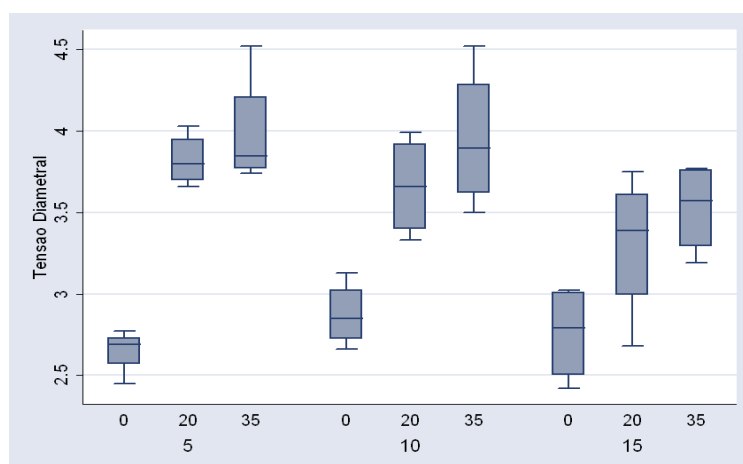


Figura 169: Pastas: Tensão Diametral (MPa): gráfico de caixas – níveis de cinza dentro do tipo de casca (5 = 5 mm; 10 = 10 mm e 15 = 10+5 mm).

Fonte: EstatJr-UNICAMP (Maia e Santos).

No caso dos corpos-de-prova de pasta ensaiados à compressão simples (parâmetro: Tensao_Ax) verificou-se que o material 5 mm apresentou um comportamento mecânico superior, diferindo significativamente dos demais, fato este atribuído à reduzida formação de vazios.

Em relação aos elementos de análise associados aos corpos-de-prova ensaiados à compressão simples (Vel_Ax, MEAp_Ax e MOEd_Ax), verificou-se que a mistura 5 mm apresentou comportamento mecânico superior, diferindo significativamente das demais.

Entre as médias dos corpos-de-prova das misturas tipo compósito, ensaiados à tração

por compressão diametral (Tensao_D), não se verificou a existência de diferença significativa entre as distribuições em tamanho de casca empregadas (5 mm, 10+5 mm e 10 mm). No caso dos elementos de análise associados a estes corpos-de-prova (Vel_D, MEAp_D e MOEd_D), não se verificou uma tendência clara em seu comportamento, mas os resultados sugerem que se considere a diferença no comportamento como sendo não significativa, principalmente se considerar-se que o resultado do parâmetro MOEd_D depende dos parâmetros Vel_D e MEAp_D.

No caso dos corpos-de-prova de compósitos ensaiados à compressão simples (Tensao_Ax), verificou-se que não há diferença estatística significativa entre as distribuições em tamanho de casca empregadas (5 mm, 10+5 mm e 10 mm) ou entre os percentuais de adição de cinza (20% e 35%).

No caso dos parâmetros associados a estes corpos-de-prova (Vel_Ax, MEAp_Ax e MOEd_Ax), verificou-se que o material sem adição de cinza apresentou comportamento mecânico superior, diferindo significativamente dos demais, o que indica que estes parâmetros apresentaram redução em seus valores com a adição de cinza.

Os gráficos do comportamento mecânico das pastas e dos compósitos, apresentados na Figura 170, destacam os parâmetros Tensão (Diametral e Axial), VPU (Diametral e Axial) e Massa Específica Aparente (Diametral e Axial), em conjunto com o consumo de cimento.

Destaca-se que, no caso do parâmetro Tensao_Ax, o fato de não se constatar diferença significativa entre as adições pode ser considerado como sendo um indicador de melhorias, pois com o acréscimo de massa (adição de cinza) ao sistema, promoveu-se redução no consumo de cimento.

Esta redução no consumo de cimento pode não estar associada, necessariamente, a uma redução da resistência, visto que não se verificou diferença estatisticamente significativa nos parâmetros Tensao_D e Tensao_Ax, o que indica a possibilidade de utilizar-se adições de cinza em percentuais superiores àqueles estudados.

Comparando-se os dois tipos de mistura (pastas e compósitos), destaca-se que na pasta de cimento o comportamento é conhecido e coerente, com um referencial de comportamento, possibilitando a detecção de variabilidades e determinação dos efeitos isolados de cada fator.

No caso dos compósitos, avalia-se o comportamento final da mistura resultante da

interação dos materiais cimento-casca-cinza (mesmo que não seja significativa), o que pode não permitir uma distinção clara do efeito isolado de cada fator (componentes da mistura).

Desta forma, verificou-se que ambos os procedimentos se complementam, permitindo efetuarem-se avaliações mais precisas do comportamento do cimento, influenciado pelas adições de casca e da cinza.

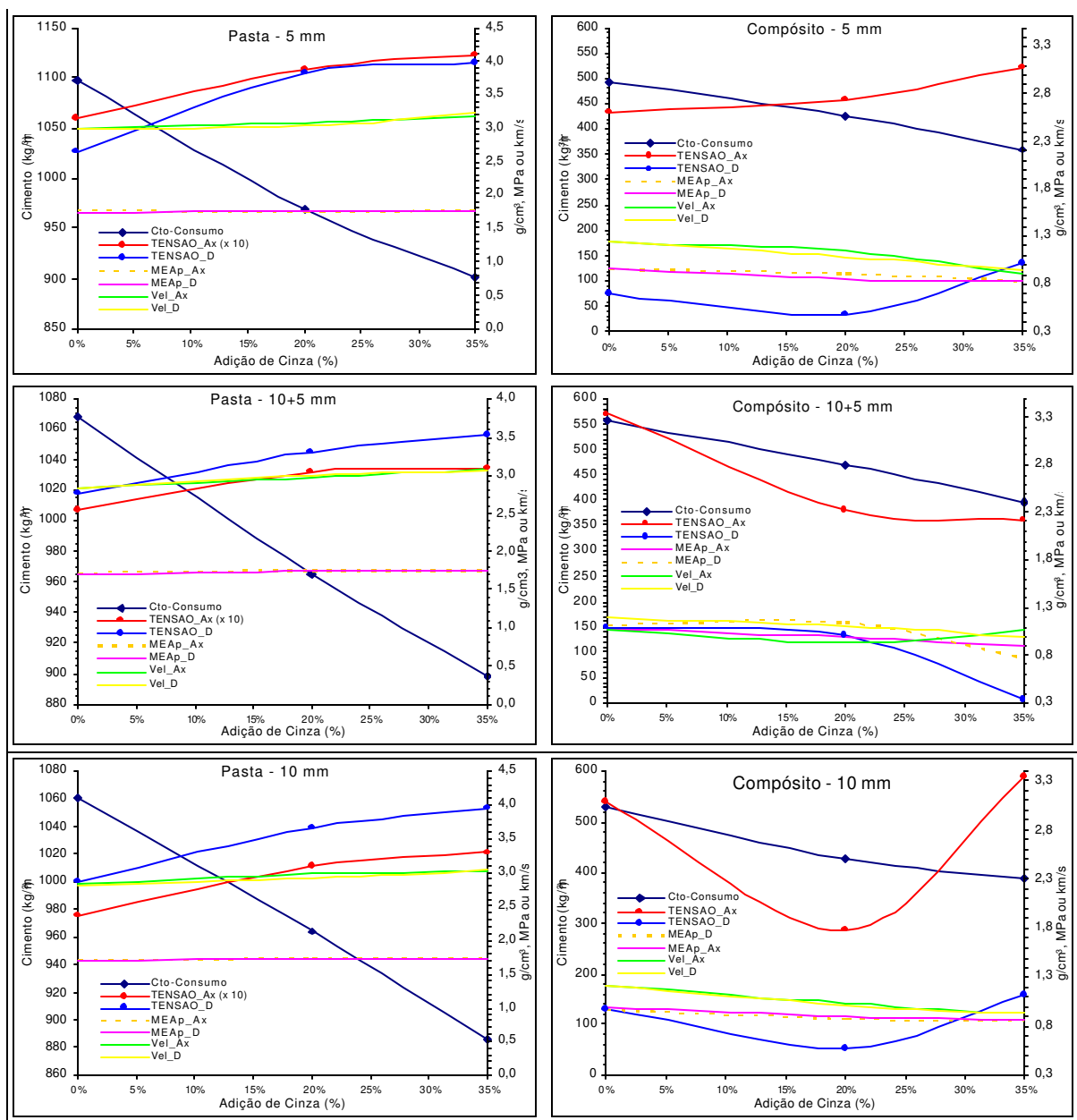


Figura 170: Gráficos dos parâmetros Tensão (MPa), Massa Específica Aparente (g/cm^3) e VPU (km/s), em conjunto com o consumo de cimento (kg/m^3).

4.4. Resultados dos ensaios da FASE IV – Estudo das PLACAS prensadas de COMPÓSITO à base de casca de arroz (distribuição em tamanho das partículas: 5 mm (42% de casca), 10+5 mm (39% de casca) e 10 mm (35% de casca)) com adições de cinza (0%, 20% ou 35%).

Nesta fase são apresentados os resultados das avaliações dos corpos-de-prova extraídos das placas prensadas, ensaiados em flexão estática, compressão paralela à superfície e em absorção e variação dimensional, nas condições “seca” (umidade natural) ou “úmida” (imersão em água por 24 h – ensaio aos 29 dias de idade).

4.4.1 Avaliação dos corpos-de-prova extraídos das placas – ensaio de flexão estática.

A Tabela 183 apresenta as médias dos resultados dos ensaios de flexão estática efetuados nos corpos-de-prova extraídos das placas prensadas da mistura **5 mm**, nas condições “seca” e “úmida”, através da qual verificou-se que corpos-de-prova ensaiados na condição úmida apresentaram valores de média de Tensão na Ruptura (T_R) que podem chegar a ser 43,2% inferiores aos valores de média dos corpos-de-prova ensaiados na condição seca (adição de 20% de cinza).

Tabela 183: FASE IV - Ensaio de flexão estática: distribuição em tamanho de casca: 5 mm - condições “seca” e “úmida” (média de três repetições, em MPa).

Ensaio de Flexão Estática: 5 mm			Condição dos corpos-de-prova no ensaio			
			SECA (Médias)		ÚMIDA (Médias)	
			Gráfica	Aritmética	Gráfica	Aritmética
35%	$MOE_{LP} =$	$P_{LP}L^3 / 4fbh^3$	3771	3917	3385	3318
	$T_{LP} =$	$3 \cdot P_{LP}L / 2bh^2$	2,16	2,15	1,23	1,40
	$T_R =$	$3 \cdot P_{RL} / 2bh^2$	3,74	4,00	2,70	2,71
20%	$MOE_{LP} =$	$P_{LP}L^3 / 4fbh^3$	2940	3298	1837	2375
	$T_{LP} =$	$3 \cdot P_{LP}L / 2bh^2$	2,85	2,31	1,38	1,32
	$T_R =$	$3 \cdot P_{RL} / 2bh^2$	3,95	4,00	2,04	2,27
0%	$MOE_{LP} =$	$P_{LP}L^3 / 4fbh^3$	2951	2964	2273	2619
	$T_{LP} =$	$3 \cdot P_{LP}L / 2bh^2$	2,50	2,59	1,61	1,61
	$T_R =$	$3 \cdot P_{RL} / 2bh^2$	3,69	3,91	2,46	2,66

OBS.: MOE_{LP} = Módulo de Elasticidade no Limite de Proporcionalidade; T_{LP} = Tensão no Limite de Proporcionalidade; T_R = Tensão na Ruptura; P = Carga (kgf); L = Vão entre apoios (cm); f = Deslocamento do cutelo (cm); b = Largura (cm); h = espessura da placa (cm).

A Figura 171 apresenta os gráficos dos ensaios de flexão estática efetuados nos corpos-de-prova extraídos das placas prensadas da mistura 5 mm, destacando-se o resultado do desempenho mecânico: Tensão de Ruptura (em MPa), a Tensão no Limite de Proporcionalidade (em MPa) e Módulo de Elasticidade (em MPa).

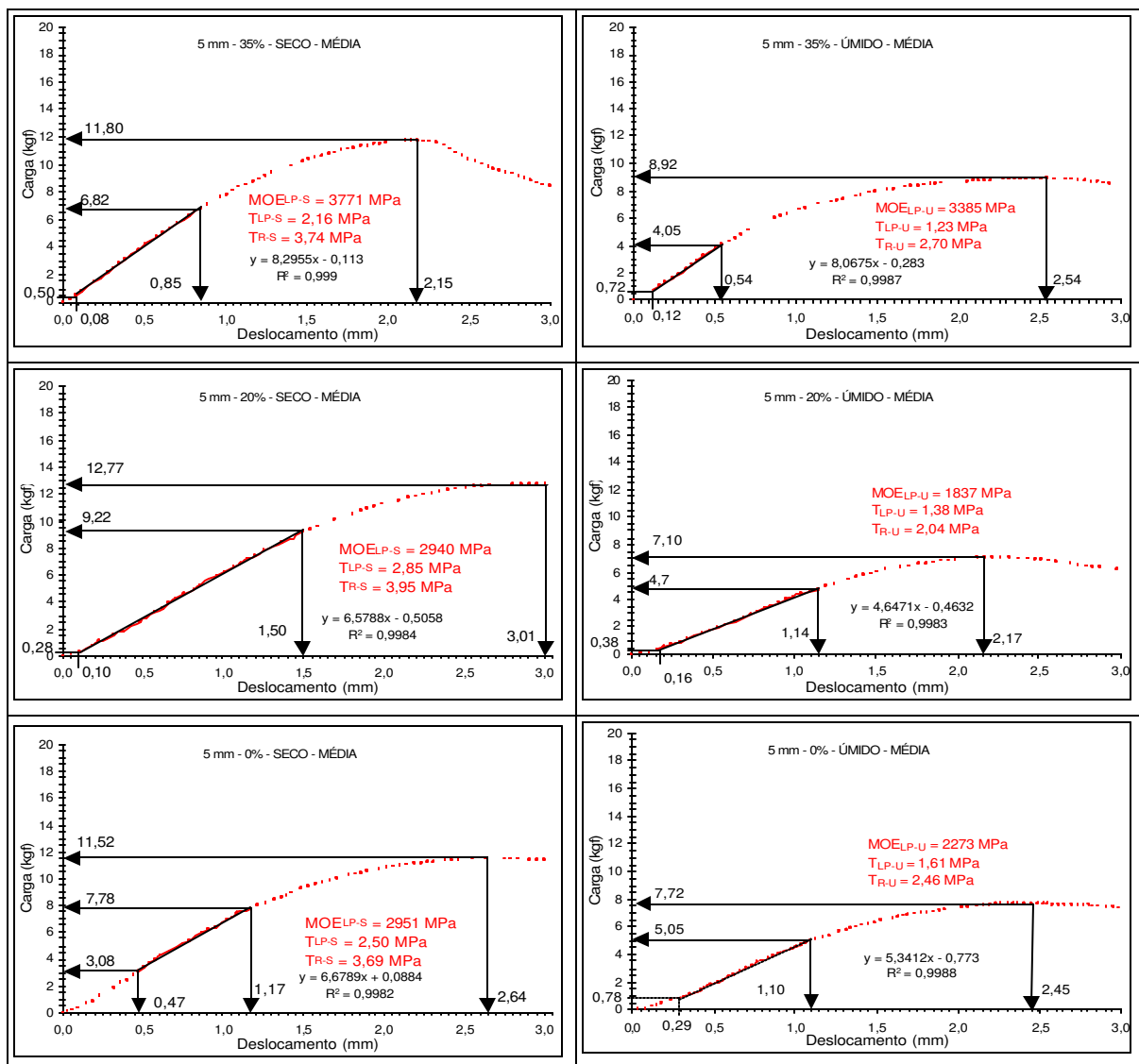


Figura 171: Ensaio de flexão estática: mistura 5 mm, nas condições “seca” e “úmida”.
OBS.: MOE_{LP} = Módulo de Elasticidade no Limite de Proporcionalidade; T_{LP} = Tensão no Limite de Proporcionalidade; T_R = Tensão na Ruptura.

Cada gráfico representa a média de três outros gráficos, sendo construído com base na média dos valores (cargas e deslocamentos do cutelo/cabeçote da máquina de ensaios) por unidade de tempo (intervalo entre aquisições).

A equação de regressão linear representa o trecho “reto” (trecho de proporcionalidade) da curva onde se considerou que a mistura cimento-cinza-casca desenvolveu um “trabalho” sem evidenciar alterações de comportamento da estrutura do material.

Na Tabela 184 são apresentadas as médias dos resultados dos ensaios de flexão estática efetuados nos corpos-de-prova extraídos das placas prensadas da mistura **10+5 mm**, nas condições “seca” e “úmida”, tendo se verificado que corpos-de-prova ensaiados na condição úmida apresentaram valores de média de Tensão na Ruptura (T_R) que podem ser até 47,5% inferiores aos dos corpos-de-prova ensaiados na condição seca (adição de 20% de cinza).

Tabela 184: **FASE IV - Ensaio de flexão estática**: distribuição em tamanho de casca: **10+5 mm** - condições “seca” e “úmida” (média de três repetições, em MPa).

Ensaio de Flexão Estática: 10+5 mm			Condição dos corpos-de-prova no ensaio			
			SECA (Médias)		ÚMIDA (Médias)	
			Gráfica	Aritmética	Gráfica	Aritmética
35%	$MOE_{LP} =$	$P_{LP}L^3 / 4fbh^3$	4057	4216	3149	3228
	$T_{LP} =$	$3 \cdot P_{LP}L / 2bh^2$	2,18	2,68	1,08	1,63
	$T_R =$	$3 \cdot P_{RL} / 2bh^2$	3,83	4,21	2,58	2,57
20%	$MOE_{LP} =$	$P_{LP}L^3 / 4fbh^3$	2797	2718	1487	1905
	$T_{LP} =$	$3 \cdot P_{LP}L / 2bh^2$	2,07	2,46	1,29	1,24
	$T_R =$	$3 \cdot P_{RL} / 2bh^2$	3,57	3,68	1,83	1,93
0%	$MOE_{LP} =$	$P_{LP}L^3 / 4fbh^3$	3070	3992	2606	3189
	$T_{LP} =$	$3 \cdot P_{LP}L / 2bh^2$	3,25	2,88	1,50	1,64
	$T_R =$	$3 \cdot P_{RL} / 2bh^2$	4,65	4,92	2,20	2,71

OBS.: MOE_{LP} = Módulo de Elasticidade no Limite de Proporcionalidade; T_{LP} = Tensão no Limite de Proporcionalidade; T_R = Tensão na Ruptura; P = Carga (kgf); L = Vão entre apoios (cm); f = Deslocamento do cutelo (cm); b = Largura (cm); h = espessura da placa (cm).

Na Figura 172 são apresentados os gráficos dos ensaios de flexão estática efetuados nos corpos-de-prova extraídos das placas prensadas da mistura 10+5 mm, onde se destacou o resultado do desempenho mecânico quanto a Tensão de Ruptura (MPa), a Tensão no Limite de Proporcionalidade (MPa) e Módulo de Elasticidade (MPa).

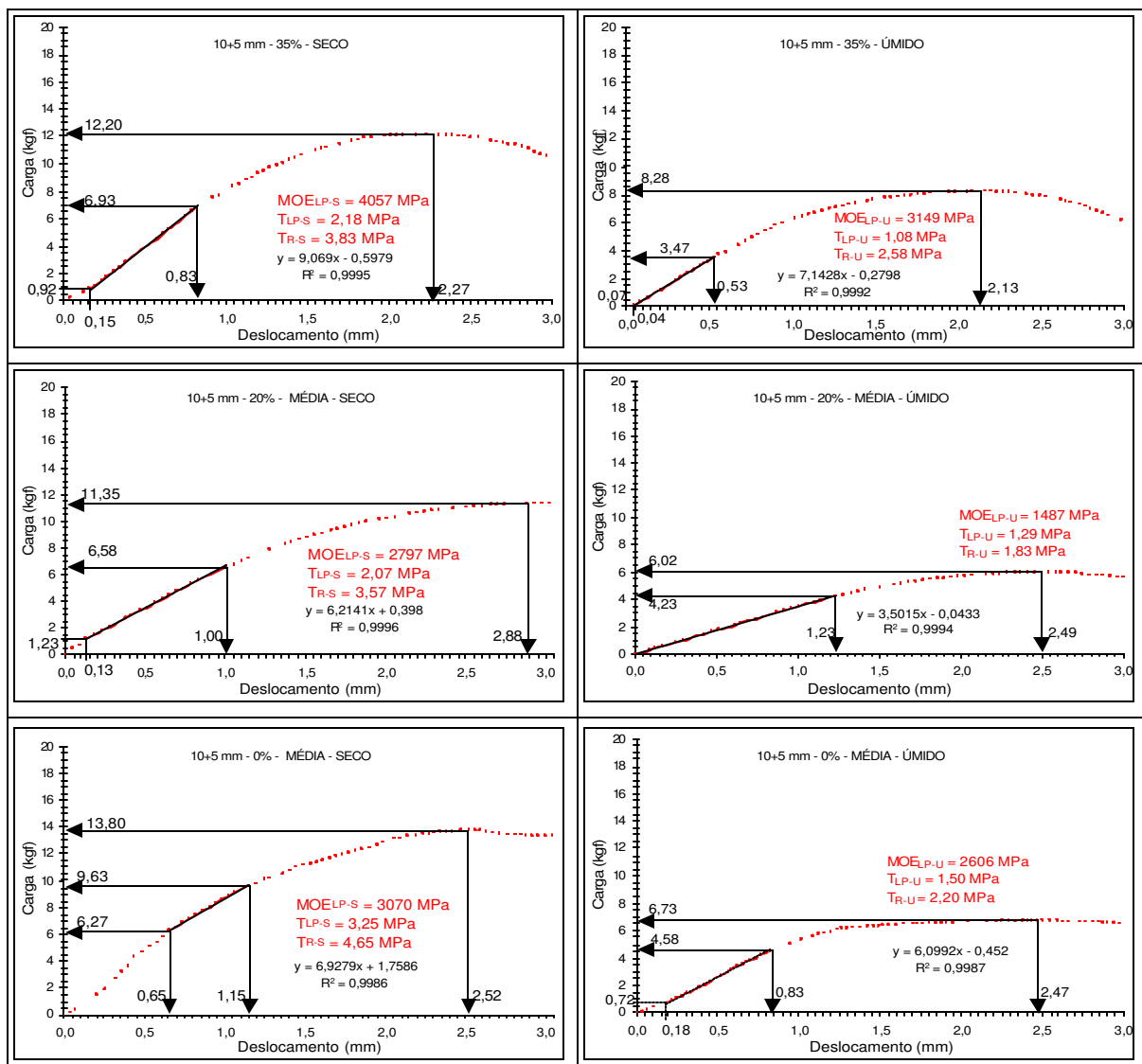


Figura 172: Ensaio de flexão estática: mistura 10+5 mm, nas condições “seca” e “úmida”.
OBS.: MOE_{LP} = Módulo de Elasticidade no Limite de Proporcionalidade; T_{LP} = Tensão no Limite de Proporcionalidade; T_R = Tensão na Ruptura.

A Figura 173 apresenta os gráficos dos ensaios de flexão estática efetuados nos corpos-de-prova extraídos das placas prensadas da mistura **10 mm**, onde se destacou o resultado do desempenho mecânico quanto a Tensão de Ruptura (MPa), a Tensão no Limite de Proporcionalidade (MPa) e Módulo de Elasticidade (MPa).

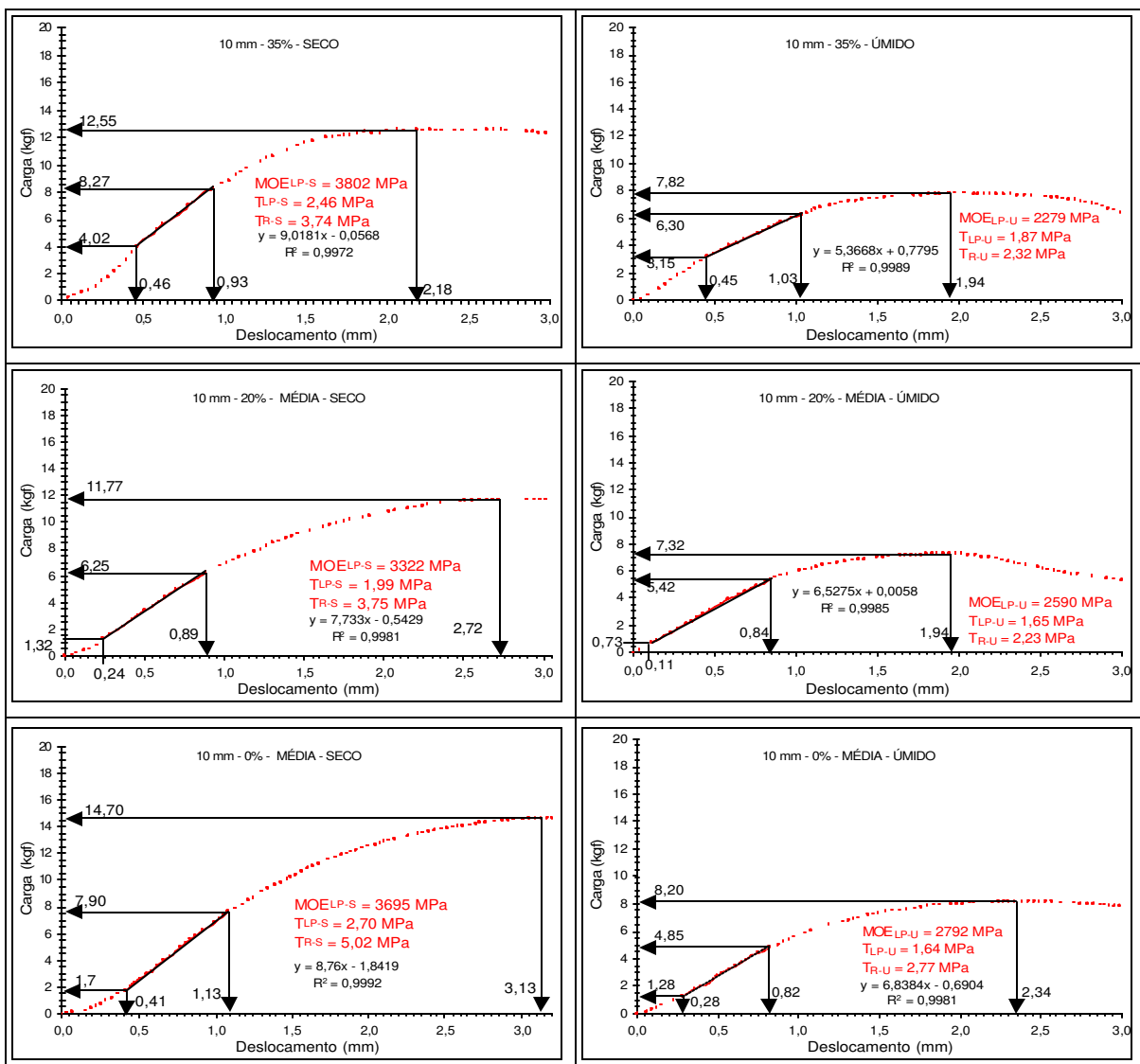


Figura 173: Ensaio de flexão estática: mistura 10 mm, nas condições “seca” e “úmida”.
OBS.: MOE_{LP} = Módulo de Elasticidade no Limite de Proporcionalidade; T_{LP} = Tensão no Limite de Proporcionalidade; T_R = Tensão na Ruptura.

A Tabela 185 apresenta as médias dos resultados dos ensaios de flexão estática efetuados nos corpos-de-prova extraídos das placas prensadas da mistura 10 mm, nas condições “seca” e “úmida”. Destaca-se que corpos-de-prova ensaiados na condição úmida apresentaram valores de média de Tensão na Ruptura (T_R) que podem chegar a ser 44,4% inferiores aos dos corpos-de-prova ensaiados na condição seca (adição de 0% de cinza).

Tabela 185: **FASE IV - Ensaio de flexão estática**: distribuição em tamanho de casca: **10 mm** - condições “seca” e “úmida” (média de três repetições, em MPa).

Ensaio de Flexão Estática: 10 mm			Condição dos corpos-de-prova no ensaio			
			SECA (Médias)		ÚMIDA (Médias)	
			Gráfica	Aritmética	Gráfica	Aritmética
35%	$MOE_{LP} =$	$P_{LP}L^3 / 4fbh^3$	3802	3796	2279	2593
	$T_{LP} =$	$3 \cdot P_{LP}L / 2bh^2$	2,46	2,79	1,87	1,66
	$T_R =$	$3 \cdot P_{RL} / 2bh^2$	3,74	4,17	2,32	2,34
20%	$MOE_{LP} =$	$P_{LP}L^3 / 4fbh^3$	3322	2923	2590	3015
	$T_{LP} =$	$3 \cdot P_{LP}L / 2bh^2$	1,99	2,52	1,65	1,34
	$T_R =$	$3 \cdot P_{RL} / 2bh^2$	3,75	3,97	2,23	2,29
0%	$MOE_{LP} =$	$P_{LP}L^3 / 4fbh^3$	3695	3705	2792	3378
	$T_{LP} =$	$3 \cdot P_{LP}L / 2bh^2$	2,70	3,23	1,64	1,76
	$T_R =$	$3 \cdot P_{RL} / 2bh^2$	5,02	5,09	2,77	2,83

OBS.: MOE_{LP} = Módulo de Elasticidade no Limite de Proporcionalidade; T_{LP} = Tensão no Limite de Proporcionalidade; T_R = Tensão na Ruptura; P = Carga (kgf); L = Vão entre apoios (cm); f = Deslocamento do cutelo (cm); b = Largura (cm); h = espessura da placa (cm).

A seguir, são apresentados os resultados das avaliações estatísticas realizadas para cada elemento empregado na caracterização do comportamento mecânico das placas ensaiadas à flexão estática.

4.4.1.1 Avaliação do Módulo de Elasticidade no Limite de Proporcionalidade (MOE_{LP} ou MOE_{LP} , em MPa) em corpos-de-prova extraídos das PLACAS e ensaiados à Flexão Estática.

Para obter os gráficos das análises estatísticas com apresentação das variáveis obedecendo a ordem da menor para a maior dimensão das partículas, as misturas foram nomeadas com as letras de A, (A_5mm), B (B_10+5 mm) e C (C_10 mm).

Na Tabela 186 apresenta-se a análise da variância (ANOVA) para o elemento de análise Módulo de Elasticidade no limite de proporcionalidade (MOE_{LP} ou MOE_{LP} , em MPa), onde se verificou que apenas os fatores CINZA e CONDIÇÃO dos corpos-de-prova no ensaio (seca ou úmida) apresentaram diferença estatisticamente significativa (p-valor < 0,05).

Em seguida, são apresentados os resultados da avaliação da casca, da cinza, da condição dos corpos-de-prova no ensaio e, da interação casca-cinza-condição.

Tabela 186: ANOVA do elemento de análise Módulo de Elasticidade no Limite de Proporcionalidade (**MOE_LP**).

Analysis of Variance for MOE_LP - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	240576,0	2	120288,0	0,26	0,7720
B:CINZA	6,31763E6	2	3,15882E6	6,85	0,0030
C:Condicao	5,81938E6	1	5,81938E6	12,61	0,0011
INTERACTIONS					
AB	4,55556E6	4	1,13889E6	2,47	0,0621
AC	347937,0	2	173969,0	0,38	0,6886
BC	511963,0	2	255982,0	0,55	0,5790
ABC	1,08337E6	4	270842,0	0,59	0,6741
RESIDUAL	1,66114E7	36	461428,0		
TOTAL (CORRECTED)	3,54878E7	53			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A) Efeito da adição de CASCA.

A Tabela 187 apresenta a análise das médias para o fator CASCA, que evidencia a falta de diferença significativa entre as diferentes distribuições em tamanho de casca.

Tabela 187: Análise do fator CASCA: elemento de análise **MOE_LP** dos corpos-de-prova ensaiados à flexão estática: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for MOE_LP by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
A_5 mm	18	3081,89	X
B_10+5 mm	18	3208,0	X
C_10 mm	18	3235,06	X

Misturas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

B) Efeito da adição de CINZA.

A Tabela 188 apresenta a análise do fator CINZA, na qual verificou-se que os percentuais de adição de 0% e de 35% não diferem significativamente entre si, apresentando desempenho superior e significativamente diferente do percentual de adição de 20% de cinza.

Tabela 188: Análise do fator CINZA: elemento de análise **MOE_LP** dos corpos-de-prova ensaiados à flexão estática: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for MOE_LP by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
20%	18	2705,78	X
0%	18	3307,72	X
35%	18	3511,44	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

C) Efeito da CONDIÇÃO dos corpos-de-prova no ensaio.

A Tabela 189 apresenta a análise do fator CONDIÇÃO dos corpos-de-prova no ensaio, tendo se evidenciado a superioridade do material na condição seca, que diferiu significativamente do material ensaiado na condição úmida. A mudança da condição dos corpos-de-prova, de seco para úmido, promoveu redução no MOE_LP em cerca de 18,7%.

Tabela 189: Análise do fator CONDIÇÃO: elemento de análise **MOE_LP** dos corpos-de-prova ensaiados à flexão estática: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for MOE_LP by Condicao			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
Condicao	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
umido	27	2846,7	X
seco	27	3503,26	X

Condições marcadas com “x” numa mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

D) Efeito das Interações CASCA-CINZA-CONDIÇÃO.

A análise da variância (Tabela 186) apontou a ausência de interação que pode ser observada nos diferentes gráficos apresentados na Figura 174. Destaca-se a distribuição em tamanho de casca 5 mm por apresentar valores médios das adições de 20% e de 35% de cinza superiores à de 0% (elemento de controle). Contudo, não se verificou a existência de diferença significativa entre os percentuais de adição na distribuição em tamanho de casca 5 mm.

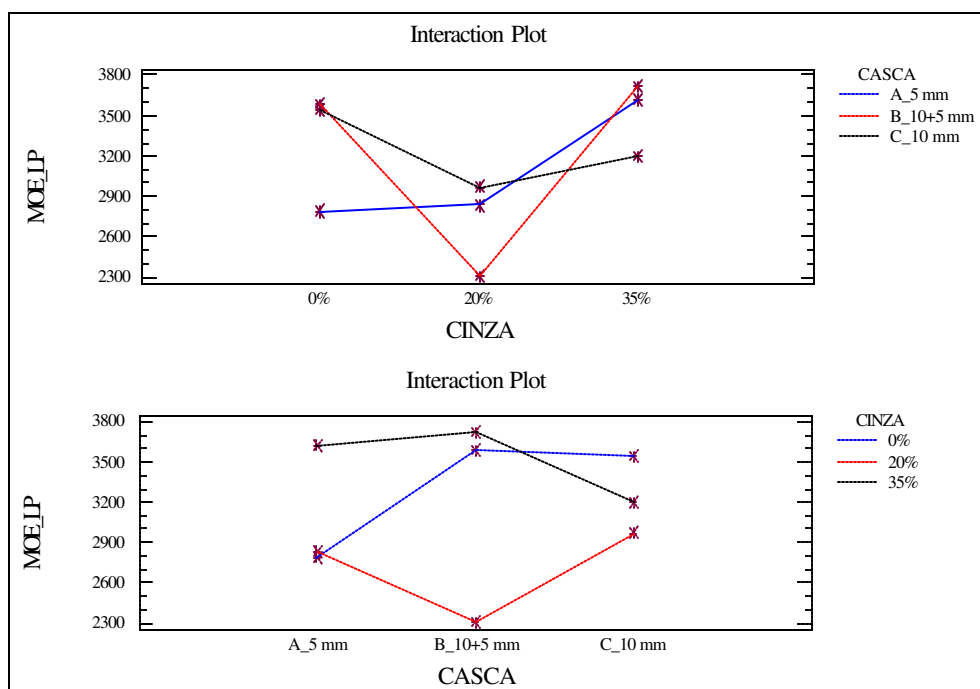


Figura 174: Interação casca-cinza: elemento de análise **MOE_LP**.

A ausência de interação casca-condição, evidenciada na análise da variância (Tabela 186), pode ser observada nos diferentes gráficos apresentados na Figura 175, que evidencia o menor diferencial entre os valores médio da distribuição em tamanho de casca 10 mm.

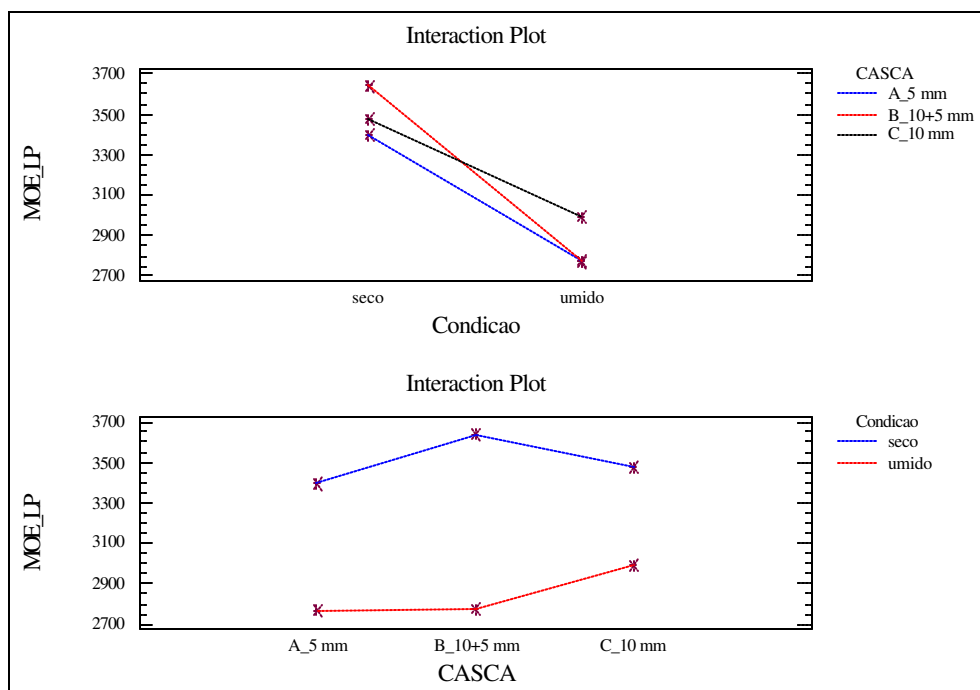


Figura 175: Interação casca-condição: elemento de análise **MOE_LP**.

No caso da interação cinza-condição, a análise da variância (Tabela 186) apontou uma ausência de interação que pode ser observada nos diferentes gráficos apresentados na Figura 176. Destaca-se que o percentual de adição de 35% de cinza apresentou os maiores valores de média, mesmo não diferindo significativamente do percentual de adição de 0% de cinza.

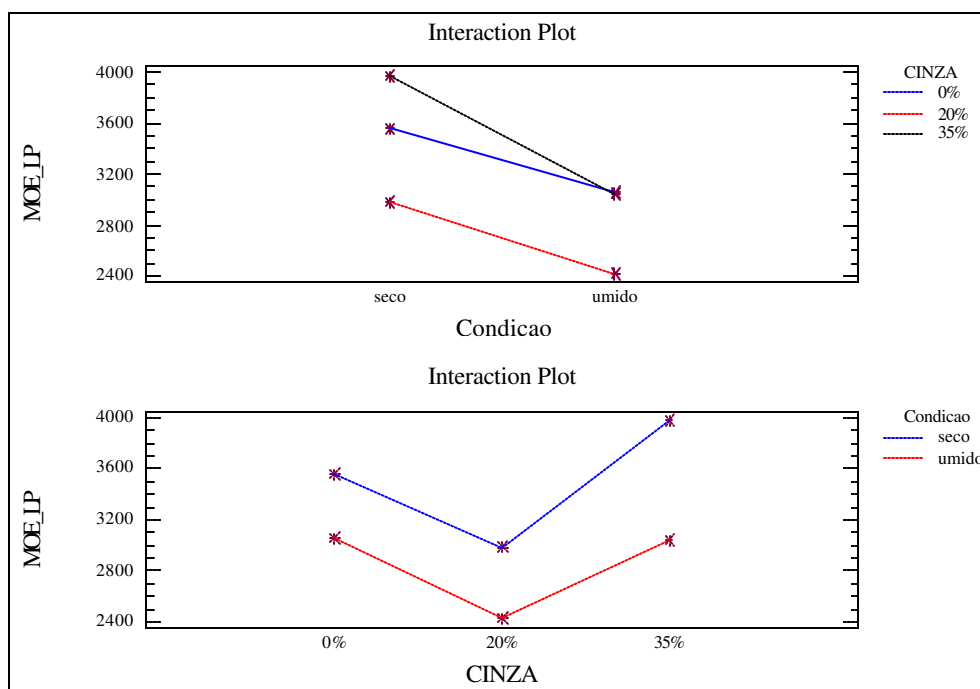


Figura 176: Interação cinza-condição: elemento de análise MOE_LP.

D) Considerações finais sobre o elemento de análise MOE_LP.

Verificou-se que o fator CASCA **não** afetou de forma significativa o elemento de análise MOE_LP dos corpos-de-prova ensaiados à flexão estática, não havendo diferença significativa entre as diferentes distribuições em tamanho de casca.

Adições de cinza, em percentuais de adição de 0% e de 35%, apresentaram comportamento superior e significativamente diferente do percentual de adição de 20% de cinza, destacando-se que o percentual de adição de 35% de cinza apresentou valores de média próximos ou superiores ao percentual de adição de 0% de cinza, empregado no experimento como elemento de controle (testemunha).

Os corpos-de-prova ensaiados à flexão estática na condição seca apresentaram

comportamento superior e significativamente diferente daqueles ensaiados na condição úmida, tendo-se verificado, com a mudança da condição (de seca para úmida), uma redução de cerca de 18,7% no MOE_LP, além de uma maior dispersão dos valores obtidos nos ensaios.

4.4.1.2 Avaliação da Tensão no Limite de Proporcionalidade (T_{LP} ou Tensão_LP, em MPa) em corpos-de-prova extraídos das PLACAS e ensaiados à Flexão Estática.

Na Tabela 190 apresenta-se a análise da variância (ANOVA) para o elemento de análise Tensão no Limite de Proporcionalidade (T_{LP} ou Tensao_LP, em MPa), onde se verificou que apenas o fator CONDIÇÃO dos corpos-de-prova no ensaio (seca ou úmida) apresentou diferença estatística significativa ($p\text{-valor} < 0,05$).

Tabela 190: ANOVA do elemento de análise Tensão no Limite de Proporcionalidade (Tensao_LP).

Analysis of Variance for Tensao_LP - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	0,922626	2	0,461313	1,65	0,2069
B:CINZA	1,58638	2	0,793191	2,83	0,0721
C:Condicao	16,7	1	16,7	59,61	0,0000
INTERACTIONS					
AB	0,289074	4	0,0722685	0,26	0,9029
AC	0,299144	2	0,149572	0,53	0,5909
BC	0,152678	2	0,0763389	0,27	0,7630
ABC	0,0459111	4	0,0114778	0,04	0,9967
RESIDUAL	10,0853	36	0,280148		
TOTAL (CORRECTED)	30,0812	53			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A seguir, são apresentados os resultados da avaliação da casca, da cinza, da condição dos corpos-de-prova no ensaio e, da interação casca-cinza-condição.

A) Efeito da adição de CASCA.

A Tabela 191 apresenta a análise das médias para o fator CASCA, onde se verificou

que as médias das diferentes distribuições em tamanho de casca não diferem significativamente entre si. Os valores médios apresentados apontam uma tendência de aumento no parâmetro Tensao_LP, com o aumento na dimensão das partículas.

Tabela 191: Análise do fator CASCA: elemento de análise **Tensao_LP** dos corpos-de-prova ensaiados à flexão estática: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Tensao_LP by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
A_5 mm	18	1,89778	X
B_10+5 mm	18	2,08667	X
C_10 mm	18	2,21611	X

Misturas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

B) Efeito da adição de CINZA.

A Tabela 192 apresenta a análise do fator CINZA, onde se verificou que os diferentes percentuais de adição de cinza não diferem significativamente entre si.

Tabela 192: Análise do fator CINZA: elemento de análise **Tensao_LP** dos corpos-de-prova ensaiados à flexão estática: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Tensao_LP by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
20%	18	1,86556	X
35%	18	2,05056	X
0%	18	2,28444	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

C) Efeito da CONDIÇÃO dos corpos-de-prova no ensaio.

A Tabela 193 apresenta a análise do fator CONDIÇÃO dos corpos-de-prova no ensaio, onde se destacou que materiais ensaiados nas condições seca e úmida diferem significativamente entre si, de modo que a mudança da condição dos corpos-de-prova, de seco para úmido, promoveu redução na **Tensao_LP** em cerca de 42,4%.

Tabela 193: Análise do fator CONDIÇÃO: elemento de análise **Tensao_LP** dos corpos-de-prova ensaiados à flexão estática: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Tensao_LP by Condicao			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
Condicao	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
umido	27	1,51074	X
seco	27	2,62296	X

Condições marcadas com “x” numa mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

D) Efeito das Interações CASCA-CINZA-CONDIÇÃO.

No caso da interação casca-cinza, a análise da variância (Tabela 190) apontou uma ausência de interação que pode ser observada nos diferentes gráficos apresentados na Figura 177.

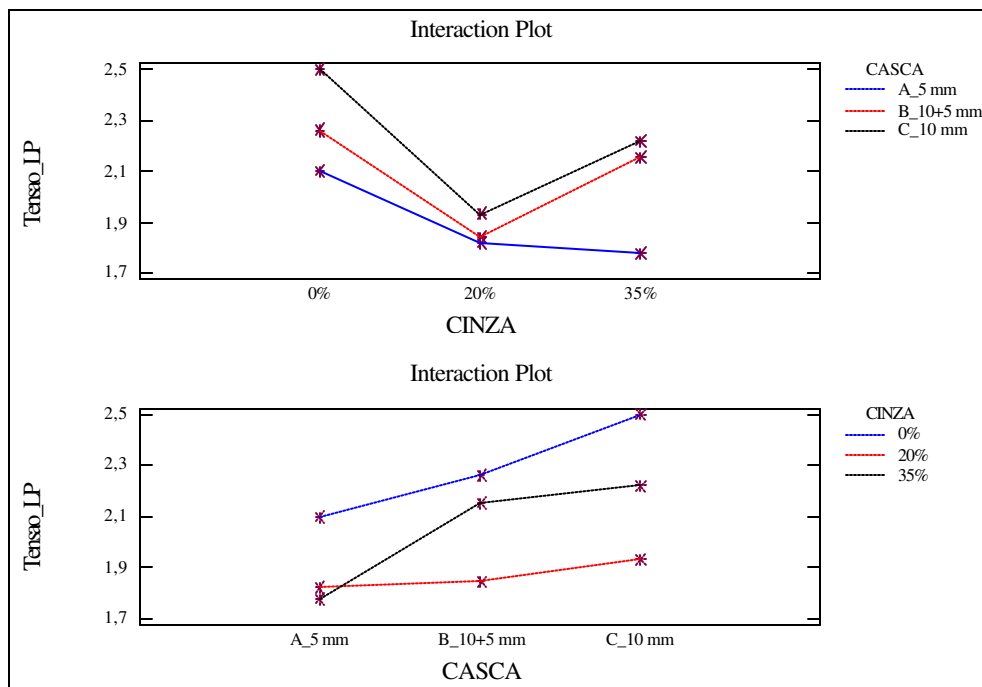


Figura 177: Interação casca-cinza: elemento de análise **Tensao_LP**.

Com base na ausência de diferença significativa entre adições de cinza, considerou-se que o percentual de 35% promoveu os melhores resultados, por agregar maior massa de material à mistura, sem comprometer, de forma significativa, a resistência do material, em relação ao elemento de análise Tensão_LP.

No caso da interação casca-condição, a análise da variância (Tabela 190) apontou uma ausência de interação que pode ser observada nos diferentes gráficos apresentados na Figura 178.

Destaca-se que a distribuição em tamanho de casca 10 mm apresentou os maiores valores médios, tendo se evidenciado uma tendência de aumento no desempenho mecânico em função do aumento na dimensão das partículas de casca.

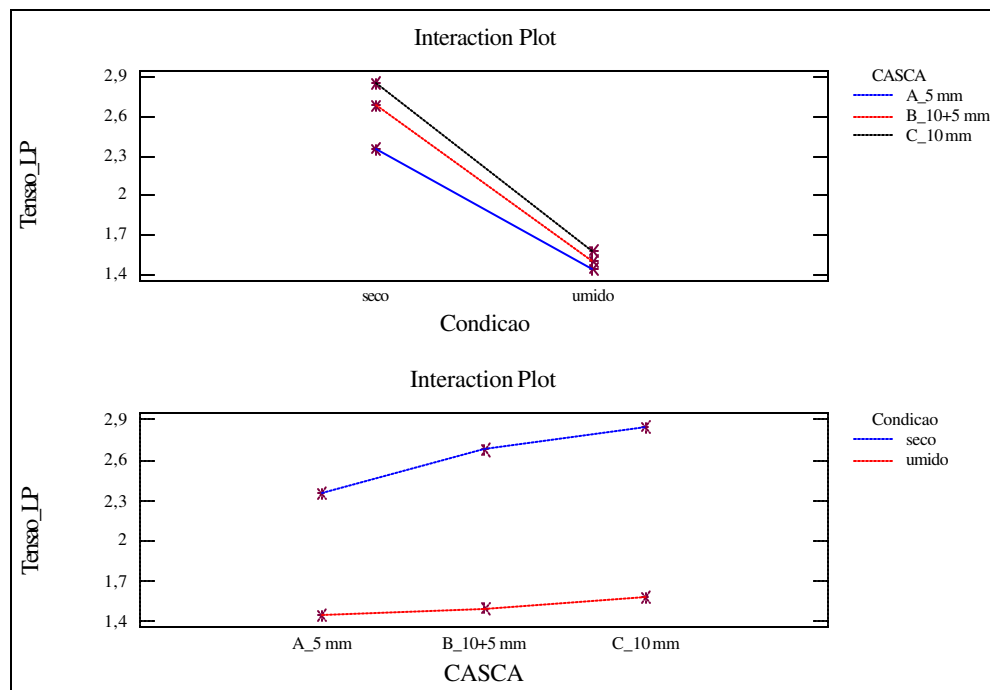


Figura 178: Interação casca-condição: elemento de análise **Tensao_LP**.

No caso da interação cinza-condição, a análise da variância (Tabela 190) apontou uma ausência de interação que pode ser observada nos diferentes gráficos apresentados na Figura 179, que evidenciam o comportamento do percentual de adição de cinza, em função da condição dos corpos-de-prova no ensaio.

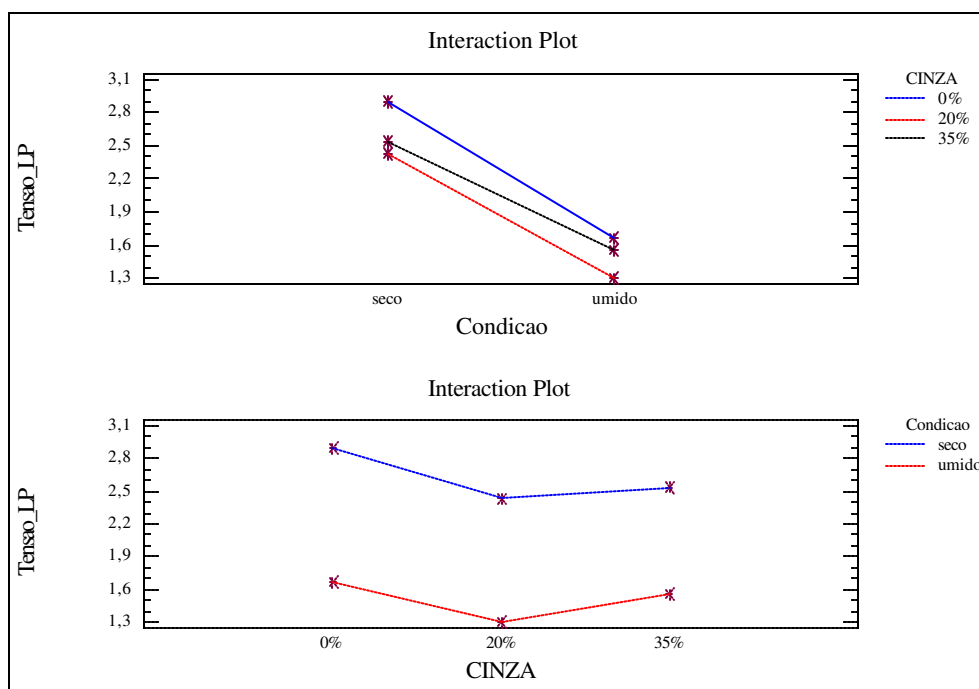


Figura 179: Interação cinza-condição: elemento de análise **Tensao_LP**.

D) Considerações finais sobre o elemento de análise **Tensao_LP**.

O ensaio das placas apontou que os fatores **CASCA** e **CINZA** não afetaram de forma significativa o elemento de análise **Tensao_LP**, dos corpos-de-prova ensaiados à flexão estática. Destaca-se, ainda, que a distribuição em tamanho de casca 10 mm apresentou uma maior diferença entre a sua condição seca e a sua condição úmida, portanto apresentando uma menor uniformidade em seu comportamento.

No caso do percentual de adição de 35% de cinza, verificou-se que o mesmo apresentou valor médio que não diferiu significativamente do percentual de adição de 0% de cinza, empregado no experimento como elemento de controle (testemunha).

Os corpos-de-prova ensaiados à flexão estática na condição seca apresentaram comportamento superior e significativamente diferente daqueles ensaiados na condição úmida, tendo se verificado, com a mudança da condição (de seca para úmida), uma redução de cerca de 42,4% na **Tensao_LP**.

4.4.1.3 Avaliação da Tensão de Ruptura (T_R ou Tensao_Ruptura, em MPa) em corpos-de-prova extraídos das PLACAS e ensaiados à Flexão Estática.

A Tabela 194 apresenta a análise da variância (ANOVA) para o elemento de análise Tensão na Ruptura (T_R ou Tensao_Ruptura, em MPa), verificando-se que apenas o fator CONDIÇÃO dos corpos-de-prova no ensaio (seca ou úmida) apresentou diferença estatística significativa (p-valor < 0,05).

Tabela 194: ANOVA do elemento de análise Tensão na Ruptura (Tensao_Ruptura).

Analysis of Variance for Tensao_Ruptura - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	0,330959	2	0,16548	0,27	0,7666
B:CINZA	3,95925	2	1,97962	3,20	0,0525
C:Condicao	40,7683	1	40,7683	65,95	0,0000
INTERACTIONS					
AB	1,66074	4	0,415185	0,67	0,6159
AC	0,665233	2	0,332617	0,54	0,5885
BC	0,226744	2	0,113372	0,18	0,8332
ABC	0,522356	4	0,130589	0,21	0,9305
RESIDUAL	22,2533	36	0,618148		
TOTAL (CORRECTED)	70,3869	53			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A seguir, são apresentados os resultados da avaliação da casca, da cinza, da condição dos corpos-de-prova no ensaio e, da interação casca-cinza-condição.

A) Efeito da adição de CASCA.

A Tabela 195 apresenta a análise das médias para o fator CASCA, evidenciando-se a ausência de diferença significativa entre as diferentes distribuições em tamanho de casca.

Tabela 195: Análise do fator CASCA: elemento de análise **Tensao_Ruptura** dos corpos-de-prova ensaiados à flexão estática: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Tensao_Ruptura by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
A_5 mm	18	3,25944	X
B_10+5 mm	18	3,33611	X
C_10 mm	18	3,45	X

Misturas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

Avaliando-se os valores apresentados, evidencia-se uma tendência de aumento no parâmetro de avaliação Tensao_Ruptura, com o aumento da dimensão das partículas.

B) Efeito da adição de CINZA.

A Tabela 196 apresenta a análise do fator CINZA, onde se destaca o percentual de adição de 35% de cinza, porém que não diferiu significativamente dos demais percentuais.

Tabela 196: Análise do fator CINZA: elemento de análise **Tensao_Ruptura** dos corpos-de-prova ensaiados à flexão estática: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Tensao_Ruptura by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
20%	18	3,02444	X
35%	18	3,33389	XX
0%	18	3,68722	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

C) Efeito da CONDIÇÃO dos corpos-de-prova no ensaio (seca ou úmida).

A Tabela 197 apresenta a análise do fator CONDIÇÃO dos corpos-de-prova no ensaio, onde se destacou a superioridade do material na condição seca, que difere significativamente do material ensaiado na condição úmida.

Tabela 197: Análise do fator CONDIÇÃO: elemento de análise **Tensao_Ruptura** dos corpos-de-prova ensaiados à flexão estática: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Tensao_Ruptura by Condicao			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
Condicao	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
umido	27	2,47963	X
seco	27	4,21741	X

Condições marcadas com “x” numa mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

Evidencia-se que a mudança da condição dos corpos-de-prova de seco para úmido, promoveu redução na resistência (elemento de análise **Tensao_Ruptura**) em cerca de 41,2%.

D) Efeito das Interações CASCA-CINZA-CONDIÇÃO.

A análise da variância (Tabela 194) apontou uma ausência de interação que pode ser observada nos diferentes gráficos apresentados na Figura 180, que evidencia que o percentual de adição de 0% de cinza (controle) apresenta, em geral, os maiores valores médios.

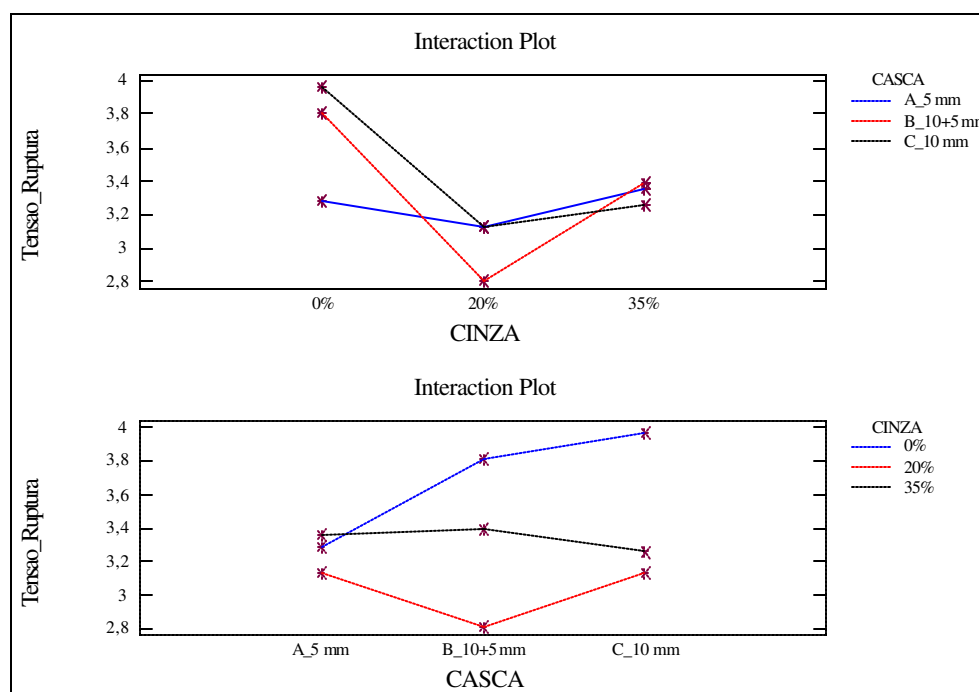


Figura 180: Interação casca-cinza: elemento de análise **Tensao_Ruptura**.

A análise da variância (Tabela 194) evidenciou a ausência de interação casca-

condição e a ausência de interação cinza-condição, como pode ser observada nos respectivos gráficos, apresentados nas Figuras 181 e 182.

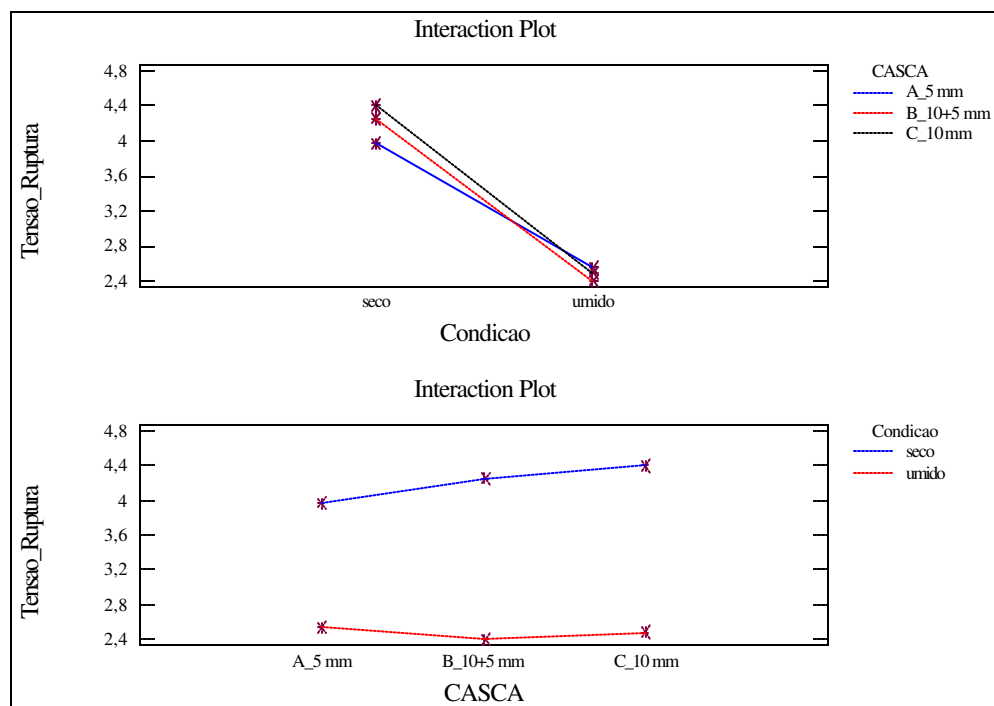


Figura 181: Interação casca-condição: elemento de análise **Tensao_Ruptura**.

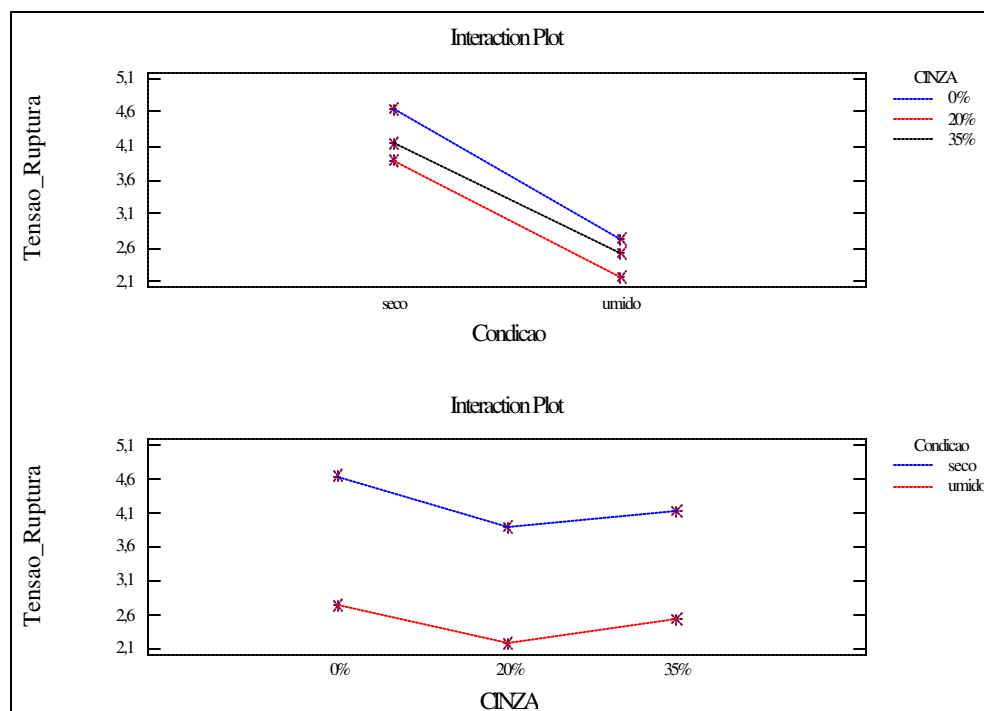


Figura 182: Interação cinza-condição: elemento de análise **Tensao_Ruptura**.

D) Considerações finais sobre o elemento de análise Tensao_Ruptura.

O ensaio das placas em flexão aponta que os fatores CASCA e CINZA não afetaram de forma significativa a resistência dos corpos-de-prova, medida através do elemento de análise Tensao_Ruptura.

No caso do fator CINZA, verificou-se a existência de diferença significativa entre os teores de 0% e de 20% de adição (o menor valor médio), sendo que a adição de 35% de cinza, além de promover um maior consumo do resíduo cinza, possibilita minimizar os problemas envolvendo a ação de extrativos inibidores da pega ainda presentes na casca, como evidenciado por Zucco e Beraldo (2005).

Com o aumento de massa na mistura, pela adição de cinza, ocorre redução no consumo do cimento sem comprometer, de forma significativa, o desempenho mecânico das placas prensadas.

Verificou-se que a distribuição em tamanho de casca 10 mm, associada ao percentual de adição de 0% de cinza, apresentou o maior valor médio em Tensao_Ruptura. Contudo, a ausência de diferença significativa entre as distribuições em tamanho de casca, assim como entre os percentuais de adição de 0% e de 35% de cinza, evidenciou que a mistura 10 mm-35% pode ser considerada como sendo a melhor opção para a produção de placas prensadas de compósito. Essa avaliação baseou-se no fato de a distribuição em tamanho de casca 10 mm não necessitar de moagem, associando-a ao elevado consumo do resíduo cinza, promovido pela adição em percentual de 35%.

Os corpos-de-prova ensaiados à flexão estática na condição seca apresentaram comportamento superior e significativamente diferente daqueles ensaiados na condição úmida, tendo se verificado, com a mudança da condição (de seca para úmida), uma redução de cerca de 41,2% no elemento de análise **Tensao_Ruptura**.

4.4.1.4 Considerações finais sobre o ensaio de Flexão Estática.

Dos elementos de análise empregados para avaliar os corpos-de-prova ensaiados à flexão estática destaca-se, como sendo o principal, a resistência máxima alcançada, representada pelo elemento de análise Tensao_Ruptura.

Os elementos de análise MOE_LP e Tensão_LP permitem evidenciar o comportamento de cada mistura no trecho de máxima segurança, em termos de resistência e manutenção das características mecânicas das placas prensadas, a partir do qual as deformações se tornam permanentes (criação de “fadiga” no material) até a ruptura.

Através da avaliação do fator CASCA verificou-se que a mesma não afetou de forma significativa a Tensao_Ruptura, o MOE_LP e a Tensão_LP, o que indica que efetivamente as distribuições em tamanho de casca caracterizadas como 5 mm, 10+5 mm e 10 mm, não promoveram mudanças significativas no comportamento mecânico das placas prensadas.

Através da avaliação do fator CINZA verificou-se que a mesma afetou significativamente apenas o parâmetro MOE_LP, não tendo afetado de forma significativa a Tensão_LP e a Tensao_Ruptura. Destaca-se que a influência da cinza, promovendo mudanças no comportamento mecânico das placas prensadas, está associada ao percentual de adição de 20% que, em geral (exceção: Tensao_LP), é inferior e significativamente diferente do percentual de adição de 0% de cinza empregado no experimento como controle.

O percentual de adição de 35% de cinza apresentou valores médios próximos ou superiores aos valores médios do percentual de adição de 0% de cinza, embora estatisticamente não se tenha verificado a existência de diferença significativa entre estes percentuais.

A ausência de diferença significativa entre as distribuições em tamanho de casca ou, entre os percentuais de adição de 0% e de 35% de cinza, sugerem que se considere a mistura 10 mm-35% como sendo uma opção mais indicada para a produção de placas prensadas.

Esta indicação está baseada nos seguintes fatos:

- a) A distribuição em tamanho de casca 10 mm não necessita de moagem;
- b) A adição de cinza em percentual de 35% reduz de forma mais direta o seu descarte em condições inadequadas, promovendo benefícios ambientais;
- c) A adição de cinza promove reduções expressivas da ação inibitória dos extrativos ainda presentes na casca;
- d) A adição de cinza em percentual de 35% aumenta a massa de “agregados” nas misturas, resultando em um menor consumo de cimento, sem comprometer, de forma significativa, o desempenho mecânico das placas prensadas
- e) A quantidade de carbono imobilizado pela mistura 10 mm-35% (traço 1:0,35:0,35)

foi estimada em cerca de 52% da massa de cimento empregado, tendo-se como base a composição da casca (51% de Carbono) e da cinza (98% de carbono), onde cada tonelada de cimento consumido no processo, reterá em sua pasta cerca de 1,25 toneladas de CO₂, já descontados os 650 kg de CO₂ liberados na produção do cimento, contribuindo para a redução na emissão de CO₂ podendo tornar as construções rurais mais viáveis do ponto de vista ecológico).

Avaliando-se o comportamento dos corpos-de-prova ensaiados nas condições seca e úmida, verificou-se que o desempenho dos corpos-de-prova ensaiados na condição úmida (24 h de saturação) apresentou reduções de 41,2% no parâmetro Tensao_Ruptura, 42,4% no parâmetro Tensao_LP e de 18,7% no parâmetro MOE_LP, quando em comparação com o desempenho dos corpos-de-prova similares, porém ensaiados na condição seca.

Portanto, o emprego das placas prensadas em ambientes expostos à ação de umidade deve ser melhor avaliado, propondo-se tratamentos preliminares (polímeros) aplicados à casca de arroz ou ao compósito dela formado.

4.4.2 Avaliação dos corpos-de-prova extraídos das placas – ensaio de compressão paralela à superfície (CPS).

A Tabela 198 apresenta os valores das médias dos corpos-de-prova ensaiados à compressão paralela à superfície, empregando-se os elementos de avaliação Tensão de Ruptura (Tensao_CPS), Velocidade do pulso ultra-sônico (VPU_CPS) e a Massa Específica Aparente (MEAp_CPS). Em seguida, são apresentados os resultados das avaliações estatísticas.

Tabela 198: **FASE IV - Ensaio de compressão paralela à superfície.**

Condição	CASCA	CINZA	Tensão	VPU	MEAp	Condição	CASCA	CINZA	Tensão	VPU	MEAp
Seco	5 mm	35	7,52	2,205	1,36	Úmido	5 mm	35	4,90	2,107	1,45
		20	6,56	2,077	1,35			20	4,00	1,902	1,45
		0	6,82	2,055	1,38			0	4,65	0,607	1,50
	10+5 mm	35	7,41	2,336	1,39		10+5 mm	35	5,30	2,273	1,52
		20	7,49	2,200	1,39			20	4,10	2,064	1,45
		0	8,56	2,295	1,44			0	5,18	0,725	1,54
	10 mm	35	6,49	2,248	1,33		10 mm	35	4,11	2,171	1,49
		20	7,72	2,315	1,41			20	4,82	2,272	1,52
		0	8,23	2,340	1,45			0	5,62	2,190	1,53

OBS.: Valores médios de **Tensão** (MPa), **VPU** (km/s) e **MEAp**, (g/cm³).

4.4.2.1 Avaliação da Tensão de Ruptura em corpos-de-prova extraídos das PLACAS e ensaiados à compressão paralela à superfície (Tensao_CPS, em MPa).

Para obter os gráficos das análises estatísticas com apresentação das variáveis obedecendo a ordem da menor para a maior dimensão das partículas, as misturas foram nomeadas como A_5mm, B_10+5 mm e C_10 mm.

A Tabela 199 apresenta a análise da variância (ANOVA) para o elemento Tensão de Ruptura (Tensao_CPS, em MPa), não se evidenciando diferença estatística significativa nas interações casca-condição (AC), cinza-condição (BC) e, casca-cinza-condição (ABC).

Tabela 199: ANOVA do elemento de análise **Tensao_CPS**.

Analysis of Variance for Tensao_CPS - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	27,2546	2	13,6273	12,05	0,0000
B:CINZA	41,634	2	20,817	18,41	0,0000
C:Condicao	775,753	1	775,753	686,17	0,0000
INTERACTIONS					
AB	70,5156	4	17,6289	15,59	0,0000
AC	4,80412	2	2,40206	2,12	0,1208
BC	6,10404	2	3,05202	2,70	0,0684
ABC	9,84929	4	2,46232	2,18	0,0707
RESIDUAL	468,052	414	1,13056		
TOTAL (CORRECTED)	1403,97	431			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A seguir, são apresentados os resultados da avaliação da casca, da cinza, da condição dos corpos-de-prova no ensaio e, da interação casca-cinza-condição.

A) Efeito da adição de CASCA.

A Tabela 200 apresenta a análise das médias para o fator CASCA, onde se destacou a falta de diferença significativa entre as médias das misturas 10 mm e 10+5 mm, sendo superiores e significativamente diferentes da média da mistura 5 mm.

Tabela 200: Análise do fator CASCA: elemento de análise **Tensao_CPS** dos corpos-de-prova ensaiados à compressão paralela à superfície: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Tensao_CPS by CASCA			

Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups

A_5 mm	144	5,7409	X
C_10 mm	144	6,16417	X
B_10+5 mm	144	6,33924	X

Misturas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

B) Efeito da adição de CINZA.

A Tabela 201 apresenta a análise do fator CINZA, verificando-se que os percentuais de adição de 20% e de 35% de cinza diferem significativamente do percentual de adição de 0% de cinza, apresentando valores de média que apontam uma redução na resistência à compressão paralela à superfície (Tensao_CPS) de até 11,2%.

Tabela 201: Análise do fator CINZA: elemento de análise **Tensao_CPS** dos corpos-de-prova ensaiados à compressão paralela à superfície: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Tensao_CPS by CINZA			

Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups

20	144	5,77986	X
35	144	5,9559	X
0	144	6,50854	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

C) Efeito da CONDIÇÃO dos corpos-de-prova no ensaio.

A Tabela 202 apresenta a análise do fator CONDIÇÃO dos corpos-de-prova no ensaio, tendo o material ensaiado na condição seca se mostrado superior, diferindo significativamente do material ensaiado na condição úmida. Evidenciou-se, desta forma, que a mudança da condição dos corpos-de-prova, de seco para úmido, promoveu redução na resistência (Tensao_CPS) em cerca de 36,1%.

Tabela 202: Análise do fator CONDIÇÃO: elemento de análise **Tensao_CPS** dos corpos-de-prova ensaiados à compressão paralela à superfície: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for Tensao_CPS by Condicao			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
Condicao	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
Umido	216	4,74139	X
Seco	216	7,42148	X

Condições marcadas com “x” numa mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

D) Efeito das Interações CASCA-CINZA-CONDIÇÃO.

A análise da variância (Tabela 199) apontou a existência de interação entre os fatores casca e cinza, o que pode ser observado nos gráficos apresentados na Figura 183.

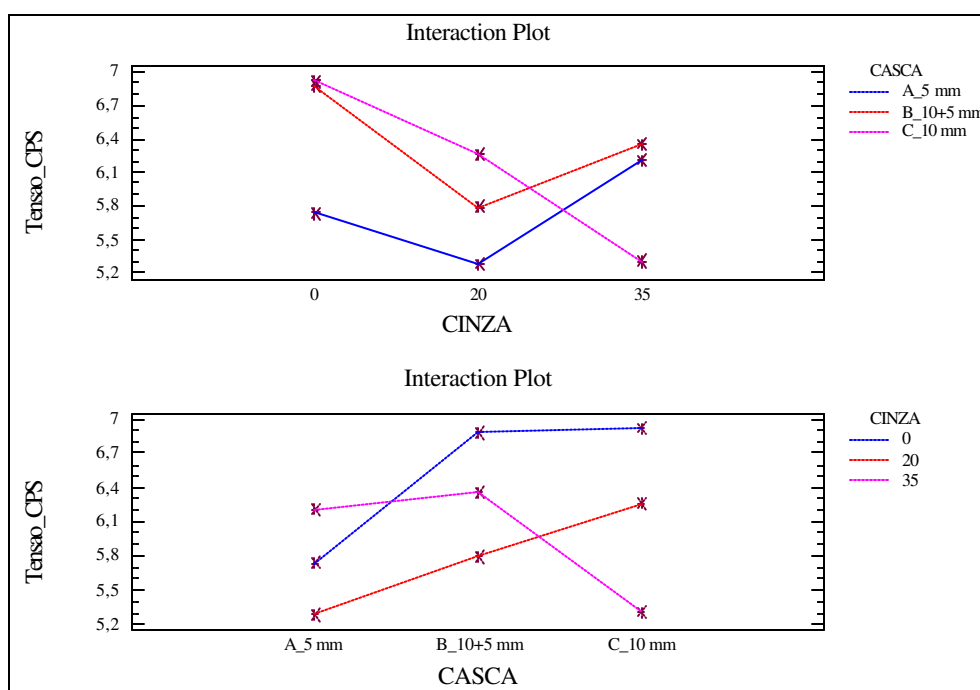


Figura 183: Interação casca-cinza: elemento de análise **Tensao_CPS**.

Destaca-se que a distribuição em tamanho de casca 10 mm apresentou redução nos valores médios com a adição de cinza. Verificou-se que o percentual de adição de 20% de cinza apresentou valores de média (Tensao_CPS) que evoluem com o aumento da dimensão das partículas.

O percentual de adição de 0% apresenta os maiores valores de média (Tensao_CPS),

para as misturas com distribuição em tamanho de casca 10+5 mm e 10 mm.

No caso da interação casca-condição, a análise da variância (Tabela 199) apontou uma ausência de interação, o que pode ser observado nos gráficos apresentados na Figura 184, tendo-se verificado uma redução na resistência (Tensao_CPS), em função da mudança de condição. Verificou-se, ainda, uma leve tendência de aumento na Tensao_CPS com o aumento na dimensão das partículas de casca.

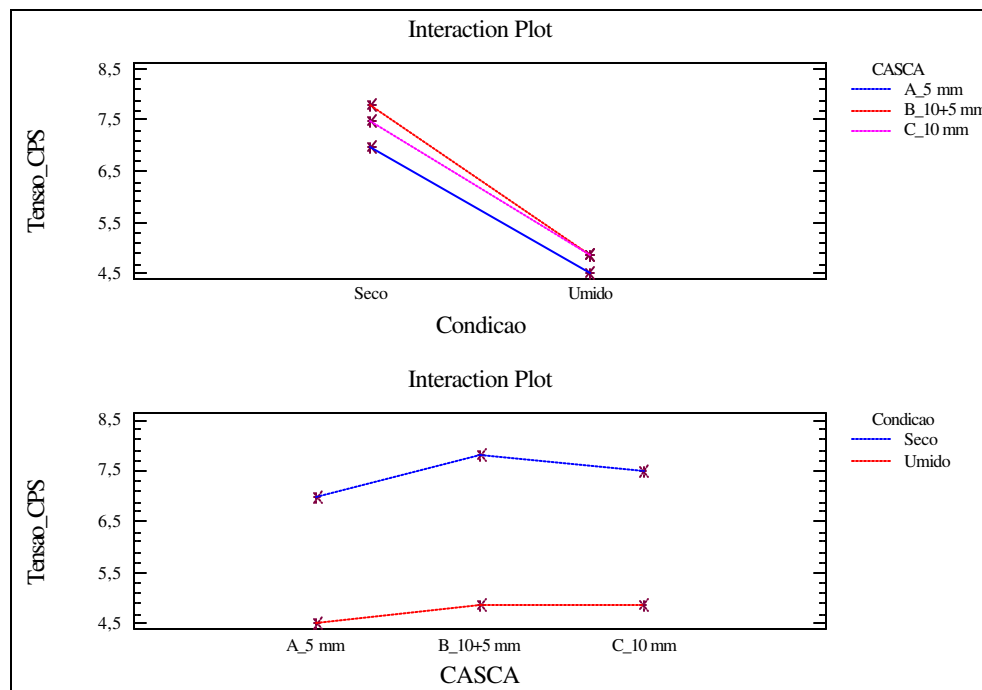


Figura 184: Interação casca-condição: elemento de análise **Tensao_CPS**.

No caso da interação cinza-condição, a análise da variância (Tabela 199) apontou uma ausência de interação, o que pode ser observado nos gráficos apresentados na Figura 185, tendo-se verificado que a adição de cinza promoveu leve redução na Tensao_CPS, quer seja na condição seca ou na condição úmida dos corpos-de-prova.

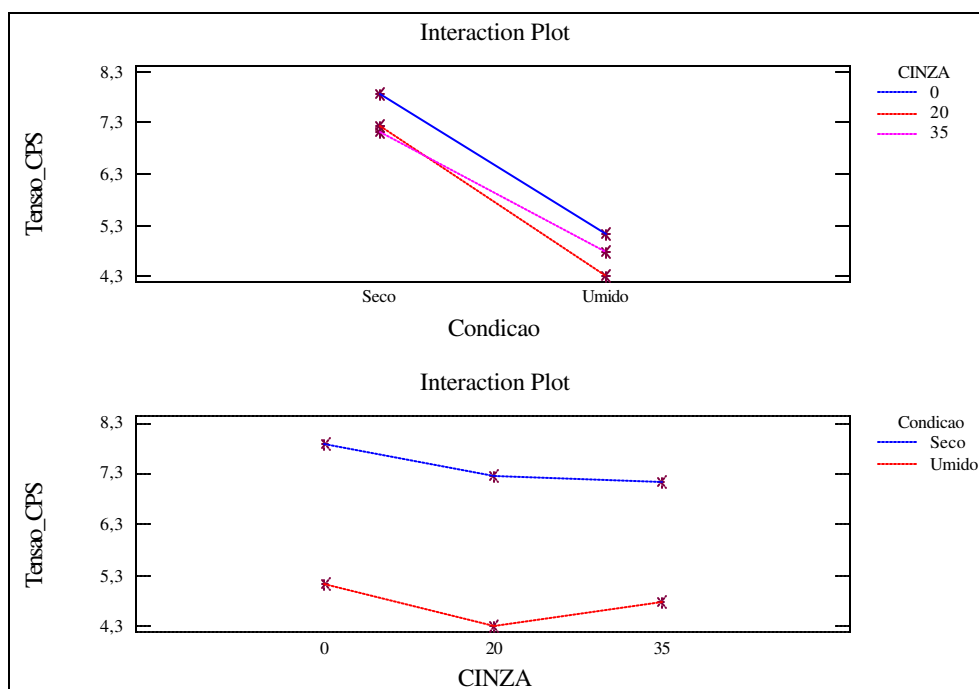


Figura 185: Interação cinza-condição: elemento de análise **Tensao_CPS**.

D) Considerações finais sobre o elemento de análise **Tensao_CPS**.

Verificou-se que o fator CASCA afetou de forma significativa a resistência dos corpos-de-prova ensaiados à compressão paralela à superfície (Tensao_CPS).

Entre as misturas produzidas com as distribuições em tamanho de casca 10+5 mm e 10 mm, não se verificou diferença significativa entre si, sendo que suas médias foram superiores e significativamente diferentes da média da distribuição em tamanho de casca 5 mm.

Adições de cinza, em percentuais de 20% e de 35%, apresentaram comportamento inferior e significativamente diferente do percentual de 0% de adição (testemunha), o que pode ser explicado pela redução no consumo de cimento, com o aumento da massa no sistema.

Os corpos-de-prova ensaiados na condição seca apresentaram comportamento superior e significativamente diferente dos corpos-de-prova ensaiados na condição úmida, tendo se verificado que a mudança de condição de seca para úmida, promoveu uma redução em cerca de 36,1% da resistência à compressão paralela à superfície.

Dentre as misturas avaliadas, destaca-se a 10 mm-0%, que apresentou o maior valor médio (6,92 MPa) e uma das menores reduções na resistência (31,75%), quando avaliada a

mudança de condição, da seca para úmida.

A mistura 10 mm-35% apresentou uma das menores médias de resistência (5,30 MPa) e uma redução na resistência de cerca de 36,6%, quando foi avaliada a mudança de condição, de seca para úmida.

4.4.2.2 Avaliação da VPU em corpos-de-prova extraídos das PLACAS e ensaiados à compressão paralela à superfície (VPU_CPS, em km/s).

Para obter gráficos de análises estatísticas com apresentação das variáveis obedecendo a ordem da menor para a maior dimensão das partículas, as misturas foram nomeadas como A_5mm, B_10+5 mm e C_10 mm.

A Tabela 203 apresenta a análise da variância (ANOVA) para o elemento de análise Velocidade do Pulso Ultra-sônico (VPU_CPS, em km/s), onde se destaca a falta de diferença significativa apenas na interação casca-cinza-condição (ABC) (p-valor > 0,05).

Tabela 203: ANOVA do elemento de análise VPU_CPS.

Analysis of Variance for VPU_CPS - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	3,39942	2	1,69971	104,71	0,0000
B:CINZA	0,586835	2	0,293418	18,08	0,0000
C:Condicao	1,28876	1	1,28876	79,39	0,0000
INTERACTIONS					
AB	1,33731	4	0,334328	20,60	0,0000
AC	0,0981586	2	0,0490793	3,02	0,0498
BC	0,108262	2	0,0541311	3,33	0,0367
ABC	0,0651048	4	0,0162762	1,00	0,4060
RESIDUAL	6,07119	374	0,0162331		
TOTAL (CORRECTED)	12,4584	391			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

Em seguida, são apresentados os resultados da avaliação da casca, da cinza, da condição dos corpos-de-prova no ensaio e, da interação casca-cinza-condição.

A) Efeito da adição de CASCA.

A Tabela 204 apresenta a análise das médias para o fator CASCA, onde se destaca a falta de diferença significativa entre as médias dos corpos-de-prova das misturas 10 mm e 10+5 mm, superiores e significativamente diferentes da mistura 5 mm.

Tabela 204: Análise do fator CASCA: elemento de análise **VPU_CPS** dos corpos-de-prova ensaiados à compressão paralela à superfície: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for VPU_CPS by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
A_5 mm	120	2,02779	X
B_10+5 mm	128	2,22369	X
C_10 mm	144	2,25631	X

Misturas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

Avaliando-se os valores médios apresentados, foi possível evidenciar o aumento na VPU_CPS com o aumento na dimensão das partículas de casca, sendo que, em geral, a casca de arroz promove redução na VPU, como foi evidenciado nas fases anteriormente avaliadas.

B) Efeito da adição de CINZA.

A Tabela 205 apresenta a análise do fator CINZA, podendo se verificar que os percentuais de adição de 0% e de 20% de cinza apresentam valores de média que não diferem significativamente entre si, porém sendo inferiores ao percentual de adição de 35% de cinza.

Tabela 205: Análise do fator CINZA: elemento de análise **VPU_CPS** dos corpos-de-prova ensaiados à compressão paralela à superfície: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for VPU_CPS by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
20	136	2,13845	X
0	112	2,14596	X
35	144	2,22337	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

Esse aumento na VPU, da ordem de 3,6%, com base na mistura controle (0% de cinza) para uma adição de 35% de cinza, é de difícil interpretação, pois o comportamento mecânico apontou reduções de até 11,2% na tensão de ruptura (Tensao_CPS). No caso da adição de 35% de cinza, a redução foi de 8,5%, o que pode estar associada à redução no consumo de cimento.

C) Efeito da CONDIÇÃO dos corpos-de-prova no ensaio.

A Tabela 206 apresenta a análise do fator CONDIÇÃO dos corpos-de-prova no ensaio. Destaca-se o material na condição seca, que difere significativamente do material ensaiado na condição úmida, tendo se verificado uma redução de 5,5% na VPU_CPS com a mudança da condição, de seco para úmido.

Tabela 206: Análise do fator CONDIÇÃO: elemento de análise **VPU_CPS** dos corpos-de-prova ensaiados à compressão paralela à superfície: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for VPU_CPS by Condiacao			

Method: 95,0 percent Tukey HSD			
Condiacao	Count	LS Mean	Homogeneous Groups

Umido	184	2,10819	X
Seco	208	2,23033	X

Condições marcadas com “x” numa mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

D) Efeito das Interações CASCA-CINZA-CONDIÇÃO.

A análise da variância (Tabela 203) apontou a existência de interação entre os fatores casca e cinza, o que pode ser observado nos gráficos apresentados na Figura 186.

Os gráficos destacam que a distribuição em tamanho de casca 10 mm apresentou redução na velocidade de propagação da onda ultra-sônica (VPU_CPS) quando da adição de 35% de cinza, tendo apresentado a menor amplitude de variação entre os percentuais de adição de cinza.

No caso da distribuição em tamanho de casca 5 mm, a melhoria observada na velocidade de propagação da onda ultra-sônica (VPU_CPS) com a adição de cinza, foi constatada ao se comparar os percentuais de adição de 0% e de 35% de cinza, tendo

apresentado a maior amplitude de variação dentre as distribuições em tamanho de casca.

Verificou-se, ainda, que nos percentuais de adição de 0% e de 20% de cinza, os valores de média evoluem com o aumento da dimensão das partículas.

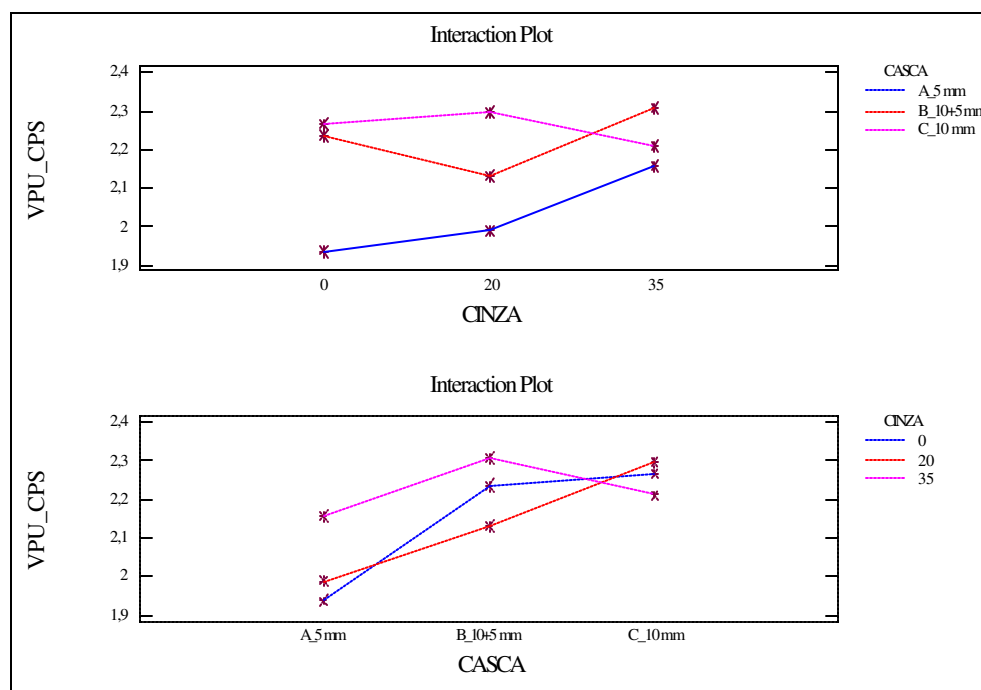


Figura 186: Interação casca-cinza: elemento de análise **VPU_CPS**.

No caso da interação casca-condição, a análise da variância (Tabela 203) apontou uma interação casca-condição que pode ser observada nos diferentes gráficos apresentados na Figura 187, que evidenciam que a distribuição em tamanho de casca 10 mm apresentou os maiores valores médios e a menor diferença entre as médias nas condições seca e úmida.

Destaca-se que o aumento da VPU_CPS, associado ao aumento na dimensão das partículas de casca, independente da condição dos corpos-de-prova no ensaio.

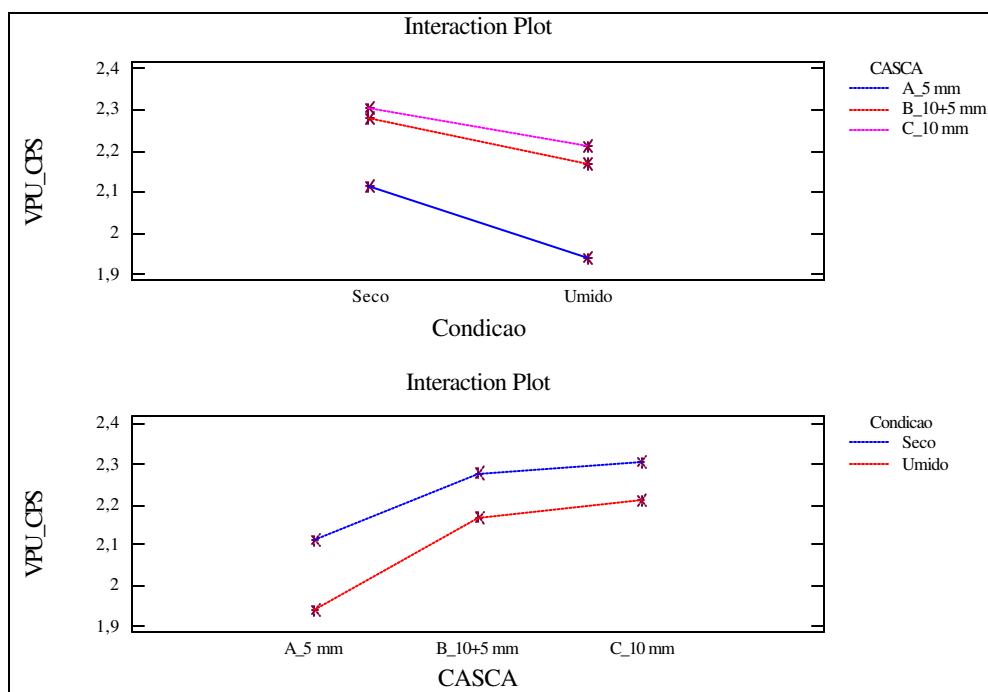


Figura 187: Interação casca-condição: elemento de análise **VPU_CPS**.

A análise da variância (Tabela 203) apontou uma interação cinza-condição que pode ser observada nos gráficos apresentados na Figura 188, que destacam que o percentual de adição de 35% de cinza apresentou os maiores valores médios em **VPU_CPS**.

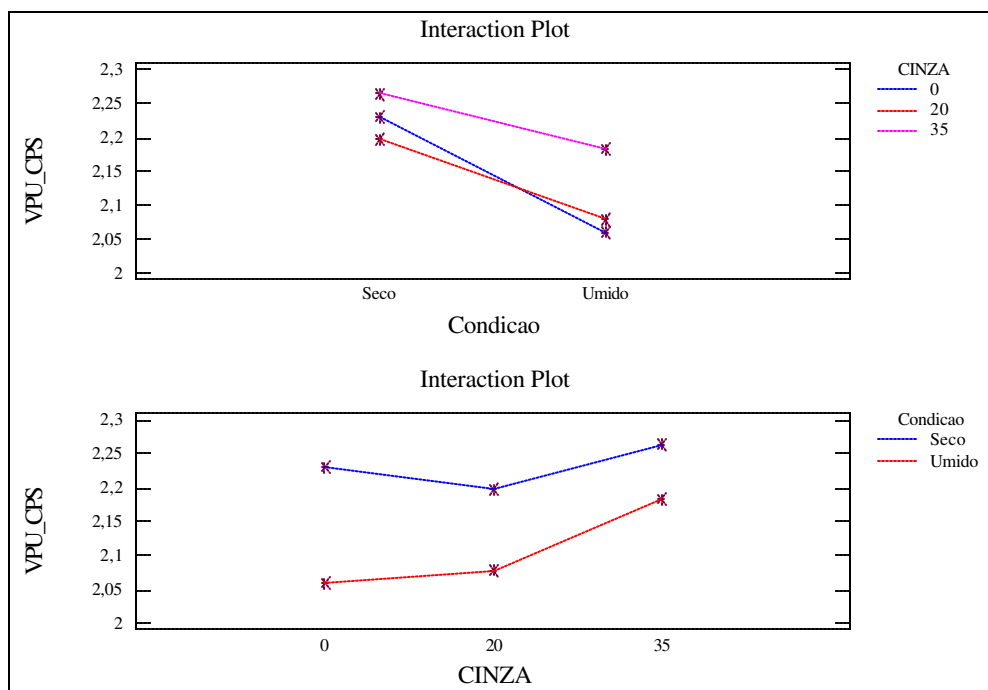


Figura 188: Interação cinza-condição: elemento de análise **VPU_CPS**.

D) Considerações finais sobre o elemento de análise VPU_CPS.

Verificou-se que os fatores CASCA, CINZA e CONDIÇÃO, bem como as interações CASCA-CINZA (AB), CASCA-CONDIÇÃO (AC) e CINZA-CONDIÇÃO (BC), afetaram de forma significativa a VPU nos corpos-de-prova ensaiados à compressão paralela à superfície. Entre as misturas produzidas com as distribuições em tamanho de casca 10+5 mm e 10 mm, não se verificou diferença significativa, sendo que suas médias são superiores e significativamente diferentes da média da distribuição em tamanho de casca 5 mm.

Verificou-se que, em geral, a velocidade de propagação da onda ultra-sônica (VPU_CPS) aumenta com o aumento do percentual de adição de cinza.

As misturas com adição de cinza em percentual de 35% apresentaram valor médio superior e significativamente diferente das misturas dos demais percentuais, o que pode ser explicado pela possibilidade da formação de elementos capazes de permitir a passagem do pulso ultra-sônico, minimizando os efeitos de atenuação (associados ao fator CASCA), como já observado nos estudos anteriores, em corpos-de-prova cilíndricos (FASES I, II e III, nas análises dos gráficos de EVPU).

A VPU_CPS dos corpos-de-prova na condição seca apresentou comportamento superior e significativamente diferente da VPU_CPS dos corpos-de-prova na condição úmida, sendo que a mudança de condição, de seca para úmida, promoveu redução em cerca de 5,5% na VPU_CPS. Essa redução não deve ser associada diretamente à condição do material no ensaio mas, sim, em consequência da saturação das fibras da casca, onde o inchamento possivelmente promoveu rupturas na estrutura, dificultando a passagem do pulso ultra-sônico.

Entre as misturas avaliadas, destacaram-se as de 10 mm-20%, 10+5 mm-35% e a de 10 mm-35%, por apresentarem as menores reduções VPU de, respectivamente, 1,85%, 2,73% e de 3,43%, quando da mudança de condição de seca para úmida.

4.4.2.3 Avaliação da Massa Específica Aparente em corpos-de-prova extraídos das PLACAS e ensaiados à compressão paralela à superfície (MEAp_CPS, em MPa).

A Tabela 207 apresenta a análise da variância (ANOVA) para o elemento de análise massa específica aparente (MEAp_CPS, em g/cm³), verificando-se que apenas nas interações

CASCA-CONDIÇÃO e CASCA-CINZA-CONDIÇÃO, não se evidenciou a existência de diferença estatística significativa (p-valor < 0,05).

Tabela 207: ANOVA do elemento de análise MEAp_CPS.

Analysis of Variance for MEAp_CPS - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	0,171904	2	0,0859521	21,40	0,0000
B:CINZA	0,193685	2	0,0968424	24,11	0,0000
C:Condicao	1,18755	1	1,18755	295,71	0,0000
INTERACTIONS					
AB	0,107444	4	0,0268611	6,69	0,0000
AC	0,0092625	2	0,00463125	1,15	0,3166
BC	0,0278764	2	0,0139382	3,47	0,0320
ABC	0,0351028	4	0,00877569	2,19	0,0699
RESIDUAL	1,66257	414	0,00401587		
TOTAL (CORRECTED)	3,3954	431			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

A seguir, são apresentados os resultados da avaliação da casca, da cinza, da condição dos corpos-de-prova no ensaio (massa específica aparente seca e massa específica aparente úmida ou saturada após 24 h de imersão) e da interação casca-cinza-condição.

A) Efeito da adição de CASCA.

A Tabela 208 apresenta a análise das médias para o fator CASCA, podendo se destacar a falta de diferença significativa entre as médias dos corpos-de-prova das misturas 10 mm e 10+5 mm, superiores e significativamente diferentes da mistura 5 mm.

Avaliando-se os valores médios apresentados, evidencia-se uma tendência de aumento na MEAP_CPS, com o aumento na dimensão das partículas de casca, o que pode ser explicado pelo fato da quantidade de casca na mistura se reduzir com o aumento na dimensão das partículas. Destaca-se que dos materiais empregados nas misturas, a casca (diferentes distribuições em tamanho de casca) apresenta a menor massa específica.

Tabela 208: Análise do fator CASCA: elemento de análise **MEAp_CPS** dos corpos-de-prova ensaiados à compressão paralela à superfície: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for MEdp_CPS by CASCA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CASCA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
A_5 mm	144	1,41354	X
B_10+5 mm	144	1,455	X
C_10 mm	144	1,45667	X

Misturas marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

B) Efeito da adição de CINZA.

A Tabela 209 apresenta a análise do fator CINZA, podendo se verificar que os percentuais de adição de 20% e de 35% não diferem significativamente entre si, sendo inferiores e significativamente diferentes do percentual de adição de 0% de cinza (utilizado como controle ou testemunha no experimento), em até 3,1%.

Tabela 209: Análise do fator CINZA: elemento de análise **MEAp_CPS** dos corpos-de-prova ensaiados à compressão paralela à superfície: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for MEdp_CPS by CINZA			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
CINZA	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
35	144	1,42597	X
20	144	1,42757	X
0	144	1,47167	X

Adições marcadas com “x” em uma mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

C) Efeito da CONDIÇÃO dos corpos-de-prova no ensaio.

A Tabela 210 apresenta a análise do fator CONDIÇÃO dos corpos-de-prova no ensaio, onde se destaca que o material na condição úmida (**massa específica aparente úmida**) diferem significativamente do material ensaiado na condição seca (**massa específica aparente seca**), em função do aumento na massa pela absorção de água.

Verificou-se que a mudança na MEdp_CPS da condição dos corpos-de-prova de seco (massa específica aparente seca) para úmido (massa específica aparente úmida) foi de cerca de

7,5% e que a absorção de água não contribuiu para melhorar o meio de propagação do pulso ultra-sônico, destacando-se que nas FASES I e II (Pastas), as medidas de VPU estavam associadas à formação de estruturas cristalinas (Início de Pega) e não à presença de sólidos em suspensão.

Tabela 210: Análise do fator CONDIÇÃO: elemento de análise **MEAp_CPS** dos corpos-de-prova ensaiados à compressão paralela à superfície: Médias (Tukey, 95%).

Multiple Range Tests for MEA _p _CPS by Condicao			
Method: 95,0 percent Tukey HSD			
Condicao	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
Seco	216	1,38931	X
Umido	216	1,49417	X

Condições marcadas com “x” numa mesma coluna não apresentam diferença estatística significativa.

D) Efeito das Interações CASCA-CINZA-CONDIÇÃO.

A análise da variância (Tabela 207) apontou uma interação que pode ser observada nos gráficos apresentados na Figura 189, onde se destaca a redução na MEA_p_CPS com o aumento na adição de cinza (10 mm).

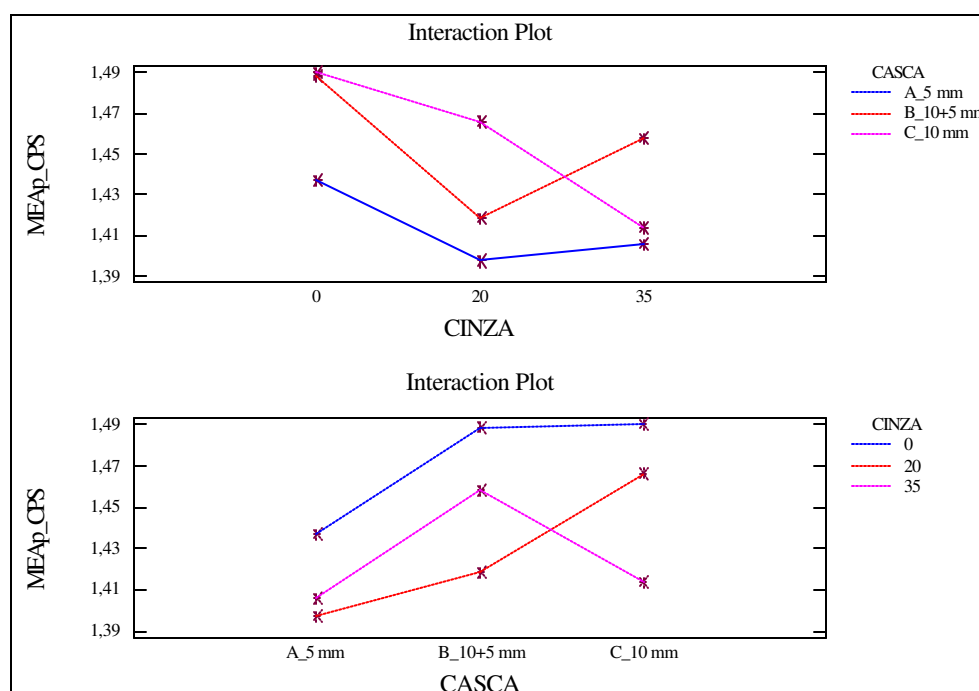


Figura 189: Interação casca-cinza: elemento de análise **MEAp_CPS**.

Destacou-se, ainda, o percentual de adição de 0% de cinza, por apresentar os maiores valores de média, diferindo significativamente dos demais percentuais de adição.

No caso da interação casca-condição, a análise da variância (Tabela 207) apontou uma ausência de interação que pode ser observada nos diferentes gráficos apresentados na Figura 190, que evidenciam um aumento na MEAp_CPS com a mudança da condição dos corpos-de-prova no ensaio, de seco para úmido.

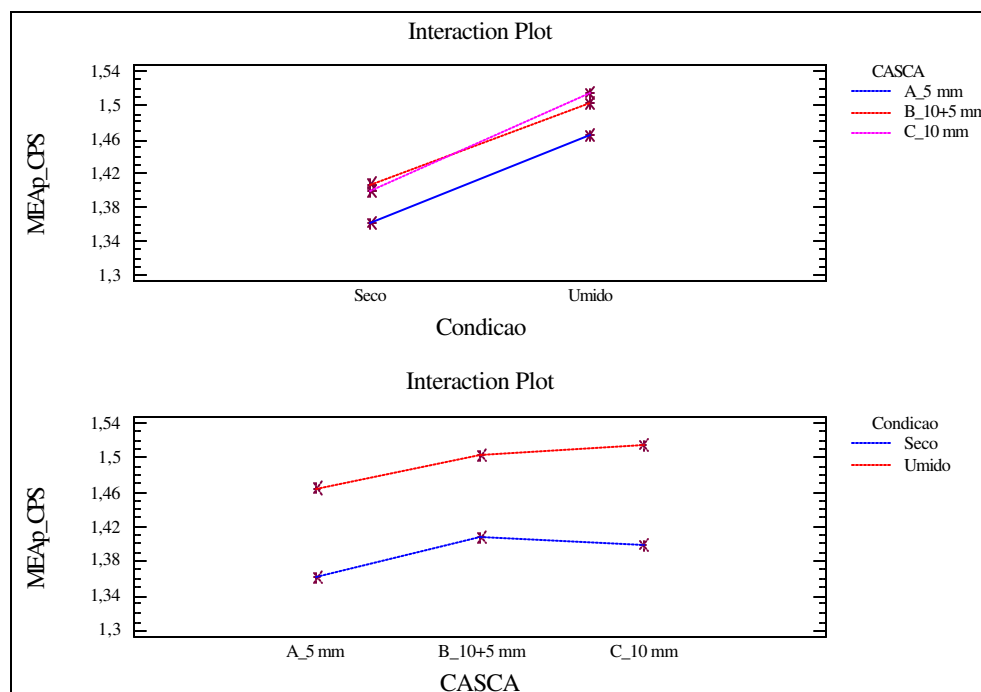


Figura 190: Interação casca-condição: elemento de análise MEAp_CPS.

No caso da interação cinza-condição, a análise da variância (Tabela 207) apontou uma interação que pode ser observada nos gráficos apresentados na Figura 191, que evidencia que o percentual de adição de 0% de cinza apresentou valores de média superiores e estatisticamente diferentes dos demais percentuais.

Destacou-se, ainda, que a mudança da condição dos corpos-de-prova no ensaio, de seca para úmida, promoveu aumento na MEAp_CPS, tendo-se verificado que, em geral, a massa específica aparente se reduz com o aumento do percentual de adição de cinza.

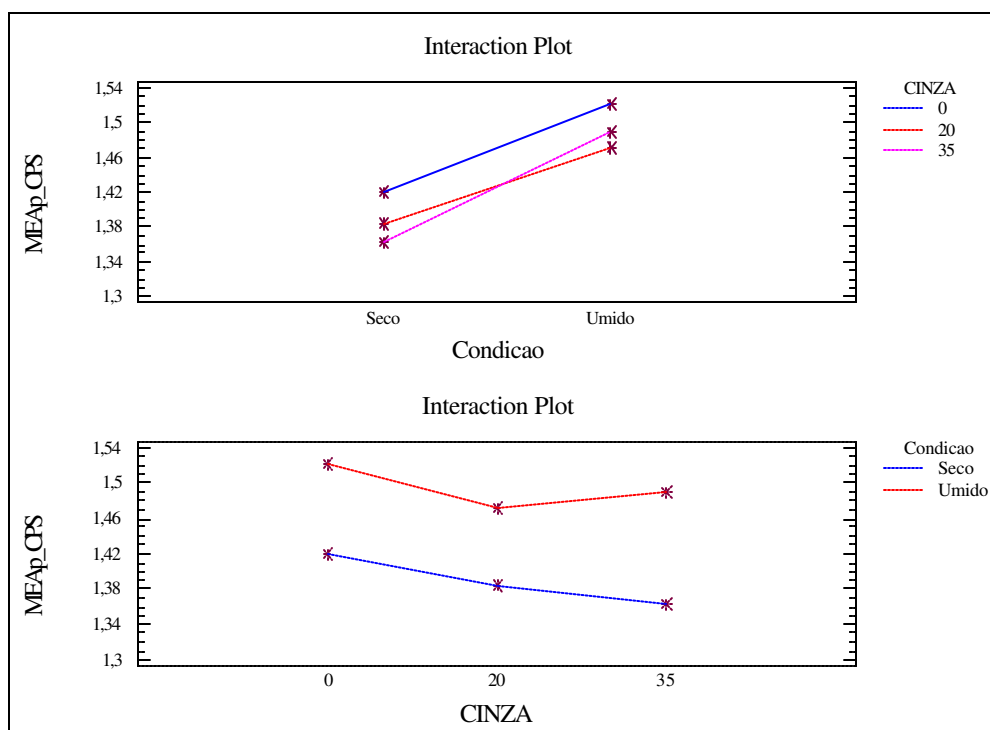


Figura 191: Interação cinza-condição - fator CINZA: elemento de análise MEAp_CPS.

D) Considerações finais sobre o elemento de análise MEAp_CPS.

Verificou-se que os fatores CASCA, CINZA e CONDIÇÃO, bem como as interações CASCA-CINZA (AB) e CINZA-CONDIÇÃO (BC), afetaram de forma significativa a massa específica aparente dos corpos-de-prova ensaiados à compressão paralela à superfície.

Entre as misturas produzidas com as distribuições em tamanho de casca 10+5 mm e 10 mm, não se verificou diferença significativa, sendo que suas médias são superiores e significativamente diferentes da média da distribuição em tamanho de casca 5 mm.

As adições de cinza, em percentuais de 20% e de 35%, apresentaram valores médios inferiores e significativamente diferentes do percentual de adição de 0%, empregado no experimento como controle (testemunha).

Destaca-se que o material na condição úmida (massa específica aparente úmida) difere significativamente do material ensaiado na condição seca (massa específica aparente seca), de modo que a absorção de massa de água, quando da mudança de seca para úmida, está associada a um aumento médio de 7,5% na MEAp. Entre as misturas avaliadas, destacam-se as de 5 mm-20%, 5 mm-35% e 10 mm-35%, por apresentarem os menores valores médios de MEAP_CPS, quer seja na condição seca ou na condição úmida.

4.4.2.4 Considerações finais sobre o ensaio de Compressão Paralela à Superfície.

Dos elementos de análise empregados para avaliar os corpos-de-prova ensaiados à compressão paralela à superfície, destaca-se, como principal, a resistência máxima alcançada, representada pelo elemento de análise tensão de ruptura (Tensao_CPS).

A Tabela 211 apresenta o resultado das comparações efetuadas entre as médias das condições seca e úmida para os elementos de análise Tensão_CPS, VPU_CPS e MEAp_CPS, destacando-se o percentual de redução ou de aumento, em função da mudança de condição, de seca para a úmida.

Tabela 211: Ensaio de compressão paralela à superfície (CPS): comparação entre médias, nas condições seca e úmida, com base na condição seca dos corpos-de-prova.

Mistura	REDUÇÃO		AUMENTO
	Tensao CPS	VPU_CPS	MEAp_CPS
5 mm-0%	31,8%	8,9%	11,4%
5 mm-20%	39,0%	6,9%	8,4%
5 mm-35%	34,9%	6,9%	4,4%
10+5 mm-0%	39,4%	6,6%	5,3%
10+5 mm-20%	45,2%	4,5%	6,2%
10+5 mm-35%	28,5%	9,0%	2,7%
10 mm-0%	31,8%	6,1%	6,4%
10 mm-20%	37,6%	7,4%	1,9%
10 mm-35%	36,6%	11,9%	3,4%

Destaca-se que a mistura 10+5 mm-35% apresentou a menor redução na resistência à ruptura (Tensao_CPS = 28,53%) e o menor aumento na massa específica aparente (MEAp_CPS) em função da mudança de condição, de seca para úmida, ou seja, a variação entre a massa específica aparente seca e a massa específica aparente úmida foi de 2,7%.

A mistura 10 mm-35% apresentou uma das menores médias de resistência à ruptura (5,30 MPa) e uma redução na tensão de ruptura de cerca de 36,6% (Tensao_CPS), além de um dos menores aumentos na massa específica aparente (MEAp_CPS), em função da mudança da condição, de seca para a úmida, de cerca de 3,4%.

A causa da redução observada na VPU_CPS não está bem definida, mas acredita-se que esteja ligada à expansão das fibras (inchamento), pela sua saturação, promovendo aumento nos efeitos de atenuação, pela ruptura nos elementos capazes de permitir a passagem do pulso ultra-sônico.

A correlação entre os elementos de análise Tensao_CPS e VPU_CPS foi de 0,62 e o coeficiente de determinação (R^2) de 39%. Contudo, avaliando-se a correlação entre os elementos, levando em consideração a condição dos corpos-de-prova no ensaio, verificou-se que a correlação entre Tensao_CPS e VPU_CPS, nas condições secas, foi de 0,56 e, o coeficiente de determinação (R^2) de 31,3%. No caso da correlação entre Tensao_CPS e VPU_CPS nas condições úmidas, foi de 0,72 e o coeficiente de determinação (R^2) de 51,4%. As expressões, das respectivas equações lineares (11 e 12) são:

$$\text{Tensao\_CPS}_{(seca)} = -2,95191 + 4,66564 * \text{VPU\_CPS}_{(seca)} \quad (11)$$

$$\text{Tensao\_CPS}_{(úmido)} = -4,67919 + 4,38111 * \text{VPU\_CPS}_{(úmido)} \quad (12)$$

A correlação entre os elementos de análise Tensao_CPS e MEAp_CPS foi de **(-0,06)** e o coeficiente de determinação (R^2) de 0,37%. Estes baixos valores podem ser explicados pelo fato de ser uma análise conjunta dos corpos-de-prova nas condições seca e úmida (Figura 192), o que apontou a necessidade de se efetuar avaliações isoladas, para a condição seca e, para a condição úmida.

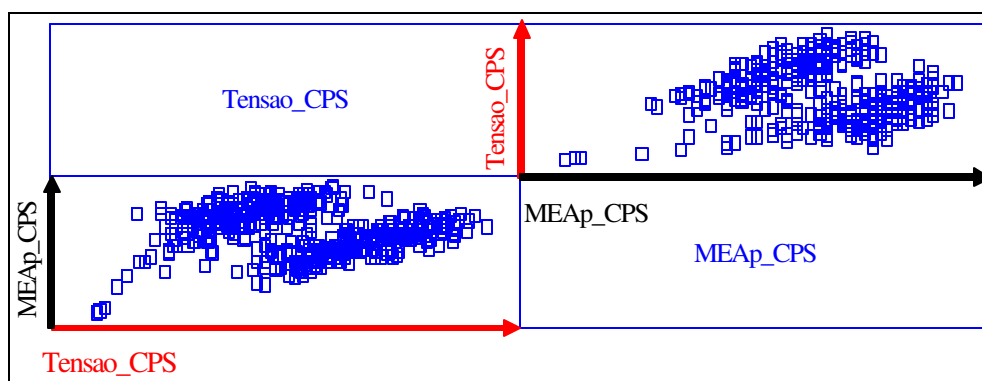


Figura 192: Correlação entre **Tensao_CPS** e **MEAp_CPS**: dispersão dos pontos, em análise conjunta das condições seca e úmida.

A correlação entre Tensao_CPS e MEAp_CPS, nas condições secas (Figura 193), foi de 0,74 e o coeficiente de determinação (R^2) de 54,6%.

A expressão da equação linear (13) e o seu gráfico (Figura 194) são:

$$\text{Tensao\_CPS}_{(seca)} = -13,4642 + 15,0332 * \text{MEAp\_CPS}_{(seca)} \quad (13)$$

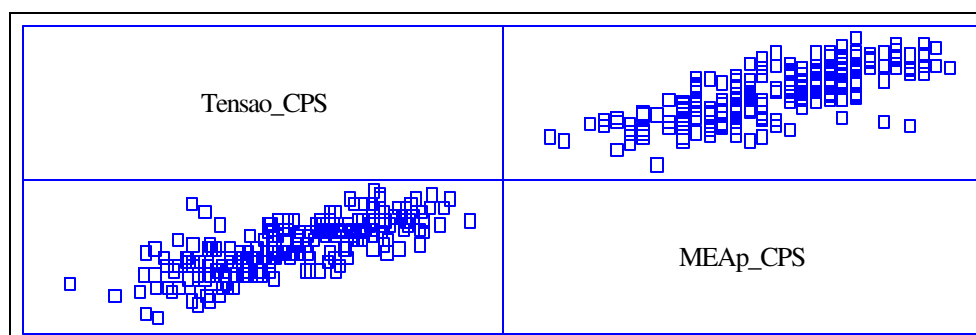


Figura 193: Correlação entre **Tensao_CPS** e **MEAp_CPS**: dispersão dos pontos dos elementos em análise na condição seca.

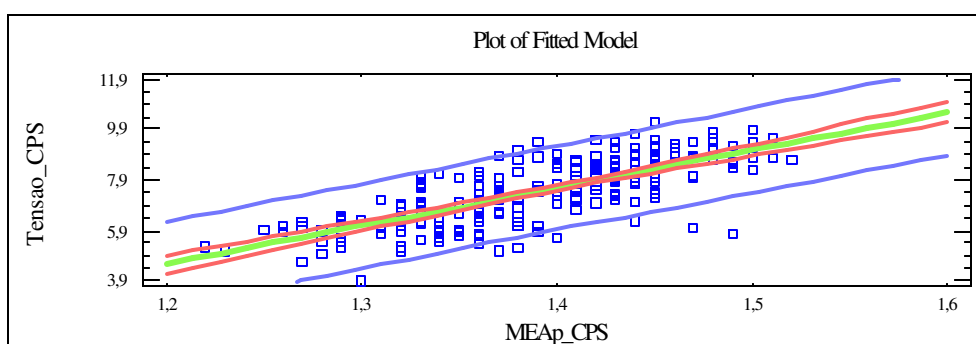


Figura 194: Correlação entre **Tensao_CPS** e **MEAp_CPS** na condição seca: **Equação linear**, **Limites do intervalo de confiança (95%)** e, **Limites dos valores previstos pela equação**.

A correlação entre Tensao_CPS e MEAp_CPS, na condição úmida (Figura 195), foi de 0,69 e o coeficiente de determinação (R^2) de 47,4%. A expressão da equação linear encontrada (14) e o seu gráfico (Figura 196) são:

$$\text{Tensao\_CPS}_{(\text{úmido})} = -10,169 + 9,97905 * \text{MEAp\_CPS}_{(\text{úmido})} \quad (14)$$

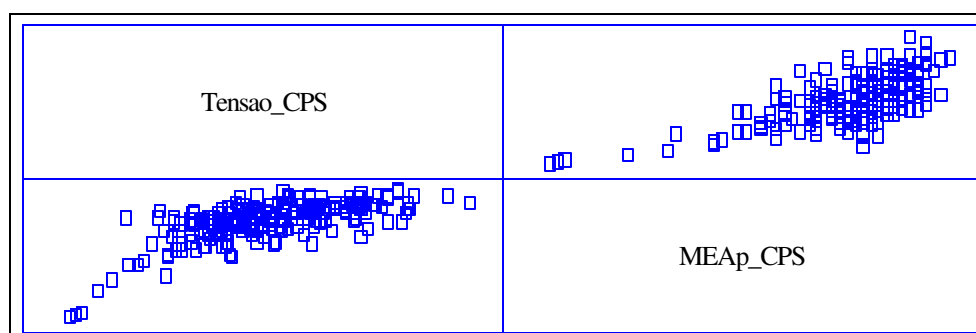


Figura 195: Correlação entre **Tensao_CPS** e **MEAp_CPS**: dispersão dos pontos dos elementos em análise na condição úmida.

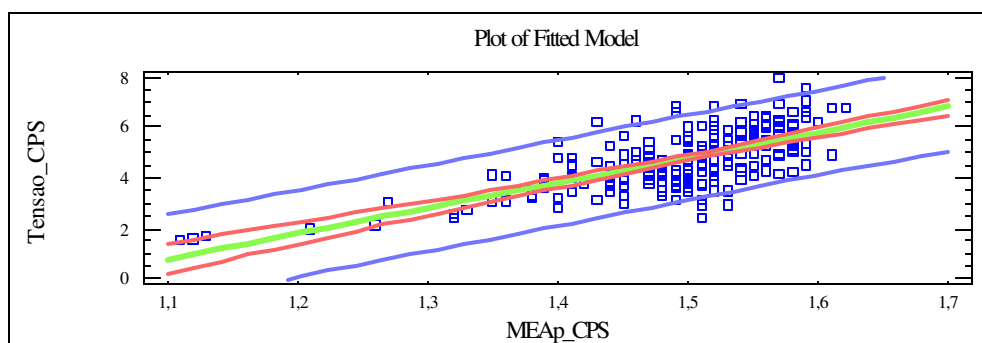


Figura 196: Correlação entre **Tensao_CPS** e **MEAp_CPS** na condição úmida: **Equação linear**, **Limites do intervalo de confiança (95%)** e, **Limites dos valores previstos pela equação**.

A correlação entre VPU_CPS e MEAp_CPS foi de 0,42 e o coeficiente de determinação (R^2) de 17,7%.

Contudo, avaliando-se a correlação entre os elementos, levando em consideração a condição dos corpos-de-prova no ensaio, verificou-se que a correlação entre VPU_CPS e MEAp_CPS, ambos na condição seca, foi de 0,65 e o coeficiente de determinação (R^2) de 43%.

No caso da correlação entre VPU_CPS e MEAp_CPS, ambos na condição úmida, foi de 0,79 e o coeficiente de determinação (R^2) de 62,4%. As expressões, das respectivas equações lineares (15 e 16), são:

$$\text{VPU\_CPS}_{(\text{seca})} = 0,0843374 + 1,54737 \cdot \text{MEAp\_CPS}_{(\text{seca})} \quad (15)$$

$$\text{VPU\_CPS}_{(\text{úmido})} = -0,652251 + 1,8718 \cdot \text{MEAp\_CPS}_{(\text{úmido})} \quad (16)$$

Destaca-se, desta forma, a importância da condição do material a ser ensaiado, quando se efetua uma avaliação empregando a VPU como elemento de análise e, mesmo como método preditivo de comportamento.

4.4.3 Avaliação dos corpos-de-prova extraídos das placas – ensaio de absorção e variação dimensional

A Tabela 212 apresenta as médias dos resultados dos corpos-de-prova obtidos no ensaio de absorção de água, para o período de imersão de 24 h, expressos em percentuais de massa e de volume, com base na massa ou volume medidos antes da imersão em água

(posição vertical; afastamento mínimo de 10 mm), previamente condicionados em sala climatizada (temperatura $22\pm 3^{\circ}\text{C}$).

Tabela 212: **FASE IV - Absorção de água:** 24 h de imersão.

Absorção de Água (%)		
Mistura	Variação no Volume	Variação na Massa
5 mm - 35%	1,17	10,91
5 mm - 20%	1,54	12,58
5 mm - 0%	1,58	10,14
10+5 mm - 35%	1,09	11,40
10+5 mm - 20%	1,63	12,87
10+5 mm - 0%	1,61	9,10
10 mm - 35%	1,49	13,25
10 mm - 20%	1,57	11,67
10 mm - 0%	1,59	9,64

Na Figura 197 apresenta-se o gráfico das curvas de variação na absorção de água, em percentuais de massa, para as diferentes misturas testadas.

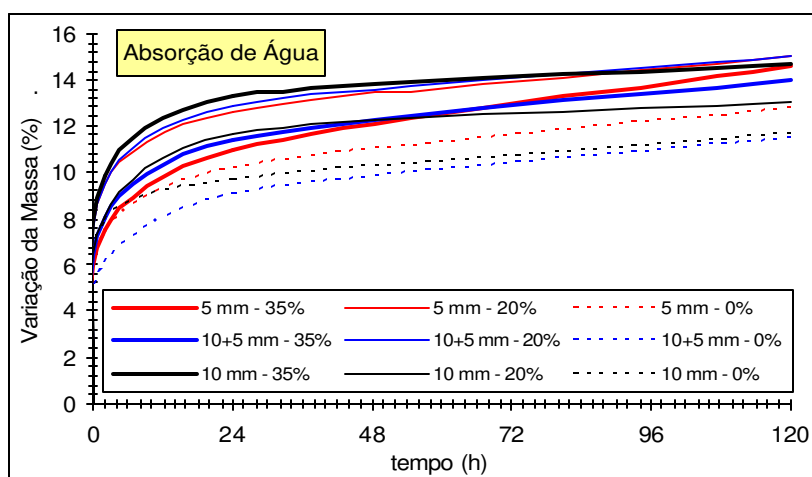


Figura 197: Curvas de variação da absorção de água: percentuais de massa.

A Tabela 213 apresenta a análise da variância (ANOVA) para os valores de absorção de água em massa, para o tempo de absorção de 24 h (comportamento similar para os tempos de 2 h e de 120 h).

Destaca-se que apenas no fator CINZA evidencia-se a existência de diferença significativa ($p\text{-valor} < 0,05$) entre as médias dos corpos-de-prova das misturas.

Verificou-se que as misturas com percentuais de adição de 20% e de 35% de cinza

apresentaram valores médios de absorção (ABS_Massa_24_h), que foram superiores e significativamente diferentes do percentual de adição de 0% de cinza.

Tabela 213: ANOVA do ensaio de absorção de água – Variação na MASSA (ABS_Massa_24_h) para o tempo de imersão de 24 h.

Analysis of Variance for ABS_Massa_24_h - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	0,765896	2	0,382948	0,35	0,7083
B:CINZA	38,2516	2	19,1258	17,56	0,0001
INTERACTIONS					
AB	12,3801	4	3,09503	2,84	0,0548
RESIDUAL	19,6089	18	1,08938		
TOTAL (CORRECTED)	71,0065	26			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

O gráfico da interação casca-cinza (Figura 198) destaca a variação na absorção de água em percentuais de massa (ABS_Massa_24_h) relativos ao tempo de imersão de 24 h.

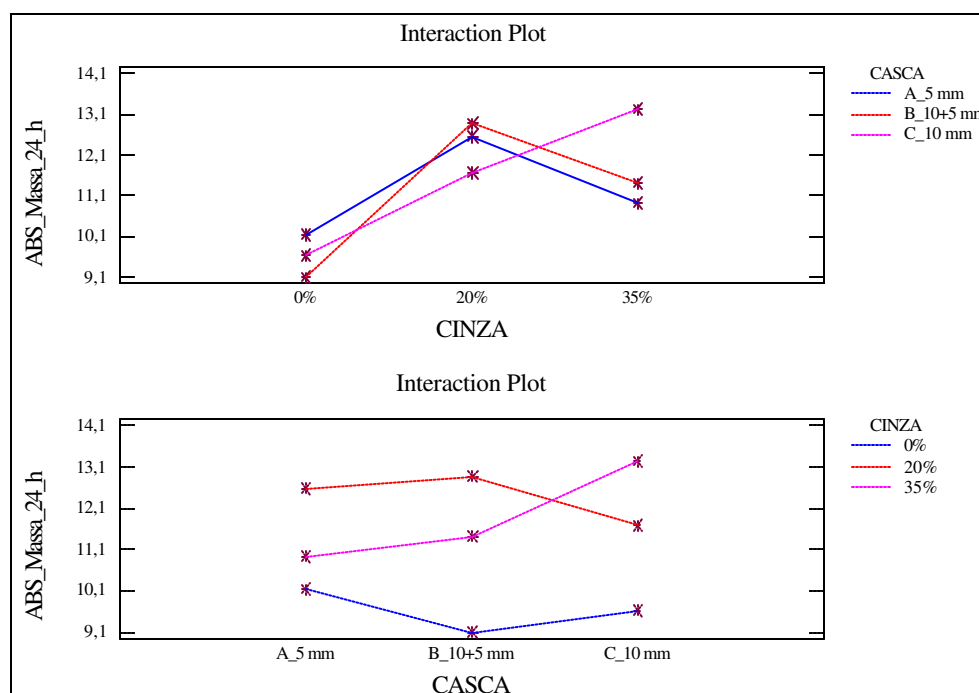


Figura 198: Interação casca-cinza evidenciando a absorção de água em percentuais de massa (ABS_Massa_24_h).

Verificou-se que o valor médio da absorção de massa de água em misturas com adição de 0% de cinza foi, em geral, inferior e significativamente diferente dos valores médios da absorção de massa de água em adições de 20% e de 35% de cinza, que não diferem estatisticamente entre si.

Na Figura 199 apresenta-se o gráfico das curvas de variação na absorção de água, em percentuais de volume, para as diferentes misturas testadas.

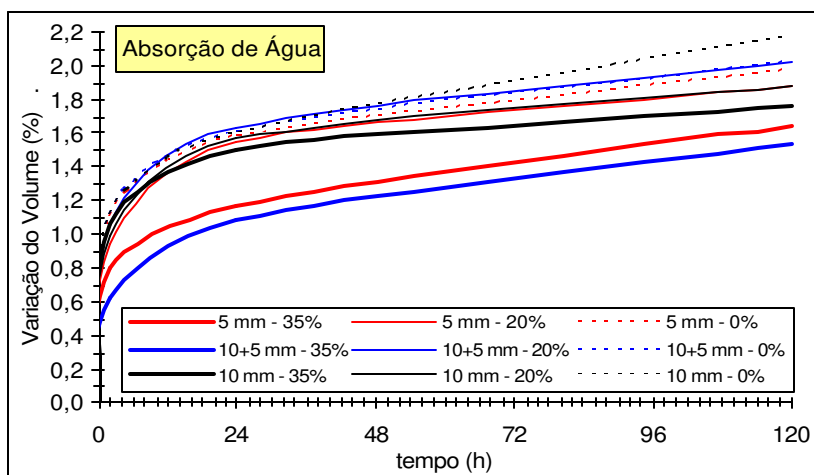


Figura 199: Curvas de variação na absorção de água: percentuais de volume.

A Tabela 214 apresenta a análise da variância (ANOVA) para os valores de absorção de água em volume, para o tempo de absorção de 24 h.

Tabela 214: ANOVA do ensaio de absorção de água – Variação no VOLUME (ABS_Volume_24_h) para o tempo de imersão de 24 h.

Analysis of Variance for ABS_Volume_24_h - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:CASCA	0,0874889	2	0,0437444	0,15	0,8610
B:CINZA	0,694689	2	0,347344	1,20	0,3247
INTERACTIONS					
AB	0,201756	4	0,0504389	0,17	0,9489
RESIDUAL	5,21827	18	0,289904		
TOTAL (CORRECTED)	6,2022	26			
All F-ratios are based on the residual mean square error.					

Destaca-se a ausência de diferença significativa (p -valor $< 0,05$) nos fatores CASCA, CINZA e na interação CASCA-CINZA.

Verificou-se que a variação no volume não foi influenciada pela composição das misturas (fatores CASCA, CINZA e interação CASCA-CINZA).

A análise da variância apontou a ausência de interação casca-cinza, evidenciada nos gráficos da Figura 200, relativa à variação da absorção de água em percentuais de volume para o tempo de imersão de 24 h (ABS_Volume_24_h).

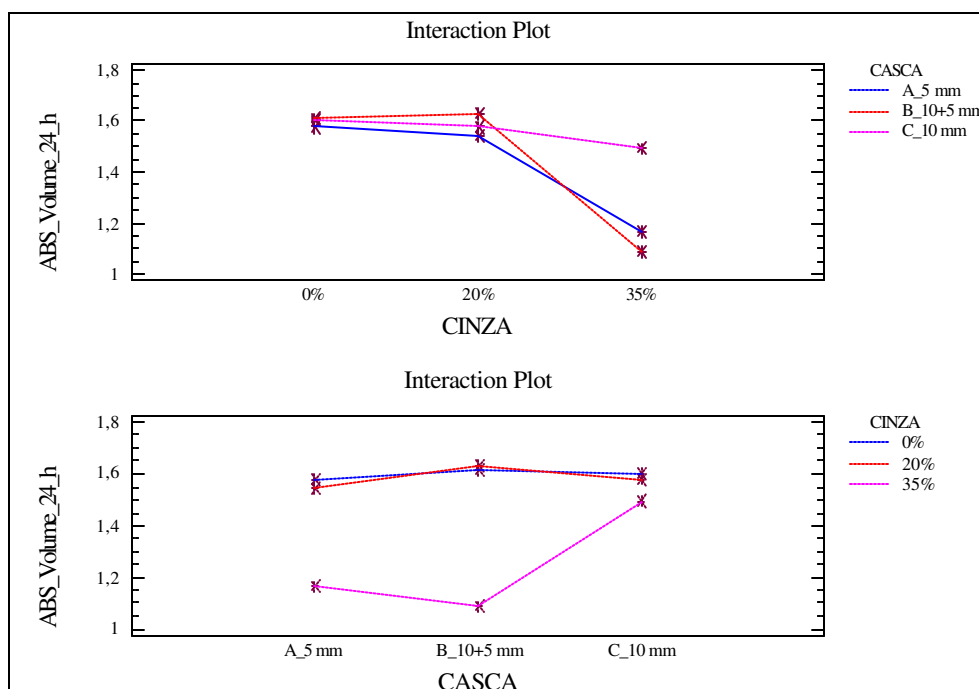


Figura 200: Interação casca-cinza e intervalo de confiança (Tukey, 95%), para a absorção de água em percentuais de volume (ABS_Volume_24_h).

Acredita-se que a menor variação volumétrica (misturas com adições de 20% e de 35% de cinza) pode estar associada ao efeito de redução dos macroporos, pelo aumento no percentual de **finos** na mistura.

A Tabela 215 apresenta o resumo dos ensaios efetuados.

A Figura 201 apresenta as curvas da variação (média) no comprimento, na largura e na espessura dos corpos-de-prova, para as diferentes misturas avaliadas.

Tabela 215: **FASE IV**: Resumo do comportamento dos parâmetros avaliados.

FASE IV		Ensaio de Flexão						Ensaio de Compressão Paralela à Superfície					
		MOE LP		Tensão LP		Tensão Ruptura		VPU CPS		Tensão CPS		MEAp CPS	
Casca	5 mm	X		X		X		X		X		X	
	10+5 mm	X		X		X			X		X		X
	10 mm	X		X		X			X		X		X
Cinza	0%		X	X			X	X		X			X
	20%	X		X		X		X		X		X	
	35%		X	X		X	X		X		X		
Condição	Seco		X		X		X		X		X		X
	Úmido	X		X		X		X		X			X

FASE IV		Ensaio de Absorção - em % de Massa						Ensaio de Absorção - em % de Volume					
		2 h		24 h		120 h		2 h		24 h		120 h	
Casca	5 mm	X		X		X		X		X		X	
	10+5 mm	X		X		X		X		X		X	
	10 mm	X		X		X		X		X		X	
Cinza	0%	X		X		X		X		X		X	
	20%		X		X		X	X		X		X	
	35%	X	X		X		X	X		X		X	

Distribuições em tamanho de casca marcadas com “x” em uma mesma coluna não difere m estatisticamente.

Percentuais de adição de cinza marcados com “x” em uma mesma coluna não difere m estatisticamente.

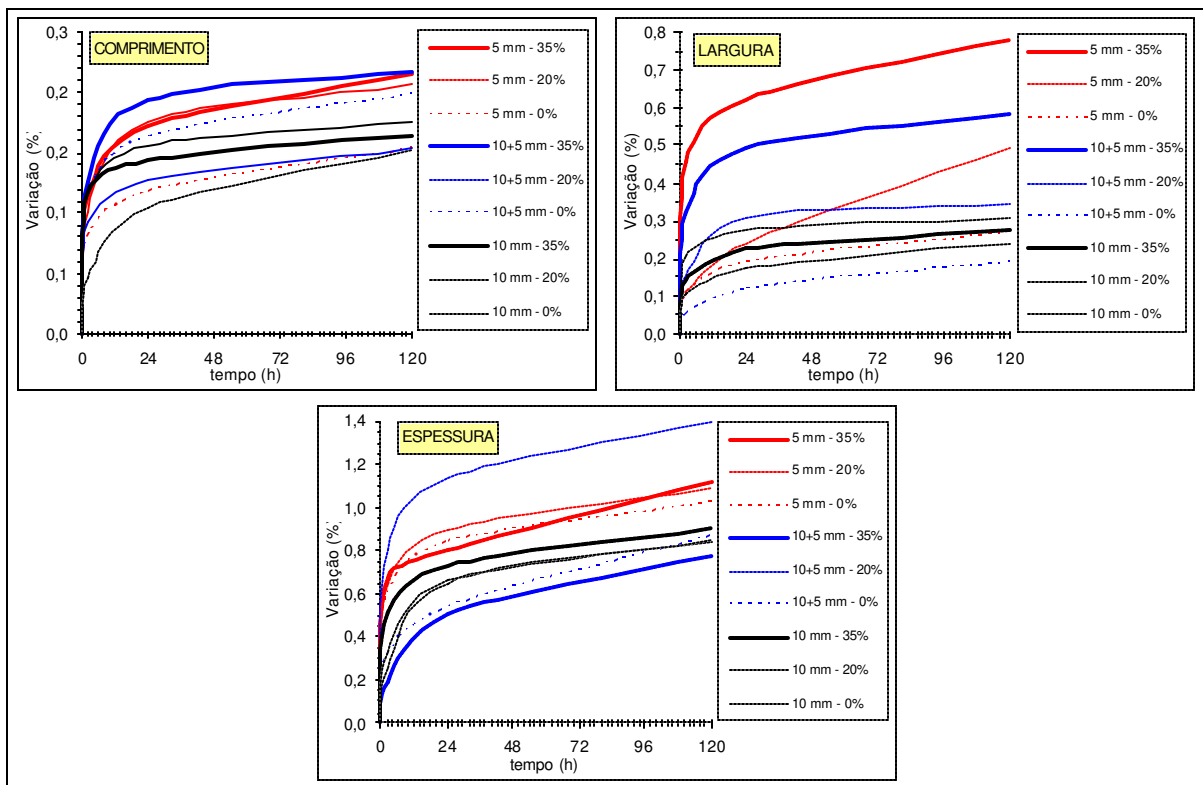


Figura 201: Curvas da variação (média) das dimensões dos corpos-de-prova (comprimento, largura e espessura) em função do tempo de imersão.

Na Figura 202 são apresentadas as curvas de variação (média) dos componentes dimensionais em função da distribuição em tamanho de casca (5 mm, 10+5 mm e 10 mm) ou do percentual de adição de cinza (0%, 20% e 35%).

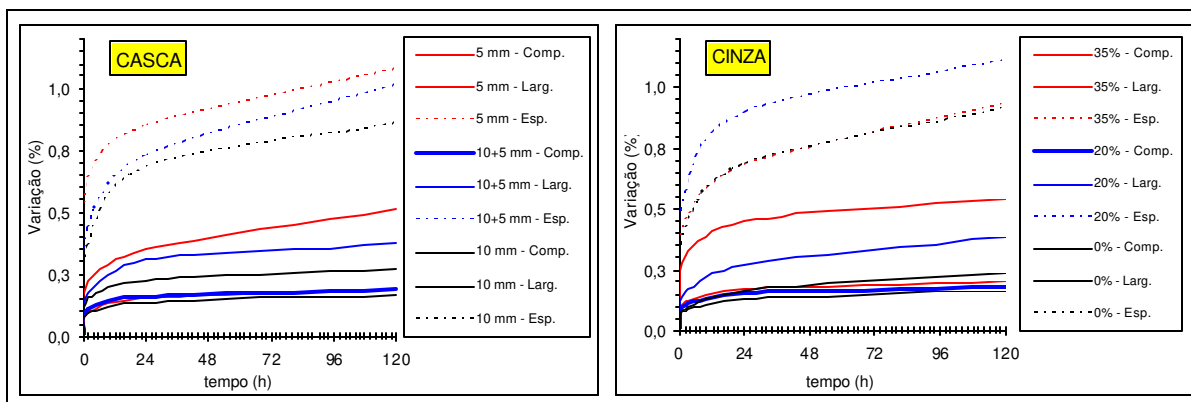


Figura 202: Curvas da variação (médias) das dimensões dos corpos-de-prova em função da distribuição em tamanho da casca ou do percentual de adição da cinza.

Avaliando-se as variações referentes às diferentes distribuições em tamanho de casca (Figuras 201 e 202) verificou-se que entre as mesmas (5 mm, 10+5 mm e 10 mm) não existe diferença significativa, sendo que as maiores variações observadas, na largura e na espessura, estão associadas à distribuição em tamanho de casca 5 mm, que possui uma maior presença de finos em sua composição.

No caso da adição de cinza, verificou-se que o percentual de adição de 35% promoveu as maiores variações no comprimento e na largura, enquanto que o percentual de adição de 20% promoveu as maiores variações na espessura.

A Tabela 216 apresenta, de forma resumida, o resultado das avaliações estatísticas (Tukey, 95%) efetuadas com base nos valores das variações referentes a cada mistura, o que permite destacar que as variações dimensionais são, em geral, não significativas.

Tabela 216: Resumo da avaliação estatística das variações dimensionais (Tukey, 95%).

Tempo de imersão		2 h			24 h			120 h		
Dimensão	Fator	ANOVA		Variação	ANOVA		Variação	ANOVA		Variação
		(p-valor)	S ou NS		(p-valor)	S ou NS		(p-valor)	S ou NS	
Comprimento	Casca	0,8411	NS	10 = 5 = (10+5)	0,6439	NS	10 = 5 = (10+5)	0,6595	NS	10 = (10+5) = 5
	Cinza	0,3896	NS	0 = 20 = 35	0,4031	NS	0 = 20 = 35	0,6945	NS	0 = 20 = 35
	Interação	0,4920	NS	=====	0,6444	NS	=====	0,7490	NS	=====
Largura	Casca	0,4355	NS	10 = (10+5) = 5	0,4647	NS	10 = (10+5) = 5	0,2205	NS	10 = (10+5) = 5
	Cinza	0,0153	S	(0 = 20); (20 = 35); (0 ? 35)	0,0613	NS	0 = 20 = 35	0,1702	NS	0 = 20 = 35
	Interação	0,1208	NS	=====	0,4223	NS	=====	0,7203	NS	=====
Espessura	Casca	0,2534	NS	10 = (10+5) = 5	0,7872	NS	10 = (10+5) = 5	0,6771	NS	10 = (10+5) = 5
	Cinza	0,6818	NS	0 = 35 = 20	0,6222	NS	0 = 35 = 20	0,7241	NS	0 = 35 = 20
	Interação	0,3553	NS	=====	0,7818	NS	=====	0,8390	NS	=====

OBS.: Teste de significância = Tukey, 95%; **NS** = Não Significativo (p-valor > 0,05); **S** = Significativo (p-valor < 0,05)
10 => 10 mm; 5 => 5 mm e (10+5) => (10+5) mm. Variação: do menor valor para o maior valor => 10 = 5 = (10+5).

A escolha de uma mistura para a produção de compósitos, com base na estabilidade

dimensional, aponta para misturas com distribuição em tamanho de casca 10 mm-35%, com menor custo de manipulação (não necessita de moagem da casca), além de propiciar um maior consumo de cinza, com inegáveis benefícios ambientais.

Destaca-se que a umidade dos corpos-de-prova (realizada após o ensaio de absorção e variação dimensional - ASTM D1037-78/1982) antes do ensaio foi: 5 mm-35% = 15,0%; 5 mm-20% = 17,0%; 5 mm-0% = 20,1%; 10+5 mm-35% = 15,8%; 10+5 mm-20% = 17,1%; 10+5 mm-0% = 18,9%; 10 mm-35% = 15,7%; 10 mm-20% = 16,5%; 10 mm-0% = 18,6%.

4.4.4 Considerações finais sobre o ensaio das placas.

Avaliando-se os resultados dos ensaios de flexão estática e de absorção e de variação dimensional, verificou-se que o fator CASCA não apresentou um efeito estatisticamente significativo no comportamento das misturas.

No caso do ensaio de compressão paralela à superfície, verificou-se que o fator CASCA apresentou um efeito estatisticamente significativo em função do baixo desempenho das misturas produzidas com a distribuição em tamanho de casca 5 mm, em relação às misturas produzidas com distribuições em tamanho de casca 10+5 mm e 10 mm (não diferiram significativamente entre si).

Em relação ao fator CINZA, verificou-se que nos ensaios de flexão estática e de absorção e variação dimensional, não existe diferença significativa entre as misturas.

No caso do ensaio de compressão paralela à superfície, a existência de diferença significativa é observada entre a mistura com adição de 0% de cinza (maiores valores médios de resistência) e misturas com adições de 20% e de 35% de cinza (não diferem significativamente entre si).

Com base nos dados apresentados, considera-se que a mistura 10 mm-35% apresenta comportamento que, em geral, não difere significativamente das demais misturas, apresentando como vantagens, em relação às demais misturas, um menor consumo de cimento sem comprometer de forma significativa o desempenho das placas.

4.5. Resultados relativos da avaliação conjunta do comportamento das misturas das Fases I, II, III e IV – Correlações e Modelos matemáticos.

O elevado volume de informações e a complexidade da análise pretendida, de correlacionar as Fases I, II, III e IV da pesquisa, impôs a necessidade da ação de especialistas⁴ para efetuar a avaliação do comportamento das misturas. Restringiu-se a análise conjunta das Fases I, II, III e IV aos resultados dos ensaios mecânicos envolvendo o ensaio de tração por compressão diametral (Tensao_D dos corpos-de-prova cilíndricos das Fases I, II e III) e os ensaios de flexão estática e compressão paralela à superfície (Fase IV).

Em função de características do software empregado pelos especialistas, os algarismos romanos (fases I, II, III e IV) empregados no texto para definir as diferentes fases, foram convertidos em algarismos arábicos (Fases 1, 2, 3 e 4), para a apresentação gráfica.

Entre os principais resultados das análises, destacaram que o aumento da quantidade de casca adicionada promoveu uma queda substancial do valor da resistência à tração por compressão diametral (Tensao_D), tendo-se observado que o comportamento da tensão na Fase III (compósitos) é aparentemente diferente do comportamento na Fase II (Pastas).

A Figura 203 apresenta um gráfico de caixas para a Tensao_D nas Fases I, II e III do experimento (corpos-de-prova cilíndricos).

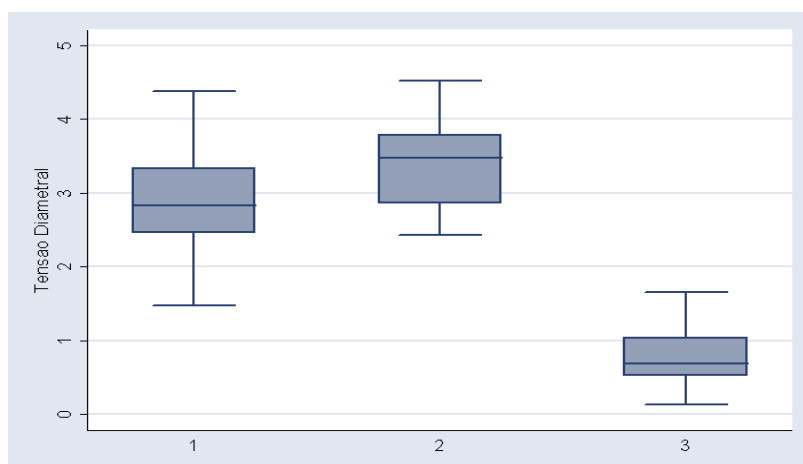


Figura 203 - Gráfico de caixas dos resultados dos ensaios mecânicos envolvendo o ensaio de tração por compressão diametral (Tensao_D): Fases I (1), II (2) e III (3).
Fonte: EstatJr-UNICAMP (Maia e Santos).

⁴ Contrato P11/06 – EstatJr-UNICAMP (www.estatjr.com.br) – Executores: Rafael Pimentel Maia (eumaia2003@yahoo.com.br) e Ana Paula Rocha dos Santos (paulaestat@yahoo.com.br).

A Tensao_D é maior na Fase I, e menor na III, (fato já observado anteriormente); com relação à variabilidade, a Fase I apresenta maior dispersão nos resultados, em função da maior ou menor eficiência do processo de lavagem, relacionado à redução de extrativos inibidores de pega e a um efeito relativo associado à dimensão das partículas.

Comparando-se as fases I (1), II (2) e III (3), sem levar em consideração a dosagem e a distribuição em tamanho da casca, obteve-se o gráfico de caixa apresentado na Figura 204, que destaca o comportamento diferenciado tanto entre as fases quanto entre os níveis de cinza (0% = 0; 5% = 5; 20% = 20 e 35% = 35).

Na Fase I (1) a variabilidade é maior do que na Fase II (2), em todos os níveis de cinza (teores de adição).

Verificou-se que a análise da relação entre as Fases I (1), II (2) e III (3) tornara-se complicada pelo fato de as mesmas apresentarem características distintas, principalmente a Fase I (1), onde se estudou, de forma isolada, cada faixa de distribuição em tamanho de partículas de casca.

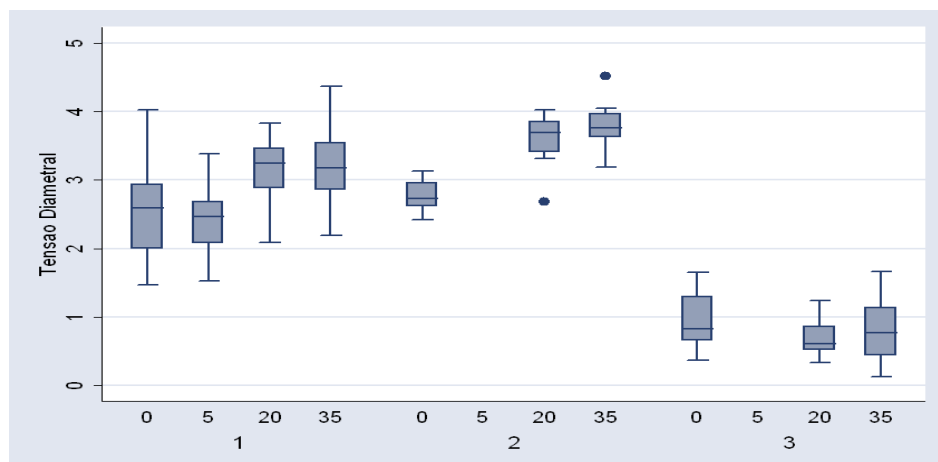


Figura 204 - Gráfico de caixas: **Tensao_D** - fases I (1), II (2) e III (3) para cada nível de cinza

Fonte: EstatJr-UNICAMP (Maia e Santos).

A forma encontrada para facilitar essa comparação foi a criação de novas variáveis, correspondentes à quantidade de casca de determinada faixa de distribuição em tamanho das partículas presente na mistura das mesmas (caracterizadas pela distribuição em tamanho de casca 5 mm, 10 mm e 10+5 mm) e a quantidade geral de casca de arroz (definida como **qtdade**). As novas variáveis e os níveis que elas assumem são apresentados na Tabela 217.

Tabela 217: Correlação entre Fases: Novas variáveis e níveis assumidos.

casca #16	0%	20,05%	42,05%	76,54%	100%
casca #30	0%	1,85%	6,58%	12,08%	100%
casca #50	0%	0,76%	1,34%	1,40%	100%
casca #100	0%	0,30%	0,39%	0,51%	100%
casca #200	0%	0,63%	0,67%	0,80%	100%
quantidade		7,5%	35%	39%	42%

Fonte: EstatJr-UNICAMP (Maia e Santos).

Inicialmente foram relacionadas as Fases I (1) e II (2), tendo se empregado um modelo de regressão linear múltipla, testando-se, inicialmente, o efeito de todos os diferentes níveis de casca e de cinza e suas interações. Em seguida, foram removidas do modelo as variáveis que não apresentaram significância estatística, de modo que se obteve como modelo, a equação (17):

$$Tensao\_D = 1,9892 + 0,0077*#16 + 0,0089*#30 + 0,0051*#50 + 0,0061*#100 + 0,0263 * CINZA - 0,0054*#16*#30 + 0,1357*#16*#100 \quad (17)$$

É importante salientar que esse modelo é para o caso em que a quantidade de casca na mistura está fixa em 7,5%. As faixas de distribuição em tamanho das partículas #16, #30, #50 e #100 têm efeito positivo, ou seja, quanto maior a quantidade dessas faixas maior, em média, será a tensão diametral (Tensao_D).

Entretanto, elas apresentaram interações, o que indicou que não se pode aumentar a quantidade de casca de uma determinada faixa de distribuição em tamanho das partículas, sem se preocupar com outras faixas de distribuição em tamanho das partículas de casca. A cinza também tem um efeito positivo, pois quanto maior a quantidade de cinza, maior será a Tensao_D. Das interações tem-se os seguintes resultados:

- 1) A interação entre a faixa de distribuição em tamanho das partículas #16 e a faixa de distribuição em tamanho das partículas #30 tem efeito negativo, ou seja, o aumento de uma, com fixação da outra ou, o aumento conjunto das duas, promoveu redução na Tensao_D.
- 2) O efeito da interação entre a faixa de distribuição em tamanho das partículas #16 e a faixa de distribuição em tamanho das partículas #100 é positivo, sendo que o aumento da quantidade das duas promoveu um aumento na Tensao_D.

No modelo seguinte foram utilizados os valores de Tensao_D obtidos nas fases I (1), II (2) e III (3), sendo utilizada a variável quantidade de casca (**qtdade**), empregando-se os mesmos procedimentos do desenvolvimento do modelo anterior, tendo como modelo final, a equação (18):

$$Tensao\_D = 2,9623 + 0,0057 * \#16 + 0,0068 * \#30 - 0,2317 * \#50 + 0,0331 * CINZA - 0,1025 * QTDADE - 0,0045 * \#16 * \#30 + 0,1125 * \#16 * \#50 + 0,0313 * \#50 * QTDADE - 0,0006 * CINZA * QTDADE \quad (18)$$

Em relação ao fator CASCA, apenas as faixas de distribuição em tamanho de partículas com dimensão característica de #16, #30 e # 50 tiveram efeito significativo, sendo que as faixas de distribuição em tamanho de partículas #16 e #30 apresentaram um efeito positivo e a faixa de distribuição em tamanho de partículas #50, apresentou um efeito negativo.

O fator CINZA e a variável qtdade (quantidade de casca) também foram significativos, sendo que o fator CINZA apresentou um efeito positivo enquanto que a variável qtdade (quantidade de casca) apresentou um efeito negativo. Como observado anteriormente, quanto maior for a quantidade de casca com relação ao total da mistura, menor será o valor da tensão diametral. As interações que permaneceram foram as seguintes:

- 1) A interação entre a faixa de distribuição em tamanho das partículas #16 e a faixa de distribuição em tamanho das partículas #30 tem efeito negativo, ou seja, o aumento de uma, com fixação da outra ou, o aumento conjunto das duas, promoveu redução na Tensao_D.
- 2) O efeito da interação entre a faixa de distribuição em tamanho das partículas #16 e a faixa de distribuição em tamanho das partículas #100 é positivo, pois o aumento da quantidade das duas promoveu um aumento na Tensao_D.
- 3) O aumento da quantidade de casca (qtdade) associado ao aumento da faixa de distribuição em tamanho das partículas #50, tem um efeito positivo, ou seja, promoveu aumento na Tensao_D.
- 4) O aumento da quantidade de CINZA, associado ao aumento da quantidade de casca (**qtdade**), tem um efeito negativo, ou seja, promoveu redução na Tensao_D.

Os especialistas apontaram em seu relatório a baixa correlação entre a Fase IV e as demais Fases, fato que se atribuiu ao processo de prensagem para a obtenção das placas.

Contudo, para efeito de registro e referenciamento, apresenta-se, a seguir, a correlação entre as Fases III (3) e IV (4), empregando-se o software Statgraphics Plus (1999).

A Figura 205 apresenta a matriz da dispersão dos pontos da correlação (intervalo de confiança de 95%) entre os ensaios de tração por compressão diametral (F_III_Diam), compressão simples (F_III_Axial), flexão estática (F_IV_Flexao) e compressão paralela à superfície (F_IV_CPS). Na Tabela 218 são apresentados os valores dos coeficientes de correlação entre os referidos ensaios, para um intervalo de confiança de 95%.

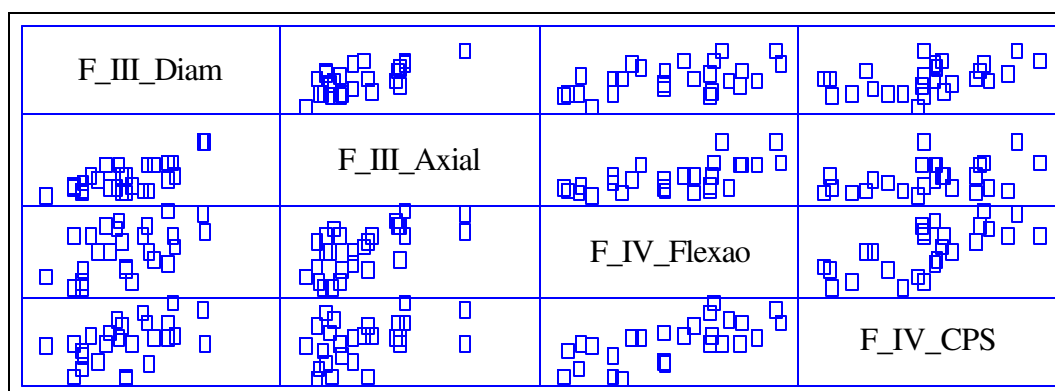


Figura 205: Correlação (Pearson): Matriz da dispersão dos pontos entre ensaios das fases **III (3)** e **IV (4)**.

Tabela 218: Coeficiente de correlação entre os ensaios de tração por compressão diametral, compressão simples, flexão estática e compressão paralela à superfície.

Correlations	F_III_Diam	F_III_Axial	F_IV_Flexao	F_IV_CPS
F_III_Diam		0,6937 (27) 0,0001	0,5163 (27) 0,0058	0,4723 (27) 0,0129
F_III_Axial	0,6937 (27) 0,0001		0,6468 (27) 0,0003	0,4127 (27) 0,0324
F_IV_Flexao	0,5163 (27) 0,0058	0,6468 (27) 0,0003		0,6903 (27) 0,0001
F_IV_CPS	0,4723 (27) 0,0129	0,4127 (27) 0,0324	0,6903 (27) 0,0001	

Legenda
Correlation
(Sample Size)
p-value

A correlação entre o ensaio de flexão estática (F_IV_Flexao) e o ensaio de tração por compressão diametral (F_III_Diam) foi de 0,52 com um coeficiente de determinação (R^2) de 26,7%. A expressão da equação linear (19) encontrada foi:

$$F_{IV\_Flexao} = 3,15261 + 1,54071 * F_{III\_Diam} \quad (19)$$

Avaliando-se outros modelos, verificou-se que os coeficientes de correlação e de determinação (R^2) não diferem muito do modelo linear. A Tabela 219 apresenta alguns dos modelos alternativos encontrados.

Tabela 219: Modelos alternativos, entre F_{IV_Flexao} e F_{III_Diam} : Coeficientes de correlação e de determinação (R^2).

Descrição	Modelo	Equação do modelo	Correlação	R^2 (%)
Multiplicative	$Y = a * X^b$	$F_{IV\_Flexao} = 4,58973 * F_{III\_Diam}^{0,223702}$	0,5282	27,9
Reciprocal-Y	$Y = 1/(a + b * X)$	$F_{IV\_Flexao} = 1/(0,316814 - 0,100118 * F_{III\_Diam})$	-0,5259	27,7
Square root-X	$Y = a + b * \sqrt{X}$	$F_{IV\_Flexao} = 2,22124 + 2,45865 * \sqrt{F_{III\_Diam}}$	0,5225	27,3
Exponential	$Y = \exp(a + b * X)$	$F_{IV\_Flexao} = 3,15261 + 1,54071 * F_{III\_Diam}$	0,5223	27,3
Square root-Y	$Y = (a + b * X)^2$	$F_{IV\_Flexao} = (1,77735 + 0,384408 * F_{III\_Diam})^2$	0,5196	27,0

OBS.: Multiplicative = Função potência ou COBB-DOUGLAS; Reciprocal-Y = Linear inversa de Y; Square root-X = Raiz Quadrada-X; Exponential = Exponencial; Square root-Y = Raiz Quadrada-Y.

A Figura 206 apresenta o gráfico para o modelo de equação linear.

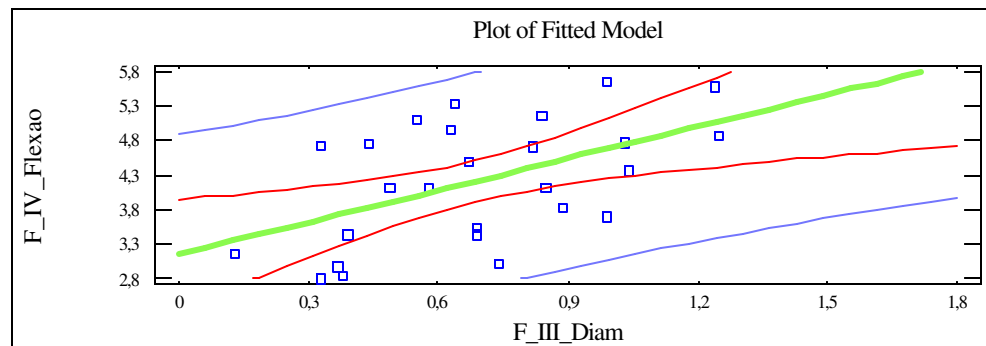


Figura 206: **Equação linear**, **Limites do intervalo de confiança (99%)** e, **Limites dos valores previstos pela equação**.

A correlação entre o ensaio de flexão estática (F_{IV_Flexao}) e o ensaio de compressão simples (F_{III_Axial}) foi de 0,65 com um coeficiente de determinação (R^2) de 41,8%. A expressão da equação linear (20) encontrada foi:

$$F_{IV\_Flexao} = 2,96216 + 0,553335 * F_{III\_Axial} \quad (20)$$

Avaliando-se outros modelos, verificou-se que os coeficientes de correlação e de determinação (R^2) não diferem muito do modelo linear. A Tabela 220 apresenta alguns dos

modelos alternativos encontrados.

Tabela 220: Modelos alternativos, entre F_IV_Flexao e F_III_Axial: Coeficientes de correlação e de determinação (R^2).

Descrição	Modelo	Equação do modelo	Correlação	R^2 (%)
Square root-X	$Y = a + b*\sqrt{X}$	$F_{IV\_Flexao} = 1,62067 + 1,76237*\sqrt{F_{III\_Axial}}$	0,6545	42,8
Logarithmic-X	$Y = a + b*\ln(X)$	$F_{IV\_Flexao} = 3,24663 + 1,32659*\ln(F_{III\_Axial})$	0,6532	42,7
Multiplicative	$Y = a*X^b$	$F_{IV\_Flexao} = 3,26538*F_{III\_Axial}^{0,320812}$	0,6367	40,5
Square root-Y	$Y = (a + b*X)^2$	$F_{IV\_Flexao} = (1,7369 + 0,134942*F_{III\_Axial})^2$	0,6362	40,5

OBS.: Square root-X = Raiz Quadrada-X; Logarithmic-X = Logarítmica de X; Multiplicative = Função potência ou COBB-DOUGLAS; Square root-Y = Raiz Quadrada-Y.

A Figura 207 apresenta o gráfico para o modelo de equação linear apresentado.

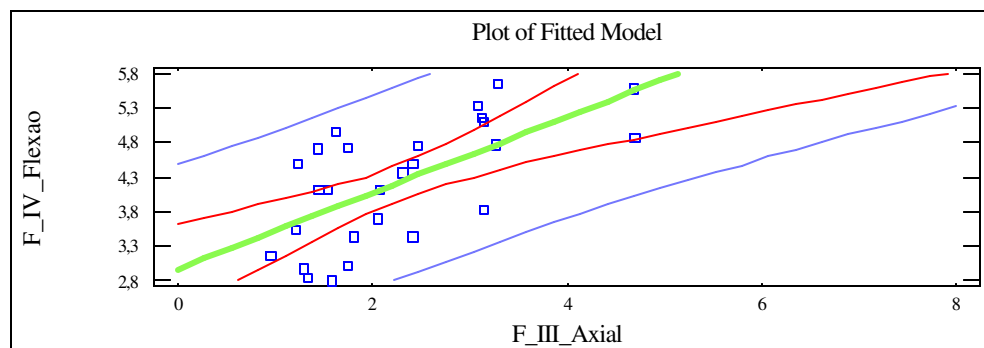


Figura 207: **Equação linear**, Limites do intervalo de confiança (95%) e, Limites dos valores previstos pela equação.

A correlação entre o ensaio de flexão estática (F_IV_Flexao) e o ensaio de compressão paralela à superfície (F_IV_CPS) foi de 0,69 com um coeficiente de determinação (R^2) de 47,7%. A expressão da equação linear (21) encontrada foi:

$$F_{IV\_Flexao} = -0,527226 + 0,639343*F_{IV\_CPS} \quad (21)$$

A correlação entre o ensaio de compressão paralela à superfície (F_IV_CPS) e o ensaio de tração por compressão diametral (F_III_Diam) foi de 0,47 com coeficiente de determinação (R^2) de 22,3%. A expressão da equação linear (22) encontrada foi:

$$F_{IV\_CPS} = 6,36953 + 1,52158*F_{III\_Diam} \quad (22)$$

A correlação entre o ensaio de compressão paralela à superfície (F_IV_CPS) e o ensaio de compressão simples (F_III_Axial) foi de 0,41 com coeficiente de determinação (R^2) de 17,0%. A expressão da equação linear (23) encontrada foi:

$$F_{IV\_CPS} = 6,55625 + 0,381245 * F_{III\_Axial} \quad (23)$$

As correlações apresentadas, entre as Fases III e IV, apontaram que a natureza particular da Fase IV (placas prensadas) produziu baixos valores de correlação, que podem ser considerados inadequados para uso como elemento preditivo de comportamento.

Em função desta característica, a avaliação global conjunta das Fases I, II, III e IV foi descartada.

Destaca-se, contudo, a importância das fases I, II e III, por evidenciarem o comportamento das misturas e, por denotar a necessidade de produzir corpos-de-prova em condições similares ao processo de fabricação, visando a obtenção do produto final.

4.6. Avaliação do consumo de cimento.

A avaliação envolvendo o consumo de cimento em pastas e em compósitos, apresentada na Fase III, indicou uma redução no consumo de cimento, com a adição de cinza.

No caso das placas, por sua natureza construtiva associada à prensagem das misturas, notou-se um comportamento diferenciado no consumo de materiais, uma vez que o volume ocupado pela mistura na confecção de corpos-de-prova cilíndricos, quando sob ação do processo de compactação (para uma mesma mistura), reduz-se de modo a alterar o consumo dos materiais.

Na Figura 208 os gráficos apresentados possibilitam efetuar-se uma comparação do comportamento das Fases III e IV, envolvendo os parâmetros de análise tensão de ruptura, massa específica aparente e velocidade de propagação da onda ultra-sônica.

Evidencia-se, desta forma, a mudança no comportamento de uma mesma mistura, quando sob a ação do processo de compactação.

Destaca-se que a adição de cinza, em percentual de 35%, promoveu a maior redução no consumo de cimento, como apontado na Tabela 221.

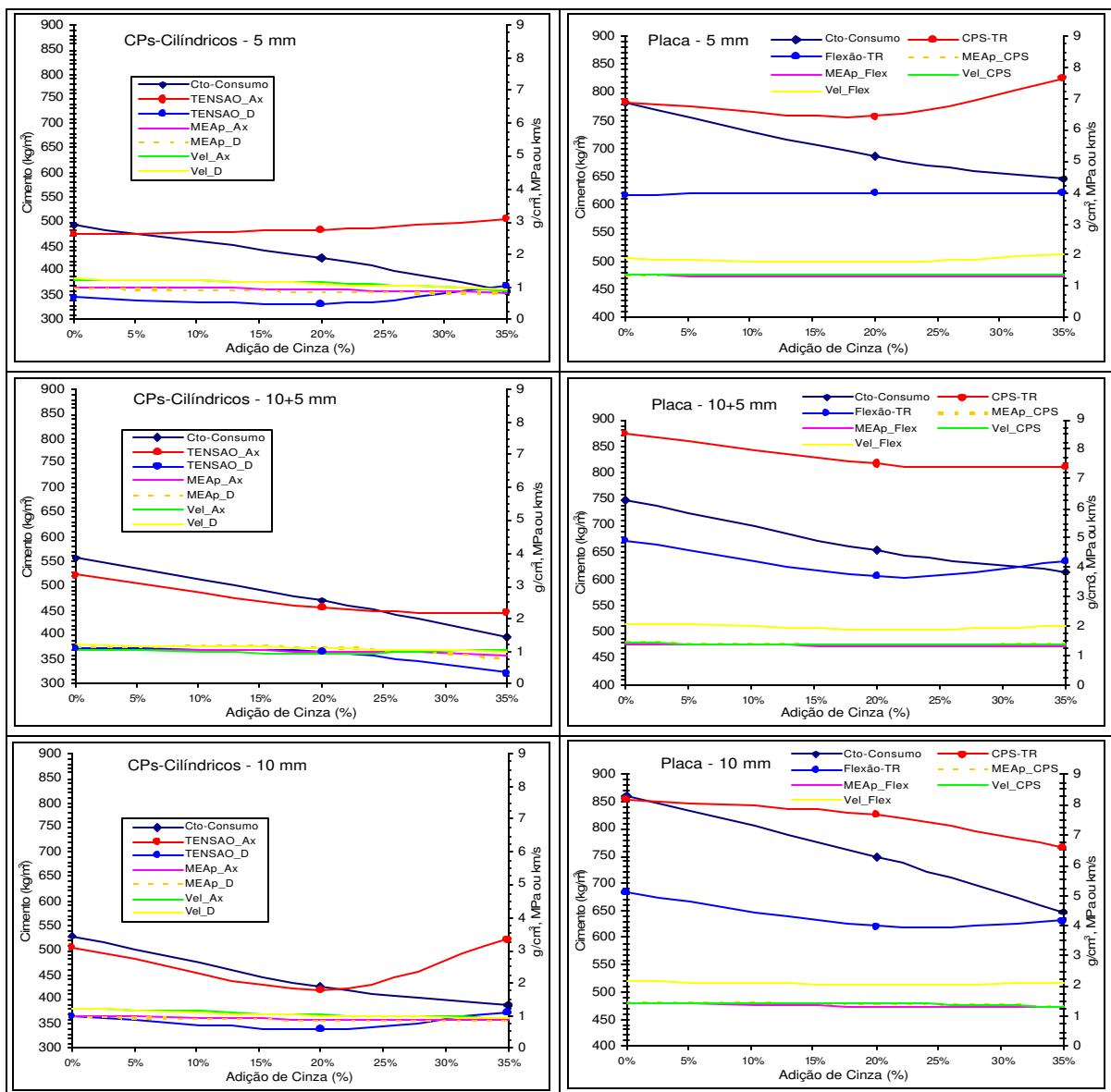


Figura 208: Comparação entre a fase III e a fase IV: Comportamento envolvendo a Tensão de ruptura, a Massa Específica Aparente e a velocidade de propagação da onda ultra-sônica, em conjunto com o consumo de cimento.

Tabela 221: Variação média da redução no consumo de cimento em função da adição de cinza.

Variação	Corpos-de-prova Cilíndricos			Placas Prensadas		
	5 mm	10+5 mm	10 mm	5 mm	10+5 mm	10 mm
0% ==> 20%	16,70%	11,80%	19,80%	14,00%	14,30%	15,20%
0% ==> 35%	26,80%	35,10%	26,00%	18,80%	20,90%	25,00%

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho de pesquisa evidenciou-se, por meio da apresentação dos resultados na forma de fases, que os efeitos da ação dos componentes empregados nas misturas variaram em função dos seus percentuais de adição em relação à massa da pasta de cimento (cimento + água + acelerador de pega cloreto de cálcio).

Em linhas gerais, evidenciou-se que em misturas tipo PASTA, o comportamento verificado diferiu daquele observado em misturas tipo COMPÓSITO, embora ambas se complementassem. A diferença no comportamento das misturas foi evidenciada a partir dos fatores CASCA e CINZA, por meio do resultado de ensaios aplicados aos corpos-de-prova cilíndricos e às placas prensadas. No caso das placas prensadas, além de avaliar os fatores CASCA e CINZA, avaliou-se também o efeito da CONDIÇÃO dos corpos-de-prova extraídos das placas (condição: seca ou úmida).

Baseado nas particularidades dos ensaios aplicados durante as diferentes fases nas quais se dividiu o presente trabalho, pôde-se concluir:

1. No caso do comportamento das misturas, em relação ao Fator CASCA, evidenciou-se que mesmo após a casca de arroz ter sido lavada em solução de cal, o comportamento químico das pastas e dos compósitos evidenciou a influência dos extrativos ainda presentes na casca de arroz. Destacou-se a melhoria excepcional da faixa de distribuição em tamanho de casca #100 com a dupla lavagem. Zucco (1999) já havia apontado que essa faixa de distribuição em tamanho de casca #100 apresentara um comportamento similar ao da faixa #200. No caso do comportamento mecânico associado ao ensaio de compressão simples, evidenciou-se que a casca, por apresentar baixa resistência ao esmagamento, se comparada à da pasta de cimento, atuava como um “vazio”, ou como um ponto de menor resistência em relação às demais regiões da pasta. Entre as faixas de distribuição em tamanho de casca avaliadas, destacaram-se aquelas que apresentavam uma dimensão característica definidas como #16, #30 e

- #50. Tais faixas de distribuição em tamanho de casca apresentaram um efeito significativo nas misturas (Fase II – pasta e, fase III - compósito), sendo que #16 e #30 promoveram incrementos na resistência à tração por compressão diametral das misturas (parâmetro de avaliação: Tensao_D), enquanto que a #50 promoveu redução na resistência à tração por compressão diametral. No caso das faixas #200 e #100 que acarretaram interferência nas misturas, quando em reduzido percentual na composição das misturas 5 mm, 10+5 mm e 10 mm, foram avaliadas como sendo não significativas, o que possibilitou a sua remoção dos modelos matemáticos envolvendo o ensaio de tração por compressão diametral. Os resultados do ensaio de compressão simples (parâmetro de avaliação: Tensao_Ax) evidenciaram, por meio da análise de misturas tipo pasta, que a adição de casca de arroz promoveu redução na resistência ao esmagamento, podendo-se associar tal fato à presença de vazios formados pela evaporação da água excedente ou pela baixa resistência à compressão inerente à casca de arroz. Entretanto, não se evidenciou nos compósitos (corpos-de-prova cilíndricos e placas prensadas) a existência de diferença significativa entre dosagens elevadas de casca de arroz de 36% (10 mm), 39% (10+5 mm) e 42% (5 mm).
2. No caso do comportamento das misturas envolvendo o Fator CINZA, verificou-se que para as misturas do tipo pasta, a adição de 5% de cinza não alterou seu desempenho mecânico, tendo como base de comparação a pasta definida como padrão de referência (PP-0%). Desse modo, este percentual foi descartado das demais análises, por envolver um consumo muito baixo do resíduo. Ainda em relação às misturas do tipo pasta (Fases I e II), evidenciou-se que a adição de cinza em percentuais de 20% e de 35% promoveu melhorias, destacadas nos resultados dos ensaios de tração por compressão diametral (parâmetro de avaliação: Tensao_D) e de compressão simples (parâmetro de avaliação: Tensao_Ax). O aumento no percentual de adição de cinza promoveu o aumento na resistência. No caso dos compósitos (Fases III e IV), verificou-se que, em geral, os ensaios de tração por compressão diametral (parâmetro de avaliação: Tensao_D) e de flexão estática (parâmetro de avaliação: Tensao_Ruptura) evidenciaram a ausência de diferença significativa entre as misturas, apontando uma tendência de similaridade no comportamento destes ensaios. Em relação aos ensaios de compressão simples (parâmetro de avaliação: Tensao_Ax)

- e de compressão paralela à superfície (parâmetro de avaliação: Tensao_CPS), verificou-se que a adição de cinza somente evidenciou redução na resistência, no parâmetro de avaliação Tensao_CPS, onde o percentual de 35% de adição promoveu as menores reduções, o que o aponta como o teor mais adequado para efetuar as misturas. A adição de 35% de cinza promoveu a maior redução no consumo de cimento, em média de 20% (5 mm, 10+5 mm e 10 mm), sem afetar de forma significativa, a resistência das misturas produzidas (10 mm-35% = redução de 25%).
3. A interação CASCA-CINZA se tornou evidente em muitos casos, tendo por destaque a mistura 10 mm-35% (Tabela 181), considerada como sendo a mais adequada para a produção de compósitos, por permitir o emprego da casca de arroz sem a necessidade de moagem aliada a um elevado consumo de cinza, dando-se, portanto, um destino mais adequado a estes rejeitos. Destaca-se um duplo efeito de interação atribuído à cinza que atua como “finos” capazes de promover melhorias na resistência mecânica e também como material adsorativo capaz de minimizar o efeito negativo dos extrativos ainda presentes na casca sobre a pasta de cimento. Contudo, verificou-se que o aumento de massa no sistema, associado à adição de cinza, promoveu redução em alguns dos parâmetros empregados nas avaliações química e mecânica.
 4. Especificamente no caso do ensaio das placas, a CONDIÇÃO do material no momento do ensaio evidenciou que a redução na resistência pode ser determinante para a definição da aplicação das placas prensadas em construções rurais.
 5. O ensaio de absorção evidenciou que, em termos de variação percentual de massa, as diferenças estatísticas evidenciadas foram creditadas à adição de cinza, em percentual de 20% e de 35%, o que se acredita que esteja relacionado com a maior capacidade de retenção de água, associada à maior presença de microporos. No caso da avaliação da absorção considerando-se a variação percentual de volume, verificou-se que não existe diferença significativa entre adições de casca e entre adições de cinza, indicando que as placas produzidas com as diferentes misturas apresentam a mesma estabilidade volumétrica.
 6. A metodologia empregada na obtenção dos cilindros de mistura (pastas ou compósitos) possibilitou a obtenção de corpos-de-prova que apresentaram valores médios de VPU (VPU_D e VPU_Ax), de MEAp (MEAp_D e MEAp_Ax) e de

MOEd (MOEd_D e MOEd_Ax), que foram considerados como homogêneos, indicando que o cilindro do qual foram extraídos foi moldado de forma considerada como uniforme. Os elementos de avaliação do comportamento químico (área sob a curva de hidratação e inclinação máxima da curva de hidratação, entre outros) ou, do comportamento mecânico (massa específica aparente e velocidade de propagação do pulso ultra-sônico, entre outros), apresentaram variabilidades atribuídas aos efeitos dos extrativos ainda presentes na casca de arroz e, principalmente, à adição de massa ao sistema. Porém, não se tornou possível efetuar uma quantificação precisa da influência destes agentes promotores da variabilidade, pois existem outros fatores, evidenciados (porosidade) ou não, que não puderam ser considerados no presente trabalho, requerendo-se, portanto, estudos mais aprofundados para que se obtenha uma melhor compreensão da ação dessas variáveis.

7. O comportamento das placas prensadas das diferentes distribuições em tamanho de casca (5 mm, 10+5 mm e 10 mm) seguiu a tendência apontada por Zucco (1999), ou seja, a prensagem promoveu uma uniformidade no comportamento, traduzido pela ausência de diferença significativa entre as misturas.
8. O resultado do método empregado para as determinações do início e do fim de pega em pastas mostrou ser muito dependente da habilidade e da interpretação pessoal do operador, devendo o mesmo ser aperfeiçoado associando-se o tempo e a temperatura com o desenvolvimento da resistência à penetração (NBR 9832/1992).
9. Em misturas tipo compósito, a correlação entre o ensaio de tração por compressão diametral (Tensao_D) e o ensaio de compressão simples (Tensao_Ax) foi muito baixa, obtendo-se um coeficiente de determinação de 38,6%. Da mesma maneira foi muito baixo o coeficiente de determinação ($R^2 = 26,7\%$) entre os ensaios de flexão estática e de tração por compressão diametral.

Para os trabalhos futuros, pretende-se desenvolver estudos visando uma maior redução no tempo de desforma, empregando-se diferentes técnicas como a deposição química e a cura térmica com vapor de baixa pressão (sistema integrado para a produção do compósito cimento-cinza-casca, onde: casca → energia → cinza → compósito cimento-cinza-casca).

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M.; DEROLLE, A. **Construindo com fibras vegetais**. In: Tecnologia de Edificações - São Paulo. IPT-Pini, 1990. p. 17-20.

AJIWE, V.I.E.; OKEKE, C.A.; AKIGWE, F.C. A preliminary study of manufacture of cement from rice husk ash. **Bioresource Technology**. May 2000, 73(1), p. 37-39. ISSN: 0960-8524.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL - ASTM. Standard methods of evaluating the properties of wood-based fiber and particle panel materials. In: Annual Book of ASTM Standards, **ASTM D1037-78**. Philadelphia, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5733** – Cimento Portland de alta resistência inicial. Especificação. Rio de Janeiro, 1991. 5 p.

_____. **NBR 5737** – Cimento Portland resistentes a sulfatos. Especificação. Rio de Janeiro, 1992. 4 p.

_____. **NBR 5752** – Materiais Pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento. Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1992. 3 p.

_____. **NBR 6474** – Cimento Portland e outros materiais em pó: Determinação da massa específica. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984. 4 p.

_____. **NBR 7175** – Cal hidratada para argamassas. Especificação. Rio de Janeiro, 1992.

_____ **NBR 7215** – Cimento Portland: Determinação da resistência à compressão. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1996. 8 p.

_____ **NBR 7217** – Agregados: Determinação da composição granulométrica, método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987. 3 p.

_____ **NBR 7222** – Argamassa e Concreto: Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994. 3 p.

_____ **NBR 9776** – Agregados: Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman, método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987. 3 p.

_____ **NBR 9832** – Concreto e Argamassa – Determinação dos tempos de pega por meio da resistência à penetração. Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1992. 3 p.

_____ **NBR 9939** – Agregados: Determinação do teor de umidade total, por secagem, em agregado gráudo. Rio de Janeiro, 1987. 2 p.

_____ **NBR 11581** – Cimento Portland: Determinação dos tempos de pega. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991. 3 p.

_____ **NBR 11768** – Aditivos para concreto de cimento Portland. Especificação. Rio de Janeiro, 1992. 4 p.

_____ **NBR 12006** – Cimento: Determinação do calor de hidratação pelo método da garrafa de Langavant. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1990. 4 p.

BAKER, P. New burning law will cost californians more. **Rice Journal**, Raleigh, U.S.A., v. 95, n. 4. p. 16-18, may. 1992.

BERALDO, A. L. **Généralisation et optimisation de la fabrication d'un composite biomasse végétale-ciment à variations dimensionnelles limitées vis-à-vis des variations de l'humidité.** 222 p. Tese (Thèse de Docteur em Sciences du Bois). Nancy : Université Henri Poincaré, Nancy I, 1994.

BERALDO, A. L.; AZZINI, A.; BUCUR, V. Utilização de NDE em compósitos de bambu e cimento Portland. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS. XIX, 2000, São Paulo. **Anais...** São Paulo: [s.n.], 2000. CD-ROM

BERALDO, A. L.; VIEIRA, F. de F. **Ensaio não destrutivo (END) aplicados a compósitos de origem vegetal.** In: Iº Fórum das Universidades Públicas Paulistas: Ciência e Tecnologia em Resíduos. São Pedro. 2003. 1 CD-ROM. p. 323-331.

BERALDO, A. L.; ZUCCO, L. L. Casca de arroz e cimento Portland: possibilidade de utilização em construções. In: VII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. 1998a. Florianópolis, SC. **Anais ...** v.1, p.29-34.

_____ Casca de arroz: efeito da granulometria e de tratamentos na fabricação de compósitos à base de cimento Portland. In: Simpósio sobre Materiais e Tecnologias Não Convencionais, 1998, Rio de Janeiro. **Caderno de Resumos ...** Rio de Janeiro: PUC-RJ, 1998b. v.1. p. 2.

BIBLIS, E. J.; LO, C. F. Sugar and others wood extractives: effect on the setting of southern pine-cement mixtures. **Forest Products Journal**, 18 (8), 1968. p. 28-34.

BIGNO, I C. **Aproveitamento do resíduo de corte de rochas ornamentais como filler mineral em compósitos de matriz polimérica e cimentícia.** 185 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal Fluminense, 2002.

BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of wood and wood composites.** [S.l.]: Van Nostrand Reinhold Company, 1982. Cap. 12, p. 637-639.

CAETANO, S. F. **Determinação das propriedades acustoelásticas de aço API 70 para gasodutos**. 182 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

CERNÝ, R.; PAVLÍK, J.; TYDLITÁT, V.; KLECKA, T.; BOUŠKA, P.; ROVNANÍKOVÁ, P. Application of a microwave impulse technique to the measurement of free water content in early hydration stages of cement paste. **Cement and Concrete Research**. Vol. 33, 2003. p. 93-102. Acesso em: 19/março/2003.

CINCOTTO, M. A.; AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **Optimization of rice husk ash production**. *Proceedings of Int. RILEM Symp.: Vegetable Plants and their Fibres as Building Materials*, 2, Salvador, 17-21 set., 1990. Londres: Chapman and Hall, 1990, p. 334-342.

DAFICO, D.A e PRUDÊNCIO JR., L.R. Um estudo visando a identificação das condições de queima da casca de arroz para produção de pozolana branca. In: IX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. Foz do Iguaçu, PR. 2002. p.1671-1680. CD-Rom. Disponível em: < www.infohab.org.br/ >.

DELLA, V. P.; KÜHN, I.; HOTZA, D. Caracterização de cinza de casca de arroz para uso como matéria-prima na fabricação de refratários de sílica. **Química Nova**. Vol. 24, n. 6, 778-782, 2001.

FARIAS, J. S. A.; RECENA, F. A. P. **Study for Brazilian rice husk ash cement**. *Proceedings of Int. RILEM Symp.: Vegetable Plants and their Fibres as Building Materials*, 2, Salvador, 17-21 set., 1990. Londres: Chapman and Hall, 1990, p. 360-369.

FREIRE, W. J. Materiais Alternativos de Construção. In: BERALDO, A. L.; NAAS, I. A.; FREIRE, W. J. **Construções rurais: materiais**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1991. p. 105-161.

FREIRE, W. J. Cimento produzido a partir da cinza da casca de arroz. In: TOLÊDO FILHO, R. D.; NASCIMENTO, J. W. B.; GHAVAMI, K. **Materiais não convencionais para construções rurais**. Campina Grande, UFPb / SBEA, 1997. p. 83-111.

FOLETTTO, E.L.; HOFFMANN, R.; HOFFMANN, R.S.; PORTUGAL Jr., U. L.; JAHN, S.L. Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz. In: **Química Nova**, Vol. 28, Nº. 6, 1055-1060, 2005. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/qn/v28n6/26837.pdf> >. Acesso em: 10-Abril-2006.

GRAM, H. E. **Durability studies of natural organic fibres in concrete, mortar on cement**. In: RILEM Symposium on Developments in Fibre Reinforced Cement and Concrete, v. 2, 1986. p. 13-17.

GUEDERT, L. O.; DAMO, N. B.; PRUDÊNCIO JR., L. R. Utilização da cinza de casca de arroz como material pozolânico para a obtenção de aglomerantes alternativos. In: SIMPÓSIO DE DESEMPENHO DE MATERIAIS E COMPONENTES DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 2., 1989, Florianópolis. **Anais...**Florianópolis: [s. n.], 1989. p. 152-170.

HACHMI, M.; MOSLEMI, A. A. Correlation between wood-cement compatibility and wood extractives. **Forest Products Journal**, v. 39 (6), 1989. p.55-58.

HOSSAIN, A. S. M. M.; HOQUE, A. M.; ZANIEWSKI, J. P. **Stabilization of alluvial soils with cement and cement-rice husk ash blend for low-volume road construction in Bangladesh**. In: Fifth International Conference on Low-volume Roads. Transportation Research Record, v. 2, nº 1291. 1991.p. 275-284.

HOFSTRAND, A. D.; MOSLEMI, A. A.; GARCIA, J. F. Curing characteristics of wood particles from nine northern Rocky mountain species mixed with Portland cement. **Forest Products Journal**, v. 34 (2), 1984. p.57-61

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA **Safra de 2005 foi 5,51% menor que a de 2004**. Disponível em: < http://www1.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=520&id_pagina=1>, acessado em 14-08-2006.

IRLE, M.; SIMPSON, H. Agricultural residues for cement-bonded composites. In: **Inorganic-bonded wood and fiber composite-materials conference**. Idaho, USA, v. 3, 1992. p.54-58.

ISAIA, G. C. Entraves e perspectivas para uso de elevados teores de cinza volante e cinza de casca de arroz em concreto estrutural. In: Workshop: Reciclagem e reutilização de resíduos como materiais de construção civil. PCC-USP. São Paulo. **Anais ...** São Paulo: EPUSP, 1996. p. 45-50.

JAUBERTHIE, R.; RENDELL, F.; TAMBA, S.; CISSË, I. K. Properties of cement – rice husk mixture. **Construction and Building Materials**. [S.l.], v. 17, p. 239-43, 2003.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. G. da. Cinzas e Aglomerantes Alternativos. In: **Tecnologia e Materiais Alternativos de Construção**. Wesley Jorge Freire e Antonio Ludovico Beraldo (Coord.). Campinas, SP: Editora da UNICAMP, 2003. p. 145-190.

KRISHNARAO, R.V.; SUBRAHMANYAM, J. e KUMAR, T.J. Studies on the formation of black particles in rice husk silica ash. **Journal of the European Ceramic Society**, 21. 2001. p. 99-104. Disponível em: < www.elsevier.com/locate/jeurceramsoc >. Acesso em: 07-Jun-2005.

MARTINS, M.C.M.; SOARES, E.T.; FIORENTINI, I.; HOFFMANN, R.; PORTUGAL Jr., U.; JAHN, S.L. Cinza de casca de arroz como fonte de silício para síntese de zeólita A. In: **Congresso Brasileiro de Catálise**, 12º. Angra dos Reis, Rio de Janeiro, de 16 a 19 de setembro de 2003. Disponível em: <http://www.12cbcat.sbc.org/trabalhos/A015.pdf>>. Acessado em 28-Abril-2005.

MI-GEIDA. **Contribuição ao desenvolvimento da agroindústria**. Vol. 8 - Arroz. Ministério do Interior - Grupo Executivo de Irrigação para o Desenvolvimento Agrícola. 1972. p 19.

MEHTA, P.K. e MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**. 1ª. ed., SãoPaulo:Pini, 1994.

MENEGHETTI, L.C. **Avaliação da resistência à compressão de concretos nas primeiras idades através da velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas**. 163 p. Dissertação (Mestrado) - Orientador: Ivo José Padaratz. Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Tecnológico. 1999.

MESA VALENCIANO, M. Del C. **Durabilidade de compósitos cimentícios com materiais lignocelulósicos**. 169 p. Tese (Doutorado em Construções Rurais) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, SP: [s.n.], 2004.

MILLER, D. P.; MOSLEMI, A. A. Wood-cement composites: Effect of model compounds on hydration characteristics and tensile strength. **Wood and Fiber Science**, v. 23 (4), 1991. p. 472-482

MOSLEMI, A. A.; GARCIA, J. F.; HOFSTRAND, A. D. Effect of various treatments and additives on wood-Portland cement-water system. **Wood and Fiber Science**. v. 15 (2), 1983. p. 164-176

MOSLEMI, A. A.; LIM, Y. T. Compatibility of southern hardwoods with Portland cement. **Forest Products Journal**, v. 34 (718), 1984. p. 22-26

NAKBANPOTE, W.; THIRAVETYAN, P.; KALAMBAHETI, C. Preconcentration of gold by rice husk ash. **Minerals Engineering**, Volume 13, Issue 4 , April 2000, Pages 391-400. Disponível em: < www.pdti.kmutt.ac.th/remediation/remediation%20lab/PDF_file/Mineral-Eng_2000-V-13.pdf >. Acesso em: 14-Fev-2007.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2^a. ed. São Paulo: PINI, 1997.

PAYA, J.; MONZO, J.; BORRACHERO, M.V.; AMAHJOUR, F.; GIRBES, I.; VELAZQUEZ, S.; ORDONEZ, L.M. Advantages in the use of fly ashes in cements containing pozzolanic combustion residues: silica fume, sewage sludge ash, spent fluidized bed catalyst and rice husk ash. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**. Mar 2002; 77(3). p. 331.

PHILIPPIDIS, T.P.; AGGELIS, D.G. An acousto-ultrasonic approach for the determination of water-to-cement ratio in concrete. **Cement and Concrete Research**, 33 (2003) 525–538.

PIMENTEL, L. L. **Durabilidade de argamassas modificadas por polímeros e reforçadas com fibras vegetais**. 136 p. Tese (Doutorado em Construções Rurais) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, SP: [s.n.], 2004.

PIRJE, B. J.; GLASSER, F. P.; SCHMIT-HENCO, C.; AKERS, S. A. S. Durability studies and characterization of the matrix and fibre-cement interface of asbestos-free fiber-cement products. **Cement e Concrete Composites** (12), 1990. p. 233-244.

PRUDÊNCIO Jr., L. R.; SANTOS, S. Influência do grau de moagem na pozolanidade da cinza da casca de arroz. In: Workshop: Reciclagem e reutilização de resíduos como materiais de construção civil. PCC-USP. São Paulo. **Anais ...** São Paulo: EPUSP, 1996. p. 53-62.

PRUDÊNCIO JR., L. R.; SANTOS, S.; DAFICO, D. A. Cinza da casca de arroz. In: ROCHA, J. C.; JOHN, V. M. **Utilização de resíduos na construção habitacional**. Porto Alegre: Coletânea Habitare - Antac, 2003. v. 4, cap.8, p.240-61.

RÊGO, J. H. S.; NEPOMUCENO A. A.; VIEIRA, F. L.; LOPES, A. N. M. Estudo de aglomerantes compostos por cimento Portland comum (CP I) e as cinzas de casca de arroz (CCA) amorfa e cristalina. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 45^o., 2003, Espírito Santo. **Anais...** Espírito Santo: [s.n.], 2003. CD_ROM.

RODRIGUES, C. de S.; GHAVAMI, K. The influence of rice husk ash on physical and mechanical properties of high performance cellulose-cement composites. In: Conferência Brasileira de Materiais e Tecnologias Não Convencionais – Habitações e Infra-Estrutura de Interesse Social - Brasil NOCMAT 2004. Pirassununga: FZEA/USP, **Anais ...**, 2004. CD-ROM. p. 440-450.

RUIZ, G.; DELGADO, L.; HERNANDÉZ, E. **Edificacion de bajo coste**. Apuntes. Cuba, [1995]. p. 69-70.

SANDERMANN, W.; PREUSSER, H. J.; SCHIENS, W. The effect of wood extractives on the setting of cement-bonded wood materials. **Holzforschung**, v. 14 (3), 1960. p. 70-77.

SANTI, A.M.M. e SEVÁ FILHO, A. O. Resíduos renováveis e perigosos como combustíveis industriais. Estudo sobre a difícil sustentação ambiental da fabricação de cimento no Brasil, anos 1990. In: **Congresso Brasileiro de Energia**, VIII. Rio de Janeiro, 01 de dezembro de 1999. Disponível em: < http://www.fem.unicamp.br/~seva/oitoCBeresiduos_cimento.PDF >. Acesso em: 10-Abril-2006.

SANTOS, S. **Estudo da viabilidade de utilização de cinza de casca de arroz residual em argamassas e concretos**. 111 p. Dissertação (Mestrado) - Orientador: Luiz Roberto Prudencio Jr. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. 1997.

SATTO, J.; BERALDO, A. L.; ZUCCO, L. L.; SILVA, G. E. da Performance hidráulica em um canal construído com argamassa de cimento e casca de arroz. In: XXVII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Poços de Caldas, MG. **Anais ...** v. 1, 1998. p. 235-237.

SERRANO, J. S.; CASTRO, J. V. Materiales de construcción con propiedades aislantes a base de cáscara del arroz. **Informes de la Construcción**, Instituto Eduardo Torroja, Madrid, v.37, no 372, (7), 1985. p.53-64.

SHIMIZU, G.; JORILLO Jr., P. **Study on the use of rough and unground ash from an open heaped-up burned rice husk as a partial cement substitute.** *Proceedings of Int. RILEM Symp.: Vegetable Plants and their Fibres as Building Materials*, 2, Salvador, 17-21 set., 1990. Londres: Chapman and Hall, 1990, p. 321-333.

SILVEIRA, A. A. **A Utilização de cinza de casca de arroz com vistas a durabilidade de concretos: estudo do ataque por sulfatos.** 139 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

SILVEIRA, A.; DAL MOLIN, D. C. C. A influência do tratamento térmico da cinza de casca de arroz na pozolanicidade e na resistência à compressão de argamassas. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS**, 1., 1995, Goiânia. **Anais...Goiânia:** [s.n.], 1995. p. 15-24.

SIMATUPANG, M. H. Degradations of glucose, cellobiose, and wood under the influence of Portland cement paste. **Holzforschung**, v. 40 (3), 1986. p. 149-155.

SMITH, R. Rice husk ash cement: progress in development and application. **Intermediate Technology Publications Limited**. London. 1984. p. 45.

STATGRAPHICS Plus Version 4.1 **User Manual**. Rockville. (Maryland): Manugistics, 1999.

TASHIMA, M.M.; RUFINO DA SILVA, C.A.; AKASAKI, J.L.; BARBOSA, M.B.; SILVA, E.J. da. Avaliação do teor de cinza de casca de arroz no concreto. In: **Congresso Brasileiro do Concreto**, 46°. - COBRACON 2004, Florianópolis: SC, 2004. p. 378-388. CD-ROM.

TAYLOR, H.W.F. **Cement Chemistry**, Academic Press Inc, San Diego, CA. Second printing. 1992.

VALENZUELA, W. **Contribution à la détermination de l'aptitude d'essences forestières pour la fabrication de panneaux de fibro-ciment.** 135 p. Tese (Doutorado em Ciências Agrônômicas). Belgique: Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux, 1989.

ZUCCO, L.L. Aproveitamento da casca e cinza da casca de arroz. In: **AP 315- Aproveitamento de Resíduos Agroindustriais** – Prof. Wesley Jorge Freire. Edições internas. Feagri/Unicamp, 1998. 18p.

ZUCCO, L. L. **Estudo da viabilidade de fabricação de placas de compósitos à base de cimento e casca de arroz.** 118 p. Dissertação (Mestrado em Construções Rurais) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

ZUCCO, L. L.; BERALDO, A. L. Aproveitamento da cinza e da casca de arroz na produção de compósitos. In: Workshop de Pós-graduação: O workshop das áreas de concentração, 4º., Campinas, SP, 2003. **Anais ...**, Campinas, SP: Feagri/Unicamp, 2003. Cd-rom.

ZUCCO, L. L.; BERALDO, A. L. Influência da casca de arroz e de sua cinza sobre a hidratação da pasta de cimento de alta resistência inicial (CP-V-ARI). In: Conferência Interamericana sobre Materiais e Tecnologias Não Convencionais na Construção Ecológica e Sustentável. IAC-NOCMAT 2005. **Anais ...**, Rio de Janeiro: RJ, Brasil, 2005. Cd-rom.

WEATHERWAX, R. C.; TARKOW, H. Effect of wood on setting of Portland cement. **Forest Products Journal**, v. 14 (12), 1964. p.567-570.