

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA - FEAGRI**

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE FABRICAÇÃO
DE PLACAS DE COMPÓSITOS À BASE DE
CIMENTO E CASCA DE ARROZ**

Por

LÓRIS LODIR ZUCCO

Orientador:

Prof. Dr. Antonio Ludovico Beraldo

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, Área de Concentração: Construções Rurais

Campinas - SP
Maio de 1999

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

Z82e	Zucco, Lóris Lodir Estudo da viabilidade de fabricação de placas de compósito à base de cimento e casca de arroz. / Lóris Lodir Zucco.--Campinas, SP: [s.n.], 1999. Orientador: Antonio Ludovico Beraldo. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola. 1. Arroz. 2. Resíduos agrícolas. 3. Compostos fibrosos. 4. Placa de fibra. I. Beraldo, Antonio Ludovico. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.
------	---

À família ZUCCO, distante no espaço, sempre presente no pensamento;
À família BARBOSA, que me acolheu e me fez seu integrante;
À família MOTOKI, valiosa em minha evolução humana;
À família BERALDO, pela atenção e carinho;
À família CHAIBLER, pelo apoio;
À família CETURIANA, pelo apoio profissional;
À família FEAGRI, pilar da formação e evolução profissional;

À Família, berço da equidade, ofereço.

AGRADECIMENTOS

Ao prof. Dr. Antonio Ludovico Beraldo, pela orientação, compreensão durante todos os momentos, pela confiança e, acima de tudo, pela credibilidade em mim depositada.

Aos professores, David de Carvalho, Irenilza de Alencar Nääs, Raquel Gonçalves e Wesley Jorge Freire, pelo empréstimo de equipamentos imprescindíveis à realização dos experimentos, pelo apoio, carinho e atenção na solução de problemas.

Às secretarias Ana e Marta (CPG), Deise e Vanessa (DCONRU), pela atenção e carinho.

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 funcionários do Campo Experimental, pela amizade e por proporcionar momentos de descontração, principalmente quando tudo parecia muito complicado.

Às funcionárias Maria Ivone e Tuca por suportarem meus momentos de mau-humor (que não foram raros).

Ao Departamento de Máquinas que ofereceu, dentro das possibilidades, as condições para que fosse possível desenvolver o sistema de produção de placas e a realização de alguns dos ensaios mecânicos.

Aos técnicos e auxiliares do Laboratório de Protótipos do DMAQ, Chicão, Denis, Fubá, Luís, Marcos Paulo e Zé Maria, pelo incentivo, auxílio e companheirismo, sem os quais a criação e adequação dos equipamentos utilizados no experimento não seria possível.

Aos professores da Faculdade de Engenharia Civil, Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas, Newton, Demarzo e Armando, pela atenção, dedicação e espírito inovador, nas atividades acadêmicas.

Ao professor André Bartholomeu, da Faculdade São Francisco, que gentilmente cedeu o equipamento de ultrassom utilizado nesta pesquisa.

Aos técnicos do Laboratório de Materiais e Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil, Mestre Marçal, Ademir, Luciano, Marcelo, Carlão e Claudinei, que muito colaboraram na execução dos ensaios de compressão, bem como na fase inicial de execução das chapas prensadas.

Às técnicas do Laboratório de Ensaio de Materiais, Gisleiva e Liz, pelo auxílio no controle e condução da execução experimental.

Ao técnico José Luís, da Faculdade de Engenharia Mecânica, pela presteza e atenção dispensados na execução dos ensaios à flexão.

Aos colegas, em especial ao Mário, João Carlos, Martha, Ana e Cal, pela grandeza de espírito no auxílio das dificuldades, que não foram poucas.

Ao futuro Engenheiro Agrícola Jefferson Rodrigues, pelo empenho no fornecimento da matéria-prima casca de arroz, ao qual desejo e, tenho a certeza, de que terá sucesso em seus empreendimentos.

Aos funcionários Clóvis e André (LABIN), ao aluno Júlio (graduação), pelo auxílio na utilização de programas e computadores.

A empresa fabricante de lajes CIMENTFORTE, pelo fornecimento do cimento CP V-ARI, à preço de custo.

A CPG/FEAGRI pelos recursos oferecidos.

A CAPES/PICDT pela concessão da bolsa

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, pela possibilidade de ampliar meus horizontes através da melhoria de minha formação profissional.

Ao Colégio Técnico da Universidade Rural, pela oportunidade de realizar este trabalho.

A todos que, mesmo não sendo citados, ofereceram-me apoio para a realização deste, deixo meu humilde agradecimento e, ao mesmo tempo, desculpas pelos eventuais transtornos decorrentes da utilização de instalações e equipamentos.

.....muito obrigado.

SUMÁRIO

	página
LISTA DE QUADROS	x
LISTA DE FIGURAS	xi
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Estudos sobre a casca de arroz	4
2.2 Compósitos com materiais de origem vegetal	6
2.2.1. Incompatibilidade química entre a biomassa vegetal e o cimento	8
2.2.2. Avaliação da incompatibilidade química através de curvas de hidratação	10
2.2.3. Redução da incompatibilidade química pela eliminação parcial de extrativos presentes na biomassa vegetal, mediante lavagem a quente	13
2.2.4. Redução da incompatibilidade química pelo uso de aceleradores de pega	15

	página
2.2.5 Redução da incompatibilidade química através da mineralização da biomassa vegetal	17
2.3 A carbonatação	19
2.4 Avaliação de propriedades mecânicas através do ultrassom	20
3. MATERIAL E MÉTODOS	22
3.1 Material	22
3.1.1. Casca de arroz	22
3.1.2. Aditivos químicos	22
3.1.3. Cal	23
3.1.4. Cimento	23
3.1.5. Água	24
3.1.6. Gás carbônico	24
3.1.7. Equipamentos	24
3.2 Métodos	26
3.2.1. Métodos relativos ao material casca de arroz	26
3.2.1.1. Recepção e acondicionamento do material casca de arroz	26
3.2.1.2. Fracionamento do material casca de arroz na condição natural .	26
3.2.1.3. Lavagem do material casca de arroz	27
3.2.1.3.1. Lavagem em água quente	27
3.2.1.3.2. Lavagem em solução de cal	28
3.2.1.4. Características físicas do material casca de arroz	29
3.2.1.4.1. Análise granulométrica das frações granulométricas 10 mm, 5 mm e 3 mm	29
3.2.1.4.2. Determinação da massa unitária na condição solto	30
3.2.1.4.3. Determinação do teor de umidade	31
3.2.1.4.4. Determinação da massa específica	32
3.2.1.5. Mineralização	33
3.2.2. Métodos relativos ao compósito	34
3.2.2.1. Determinação do traço	34
3.2.2.2. Moldagem de corpos-de-prova cilíndricos	36

	página
3.2.2.3. Cura dos corpos-de-prova cilíndricos	37
3.2.2.4. A incompatibilidade química entre a matriz de cimento e a casca de arroz	38
3.2.2.4.1. Determinação da incompatibilidade química	39
3.2.2.4.2. Influência da granulometria na incompatibilidade química	40
3.2.2.5. Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos	41
3.2.3. Métodos relativos às placas	42
3.2.3.1. Definição de parâmetros: tipo de cimento, tratamento, condição do material e fração granulométrica empregados na produção de placas	42
3.2.3.2. Dimensões das placas	42
3.2.3.2.1. Carga aplicada	43
3.2.3.2.2. Quantidade de materiais	44
3.2.3.3. Sistema de prensagem	45
3.2.3.4. Desmoldagem e cura das placas	47
3.2.3.5. Carbonatação de corpos-de-prova	47
3.2.3.6. Avaliação das características das placas	48
3.2.3.6.1. Ensaio de flexão estática dos corpos-de-prova extraídos das placas	50
3.2.3.6.2. Ensaio de resistência à compressão	52
3.2.3.6.2.1. Ultrassom	53
3.2.3.6.2.2. Ensaio de resistência à compressão paralela à superfície, de corpos-de-prova extraídos das placas prensadas	54
3.2.3.6.3. Ensaio de absorção de água e de variação dimensional das placas	55
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
4.1 Resultados relativos ao material casca de arroz	59
4.1.1. Análise granulométrica dos materiais definidos como frações granulométricas de 10 mm, 5 mm e 3 mm	59
4.1.2. Determinação da massa unitária na condição solto	61
4.1.3. Determinação do teor de umidade	62
4.1.4. Determinação da massa específica	64

	página
4.2 Resultados relativos ao compósito	65
4.2.1. Determinação do traço	65
4.2.2. Cura dos corpos-de-prova cilíndricos	68
4.2.3. A incompatibilidade química entre a matriz de cimento e a casca de arroz	69
4.2.3.1. Determinação da incompatibilidade química	69
4.2.3.2. Influência da granulometria na incompatibilidade química	71
4.2.3.3. Considerações gerais a respeito da incompatibilidade química entre a matriz de cimento e a casca de arroz	75
4.2.4. Ensaio de compressão	80
4.2.4.1. Avaliação dos resultados do ensaio de compressão	80
4.2.4.2. Tipos de fissura observados nos corpos-de-prova cilíndricos	83
4.3 Resultados relativos às placas	85
4.3.1. Definição de parâmetros: tipo de cimento, tratamento, condição do material, fração granulométrica e traços empregados na produção das placas	85
4.3.2. Quantidade de materiais	85
4.3.3. Avaliação das características das placas	86
4.3.3.1. Ensaio de flexão estática	86
4.3.3.1.1. Avaliação dos resultados do ensaio de flexão estática	86
4.3.3.1.2. Avaliação dos resultados de massa específica aparente das placas	88
4.3.3.1.3. Considerações gerais, envolvendo as variáveis resistência à compressão e massa específica aparente	90
4.3.3.1.4. Comportamento das placas no ensaio de flexão	91
4.3.3.1.5. Tipos de fissura	95
4.3.3.2. Ensaio de compressão paralela à superfície	97
4.3.3.2.1. Avaliação dos resultados	97
4.3.3.2.2. Comportamento dos corpos-de-prova no ensaio à compressão paralela à superfície	100
4.3.3.2.3. Tipos de fissura	101
4.3.3.2.4. Correlação entre os parâmetros de avaliação	102
4.3.3.2.4.1. Entre a massa específica aparente e a velocidade de propagação da onda ultrasonora	102

	página
4.3.3.2.4.2. Entre a resistência à compressão paralela à superfície e a velocidade de propagação da onda ultrasonora	103
4.3.3.2.4.3. Entre a resistência à compressão paralela à superfície e a massa específica aparente	104
4.3.3.3. Considerações gerais sobre a massa específica aparente dos materiais utilizados nos ensaios de flexão estática e de compressão paralela	105
4.3.3.4. Ensaio de absorção de água e variação dimensional	106
4.4 Avaliação do consumo de materiais	110
5. CONCLUSÕES	112
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114

LISTA DE QUADROS

	página
Quadro 2.1	Produção e principais produtores de arroz - safra 1994 5
Quadro 3.1	Peneiras utilizadas 30
Quadro 3.2	Traços empregados de acordo com a fração granulométrica 36
Quadro 3.3	Parâmetros do ensaio de flexão estática, segundo a ASTM D-1037 . 51
Quadro 4.1	Distribuição granulométrica- casca de arroz – fração granulométrica 10 mm 59
Quadro 4.2	Distribuição granulométrica- casca de arroz – fração granulométrica 5 mm 60
Quadro 4.3	Distribuição granulométrica- casca de arroz – fração granulométrica 3 mm 60
Quadro 4.4	Massa específica unitária do material solto (g/dm^3) 62
Quadro 4.5	Umidade do material, nas condições de estocagem (%) 62
Quadro 4.6	Quantidade de material utilizado (g) 65
Quadro 4.7	Resultado do ensaio de compressão simples (MPa) e análise estatística simplificada (SANEST) 81
Quadro 4.8	Quantidade de material, por placa, em gramas 86
Quadro 4.9	Resultado do ensaio de flexão estática (MPa) e análise estatística simplificada (SANEST) 87
Quadro 4.10	Resultado da análise estatística da variável massa específica aparente (g/cm^3) e análise estatística simplificada (SANEST) 89
Quadro 4.11	Resultado dos ensaios de flexão estática (MPa) 92
Quadro 4.12	Resultado do ensaio de compressão paralela à superfície (MPa), massa específica aparente, velocidade de propagação do ultrassom e análise estatística simplificada (SANEST) 98
Quadro 4.13	Resultado dos ensaios de compressão paralela à superfície (CPS) e a velocidade de propagação da onda ultrasonora 100
Quadro 4.14	Percentuais relativos de absorção de água (24 h de imersão) 106
Quadro 4.15	Variações dimensionais nos materiais testados (24 h imersão) 108
Quadro 4.16	Consumo de materiais (kg/m^3 de compósito) 109

LISTA DE FIGURAS

	página
Figura 2.1 Área sob a curva de hidratação e fator CA	11
Figura 3.1 Solubilidade do Hidróxido de cálcio, em água	28
Figura 3.2 Soquete de compactação: Especificações	35
Figura 3.3 Corpos-de-prova com sinais de incompatibilidade química na região da base	38
Figura 3.4 Calibração da prensa	46
Figura 3.5 Esquema da prensagem e fixação dos moldes	46
Figura 3.6 Posição dos corpos-de-prova	49
Figura 3.7 Extração de corpos-de-prova para ensaio de flexão estática nas condições <u>seco</u> e <u>úmido</u>	50
Figura 3.8 Extração de corpos-de-prova para carbonatação e posterior ensaio à flexão estática	50
Figura 3.9 Esquema estático de carregamento	51
Figura 3.10 Extração de corpos-de-prova para ensaio à compressão paralela à superfície	52
Figura 3.11 Estrutura segmentada de uma peça, para obtenção de corpos-de- prova utilizados no ensaio de compressão paralela à superfície ...	52
Figura 3.12 Medição da velocidade de propagação do som, utilizando o equipamento de ultrassom	54
Figura 3.13 Extração de corpos-de-prova para o ensaio de absorção de água e de variação dimensional	55
Figura 3.14 Extração de corpos-de-prova para determinação de umidade (U%), absorção de água e variação dimensional (A e B)	55
Figura 3.15 Locais marcados nos corpos-de-prova, utilizados para as medidas ..	56

	página
Figura 4.1	Curva de secagem: Compósitos à base de CP V-ARI 68
Figura 4.2	Curva de secagem: Compósitos à base de CP II-E-32 69
Figura 4.3	Curvas de hidratação (# 200): CP V-ARI e CP II-E-32 70
Figura 4.3a	Detalhe das curvas de hidratação (# 200): CP V-ARI e CP II-E-32 . 71
Figura 4.4	Curvas de hidratação (# 100): CP V-ARI e CP II-E-32 71
Figura 4.5	Curvas de hidratação (# 50): CP V-ARI e CP II-E-32 72
Figura 4.6	Curvas de hidratação (# 30): CP V-ARI e CP II-E-32 73
Figura 4.7	Efeitos da granulometria e condição do material, na temperatura máxima de hidratação do cimento CP V-ARI 73
Figura 4.8	Curvas de hidratação: Efeito da fração granulométrica e do traço 75
Figura 4.9	Entalpia da reação de hidratação do cimento CP V-ARI 78
Figura 4.10	Entalpia da reação de hidratação: ARI + # 200 N 79
Figura 4.11	Entalpia da reação de hidratação: ARI + # 200 L 79
Figura 4.12	Entalpia da reação de hidratação: ARI + # 200 LSC 80
Figura 4.13	Padrões de ruptura encontrados no ensaio de compressão 83
Figura 4.14	Gráfico carga x deformação: 10 mm, seco 93
Figura 4.15	Gráfico carga x deformação: 10 mm, úmido 94
Figura 4.16	Gráfico carga x deformação: aglomerado misto com revestimento, seco 94
Figura 4.17	Gráfico carga x deformação: aglomerado misto sem revestimento, seco 95
Figura 4.18	Fissura em compósito à base de casca de arroz, ensaiado à flexão ... 96
Figura 4.19	Ângulo de inclinação da fissura, em compósito ensaiado à flexão ... 96
Figura 4.20	Fissura em aglomerados com e sem revestimento, ensaiados à flexão 97
Figura 4.21	Ângulo de inclinação da fissura em aglomerado com e sem revestimento, ensaiado à flexão 97
Figura 4.22	Padrões de ruptura encontrados no ensaio de compressão 101
Figura 4.23	Correlação entre os parâmetros mea e Vel. Ultrasom 103
Figura 4.24	Correlação entre os parâmetros CPS e Vel. Ultrasom 103
Figura 4.25	Correlação entre os parâmetros CPS e mea 105
Figura 4.26	Curvas de absorção de água 106
Figura 4.27	Curvas de variação volumétrica 107
Figura 4.28	Curvas de variação dimensional: espessura 109
Figura 4.29	Curvas de correlação: absorção x volume 109

RESUMO

No processo de beneficiamento do arroz origina-se um importante resíduo - casca de arroz - que acaba sendo queimado ou despejado em aterros, causando sérios prejuízos ao meio ambiente. O presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de estudar a possibilidade de utilização deste resíduo, na produção de placas prensadas, para uso em construções. O material casca de arroz sofreu um processo de fracionamento obtendo-se desta forma três granulometrias (10 mm, 5 mm e 3 mm), que foram estudadas de forma isolada. A incompatibilidade química entre a casca de arroz e o cimento (CP V-ARI e CP II-E-32) foi avaliada através de curvas de hidratação, que evidenciaram o efeito inibitório do material casca de arroz, bem como a influência de sua granulometria sobre a incompatibilidade química. Através de ensaios de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos determinou-se a influência da combinação do cimento CP V-ARI, das granulometrias 10 mm, 5 mm e 3 mm, da lavagem das partículas em solução de cal e do uso do acelerador de pega cloreto de cálcio, na obtenção de compósitos de maior resistência à compressão. Através da combinação destes fatores foi possível a produção de placas prensadas, ensaiadas e comparadas com materiais convencionais (aglomerados e um tipo de compensado), tendo-se evidenciado a grande estabilidade dimensional do compósito.

ABSTRACT

Husk rice from processing industries is a very important agricultural residue. A great amount of this raw material is burned or discarded, provoking a serious environment problem. The aim of this work was to study the feasibility of rice husk residues utilization when combined with Portland cement paste, for board manufacturing. Original (10 mm) or reduced (5 and 3 mm) rice husk particles were utilized in this work. Rice husk-Portland cement paste chemical incompatibility was evaluated by means of a hydration curve (temperature against time). Rice husk natural particle were very inhibitory to the cement setting, mainly when smaller particles (0.074 mm) were utilized. Compression strength of rice husk-Portland cement paste samples is a function of Brazilian cement type (CP II-E-32 or CP V-ARI), particle size (10, 5 or 3 mm) and chemical treatments (lime or calcium chloride solution). Rice husk-Portland cement shows smaller dimension variation when compared with wood-resin bonded materials.

1. INTRODUÇÃO

Da história da humanidade, sabe-se que o homem, para se fixar em um determinado local, precisou desenvolver métodos e técnicas construtivas que garantissem a sua segurança, a dos animais de criação, bem como a de suas plantações.

A principal matéria-prima, a madeira, foi utilizada nos cercados dos animais e das plantações, assim como nas estruturas das habitações, como as palafitas, entre outros tipos de construção.

O homem, já sedentário e vivendo em uma sociedade mais complexa, além dos limites familiares, desenvolveu novas técnicas, entre as quais o uso de fibras vegetais como reforço de materiais cerâmicos, utilizados na construção de muros e paredes, sendo esta uma técnica relativamente recente, na história da humanidade.

A utilização de fibras vegetais, de forma isolada ou em mistura com outros materiais, data do tempo dos Hebreus, cativos no Egito, que utilizavam palha para melhorar a qualidade dos produtos cerâmicos, assim como diversos povos que recorriam às fibras vegetais para reduzir a presença de fissuras em tijolos queimados ao sol, além de torná-los mais leves.

No Brasil, muitas construções foram feitas com taipas de pedras assentadas com uma mistura de terra, areia, óleo de baleia, farinha de ossos queimados e carvão.

No Estado do Rio de Janeiro, algumas construções deste tipo podem ainda ser vistas em cidades do interior como Valença e Pinheiral, ou mesmo na cidade do Rio de Janeiro, na região da Central do Brasil e na rua da Carioca, entre outros locais históricos.

Esta técnica, no Brasil, só foi substituída após o advento do cimento Portland (inicialmente importado), como material aglomerante.

Atualmente, quer seja no interior do país ou na periferia das grandes cidades, a construção de casa de pau-a-pique, revestida com barro amassado ou barro amassado com capim (princípio do tijolo de adobe), ainda é utilizada por famílias de baixa renda ou mesmo por aquelas desprovidas de uma renda que lhes permitam uma habitação de melhor qualidade.

A melhoria da qualidade de vida passa, necessariamente, por uma melhoria nas condições de higiene das construções, fator decisivo na saúde de uma população.

O alto custo dos materiais de construção tem sido um dos fatores limitantes na melhoria das instalações ou construções, ao nível rural, principalmente pelo fator transporte.

A utilização de resíduos agro-industriais na obtenção de materiais alternativos poderia viabilizar muitas instalações, trazendo, entre outras vantagens, benefícios ambientais.

Considerando-se que este tipo de resíduo é geralmente queimado sem qualquer controle ambiental, sua utilização seria uma opção melhor que a queima indiscriminada, podendo viabilizar um processo industrial, considerando-se a abundância de matéria-prima.

Como exemplo, no caso da casca de arroz e, segundo o Ministério do Interior – Grupo Executivo de Irrigação para o Desenvolvimento Agrícola (M.I.-GEIDA, 1972), uma pequena indústria de beneficiamento de arroz com capacidade mínima de 25 sacas de 60 kg

por dia (1500 kg/dia), produz cerca de 300 kg/dia de casca de arroz, o que resulta em um volume de cerca de 2,4 m³ que, quando queimados, produzem cerca de 60 kg de cinza, diariamente. Em ambos os casos, a geração de casca e/ou cinza da casca, já justificaria a utilização destes rejeitos na produção de materiais alternativos de construção, como uma forma de minimizar os problemas ambientais decorrentes do seu descarte ou queima a céu aberto.

Com base em dados da safra brasileira de arroz de 1994, estimou-se uma produção anual do resíduo agro-industrial casca de arroz da ordem de 2 milhões de toneladas de casca ou cerca de 16 milhões de metros cúbicos.

A utilização do resíduo agro-industrial casca de arroz, como agregado na produção de Compósitos Biomassa Vegetal-Cimento – CBVC (BERALDO, 1994a) traria benefícios ambientais pela possível redução do uso de recursos minerais como a areia, cuja exploração agride o meio ambiente.

As construções que fizessem uso de CBVC poderiam tornar-se mais agradáveis, dadas as características de clima tropical do Brasil e ao fato destes materiais apresentarem baixo coeficiente de condutibilidade térmica, oscilando, segundo SERRANO & CASTRO (1985), entre $\lambda = 0,105 \text{ kcal/m h } ^\circ\text{C}$ e $\lambda = 0,123 \text{ kcal/m h } ^\circ\text{C}$.

Diante do exposto, considerando a grande disponibilidade de casca de arroz no território nacional, o objetivo do presente estudo foi o de verificar a adequação do uso desse resíduo como um componente na fabricação de concreto leve, e testar a viabilidade de fabricação de placas prensadas de compósitos à base de cimento Portland e casca de arroz.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Estudos sobre a casca de arroz

SILVEIRA et al. (1996) citaram diversos autores que definiram ser a casca de arroz uma capa lenhosa, dura e altamente silicosa, composta por 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica, em base anidra.

IRLE & SIMPSOM (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, o que só poderia ser comprovado através de ensaios adequados.

Para avaliar a viabilidade de implantação de uma pequena indústria de beneficiamento de arroz, o M.I.-GEIDA (1972) desenvolveu um estudo no qual verificou que a capacidade mínima necessária de processamento deve ser de 25 sacas de 60 kg por dia, o que requer uma área mínima de cultivo de 250 ha (produtividade média de 1500 kg/ha). Com o beneficiamento deste arroz, serão obtidos anualmente, cerca de 375 toneladas de grãos e 75 toneladas de casca. Esta casca, se queimada, gerará cerca de 15 toneladas de cinza. Tanto a casca como a cinza, podem ser uma fonte de poluição do meio ambiente, tendo em vista que seu descarte é geralmente feito em aterros a céu aberto.

Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (1995), a cultura do arroz (*Oriza sativa*, L.) no Brasil, na safra de 1994, produziu cerca de 10 milhões de toneladas de arroz em casca, dos quais cerca de 2 milhões de toneladas são de casca de arroz (a casca equivale a cerca de 20% do grão, em peso), nem sempre queimada em fornos, mas sim, na maioria das vezes, a céu aberto, poluindo o meio ambiente.

O Rio Grande do Sul, na safra de 1994, foi o maior produtor nacional, responsável por cerca de 42% da produção nacional (Quadro 2.1).

Quadro 2.1 - Produção e principais produtores de arroz - safra 1994.

Estado	Área cultivada (hectares)	Produção (toneladas)	Produção Nacional (%)	Produtividade (kg/ha)
RO	157300	275028	2,74	1748
PA	189949	268288	2,68	1431
TO	167436	353671	3,53	2131
MA	779728	1035622	10,33	1362
PI	285103	420566	4,19	1492
CE	80009	194572	1,94	2432
MG	371552	649365	6,47	1762
SP	142240	276600	2,76	1945
PR	105586	217466	2,17	2065
SC	150270	666996	6,65	4456
RS	978045	4230680	42,18	4332
MS	101449	226444	2,26	2364
MT	488379	812439	8,10	1565
Brasil	4167676	10029371	100,00	2304

Fonte: IBGE - Anuário Estatístico do Brasil, 1995.

PRUDÊNCIO & SANTOS (1996) destacaram que cerca de 90% da produção nacional estão concentrados em 10 Estados, sendo aproximadamente 30% desta produção beneficiada somente em cidades de médio porte ou em grandes centros urbanos.

Da análise do Quadro 2.1, percebe-se que 1% da produção nacional corresponde a cerca de 20 mil toneladas de casca de arroz ou 4000 toneladas de cinza, volumes estes expressivos, se forem considerados os efeitos sobre o meio ambiente.

SILVEIRA et al. (1996) citaram, em seu trabalho, o município de Pelotas, responsável por mais de 30% do arroz plantado no Estado do Rio Grande do Sul. Nesse Estado se beneficiam cerca de 2 milhões de toneladas anuais de arroz (o restante é comercializado em casca), produzindo cerca de 70 mil toneladas de casca, gerando sérios problemas ambientais.

2.2. Compósitos com materiais de origem vegetal

Segundo a literatura, a palavra compósito refere-se ao material obtido a partir de uma matriz reforçada com fibras, podendo, ainda, referir-se à mistura de componentes, na obtenção de materiais com propriedades que não são encontradas nos constituintes isolados.

Suas propriedades, como resistência mecânica, isolamento termo-acústico, entre outras, variam de acordo com a proporção dos componentes utilizados, daí a necessidade de se conhecer algumas das características físico-mecânicas dos compósitos, a fim de fornecer subsídios tecnológicos para a produção de materiais de construção alternativos.

A quantidade de pesquisas sobre compósitos à base de cimento é crescente em nível mundial, sendo impostas pela necessidade de aproveitar resíduos industriais e agro-industriais, cujos volumes e quantidades geradas tornaram-se nefastos ao meio ambiente. No Brasil, tais pesquisas são reduzidas. IRLE & SIMPSON (1992) citaram o caso do Reino Unido, onde deixou-se de queimar ou enterrar no solo os resíduos agrícolas sob a alegação

de um possível aumento da presença de patógenos nos cultivos subseqüentes, o que tem gerado anualmente volumes expressivos de resíduos vegetais.

A utilização de resíduos vegetais, na obtenção de produtos para a construção, é uma das ferramentas mais úteis para o controle e minimização dos problemas ambientais causados pelo descarte, lançamento em aterros, ou queima.

O uso de tais materiais pode viabilizar a fabricação de materiais de baixo custo, permitindo ainda a substituição parcial ou total de algumas das matérias-primas convencionais (areia, brita).

A principal aplicação destes compósitos é na fabricação de peças ou elementos que não sejam submetidos a solicitações mecânicas importantes, podendo ser de especial interesse na substituição das fibras de amianto, principalmente considerando-se o uso de resíduos vegetais disponíveis localmente.

Do ponto de vista ambiental, a utilização de resíduos agro-industriais (como a casca de arroz) traria somente benefícios, pois evitaria a queima indiscriminada do material ou sua deposição em locais e em condições inadequadas.

No Brasil, a principal motivação é traduzida pela necessidade da obtenção de materiais de construção que tornem as construções mais agradáveis, dadas as características de clima tropical do país, não se deixando de lado, no entanto, os aspectos econômicos.

Na industrialização dos compósitos de fibras vegetais, deve-se levar em consideração a baixa aceitação de produtos derivados de resíduos, como os chamados “aglomerados”, considerados pelo consumidor como sendo de baixa qualidade, pela fácil desagregação de suas partículas, sob a ação da umidade. Tal fato não ocorre, geralmente, com alguns tipos de compósitos à base de aglomerantes inorgânicos, como o cimento.

Como ainda não estão adequadamente estudadas todas as implicações do uso de aglomerantes inorgânicos na obtenção de compósitos cimento - biomassa vegetal, muitos problemas, geralmente específicos a cada espécie vegetal, devem ser solucionados para que se obtenham produtos que imprimam segurança e confiança ao consumidor.

2.2.1. Incompatibilidade química entre a biomassa vegetal e o cimento

A ocorrência de incompatibilidade química entre o cimento e a madeira deve-se ao fato da água de amassamento solubilizar açúcares, entre outros inibidores que, em contato com o cimento, inibem sua pega, tornando o processo produtivo inadequado.

Estes inibidores, denominados genericamente como extrativos, são um tipo de reserva de alimento para a planta, podendo, segundo BODIG & JAYNE (1982), afetar as propriedades mecânicas da madeira, por influírem na densidade e teor de umidade do material. Podem ainda modificar a durabilidade, a cor e o odor, entre outras características.

Os referidos autores citaram como exemplos os extrativos fenólicos, ligados muitas vezes à cor da madeira, que melhoram as propriedades de resistência a fungos e insetos, e, ainda, os óleos essenciais/voláteis, que são repelentes de insetos ou que possuem ação inseticida.

Em relação ao teor de umidade, os autores afirmaram que a água livre, no interior do vacúolo das células, não traz efeitos significativos nas propriedades físicas, a menos que esteja congelada. No caso da perda de água absorvida pelas paredes das células, as propriedades mecânicas das madeiras sofrem mudanças.

Os produtos à base de aglomerantes inorgânicos estão enquadrados na categoria denominada de Compósito Biomassa Vegetal-Aglomerante Inorgânico - CBVC, que

apresentam certas vantagens, quando comparados com materiais de construção convencionais, entre as quais BERALDO et al. (1995) relacionaram o fato da biomassa vegetal ser uma matéria-prima disponível e renovável, dos compósitos apresentarem uma massa específica reduzida, ductilidade e resistência à compressão de 3,0 a 6,0 MPa, além de uma boa capacidade de isolamento termo-acústico.

Os autores citaram, como desvantagens, as expressivas variações dimensionais decorrentes da variação de umidade e a variabilidade do comportamento da biomassa vegetal na presença do cimento, traduzida pelo longo tempo necessário para a pega (ou inexistência da mesma), indicativo de incompatibilidade química entre a biomassa vegetal e o cimento Portland.

Em função desta interação biomassa vegetal com o cimento não se dar de forma efetiva, vários estudos são citados sobre a incompatibilidade química entre o cimento e a biomassa vegetal.

Esta incompatibilidade química pode ser contornada, parcialmente, através de técnicas adequadas, como a lavagem da biomassa vegetal, ou atuando-se sobre a matriz de cimento.

A lavagem da biomassa vegetal teria por finalidade eliminar ao máximo os extrativos solúveis, causadores da inibição da pega e endurecimento.

A modificação de características da matriz de cimento (tempo e temperatura máxima de hidratação) necessárias à pega e endurecimento, é obtida através da adição de aceleradores de pega, utilização de outro tipo de cimento, ou ainda utilizando-se a técnica da carbonatação.

Com relação à estabilidade dimensional, esta pode ser melhorada através do reforço da matriz pela adição de cargas minerais, ou ainda pelo tratamento das partículas vegetais.

2.2.2. Avaliação da incompatibilidade química através de curvas de hidratação

Segundo SANDERMANN et al. (1960), o cimento normal apresenta uma temperatura de hidratação elevada, superior à 80 °C. Na presença de glicose, amido ou taninos, considerados retardadores de pega, a hidratação é rapidamente interrompida, ficando a temperatura em torno de 28 °C.

WEATHERWAX & TARKOW (1964) determinaram uma forma de quantificar o efeito inibitório, baseado no intervalo de tempo para se atingir a temperatura máxima de hidratação do cimento. Observaram, também, a influência do tamanho das partículas e da razão madeira/cimento, naquilo que denominaram de índice inibitório.

BIBLIS & LO (1968) definiram o tempo de pega como sendo o tempo decorrido entre a mistura dos componentes e o tempo necessário para se obter a temperatura máxima de hidratação. Indicaram que o tempo de pega da mistura com o cimento aumenta à medida em que o teor de açúcares aumenta.

Outros autores, como MOSLEMI et al. (1983) e MOSLEMI & LIM (1984), observaram uma certa melhoria na pega do cimento com a remoção de açúcares, entre outros extrativos, utilizando como parâmetros, para determinar o índice de inibição, o tempo para atingir a máxima temperatura, a temperatura máxima de hidratação e a inclinação da curva de hidratação. Estes parâmetros também foram utilizados por HOFSTRAND et al. (1984).

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.

HACHMI & MOSLEMI (1989) verificaram que a composição química dos extrativos também influi na compatibilidade, sendo que um teor de extrativos menor que 7%, para as espécies estudadas, indicou serem compatíveis com o cimento, com base não mais no índice de inibição, mas no fator CA. Os autores citaram o trabalho de Hachmi, Moslemi e Campbell (1988), que definiram o fator CA como sendo a razão entre a área da curva de hidratação madeira-cimento em relação à área de referência (pasta pura), obtida na mistura cimento – água. Um material é considerado como compatível quando apresenta um fator CA superior à 68%, moderadamente compatível entre 28% e 68% e incompatível se inferior à 28%.

Para o material casca de arroz BERALDO & ZUCCO (1998) observaram, em uma análise preliminar (Figura 2.1), que se tratava de um material moderadamente compatível, podendo ser assim considerado sob certas condições (lavagem das partículas, uso de acelerador de pega, entre outros).

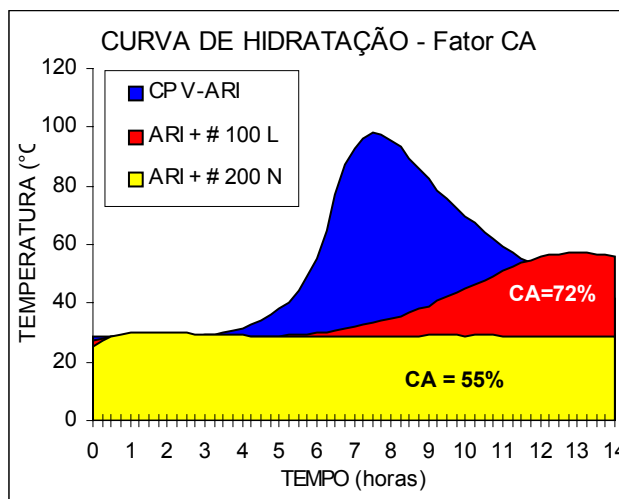


Figura 2.1: Área sob a curva de hidratação e fator CA

MILLER & MOSLEMI (1991), utilizando modelos de componentes especificamente encontrados na madeira, observaram que açúcares, taninos e hemicelulose,

afetaram todas as características de hidratação, sendo que açúcares reduziram 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, tempo, geração relativa de calor), os referidos autores concluíram que o melhor meio de se distinguir o efeito dos componentes da madeira seria determinando a diferença relativa na geração de calor entre as pastas de cimento com aditivo e a pasta pura.

VALENZUELA (1989), em seu estudo, procurou encontrar uma forma de estimar a resistência de painéis à flexão estática. No mesmo estudo, avaliou o efeito do tempo de estocagem das partículas vegetais sobre as reações de hidratação, resistência à compressão diametral e outras propriedades dos painéis. Concluiu que partículas estocadas por mais de 12 meses apresentaram 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 ($R = 0,65$).

No mesmo estudo, o autor propôs um índice de compatibilidade madeira-cimento, com base na norma DIN 1101, que estipula valores mínimos aceitáveis de resistência à flexão estática para chapas madeira-cimento.

Para obter estes valores mínimos de resistência à flexão estática, os corpos-de-prova devem apresentar uma certa resistência à 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 seguinte expressão:

$$FLc = \frac{2,1511 \times 3,9749^{CD}}{1,0029^{MB}}$$

onde:

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

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

MB = massa específica 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 compressão diametral de, no mínimo, 1,89 MPa. Abaixo deste valor, o material seria considerado como inadequado para a obtenção de chapas madeira-cimento.

2.2.3. Redução da incompatibilidade química pela eliminação parcial de extrativos presentes na biomassa vegetal, mediante lavagem a quente

Segundo BIBLIS & LO (1968), a remoção parcial de açúcares, entre outros inibidores solúveis em água quente presentes na madeira "Southern pine", reduziu o tempo de pega da mistura madeira-cimento, fato também observado com outras madeiras (Southern yellow pine, Ponderosa pine, Western larch, White spruce, Yellow poplar,

Chestnut oak, Scarlet oak, Scarlet red oak, Water oak, White oak, Post oak, Black oak, Black tupelo, Sweet gum, Hickory, Red maple, *Hevea brasiliensis*, Lodgepole pine, entre outras) ou materiais (linho, fibras de linhaça e palha de cereais), por diversos pesquisadores, entre os quais MOSLEMI et al. (1983), MOSLEMI & LIM (1984), READING (1985), SIMATUPANG et al. (1988), RASHWAN et al. (1992) e IRLE & SIMPSON (1992).

Estes estudos trataram de diferentes espécies florestais da Europa e América do Norte, graus de inibição, distribuição anatômica (cerne/alburno) mas, principalmente, de diferentes métodos de extração dos inibidores de pega, os quais interferiam nos resultados. Torna-se importante ressaltar que não houve uma padronização do método de extração, talvez pela heterogeneidade ou especificidade das espécies estudadas.

Procurando avaliar a influência da lavagem das partículas vegetais na resistência à compressão simples (aos 7 dias) de CBVC, BERALDO & ROLIM (1996) não observaram diferença significativa no módulo de ruptura (MOR), comparando partículas lavadas com não lavadas de *Eucalyptus citriodora*, combinadas com o cimento Portland..

LATORRACA (1996), utilizando partículas de *Eucalyptus dunnii* Maid, verificou que a estabilidade dimensional das chapas de madeira-cimento foi influenciada negativamente pelos tratamentos com água quente (80 °C, por 2 h) e com hidróxido de sódio (1%, por 24 h), por proporcionarem resultados inferiores à testemunha.

Na presente pesquisa, fez-se uso da técnica de lavagem das partículas à quente (80°C, por 2 h) pela possibilidade da mesma eliminar extrativos inibidores, o que permitiria uma diminuição do tempo de pega, havendo a possibilidade da mesma não afetar a resistência à compressão do compósito obtido.

2.2.4. Redução da incompatibilidade química pelo uso de aceleradores de pega

BIBLIS & LO (1968) utilizaram, em seu trabalho, o cloreto de cálcio (CaCl_2) como acelerador de pega e verificaram que soluções de cloreto de cálcio (1% a 3% em relação à massa de cimento) são necessárias para neutralizar o efeito de açúcares, sendo que teores de cloreto de cálcio acima de 10% não alteraram o intervalo de tempo para a pega.

No trabalho de MOSLEMI et al. (1983) sobre compósitos, a adição de cloreto de cálcio (5% em relação à massa de cimento) produziu os melhores resultados relacionados aos parâmetros de hidratação do cimento (temperatura e tempo de pega), quando comparados aos tratamentos **sem** adição de acelerador.

O uso de aceleradores provoca o endurecimento rápido da mistura, através do aumento na formação da estrutura cristalina do cimento, não sendo liberadas imediatamente substâncias inibidoras solúveis em água (contidas na madeira), em quantidades que impeçam a reação exotérmica do cimento.

ZHENG TIAN & MOSLEMI (1985) testaram a influência de vários tipos de aceleradores de pega sobre a temperatura de hidratação da mistura Western larch / cimento. O uso do cloreto de cálcio (5% em relação à massa de cimento) foi indicado como um dos quatro melhores, porque elevou a temperatura máxima de hidratação **em** 59 °C. Segundo os autores, a elevação da temperatura é importante para as reações de hidratação do cimento, por reduzir o tempo de reação para apenas 8 horas, uma vez que a espécie estudada era fortemente inibidora à pega do cimento.

LEE et al. (1987) citaram o cloreto de cálcio como um acelerador eficiente e econômico, largamente adotado pelas indústrias de chapas de madeira-cimento.

LEE & HONG (1986), verificaram uma redução no tempo de hidratação, de 10 a 58 horas para 3 a 5,5 horas, viabilizando a fabricação de compósitos madeira-cimento, desde que fosse adicionada, à mistura, o cloreto de cálcio (3% em relação à massa de cimento).

Em relação ao custo dos aditivos, RASHWAN et al. (1992) indicaram o cloreto de cálcio para a produção de compósitos, em dosagem de 4% (em relação à massa de cimento), por ser consideravelmente mais barato que o cloreto de magnésio ($MgCl_2$).

LATORRACA (1996), constatou que o cloreto de magnésio (produto altamente higroscópico) é mais barato que o cloreto de cálcio, o que presume-se seja devido ao fato do Brasil possuir um extenso litoral, com muitas regiões de extração de sal, onde o cloreto de magnésio é um resíduo indesejável na obtenção de sal de cozinha de qualidade superior.

SIMATUPANG et al. (1988) citaram as técnicas aplicadas para a redução no tempo de produção de diferentes tipos de chapas, entre as quais as de madeira-cimento, referindo-se também ao uso de aceleradores de pega e à injeção de gás carbônico (CO_2), sob forma gasosa, durante a prensagem das chapas.

Em um estudo visando a fabricação de chapas prensadas com partículas de madeira de diferentes espécies florestais, LEE & SHORT (1989), além de confirmarem observações anteriores sobre diferenças de compatibilidade, observaram que, sem o uso do cloreto de cálcio como acelerador de pega, a resistência à compressão foi linearmente dependente da temperatura máxima de hidratação, mas independente do tempo de hidratação.

Como conclusão, indicaram que, sem a adição de cloreto de cálcio como acelerador de pega, a compatibilidade das diferentes espécies com a matriz de cimento pode ser indicada pela resistência à compressão ou pela temperatura máxima de hidratação. Com a adição de cloreto de cálcio (3% em relação à massa de cimento), houve aumento na temperatura máxima de hidratação e na resistência à compressão, reduzindo o tempo de

hidratação; porém, com uma relação cimento/madeira muito alta (13:1), o uso do cloreto de cálcio dificultou a distinção da compatibilidade entre as diferentes espécies florestais estudadas.

LATORRACA (1996), estudando a espécie *Eucalyptus dunnii* Maid, na manufatura de painéis de madeira-cimento, verificou que os aditivos químicos empregados (3% em relação à massa de cimento) exerceram baixa influência sobre as variações dimensionais dos painéis. Verificou, ainda, que o custo do cloreto de magnésio é cerca de 40% inferior ao do cloreto de cálcio, apresentando de uma maneira geral, melhores resultados em praticamente todas as propriedades das chapas.

Nesta pesquisa optou-se por testar o uso dos aceleradores de pega cloreto de cálcio e sulfato de alumínio, pela facilidade de aquisição nas casas do ramo, em dosagem de 3% da massa de cimento.

2.2.5. Redução da incompatibilidade química através da mineralização da biomassa vegetal

A biomassa vegetal incorporada à matriz de cimento sofre, ao longo do tempo, degradação de seus constituintes, provocada pela ação alcalina do cimento, o que pode acarretar em enfraquecimento dos CBVC.

De acordo com GRAM (1986), a fibra vegetal em contato com o cimento sofre uma “mineralização”, ou seja, uma precipitação de componentes da cal no lúmen das fibras, tornando-as menos flexíveis.

PIRJE et al. (1990), avaliando corpos-de-prova não envelhecidos de compósitos onde a cura foi feita em temperatura ambiente, verificaram que uma quantidade

considerável de cálcio impregnou a parede das fibras de celulose, tendo havido alguma penetração no lúmen das fibras. Já em compósitos autoclavados e envelhecidos naturalmente, o lúmen das fibras era preenchido, mesmo que parcialmente, com cálcio e enxofre, presumivelmente sob as forma de carbonato de cálcio e sulfato de cálcio.

O método de mineralização de partículas de madeira, descrito por FURUNO et al., citados por RAMÍREZ SARMIENTO & FREIRE (1996), consiste na impregnação das fibras com sais, tendo por finalidades:

- a) proteger as fibras vegetais contra a agressividade do meio alcalino promovido pelo cimento;
- b) imobilizar a matéria orgânica constituinte, reduzindo sua capacidade de absorção de água;
- c) imobilizar o açúcar residual, reduzindo ao mínimo a sua interferência nas reações de pega e endurecimento do cimento;
- d) melhorar a qualidade do compósito produzido, em relação à durabilidade, resistência ao fogo e resistência ao ataque de microrganismos.

BERALDO & ROLIM (1996), trabalhando com partículas de madeira de reflorestamento (*Eucalyptus citriodora*), utilizaram o processo de “mineralização” (adaptado de FURUNO et al.), deixando as fibras vegetais em imersão por 5 minutos numa solução de metassilicato de sódio a 5% e, em seguida, imersão em solução saturada de sulfato de alumínio a 30%, durante outros 5 minutos. Verificaram ser esta a alternativa mais adequada para melhorar a resistência do CBVC à compressão.

2.3. A carbonatação

BERALDO (1994b) evidenciou a necessidade de reduzir o tempo necessário para que um compósito atinja a estabilidade dimensional. Para isto, fez uso da técnica de carbonatação, tendo em vista que a ação do gás carbônico (CO_2) sobre o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) conduz à formação do carbonato de cálcio (mais poroso, pela presença do CO_2 gasoso).

Este carbonato de cálcio pode, como indicado por GRAM (1986) e PIRJE et al. (1990), ocupar as microfissuras existentes no material, os espaços intercelulares e o vacúolo das células, melhorando as propriedades mecânicas dos compósitos, principalmente a estabilidade dimensional.

Como principais vantagens da carbonatação, PIRJE et al. (1990) citaram a redução no tempo de prensagem das chapas, a falta de necessidade em se efetuar a lavagem das partículas fortemente inibidoras e a melhoria estética dos painéis, devido à coloração mais uniforme. Indicaram ainda que, para realizar a carbonatação com CO_2 gasoso, existe um teor ótimo de umidade e, para eliminar uma parte da água de capilaridade, os corpos-de-prova devem ser submetidos à uma pressão de CO_2 . A reação de carbonatação é muito rápida, sendo que o tempo de tratamento necessário varia em função de fatores como a capilaridade e teor de umidade, que interferem na velocidade de difusão do gás no interior do material.

VENUAT (1984), citado por BERALDO (1994b), indicou que os parâmetros considerados como mais importantes na velocidade de carbonatação, estão ligados à composição do material (natureza e finura do ligante; relação água/cimento; granulometria dos agregados; composição da mistura), a dimensão das peças (relação entre superfície e

volume), o estado do material (teor de umidade; taxa de hidratação) e as condições do tratamento (umidade relativa; o teor de CO₂; tempo; pressão).

2.4. Avaliação de propriedades mecânicas através do ultrassom

Segundo BERALDO (1994b), a vantagem dos métodos não destrutivos, como é o caso do ultrassom, reside no fato de que eles oferecem uma avaliação correta da qualidade do material. No caso do ultrassom, esta evolução é acompanhada através da medida da velocidade de propagação do som, no objeto, desde as fases iniciais (pega), até idades mais avançadas (endurecimento), para o mesmo material.

Segundo o autor, o equipamento de ultrassom emite um impulso de vibração longitudinal, produzido por um transdutor eletroacústico que deve ser mantido em contato íntimo com o material. O impulso vibratório é, então, captado por outro transdutor, sendo convertido em sinal elétrico e em unidades de tempo. Este tempo de propagação do som no material (e a conseqüente velocidade) pode caracterizar o material, servindo de parâmetro para avaliação das suas propriedades mecânicas.

O referido autor utilizou gel cirúrgico em seu experimento, para melhorar o contato entre o corpo-de-prova e o conjunto emissor /receptor. Considerou que a provável absorção do gel pelo compósito não chegasse a modificar, de forma significativa, os resultados obtidos.

A velocidade de propagação (m/s) é obtida efetuando-se a divisão da distância entre os transdutores pelo tempo de propagação da onda.

BODIG & JAYNE (1982) indicaram que a técnica comumente utilizada para correlacionar ensaios destrutivos com não destrutivos, consiste de uma análise de regressão

(normalmente linear) dos valores de módulo de ruptura (MOR) encontrados, e da velocidade obtida em ensaio não destrutivo.

Assim, obtém-se um gráfico 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. Devem ser excluídos pontos que estejam abaixo do limite admitido (dependente da espécie utilizada), em até 5%, obtendo-se com isto, uma confiabilidade de que 95% dos pontos são representados.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Material

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

3.1.1. Casca de arroz

A casca de arroz utilizada foi coletada em máquina beneficiadora na cidade de Alpinópolis-MG, distante cerca de 350 km de Campinas-SP.

3.1.2. Aditivos químicos

De acordo com a **NBR 11768** (Aditivos para concreto de cimento Portland), aditivos são produtos utilizados em pequenas quantidades para modificar algumas propriedades (dos concretos), adequando-as ao uso. Dentro desta especificação, cita-se o emprego dos aceleradores de pega.

Foram empregados como aceleradores de pega o cloreto de cálcio e o sulfato de alumínio e, como agentes de mineralização, o silicato de sódio e o sulfato de alumínio.

Todos os produtos químicos empregados foram do tipo “PA” (Puro para Análise), com pureza mínima de 98 %.

3.1.3. Cal

A cal empregada foi a cal hidratada, tipo CH-III, marca Itaú, de uso corrente em pinturas. Segundo a Associação Brasileira de Produtores de Cal (ABPC), a cal do tipo CH-III atende à norma NBR 7175 (Cal hidratada para argamassas).

3.1.4. Cimento

Foram utilizados dois tipos de cimento Portland, o CP II-E-32 (cimento composto com escória), marca Votoran, e o CP V-ARI (cimento de alta resistência inicial), marca Exato Eldorado. As características físicas, químicas e mecânicas dos mesmos atendem, segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), aos requisitos especificados nas normas **NBR 11578** (cimento Portland composto) e **NBR 5733** (cimento Portland de alta resistência inicial), respectivamente.

A escolha do cimento CP II-E-32 deveu-se à sua maior disponibilidade no comércio local. No caso do cimento CP V-ARI, sua elevada resistência inicial favoreceu a redução do tempo de desforma das peças, além de apresentar menor sensibilidade à ação dos extrativos da casca de arroz, que inibiam a pega e endurecimento do cimento composto.

3.1.5. Água

Utilizou-se, em todo o processo, água potável fornecida pela rede pública.

3.1.6. Gás carbônico

Utilizou-se gás carbônico industrial na cura acelerada de alguns corpos-de-prova, posteriormente ensaiados à flexão estática e à compressão paralela.

3.1.7. Equipamentos

Os seguintes equipamentos foram empregados para a realização dos ensaios:

- Agitador mecânico de peneiras, marca Solotest;
- Aquecedor de água, marca Cherubino, modelos 220V e 127 V, potência de 1000 W;
- Sistema de aquisição de dados marca Barnant - Scanning Thermocouple Thermometer, modelo 692-8010 – Benchtop, 115V, ligado a microcomputador Pentium® de 166 MHz;
- Álcool anidro, marca Chemco;
- Amassadeira de panificadora, marca Hypo, com capacidade de 40 l;
- Batedeira de bolo, marca Wallita;
- Balança analítica, marca Marte, com sensibilidade de 0,01 gramas;
- Becker com volume de 2 dm³;
- Câmara úmida, para a cura das placas;
- Centrífuga para roupas, marca Arno;

- Estufa com termostato regulável, marca Fanem;
- Fôrmas metálicas, utilizadas na confecção das placas;
- Gel para E.C.G. e ultrassonografia, marca MED System;
- Máquina universal de ensaios (VEB Werkstoffprüfmaschinen);
- Microondas, marca Electrolux ME 850, com potência máxima de 850 Watts;
- Moinho-de-martelos, marca Nogueira;
- Moldes para corpos-de-prova, com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura;
- Paquímetro digital, marca DIGIMESS, com sensibilidade de 0,01 mm;
- Peneiras da série normal, com inclusão da peneira de malha 0,075 mm (ABNT n° 200);
- Prensa hidráulica convencional (30 toneladas), marca CHARLOTT, modelo PH 30;
- Prensa MTS (Material Testing System);
- Reator metálico, para cura acelerada com CO₂;
- Recipientes diversos (Panela de alumínio, baldes, entre outros);
- Serra circular Invicta;
- Soquete metálico para a moldagem dos corpos-de-prova;
- Ultrasonic Tester BP-5, marca STEINKAMP, frequência de 45 kHz;
- Utensílios diversos (espátula, faca, colher, entre outros)

3.2. Métodos

3.2.1. Métodos relativos ao material casca de arroz

3.2.1.1. Recepção e acondicionamento do material casca de arroz

O material casca de arroz em sua condição natural e com fração granulométrica de 10 mm, apresentou um teor de umidade médio de 10,74% por ocasião de sua recepção no Laboratório de Ensaio de Materiais. Foi, a seguir, acondicionado em sacos plásticos com capacidade para 50 litros, estocado em recinto fechado e utilizado à medida da necessidade.

O período máximo de estocagem foi de quatro meses.

3.2.1.2. Fracionamento do material casca de arroz na condição natural

A fração granulométrica da casca de arroz, resultante do processo de beneficiamento (10 mm) apresentou-se uniforme, com baixo percentual de finos (menos que 20% de partículas de diâmetro inferior a 0,42 mm). Visando a melhoria das características estéticas do produto final (placas prensadas), optou-se pelo fracionamento do material, embora cada fração tenha sido estudada de forma isolada.

Definiu-se como **10 mm** a fração granulométrica da casca de arroz obtida após o processo de beneficiamento do arroz, por ser esse o comprimento médio. Parte deste material sofreu, posteriormente, fracionamento mecânico em moinho-de-martelos.

As peneiras utilizadas no moinho de martelos apresentavam orifícios com 3 e 5 mm de diâmetro. O material passante por estes tipos de peneira foi definido, respectivamente,

como casca de arroz de fração granulométrica **3 mm** e **5 mm**, embora, evidentemente, ocorresse uma distribuição granulométrica do material.

3.2.1.3. Lavagem do material casca de arroz

Parte do material casca de arroz, das frações granulométricas 10 mm, 5 mm e 3 mm, foi lavado com o intuito de eliminar o excesso de extrativos inibidores da pega e do endurecimento do cimento.

Obteve-se, dessa forma, para efeito de comparação, casca de arroz na condição natural (**N** - que não sofreu nenhum tipo de lavagem), na condição lavada (**L** – lavada em água quente) e na condição lavada em solução de cal (**LSC**).

3.2.1.3.1. Lavagem em água quente (L)

A lavagem da casca de arroz foi realizada segundo metodologia adaptada de BERALDO & ROLIM (1996), que consiste na imersão do material em água quente (80 °C), por um período de 2,0 horas, para eliminar ao máximo as substâncias químicas inibidoras de pega do cimento. Em seguida, o material passou por um processo de secagem ao ar livre, sendo estocado em sacos plásticos. Adotou-se uma relação ponderal de 10:1 entre água e casca de arroz, ou seja, uma concentração de 100 gramas de casca por litro de água.

3.2.1.3.2. Lavagem em solução de cal (LSC)

A lavagem do material casca de arroz em solução de cal foi realizada com base no trabalho de SERRANO & CASTRO (1985), onde a quantidade de cal empregada foi de 5% p/p (peso/peso) da massa da casca.

Adotou-se uma razão ponderal entre a solução de cal e a casca de arroz de 10:1, o que determinou a concentração da solução de cal em 0,5% p/v (peso/volume), de acordo com as indicações dos referidos autores. A casca de arroz ficou em imersão por 24 horas, sendo em seguida escorrida e posta a secar ao ar livre, durante pelo menos 3 dias. Após a secagem, coletou-se amostra para determinar o teor de umidade.

Segundo FONSECA (1993), a solubilidade do hidróxido de cálcio é afetada negativamente pelo aumento da temperatura da água de dissolução (Figura 3.1).

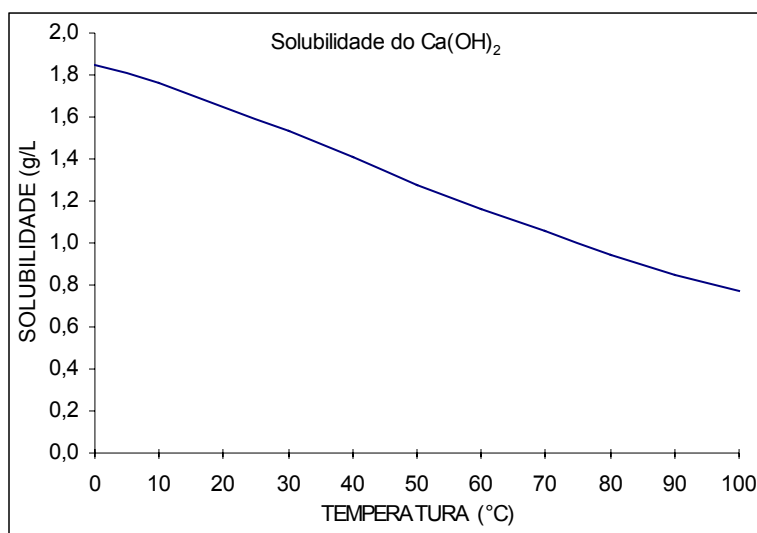


Figura 3.1 – Solubilidade do hidróxido de cálcio, em água

Desta forma, a água à temperatura de 20 °C apresentou uma solubilidade de 1,65 gramas de hidróxido de cálcio por litro. A explicação do fenômeno, segundo a autora,

advém do fato que a reação (exotérmica) é afetada pelo fornecimento externo de energia térmica.

Em consequência da baixa solubilidade, aliada à concentração final de 0,5% p/v (peso/volume), houve uma deposição do excesso de cal no fundo do recipiente utilizado.

Esta deposição exigiu o revolvimento constante da mistura para que a solução se mantivesse a mais homogênea possível, tendo em vista a possibilidade do material reagir com os componentes da cal, como supôs GRAM (1985), o que causaria a sua precipitação no lúmen das fibras e espaços intercelulares, tornando as fibras menos flexíveis, porém mais resistentes.

3.2.1.4. Características físicas do material casca de arroz

3.2.1.4.1. Análise granulométrica das frações granulométricas 10 mm, 5 mm e 3 mm

Inicialmente, a casca de arroz foi estudada quanto à sua composição granulométrica, pois o tamanho dos agregados influi tanto no aspecto estético de acabamento da peça, como nas propriedades dos compósitos.

A análise granulométrica do material casca de arroz foi realizada de acordo com a norma **NBR 7217** (Agregados: Determinação da composição granulométrica), através do peneiramento em equipamento agitador mecânico de peneiras.

Incluiu-se, na série normal, a peneira de malha # 0,075 mm (Quadro 3.1), pois o material passante por esta peneira seria utilizado na obtenção de curvas de hidratação, utilizadas na determinação da incompatibilidade química entre o material e o cimento.

Esperava-se, com isto, associar o potencial inibitório à maior ou menor presença de finos, por apresentarem maior superfície específica, liberando mais facilmente os extrativos presentes.

Quadro 3.1: Peneiras utilizadas

Abertura (mm)	ABNT	Símbolo adotado
2,40	8	# 8
1,20	16	# 16
0,60	30	# 30
0,30	50	# 50
0,15	100	# 100
(*) 0,075	200	# 200
Fundo	Fundo	Fundo

(*) Não faz parte da série normal

Desta forma, determinou-se o diâmetro máximo das partículas (peneira que conteve um percentual retido acumulado igual ou imediatamente inferior a 5% em massa), bem como o módulo de finura (soma das percentagens retidas acumuladas nas peneiras da série normal, dividida por 100).

3.2.1.4.2. Determinação da massa unitária na condição solto.

A massa unitária da casca de arroz na condição natural, para as frações granulométricas 10 mm, 5 mm e 3 mm, foi determinada tendo-se por base a norma **NBR 7251** (Agregado em estado solto: Determinação da massa unitária).

Na execução do experimento utilizou-se, como recipiente, um Becker de 2 dm³. Após tarar a balança analítica com o referido recipiente, verteu-se dentro do mesmo, a uma altura de 10 cm da borda superior do recipiente, o material até atingir o volume de 2 dm³.

Determinou-se, em seguida, a quantidade de material necessário para o volume especificado. A umidade do material utilizado foi a mesma das condições de estocagem.

3.2.1.4.3. Determinação do teor de umidade

A determinação do teor de umidade do material casca de arroz, nas suas diferentes frações granulométricas e condições, foi realizada com base na norma **NBR 9939** (Agregados: Determinação do teor de umidade total, por secagem, em agregado gráudo).

De cada condição e fração granulométrica da casca de arroz estocada (frações granulométricas 10 mm, 5 mm e 3 mm, nas condições natural, lavada e lavada em solução de cal), retirou-se amostra que foi pesada e levada à estufa em temperatura regulada para 105 °C, durante 24 horas.

Após este período, foi novamente pesada, sendo que o teor de umidade foi calculado utilizando-se a seguinte expressão:

$$h = \frac{(M_i - M_f)}{M_f} \cdot 100$$

onde: h = teor de umidade, em porcentagem;

M_i = massa inicial da amostra (g);

M_f = massa final da amostra seca (g).

Como alternativa ao método convencional de determinação de umidade, testou-se o uso de forno de microondas, de uso doméstico, como um possível substituto, pela rapidez na obtenção dos resultados. Para isto, uma amostra de 100 gramas de casca de arroz 10 mm, natural, foi colocada no microondas, em potência máxima. Em intervalos de 30

segundos, o material foi homogeneizado, tendo seu peso anotado. Este procedimento foi repetido até o momento em que a variação no peso, entre duas etapas de aquecimento, fosse inferior a 0,20 gramas, o que resultou em uma sensibilidade de 0,2%.

3.2.1.4.4. Determinação da massa específica

O método empregado por GRANDI (1995), com base na **NBR 9776** (Agregados: Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman), consiste na introdução de uma quantidade de fibra anidra, de massa conhecida (75 g de pó de serra), no interior do frasco de Chapman, contendo um volume conhecido de álcool (350 cm³).

Mede-se o volume de álcool deslocado e, pela expressão abaixo, calcula-se a massa específica aparente da fibra.

$$\gamma = \frac{M_{FIBRA}}{L - V_{ÁLCOOL}}$$

onde:

γ = massa específica aparente da fibra, na umidade de estocagem (g/cm³);

M_{FIBRA} = massa de fibra introduzida no frasco de Chapman (g);

L = leitura do frasco (volume do álcool + fibra, em cm³);

$V_{ÁLCOOL}$ = Volume do álcool no interior do frasco de Chapman, antes da introdução das fibras, em cm³.

No caso do material casca de arroz, utilizou-se um volume de 400 cm³ de álcool anidro, marca Chemco e 19 gramas de casca de arroz de fração granulométrica 10 mm.

3.2.1.5. Mineralização

Esta técnica, descrita por FURUNO et al. (RAMÍREZ SARMIENTO & FREIRE, 1996; BERALDO & ROLIM, 1996) consiste na impregnação das fibras (biomassa vegetal) com os sais resultantes da reação entre o silicato de sódio e o sulfato de alumínio.

O processo de mineralização adaptado consiste na imersão do material em solução de silicato de sódio a 5%, por um período de 5 minutos, após o qual o material deve ser mergulhado em uma solução saturada de sulfato de alumínio a 30%, por outros 5 minutos. Como última etapa, tem-se a secagem do material, para posterior utilização.

No caso do material casca de arroz, uma fração de cada fração granulométrica (10 mm, 5 mm e 3 mm), nas suas diferentes condições (natural, lavado e lavado em solução de cal), foi mineralizada. Houve, porém, a necessidade de se modificar a metodologia de execução, para permitir a confecção de corpos-de-prova imediatamente após o processo de mineralização.

Assim, de acordo com o processo original, preparou-se uma solução de silicato de sódio a 5% e outra de sulfato de alumínio a 30%. A razão ponderal (peso/peso) entre a solução de tratamento e o material a ser tratado foi de 20:1, tendo em vista a dificuldade do tratamento com volumes de solução abaixo de 1,5 litros.

A casca de arroz a ser tratada (diferentes condições e frações granulométricas, previamente pesada e embalada em saco plástico), foi acondicionada em saco de poliéster e pesada em seguida.

Mergulhou-se a casca acondicionada no saco de poliéster, inicialmente na solução de silicato de sódio (5%), permanecendo em imersão por cinco minutos. Após este período, o material foi centrifugado durante dois minutos para a remoção do excesso de solução.

A casca de arroz impregnada com silicato de sódio foi, então, imersa na solução de sulfato de alumínio (30%), ali permanecendo por cinco minutos, após o que, foi novamente centrifugada e, então, pesada.

Considerou-se que a diferença entre o peso seco do material (casca + recipiente) antes do tratamento e o peso úmido do material mineralizado (casca + recipiente + solução incorporada) correspondeu à incorporação de uma parte do volume de água necessário ao amassamento da mistura, sendo o restante complementado antes da mistura com o cimento.

A utilização de um saco constituído por material sintético, deveu-se ao fato do mesmo não apresentar variação no peso, o que foi considerado como um indicador da baixa ou nenhuma reatividade com os sais empregados no processo de mineralização. No caso do primeiro material a ser mineralizado, o saco foi umedecido e centrifugado por dois minutos, para igualar as condições com os demais tratamentos que o precederam.

3.2.2. Métodos relativos ao compósito

3.2.2.1. Determinação do traço

O traço dos compósitos foi determinado experimentalmente. Os resultados iniciais apresentaram grande dispersão, tanto pela característica elástica do material casca de arroz, como pela falta de controle no adensamento da mistura no interior dos moldes, ocorrendo uma falta ou sobra de material, na execução de um mesmo traço.

Obteve-se, contudo, uma dosagem empírica, em massa, para o material de fração granulométrica 10 mm que foi de 300 g de cimento, 110 gramas de casca de arroz e de 225 gramas de água, ou seja, um traço de 1:0,37 com relação água/cimento de 0,75.

O trabalho de SERRANO & CASTRO (1985), consultado posteriormente, apresentou traços muito próximos ao traço encontrado.

Para solucionar o problema da padronização no adensamento da mistura no interior dos moldes (compactação dependente do operador), foi desenvolvido no Laboratório de Protótipos do Departamento de Máquinas da FEAGRI, um soquete para compactação.

A Figura 3.2 apresenta as especificações do soquete de compactação

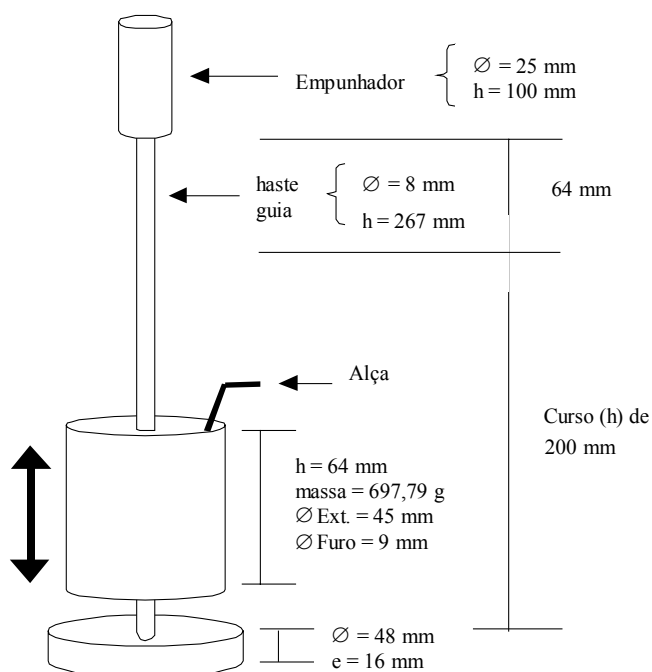


Figura 3.2: Soquete de compactação: especificações

Utilizando o referido soquete e casca de arroz na condição natural, executou-se a moldagem de corpos-de-prova, variando-se o número de quedas do soquete por camada (total de três), com igual massa de mistura preparada a partir do traço 1:0,37;0,75 (em peso).

Diferentes valores de quedas do soquete foram testados, para as diferentes fração granulométricas.

No caso de 5 quedas, houve sobra de material e os corpos-de-prova obtidos apresentavam muitas imperfeições, demonstrando uma compactação deficiente.

No caso de 10 quedas, houve uma pequena sobra de material, com um pequeno acúmulo de pasta de cimento na região entre as camadas.

No caso de 15 quedas, houve falta de material, ocorrendo um acúmulo de pasta na superfície do corpo-de-prova e na região entre as camadas de compactação.

Esta deposição de pasta de cimento formava um anel característico, indicando uma desuniformidade na distribuição da pasta de cimento, no perfil dos corpos-de-prova.

Em função dos fatos observados, foi definido em 10, o número de quedas do peso do soquete, o que resultou em uma energia de compactação de $2,12 \text{ kgf.cm/cm}^3$.

Definida a energia de compactação (padronizada), novos traços (Quadro 3.2) foram determinados.

Quadro 3.2: Traços empregados de acordo com a fração granulométrica

Fração	10 mm	5 mm	3 mm
Traço	1:0,36:0,75	1:0,42:0,75	1:0,49:0,75

3.2.2.2. Moldagem de corpos-de-prova cilíndricos

Na moldagem de corpos-de-prova cilíndricos ($\varnothing$ 50 mm e altura de 100 mm), utilizou-se, como base, a norma **NBR 7215** (Cimento Portland: determinação da resistência à compressão), no que diz respeito aos moldes, capeamento e determinação da carga de ruptura.

Para a obtenção dos referidos corpos-de-prova, foram combinados os fatores Tratamento (Testemunha; Aceleradores de pega cloreto de cálcio - **Ca** e sulfato de alumínio - **Al**; Mineralização - **Mi**), Tipos de cimento (CP II-E-32 / NBR11578 e CP V-ARI / NBR5733), Condição do material (Natural - **N**; Lavado - **L** e Lavado em Solução de Cal - **LSC**) e Fração granulométrica (10 mm; 5 mm e 3 mm).

A sequência de execução da mistura dos componentes, na produção dos compósitos, consistiu na colocação da casca de arroz no recipiente utilizado para fazer a mistura, na adição do volume de água necessário (225 gramas de água ou a quantidade necessária para atingir este valor) e na adição do cimento. Como a argamassadeira do laboratório demonstrou ser inadequada para este tipo de material (pequeno afastamento entre a pá do misturador e o recipiente, ocasionando paradas freqüentes do sistema), utilizou-se uma batedeira doméstica, em velocidade máxima, durante dois minutos, tempo necessário para que ocorresse a homogeneização da mistura.

A mistura obtida foi pesada e distribuída igualmente em camadas nos moldes dos corpos-de-prova. A compactação foi realizada com o auxílio do soquete compactador.

Na última camada, empregou-se um “colar” para aumentar o volume destinado à deposição do material. Concluída a compactação, a superfície foi regularizada.

3.2.2.3. Cura dos corpos-de-prova cilíndricos

Após a desforma (24 horas após a moldagem), os corpos-de-prova foram dispostos em bandejas para cura ao ar livre, em condições de laboratório. Foram feitas anotações periódicas da evolução da perda de massa (água de amassamento).

3.2.2.4. A incompatibilidade química entre a matriz de cimento e a casca de arroz

A incompatibilidade química entre a matriz de cimento e a casca de arroz foi percebida visualmente através da presença de manchas nos corpos-de-prova, que foram moldados com o objetivo de se determinar o traço a ser empregado (Figura 3.3).

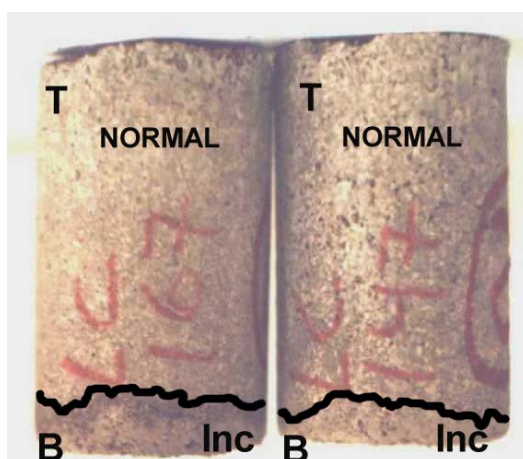


Figura 3.3: Corpos de prova com sinais de incompatibilidade química (Inc.) na região da base

Na manipulação dos mesmos, verificou-se a fragilidade da região manchada, ocorrendo a desagregação após uma leve pressão dos dedos.

A confirmação dos efeitos da incompatibilidade química dos constituintes do material compósito foi confirmada, posteriormente, através do ensaio de compressão simples, o qual indicou uma baixa resistência à compressão, para o material.

Os corpos-de-prova da Figura 3.3 foram confeccionados com casca de arroz de fração granulométrica 3 mm e cimento CP II-E-32. As manchas concentraram-se na região basal dos corpos-de-prova pelo fato dos mesmos não terem sido virados, procedimento este (inverter a posição – Topo/Base ↔ Base/Topo - dos corpos-de-prova após cada

determinação de massa) adotado posteriormente para todos os corpos-de-prova, para que houvesse uma melhor distribuição da umidade no interior dos mesmos e, com isto, uma maior uniformidade na cura ao ar livre em condições de laboratório.

Nas demais frações granulométricas, foram observadas apenas manchas superficiais, decorrentes do arraste e concentração de extrativos, pela água evaporada. Após a adoção do procedimento de inversão dos corpos-de-prova, não mais se detectou a presença de manchas, indicando uma uniformização da umidade no interior do material.

3.2.2.4.1. Determinação da incompatibilidade química

Para verificar a influência do material casca de arroz sobre as reações exotérmicas de hidratação do cimento, utilizou-se a metodologia proposta por WEATHERWAX & TARKOW (1964), através da qual se obtém curvas de hidratação.

O processo de obtenção das curvas de hidratação, segundo os referidos autores, consiste na determinação da variação da temperatura de hidratação ao longo do tempo, de pastas puras de cimento e de misturas de pastas de cimento com “aditivos” (casca de arroz).

Para a determinação da evolução do calor de hidratação do cimento, a norma **NBR12006** (MB3333/90 – Cimento: Determinação do calor de hidratação pelo método da garrafa de Langavant) determina o emprego de calorímetro semi-adiabático (garrafa de Langavant).

Na indisponibilidade do referido sistema, utilizou-se recipientes de Isopor®, dispostos no interior de uma caixa com revestimento interno isolante. No interior de cada

recipiente foi depositado o material (pasta ou mistura), para se determinar a evolução da temperatura ao longo do tempo.

A pasta pura foi composta por 200 gramas do cimento a ser analisado e 50 gramas de água, convenientemente misturados. A mistura foi composta por 200 gramas do cimento a ser analisado, 15 gramas do material que se desejava determinar a influência sobre a pega/endurecimento do cimento (casca de arroz anidra, passante na peneira com abertura de malha de 0,075 mm - ABNT n.º 200) e 90,5 g de água.

A medição das temperaturas foi feita através de termopar (tipo “J”) previamente introduzido na pasta ou mistura. A leitura e registro das temperaturas foi realizada com auxílio do equipamento de aquisição de dados de marca Barnant - Scanning Thermocouple Thermometer, com capacidade para leitura de até 12 termopares.

Os dados coletados foram manipulados através do software Excel®, obtendo-se as curvas de hidratação.

3.2.2.4.2. Influência da granulometria na incompatibilidade química

Para avaliar a influência da fração granulométrica nas reações exotérmicas de hidratação do cimento, substituiu-se o material passante na peneira com abertura de malha de 0,075 mm -ABNT n.º 200, por material passante em peneiras com abertura de malhas de 0,15 mm (ABNT n.º 100, ou # 100), 0,30 mm (ABNT n.º 50 ou, # 50) ou 0,60 mm (ABNT n.º 30 ou, # 30).

3.2.2.5. Ensaios de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos

Os corpos-de-prova foram capeados no Laboratório de Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil com uma mistura composta por enxofre (80%) e caulim (20%). Os corpos-de-prova foram ensaiados à compressão simples aos 14 dias, em máquina universal de ensaios (VEB Werkstoffprüfmaschinen), do Departamento de Máquinas Agrícolas da FEAGRI.

A escala de carga utilizada no equipamento foi de 0 a 2000 kgf, onde cada divisão correspondeu a 10 kgf, tendo-se fixado o carregamento em 0,3 divisões por segundo, o que equivale a uma velocidade de carga de 0,3 MPa/s.

A determinação da resistência à compressão foi realizada tendo-se por base a norma **NBR 7215** (Cimento Portland: Determinação da resistência à compressão), que indica uma velocidade de carregamento de 0,25 MPa/s. Tendo em vista a limitação do equipamento e, como o material compósito à base de cimento Portland e casca de arroz apresenta, entre outras características, a ductilidade (na argamassas e no concreto, é a fragilidade), esta maior deformação dos corpos-de-prova de compósitos, antes da ruptura, permitiu o aumento na velocidade de carregamento, o que reduziu o tempo necessário para cada ensaio, além de obter uma melhor visualização do ponto de ruptura. A resistência à compressão simples de cada corpo-de-prova foi calculada dividindo-se a carga de ruptura (kgf) pela área da seção do mesmo ($19,635 \text{ cm}^2$, considerada como constante), obtendo-se, então, a média (aritmética) de três repetições. Os resultados foram expressos em Mega Pascal (MPa), sendo analisados estatisticamente através do programa SANEST¹.

¹ Sistema de Análise Estatística para microcomputadores; autoria: Elio Paulo Zonta e Amauri Almeida Machado. Registro S.E.I. nº 066060. ESALQ - USP, [19--].

3.2.3. Métodos relativos às Placas

3.2.3.1. Definição de parâmetros: tipo de cimento, tratamento, condição do material e fração granulométrica empregados na produção de placas

Com base nos resultados preliminares obtidos nos ensaios de compressão simples dos corpos-de-prova cilíndricos, foi definido o tipo de cimento, tratamento, condição e fração granulométricas a serem empregados na produção das placas.

3.2.3.2. Dimensões das placas

As placas foram confeccionadas utilizando-se moldes metálicos com dimensões internas de 46,5 cm x 61,0 cm x altura variável, desenvolvidos no Laboratório de Protótipos do Departamento de Máquinas Agrícolas. Cada molde completo pesou aproximadamente 130 kg, o que limitou, em muito, a manipulação dos mesmos por uma única pessoa.

A norma **ASTM D-1037** (Evaluating the properties of wood-based fiber and particle panel materials) faz referência à determinação do comprimento dos corpos-de-prova retirados de placas, em função de sua espessura.

Tendo-se como fator limitante o comprimento dos corpos-de-prova, optou-se por produzir placas com espessura de 15 mm.

Para obter a espessura desejada analisou-se, experimentalmente, a quantidade de materiais necessários (de acordo com o traço) para a fabricação de cada placa, assim como a carga a ser aplicada pela prensa hidráulica.

Devido às limitações de ordem operacional, as placas moldadas não apresentaram a espessura desejada, ocorrendo uma variação entre 15 mm e 18 mm. A espessura de 18 mm foi excepcionalmente obtida em um único caso, quando se utilizou de fração granulométrica o material 10 mm.

3.2.3.2.1. Carga aplicada

Vários tipos de placas foram moldadas em função da carga aplicada. No caso de placas não prensadas observou-se, por ocasião da desforma (24 horas após a moldagem), que as mesmas não apresentavam resistência suficiente para a manipulação, sendo, portanto, descartada a sua fabricação.

As placas prensadas com uma carga de 10 toneladas (pressão de cerca de 3,5 kgf/cm²) permitiram uma razoável manipulação, mas apresentaram, como comportamento negativo, o inchamento espontâneo (aumento irregular na espessura), seguido de uma desagregação superficial (escamação), o que motivou seu descarte para a fabricação.

As placas prensadas com uma carga de 20 toneladas (pressão de cerca de 7,0 kgf/cm²) apresentaram excelente desempenho quanto à manipulação, além da aparente manutenção das características do material prensado. Por esse motivo, adotou-se esse valor na seqüência do trabalho.

Em relação ao acabamento superficial, obtiveram-se melhores resultados fazendo-se o revestimento interno das fôrmas com plástico grosso, o que evitou o uso de desmoldante, reduzindo a perda de nata de cimento e facilitando a desforma. O número de reutilizações do plástico grosso foi superior a 10, necessitando-se apenas efetuar uma limpeza superficial (pano seco, escova de pêlos, entre outros) a cada 5 ou 6 reutilizações.

3.2.3.2.2. Quantidade de materiais

As quantidades de materiais necessários para a produção das placas foram determinadas experimentalmente.

Verificou-se que misturas produzidas utilizando um fator água/cimento de 0,75 perdiam, por ocasião da prensagem, um volume expressivo da água de amassamento. Em razão do volume perdido (placas confeccionadas com material de fração granulométrica 10 mm perdiam cerca de 1,0 litro, de um total de 3,0 litros), ajustou-se para 0,50 o fator água/cimento. Mesmo com esta nova relação água/cimento, houve perda de água de amassamento, em todas as placas moldadas, sendo tal valor, porém, inferior a 100 ml.

Após uma série de ensaios, determinou-se a quantidade de casca de arroz necessária para a confecção da placa. As demais quantidades foram definidas em função dos traços de cada fração granulométrica (sem arredondamento, ou seja, 1:0,35 para 10 mm e 1:0,42 para a de 5 mm).

Um tipo de mistura, das frações granulométricas de 10 mm e 5 mm, foi estudada, tendo em vista a possibilidade de se obter melhores resultados nas características do produto, a exemplo do que é utilizado para o concreto.

No caso das placas onde se fez a mistura das frações granulométricas de 10 e 5 mm, a quantidade total de casca foi a mesma daquela utilizada nas placas de frações granulométricas 10 mm e de 5 mm, mas a mistura foi composta por 65% de material com fração granulométrica 10 mm e com 35% de material com fração granulométrica de 5 mm.

Este critério de usar 65% de material de fração granulométrica 10 mm e 35% de material de fração granulométrica 5 mm foi empírico, sugestionado por um ensaio preliminar, sem controle de compactação, realizado com uma mistura de 50% de material

de fração granulométrica 10 mm e 50% de material de fração granulométrica 5 mm, cujo resultado de ensaio à compressão simples (média de três repetições) foi de 5,6 MPa.

Com base neste resultado, considerou-se que um acréscimo (15%) no percentual do material de fração granulométrica 10 mm seria desejável, pelo menor consumo da fração granulométrica 5 mm, utilizada com a finalidade de melhorar a composição granulométrica.

Teoricamente, uma mistura com percentual de 65% (10 mm) e 35% (5 mm) teria uma redução de finos (diâmetro menor que 0,42 mm) de cerca de 30 %, em relação à mistura de 50% de cada uma das frações granulométricas.

A quantidade de cimento utilizada na sua fabricação (3590 gramas por placa), foi calculada com base na média dos traços das referidas frações granulométricas (1:0,42 e 1:0,36 → média = 1:0,39), tendo em vista que a redução de finos (teórica, de aproximadamente 30%), permite uma redução no consumo de cimento.

A massa de água utilizada no amassamento da mistura foi 50% do total da massa de cimento.

3.2.3.3. Sistema de prensagem

Na fabricação das placas utilizou-se uma prensa hidráulica convencional, marca Charlott, modelo PH 30, com capacidade nominal de 30 toneladas. Esta prensa indicava, através de seu manômetro, uma escala de leitura em toneladas.

Para verificar a precisão do equipamento, utilizou-se uma célula de carga previamente calibrada.

A Figura 3.4 indica a equação da reta representativa da calibração da prensa, com uma margem de erro da ordem de 2 %.

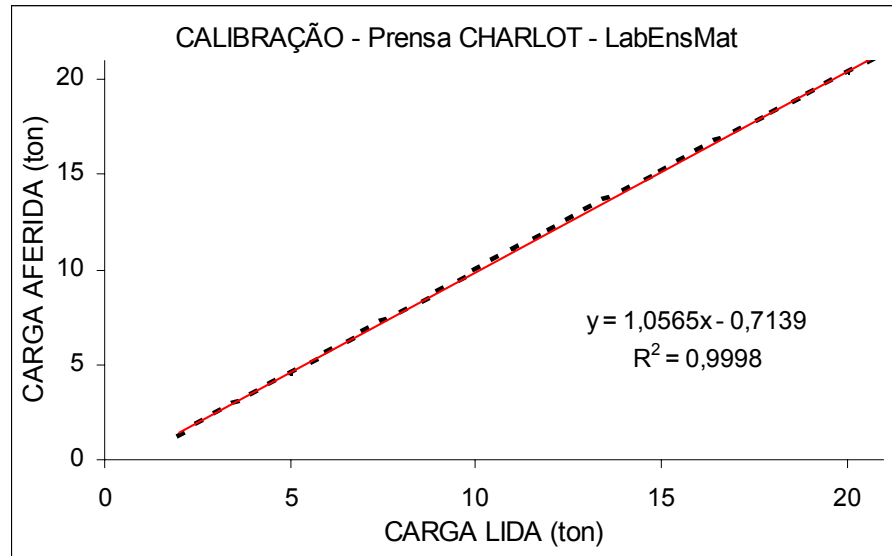


Figura 3.4: Calibração da prensa

Para a distribuição da carga ao longo da superfície da fôrma (Figura 3.5), foram utilizados discos metálicos superpostos, sobre os quais instalou-se o sistema de rótulas e um cilindro de aço que recebeu a carga aplicada pela prensa. Para a manutenção da carga aplicada, as fôrmas foram providas de um sistema de fixação composto por parafusos dispostos nas extremidades.

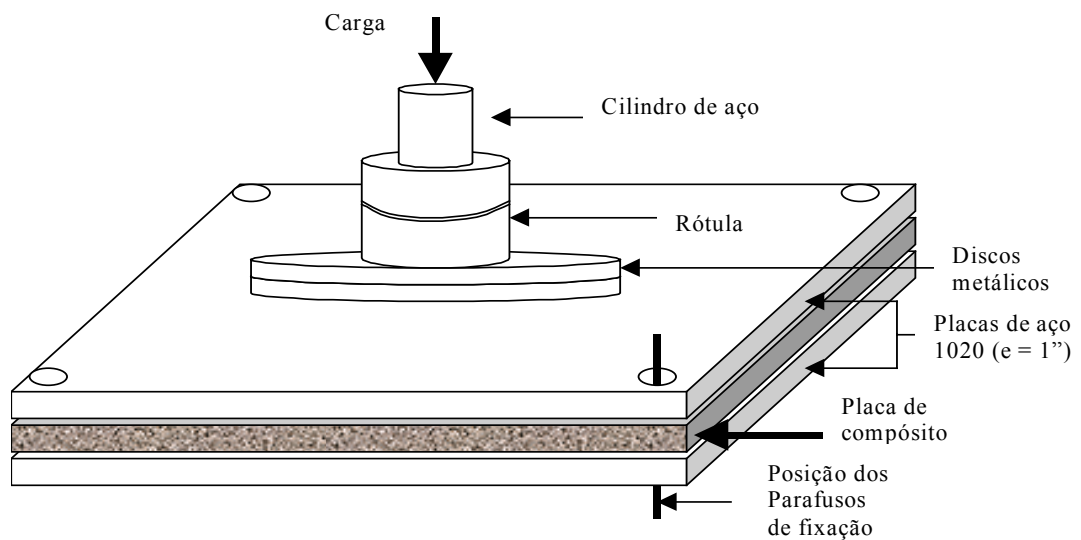


Figura 3.5: Esquema da prensagem e fixação dos moldes

3.2.3.4. Desmoldagem e cura das placas

A desmoldagem das placas prensadas foi efetuada, em média, 24 horas após a mistura dos componentes. No entanto, a desmoldagem tornou-se possível com 14 horas, quando se fez uso do cloreto de cálcio como acelerador de pega.

A cura das placas deu-se, inicialmente, em câmara úmida por um período de sete dias, sendo as placas, em seguida, removidas e postas a secar ao ar livre.

3.2.3.5. Carbonatação de corpos-de-prova

A técnica de carbonatação foi aplicada com o intuito de se verificar uma possível melhoria na resistência dos compósitos. Para a carbonatação, as peças foram umedecidas (saturadas), ficando expostas ao ar, sobre bancada, por cerca de 24 horas antes da carbonatação, para a eliminação do excesso de umidade.

Através deste procedimento, procurou-se homogeneizar o teor de umidade das placas, antes da carbonatação.

Os materiais a serem carbonatados foram dispostos no interior de um reator cilíndrico de 60 l de capacidade mantendo-se um afastamento entre as peças, de cerca de 5 mm. Após o fechamento do reator, fez-se a injeção do CO_2 , em seu interior, com um fluxo de gás de 15 litros por minuto, aguardando-se 5 minutos antes de se efetuar a abertura da válvula de escape do reator.

Supôs-se que a pressão tenha sido suficiente para expulsar o ar presente no compósito, além de eliminar uma parte do vapor de água formado em decorrência das reações do CO_2 com o hidróxido de cálcio. A válvula de escape foi fechada antes de se

perceber o término da saída de gases do interior do reator, para evitar que ocorresse o refluxo de ar para o interior do mesmo.

Repetiu-se o processo de injeção de CO₂ com um fluxo de gás de 20 litros por minuto, aguardando-se que se transcorressem 10 minutos antes de se abrir a válvula de escape para a saída do vapor de água formado, fechando-a antes de se perceber o término da saída dos gases do interior do reator.

Repetiu-se, novamente, o processo de injeção de CO₂, com um fluxo de gás de 25 litros por minuto, aguardando-se 15 minutos quando, então, abriu-se novamente a válvula de escape para a saída dos gases. Após esta etapa, o reator foi aberto, retirado-se as peças carbonatadas do seu interior e dispondo-as sobre bancada, para estabilização ao ar.

A carbonatação foi realizada em três fases para permitir a eliminação do vapor de água formado em decorrência das reações exotérmicas do gás carbônico injetado, com os componentes da cal utilizada no tratamento da casca de arroz, ou formada no processo de endurecimento do cimento.

3.2.3.6. Avaliação das características das placas

Na avaliação das características das placas utilizou-se, como referência, a norma ASTM D-1037 (Evaluating the properties of wood-based fiber and particle panel materials).

O ensaio dos corpos-de-prova de compensado e aglomerado, utilizados como elementos de comparação, foi realizado com base na ASTM D-1037, adotando-se os mesmos parâmetros do ensaio para compósitos.

As peças de compensado e aglomerado foram obtidas de descarte da serraria da UNICAMP, efetuando-se a amostragem de forma aleatória, não sendo utilizada a metodologia indicada pela norma NBR 9533 (Compensado: Determinação da resistência à flexão estática – Método de ensaio), exceto no fato de se remover, no mínimo, 50 mm de cada extremidade da peça, para evitar efeitos de borda.

Evitou-se a avaliação das características dos compensados e aglomerados, utilizando a referida norma (NBR 9533), tendo em vista a existência de conflitos metodológicos na execução dos ensaios de flexão estática, o que inviabilizaria a comparação dos resultados.

Com aproximadamente 20 dias, as placas de compósito foram serradas, utilizando-se serra circular Invicta com dentes de vídea (3 mm) para a retirada dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios de flexão estática, compressão paralela à superfície, absorção e variação dimensional.

A Figura 3.6 indica a posição de cada corpo-de-prova retirado de uma mesma placa.

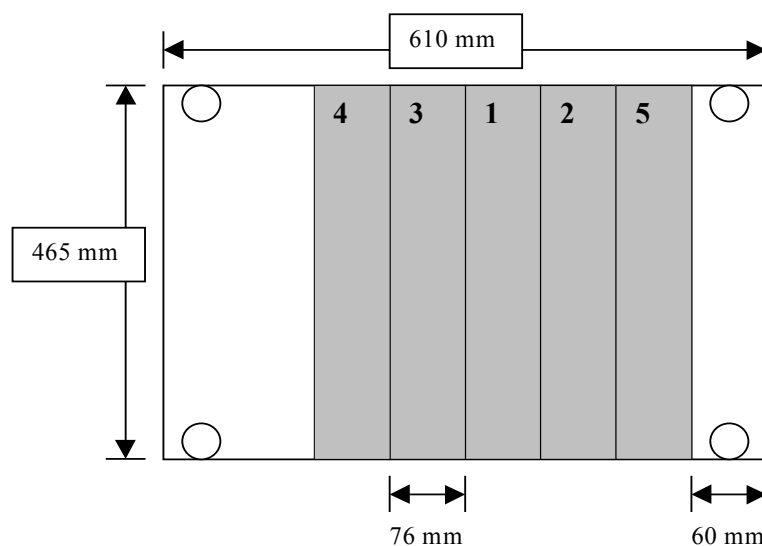


Figura 3.6: Posição dos corpos-de-prova

3.2.3.6.1. Ensaio de flexão estática dos corpos-de-prova extraídos das placas

Na Figura 3.7 pode-se observar as posições das quais foram extraídas as placas a serem utilizadas no ensaio de flexão estática, nas condições seco e úmido.

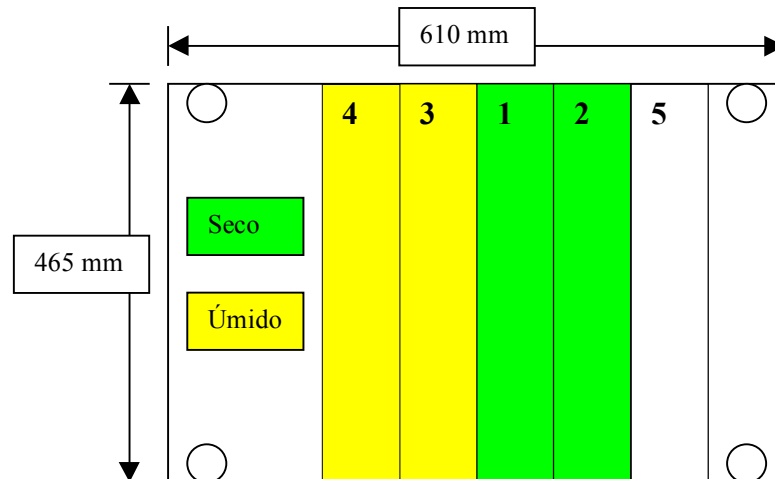


Figura 3.7: Extração de corpos-de-prova para ensaio à flexão estática nas condições seco e úmido

No caso do ensaio de materiais na condição carbonatado, as peças foram obtidas de outras placas, correspondentes às posições 1 e 2 (Figura 3.8).

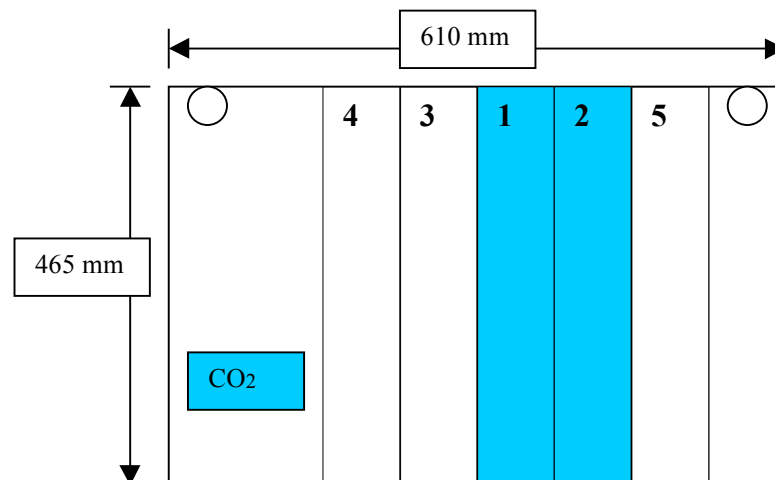


Figura 3.8: Extração de corpos-de-prova para carbonatação e posterior ensaio à flexão estática

A Figura 3.9 indica o esquema de carregamento estático realizado através de uma prensa MTS (Material Testing System), da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP.

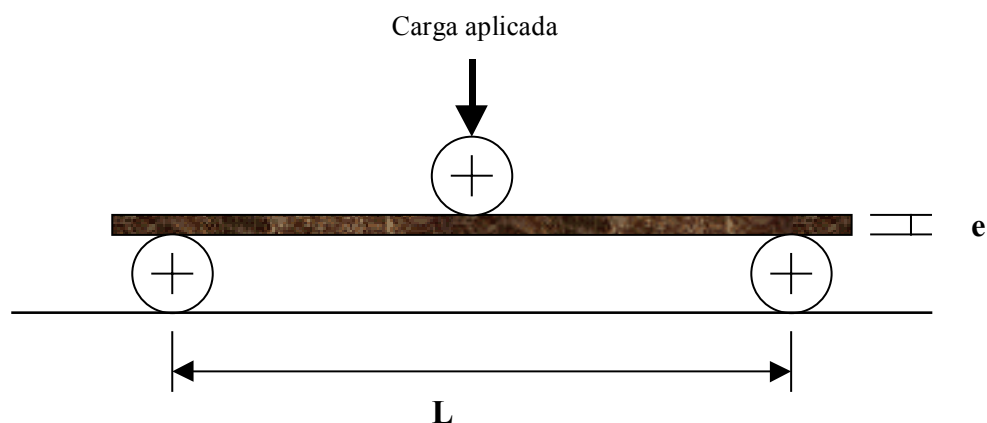


Figura 3.9: Esquema estático de carregamento

No Quadro 3.3, são apresentados os parâmetros de ensaio indicados pela norma ASTM D-1037, e utilizados na avaliação da resistência à flexão estática.

Quadro 3.3: Parâmetros do ensaio de flexão estática, segundo a ASTM D-1037

Espessura (mm)	Velocidade (mm/min)	Vão (L, em mm)	Largura (mm)
15	7,5	360	76
16	8,0	384	76
17	8,5	408	76
18	9,0	432	76

Nos cálculos, utilizou-se os valores obtidos de medições realizadas nos mesmos.

3.2.3.6.2. Ensaio de resistência à compressão

Na Figura 3.10 pode-se observar os locais dos quais foram extraídos os corpos-de-prova utilizados no ensaio de compressão, na condição seco, úmido e carbonatado, bem como as partes descartadas (D).

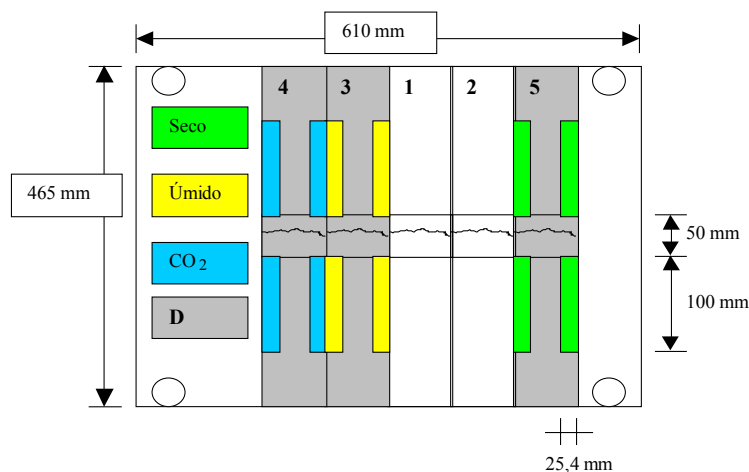


Figura 3.10: Extração de corpos-de-prova para ensaio à compressão paralela à superfície.

Em todas as peças foram descartados, no mínimo, 50 mm da região central e de cada extremidade, como pode ser observado na Figura 3.11, que apresenta a estrutura segmentada de uma parte da placa da qual se fez a extração de corpos-de-prova.

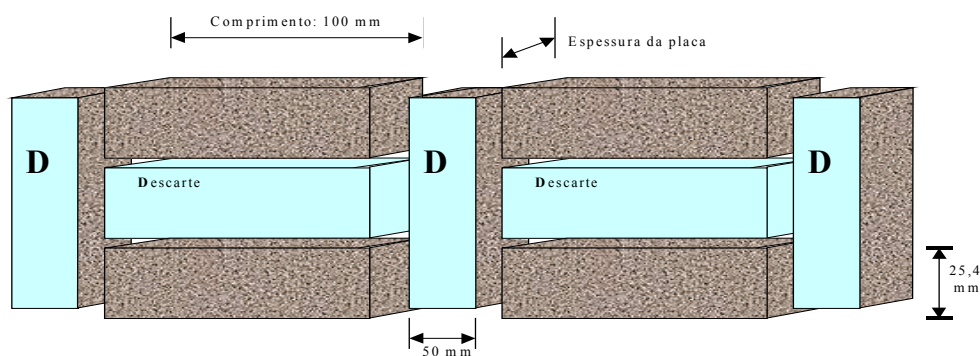


Figura 3.11: Estrutura segmentada de uma peça, para a obtenção de corpos-de-prova utilizados no ensaio de compressão paralela à superfície.

Os corpos-de-prova ensaiados na condição seco foram obtidos de peças identificadas pela posição **5** (Figura 3.10), sendo cortados, numerados e armazenados ao ar livre, até a realização do ensaio.

Os corpos-de-prova ensaiados na condição úmido (saturado), foram obtidos de peças identificadas pela posição **3** (Figura 3.10), correspondentes às peças utilizadas no ensaio de flexão estática, na condição úmida (saturada – 48 h de imersão), sendo, após o corte, numerados e armazenados em câmara úmida até a realização do ensaio.

Os corpos-de-prova ensaiados na condição carbonatado, foram extraídos de peças identificadas pela posição **4** (Figura 3.10), correspondentes às peças utilizadas no ensaio de flexão estática, na condição úmida (saturada – 48 h de imersão). Após a carbonatação, os corpos-de-prova foram cortados, numerados e armazenados em câmara úmida, até a realização do ensaio (condição: úmido).

3.2.3.6.2.1. Ultrasom

Antes da execução do ensaio de compressão, efetuou-se um ensaio não destrutivo utilizando um equipamento de ultrasom. Esta técnica foi utilizada com o objetivo de se verificar a possibilidade de avaliar a resistência à compressão de placas prensadas, em substituição ao método destrutivo.

Na medição do tempo de propagação da onda nos corpos-de-prova, foi utilizado o equipamento Ultrasonic Tester, modelo BP-5, da STEINKAMP, com transdutores de 30 mm de diâmetro, faces planas e frequência de 45 kHz (Figura 3.12). Para que o contato entre o transdutor e o material compósito fosse o melhor possível, tendo em vista as irregularidades na superfície dos corpos-de-prova, empregou-se um gel cirúrgico, de uso

corrente em ultrassonografia. Os corpos-de-prova apresentavam dimensões de 100 mm de comprimento, 25,4 mm de largura. A espessura variou de 15 a 18 mm.



Figura 3.12: Medição da velocidade de propagação do som, utilizando o equipamento de ultrassom.

Após a leitura dos tempos de propagação da onda ultrasonora, foi realizado o ensaio destrutivo, de compressão paralela à superfície, em máquina universal de ensaios (VEB Werkstoffprüfmaschinen), pertencente ao Departamento de Máquinas Agrícolas da FEAGRI.

3.2.3.6.2.2. Ensaio de resistência à compressão paralela à superfície, de corpos-de-prova extraídos das placas prensadas

Segundo a norma ASTM D-1037, os corpos-de-prova para o ensaio à compressão paralela à superfície devem possuir 100 mm de altura e 25,4 mm de largura.

A espessura adotada correspondeu àquela da placa ensaiada. A velocidade de carregamento foi a mesma utilizada nos corpos-de-prova cilíndricos, ou seja, de 0,3 MPa/s.

3.2.3.6.3. Ensaio de absorção de água e de variação dimensional das placas

Na Figura 3.13 estão indicadas as posições das quais foram retirados os corpos-de-prova utilizados nos ensaios de absorção de água e de variação dimensional

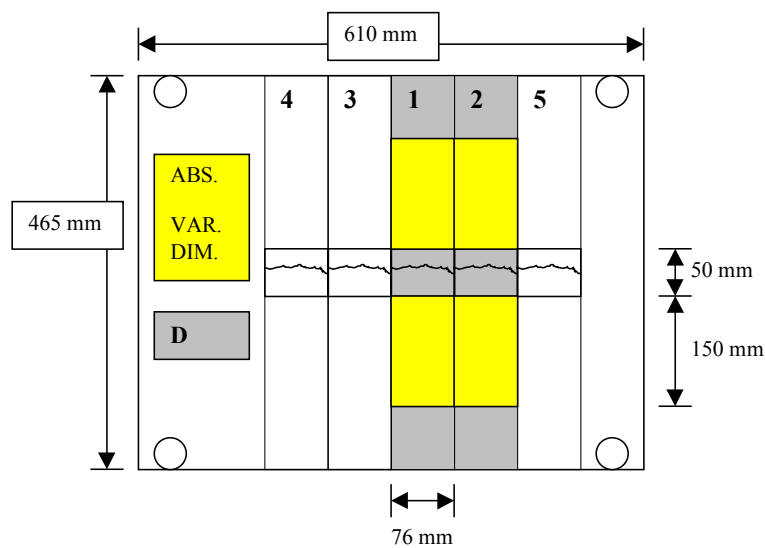


Figura 3.13: Extração de corpos-de-prova para o ensaio de absorção de água e de variação dimensional

Na Figura 3.14 está indicada a região (central, com cerca de 50 mm) removida para a determinação do teor de umidade.

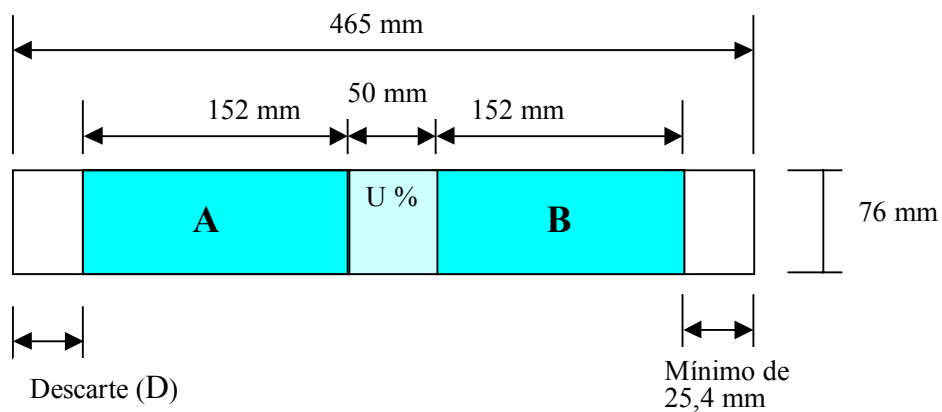


Figura 3.14: Extração de corpos de prova para determinação de umidade (U %), absorção de água e variação dimensional (A e B).

As extremidades foram descartadas, de forma que os corpos-de-prova apresentaram dimensões finais de cerca de 76 mm de largura, 152 mm de comprimento e espessura variável (de acordo com a placa ensaiada).

Estas medidas foram adotadas em função do que a norma ASTM D-1037 permite, para os casos de não se poder obter peças nas dimensões recomendadas (304 mm x 304 mm).

Efetuuou-se, posteriormente ao corte, a determinação da massa na condição seco de cada corpo-de-prova, através de balança analítica marca Marte, com sensibilidade de 0,01 grama.

Após a pesagem, determinaram-se as medidas (Figura 3.15) na condição seco, utilizando paquímetro digital marca Digimess, com sensibilidade de 0,01 mm.

Na Figura 3.15 são indicados os locais onde foram feitas as medições de comprimento, largura e espessura, considerando-se a posição da peça retirada da placa, como região central da placa (C) e região lateral (L)

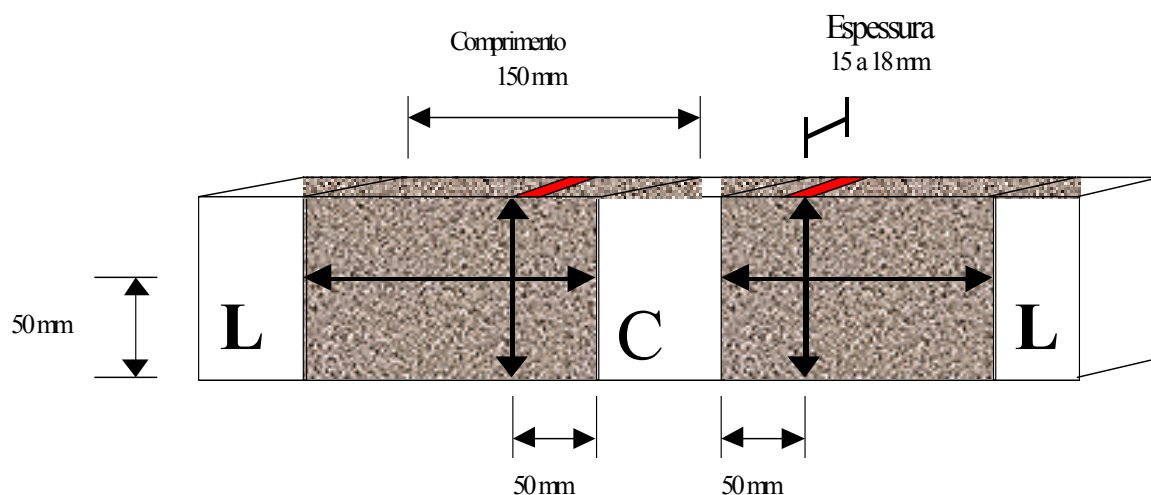


Figura 3.15: Locais marcados nos corpos-de-prova utilizados para as medições

Os corpos-de-prova na condição seco, após a determinação da massa e dimensões, foram imersos em água por um período de 2 horas.

Decorrido o tempo estipulado de imersão, os corpos-de-prova foram retirados do banho de imersão, enxugados superficialmente com auxílio de toalha de algodão/papel, sendo, em seguida, pesados e medidos.

A água utilizada no banho de imersão foi substituída por outra, limpa, tendo-se observado a presença de substâncias em suspensão, possivelmente associadas à cal, apresentando coloração amarelada.

Após a determinação das medidas necessárias (massa, comprimento, largura e espessura), os corpos-de-prova foram novamente imersos em água. Novas medições foram realizadas, após 24 horas e 120 horas do início do experimento.

Na determinação das variações dimensionais, utilizou-se a seguinte expressão:

$$V_D = \frac{(Du - Ds)}{Du} \bullet 100\%$$

Onde:

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

D_u = Dimensão da peça (comprimento, largura, espessura ou volume), na condição úmido;

D_s = Dimensão da peça (comprimento, largura, espessura ou volume), na condição seco em estufa.

A equação foi utilizada por BERALDO (1991) na determinação das variações dimensionais de madeiras.

No ensaio de absorção de água, a norma ASTM D-1037 indica que a expressão dos resultados deve ser em porcentagem de volume e em porcentagem de peso. Considera, ainda, a densidade da água como sendo 1,0 g/cm³.

Para expressar os resultados do ensaio de absorção de água em porcentagem de peso, utilizou-se a seguinte expressão:

$$ABS_p = \frac{(M_U - M_S)}{M_U} \bullet 100\%$$

Onde:

ABS_p = Absorção de água, em porcentagem de peso;

M_U = Massa do corpo-de-prova, nos diferentes tempos de imersão (g);

M_S = Massa do corpo-de-prova, na condição seco em estufa (g).

Para expressar os resultados do ensaio de absorção de água em porcentagem de volume, utilizou-se a seguinte expressão:

$$ABS_v = \frac{(V_U - V_S)}{V_U} \bullet 100\%$$

Onde:

ABS_v = Absorção de água, em porcentagem de volume;

V_U = Volume do corpo-de-prova, nos diferentes tempos de imersão (cm³);

V_S = Volume do corpo-de-prova, na condição seco em estufa (cm³).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Resultados relativos ao material casca de arroz

4.1.1. Análise granulométrica dos materiais definidos como frações granulométricas de 10 mm, 5 mm e 3 mm

Nos Quadros 4.1 a 4.3 são apresentados os resultados da análise granulométrica do material casca de arroz, para as diferentes frações granulométricas, nas condições natural e lavado.

Quadro 4.1: Distribuição granulométrica – Casca de arroz – fração granulométrica 10 mm

10 mm, estado NATURAL			10 mm, estado LAVADO		
Abertura da malha (mm)	% Retida	% Acumulada	Abertura da malha # (mm)	% Retida	% Acumulada
2.38 (# 8)	69,35	69,35	2.38 (# 8)	89,19	89,19
1.19 (# 16)	26,20	95,54	1.19 (# 16)	8,89	98,08
0.59 (# 30)	2,18	97,72	0.59 (# 30)	1,73	99,81
0.297 (# 50)	0,85	98,57	0.297 (# 50)	0,13	99,94
0.149 (# 100)	0,54	99,11	0.149 (# 100)	0,06	100,00
0.074 (# 200)	0,55	99,67	0.074 (# 200)	0,00	100,00
Fundo	0,33	100,00	Fundo	0,00	100,00
Total (# 8 à # 100)		460,30	Total (# 8 à # 100)		487,02
% Finos (menor que 0,42 mm)	2,28	MF = 4,60	% Finos (menor que 0,42 mm)	0,19	MF = 4,87

Quadro 4.2: Distribuição granulométrica – Casca de arroz – fração granulométrica 5 mm

5 mm, estado NATURAL			5 mm, estado LAVADO		
Abertura da malha # (mm)	% Retida	% Acumulada	Abertura da malha # (mm)	% Retida	% Acumulada
2.38 (# 8)	7,94	7,94	2.38 (# 8)	4,40	4,40
1.19 (# 16)	65,15	73,09	1.19 (# 16)	46,01	50,41
0.59 (# 30)	17,13	90,23	0.59 (# 30)	40,46	90,87
0.297 (# 50)	6,74	96,97	0.297 (# 50)	7,50	98,37
0.149 (# 100)	1,84	98,80	0.149 (# 100)	1,38	99,74
0.074 (# 200)	0,67	99,47	0.074 (# 200)	0,18	99,92
Fundo	0,53	100,00	Fundo	0,08	100,00
Total (# 8 à # 100)		367,03	Total (# 8 à # 100)		343,79
% Finos (menor que 0,42 mm)	9,77	MF = 3,67	% Finos (menor que 0,42 mm)	9,13	MF = 3,44

Quadro 4.3: Distribuição granulométrica – Casca de arroz – fração granulométrica 3 mm

3 mm, estado NATURAL			3 mm, estado LAVADO		
Abertura da malha # (mm)	% Retida	% Acumulada	Abertura da malha # (mm)	% Retida	% Acumulada
2.38 (# 8)	0,00	0,00	2.38 (# 8)	0,00	0,00
1.19 (# 16)	18,81	18,81	1.19 (# 16)	0,99	0,99
0.59 (# 30)	52,75	71,57	0.59 (# 30)	68,07	69,06
0.297 (# 50)	19,79	91,36	0.297 (# 50)	25,48	94,54
0.149 (# 100)	5,66	97,02	0.149 (# 100)	4,64	99,18
0.074 (# 200)	1,80	98,82	0.074 (# 200)	0,65	99,83
Fundo	1,18	100,00	Fundo	0,17	100,00
Total (# 8 à # 100)		278,76	Total (# 8 à # 100)		263,76
% Finos (menor que 0,42 mm)	28,43	MF = 2,79	% Finos (menor que 0,42 mm)	30,94	MF = 2,64

Considerações:

Verificou-se que a dimensão máxima característica (diâmetro máximo) para a fração granulométrica 10 mm foi de 2,40 mm (condições natural e lavado), com um percentual de finos inferior à 3%.

Para a fração granulométrica 5 mm, a dimensão máxima característica (diâmetro máximo) foi de 2,40 mm (condições natural e lavado), com um percentual de finos menor que 10%.

Para a fração granulométrica 3 mm, a dimensão máxima característica (diâmetro máximo) foi de 1,20 mm para o material no condição natural (percentual de finos de cerca

de 31%) e de 0,60 mm para o material na condição lavado, com um percentual de finos de cerca de 28,5%.

Na determinação dos valores dos módulos de finura, empregou-se amostras diferentes, razão pela qual os valores obtidos não devem ser contrastados.

O percentual de finos foi determinado em função do que prescreve a **NBR 7225** (Materiais de pedra e agregados naturais) sobre a classificação de areia e pedrisco como finos, quando o diâmetro das partículas varia entre 0,42 mm e 0,075 mm.

Segundo a **NBR 7211** (Agregados para concreto), que estabelece limites granulométricos para o agregado miúdo em função das percentagens retidas acumuladas, o material casca de arroz de frações granulométricas 5 mm e 3 mm pode ser comparado a uma areia grossa, ao passo que o material de fração granulométrica 10 mm, pode ser comparado à brita 0 (zero).

A importância do percentual de finos está relacionada com a incompatibilidade química, que pode ser maior à medida em que o material fica mais exposto à ação da água de amassamento, e à ação alcalinizante do cimento, da cal ou de outros agentes que possam aumentar a solubilidade dos extrativos nocivos à pega e ao endurecimento do cimento.

4.1.2. Determinação da massa unitária na condição solto

No Quadro 4.4 encontra-se o valor médio (média de três repetições) da massa unitária da casca de arroz solta (não compactada), para o material na condição natural, para as frações granulométricas 10 mm, 5 mm e 3 mm, na umidade de estocagem.

Quadro 4.4: Massa específica unitária do material solto (g/dm³)

	10 mm	5 mm	3 mm
N	96	177	303
L	102	180	300
LSC	98	181	283

Considerações:

A massa específica unitária do material na condição solto apresentou uma variação muito alta, o que é um indício de que dosagens volumétricas podem não ser adequadas no preparo das misturas. Se, no entanto, for necessário o emprego da dosagem volumétrica, sugere-se que o material sofra uma acomodação forçada das partículas, promovida por adensamento manual, o que tenderá a reduzir as distorções na distribuição do material nas fôrmas.

4.1.3. Determinação do teor de umidade

No Quadro 4.5 pode ser verificado que o teor de umidade da casca de arroz não apresentou grandes variações, situando-se entre 10 e 12%.

Quadro 4.5: Umidade do material, nas condições de estocagem (%)

Estado \ Granulometria	10 mm	5 mm	3 mm
N	10,74	10,41	10,91
L	10,19	10,13	10,94
LSC	10,90	11,84	11,24

Testando-se o uso do microondas na determinação da umidade e na secagem da casca de arroz lavada, verificou-se que, em média, foram necessários 8 minutos para determinar a umidade do material casca de arroz.

Considerações:

A variabilidade no teor de umidade decorre do fato da secagem dos materiais ter sido realizada ao ar livre. Os materiais com maior percentual de finos apresentaram teor de umidade mais elevado.

Considerou-se que a variação entre os percentuais de umidade não foi expressiva (menos que 2%), sendo que os teores estão muito próximos daquele utilizado na estocagem do arroz em casca. Desse modo, não foi efetuada a correção da quantidade de água de amassamento, para a confecção de corpos-de-prova.

Verificou-se, ainda, um incremento no teor de umidade, de cerca de 0,5%, para as condições de estocagem do laboratório, em um período de dois meses.

A utilização de microondas na determinação da umidade requer cuidados extras, como, por exemplo, a homogeneização da mistura, antes da pesagem, para a liberação de vapores mas, principalmente, para evitar que o material presente na região central do recipiente utilizado, sofra aquecimento excessivo e possa entrar em combustão.

A desuniformidade no aquecimento é o principal problema encontrado no uso desta técnica, que pode ser potencialmente nocivo à saúde do operador, se empregada inadequadamente.

A quantidade de material necessário deve ser maior do que no caso de secagem em estufa. Sugere-se um mínimo 50 gramas e um máximo de 100 gramas de casca, para permitir uma boa manipulação e uniformização do material.

Deixando-se o material exposto ao ar, a casca absorve rapidamente a umidade do ambiente, observado através do aumento na massa do material, o que deixa dúvidas a respeito da umidade real, em relação ao material seco em estufa.

4.1.4. Determinação da massa específica

Adaptando-se a metodologia proposta por GRANDI (1995), para o material casca de arroz, verificou-se que o volume inicial de 400 cm³ de álcool, ao qual se adicionou 19 gramas de casca de arroz (anidra; 10 mm; natural), sofreu um deslocamento volumétrico aproximado de 26 cm³.

A densidade do álcool utilizado foi de 0,79 g/cm³ e a massa específica da casca de arroz, de 0,73 g/cm³ (fração granulométrica 10 mm, condição natural).

Considerações:

1. O uso de substâncias de densidade inferior à água (álcool, éter, entre outros) favorece a redução da quantidade de materiais sobrenadantes ocorrendo, porém, volatilização.
2. A leitura do volume de álcool deslocado foi dificultada pela presença de material sobrenadante (erro de leitura de cerca de 2,0 cm³), não sendo possível obter resultados confiáveis. A precisão na leitura dos valores utilizando o frasco de Chapman é de cerca de 1,0 cm³. Em razão destes fatos, não foram realizadas outras determinações. É importante observar que, para os materiais na condição lavado em solução de cal (LSC), a presença dos resíduos da cal pode mascarar os resultados.
3. A precisão na medição do volume das fibras depende do grau de saturação das mesmas. Se as fibras estiverem em condição anidra (como recomenda a norma), os resultados serão mais uniformes, menos dispersos.
4. O conceito de massa específica indicado na norma **NBR 9776** (Agregados: Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman) inclui, no volume, poros impermeáveis (não podem ser preenchidos pela água).

Para o material casca de arroz, esta metodologia, mesmo adaptada, parece ser pouco adequada, pois o álcool, sendo absorvido pelo material, vai se localizar nos vacúolos das células e nos espaços intercelulares, expulsando todo o ar do interior das mesmas e, com isto, o material têm a tendência de aumentar seu volume, o que não ocorre nos grãos de areia imersos em água (ou em álcool).

4.2. Resultados relativos ao compósito

4.2.1. Determinação do traço

As quantidades de materiais indicados na Quadro 4.6 foram determinadas para uma energia de compactação padronizada de $2,12 \text{ kgf.cm/cm}^3$, para três corpos-de-prova.

Quadro 4.6: Quantidade de material utilizado (g)

Material	10 mm	5 mm	3 mm
Cimento	300	300	300
Casca de arroz	107	127	147
Água	225	225	225

A partir das quantidades indicadas, obtiveram-se os traços de 1:0,36:0,75 para o material de fração granulométrica 10 mm, 1:0,42:0,75 para o material de fração granulométrica 5 mm e de 1:0,49:0,75 para o material de fração granulométrica 3 mm.

Considerações:

Por ser um material higroscópico, a casca de arroz apresentou uma variação volumétrica que, presume-se, seja devido ao grau de saturação das fibras.

A casca de arroz funciona, a princípio, como uma esponja, liberando água para o meio, dependendo da “pressão” aplicada.

A saturação das fibras está relacionada com a absorção da água de amassamento, a qual, por sua vez, está mais ou menos disponível, em função da sequência de execução da mistura.

Assim, para uma mistura a seco de casca de arroz e cimento, sendo posteriormente acrescentada a água, a tendência observada foi de que o cimento tende a competir com a casca, no que diz respeito à absorção de água (relação água/cimento inferior a 0,75) que, desta forma, fica “seca”. A casca, na mistura obtida, tende a se expandir com facilidade, mesmo após a compactação, ocasionando uma maior variação volumétrica, para uma mesma mistura.

No caso da mistura simultânea dos materiais (deposição dos materiais no interior do recipiente: primeiro a água, em seguida a casca e por fim, o cimento), verificou-se que a absorção de água pela casca é moderada, pois, na execução da mistura, parte do cimento que está na parte superior flui com relativa facilidade para o fundo do recipiente, absorvendo boa quantidade de água.

Na compactação, as fibras vegetais e a casca de arroz, em particular, apresentam um teor de umidade que permite sua deformação sem, contudo, liberar muita água. A variação volumétrica apresentada pela casca torna-se muito menor.

Como alternativa ao problema decorrente da variação volumétrica, observou-se que a mistura deixada em repouso por, no mínimo, 30 minutos, apresentará menores variações volumétricas, pois tenderá ao equilíbrio, ocorrendo, contudo, uma perda por evaporação de parte da água de amassamento.

Quando a relação água/cimento é alta (acima de 0,75), a mistura pode virar uma “sopa” dificultando, de forma acentuada, a compactação.

Em geral, fibras vegetais úmidas e, em particular, a casca de arroz, tendem a manter a forma imposta pela compactação, apresentando uma menor variação volumétrica em relação à casca mais “seca”, podendo ainda liberar parte da água para o cimento, quando comprimidas (ação de impacto – efeito esponja).

Neste fluxo de água através da casca, promovido pela ação do soquete compactador, partículas de cimento podem manter contato mais íntimo com a estrutura da casca.

O comportamento, em relação à variação volumétrica, de cascas saturadas (imersão em água, por cinco minutos) e submetidas à centrifugação por 2 minutos (as frações granulométricas 10 mm, 5 mm e 3 mm, apresentaram teores de umidade, após a centrifugação, de respectivamente, 60%, 80% e 75,5%), se assemelhou ao método de disposição dos materiais no interior do recipiente (ordem de colocação), para posterior mistura.

Observou-se ainda que a fração granulométrica 10 mm é, dentre as frações granulométricas, a que apresenta maior variação volumétrica.

A casca de arroz centrifugada (fibras úmidas, não saturadas) apresentou maior facilidade na manipulação pois o cimento, ao aderir fortemente à casca, quase não sujava as mãos, resultando em uma mistura relativamente solta.

Este procedimento não foi adotado para a moldagem de corpos-de-prova, pois a centrifugação removeria a maior parte da água de amassamento, impregnada nas fibras, proporcionando um fator água cimento inferior a 0,75 que, desta forma, exigiria um acréscimo de água, retirada desnecessariamente.

4.2.2. Cura dos corpos-de-prova cilíndricos

Após a desforma, acompanhou-se a evolução diária da perda de massa , tendo-se realizado, após cada pesagem, a inversão da posição dos corpos-de-prova, procedimento este adotado para uniformizar a umidade no interior dos mesmos e evitar a concentração de extrativos inibidores da pega.

Na Figura 4.1 tem-se a curva da perda de massa, ao longo do tempo, para corpos-de-prova confeccionados com cimento CP V-ARI, curados ao ar livre.

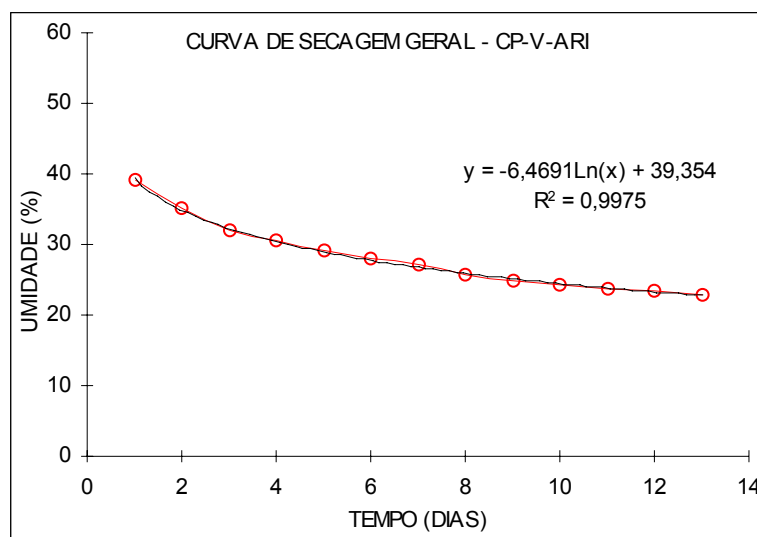


Figura 4.1: Curva de secagem: compósitos à base de CP V-ARI

A perda de umidade, em média, se estabilizou em torno do décimo segundo dia após a confecção dos corpos-de-prova.

Na Figura 4.2 tem-se a curva da perda de massa, ao longo do tempo, para os corpos-de-prova confeccionados com cimento CP II-E-32, curados ao ar livre.

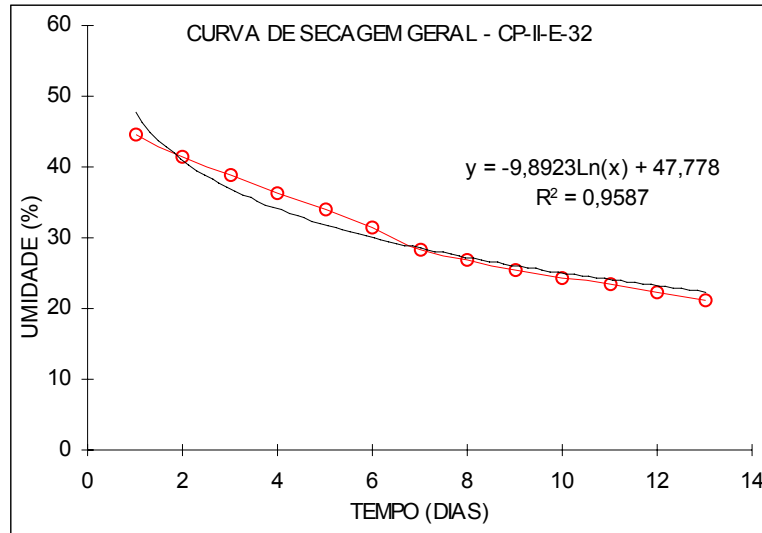


Figura 4.2: Curva de secagem: compósitos à base de CP II-E-32

Considerações:

A cura dos corpos-de-prova cilíndricos, ao ar livre, foi afetada diretamente pelas condições climáticas. O teor de umidade dos mesmos, na realização dos ensaios de compressão simples, foi, em média, superior a 20%. Uma secagem forçada, em estufa ou através de circulação forçada de ar (ventilador), pode reduzir a umidade a valores mais adequados tanto para o transporte como para a utilização de compósitos casca de arroz-cimento.

4.2.3. A incompatibilidade química entre a matriz de cimento e a casca de arroz

4.2.3.1. Determinação da incompatibilidade química

Na Figura 4.3 apresenta-se a curva de hidratação obtida de acordo com a metodologia proposta por WEATHERWAX & TARKOW (1964), ou seja, utilizando casca de arroz passante na peneira de malha # 200 (partículas com diâmetro inferior à 0,075 mm).

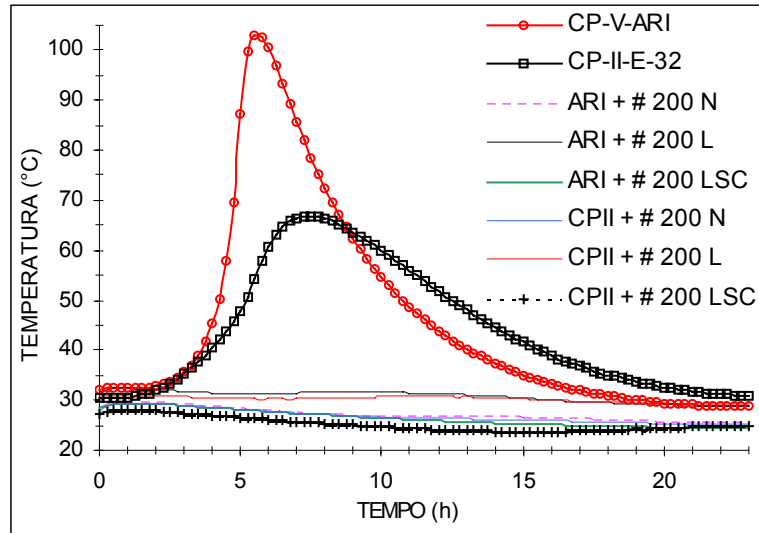


Figura 4.3: Curvas de hidratação (# 200): CP V-ARI e CP II-E-32

Embora nenhum dos tratamentos utilizados tenha se mostrado perfeitamente adequado para melhorar a compatibilidade entre a casca de arroz e o cimento Portland, a princípio, o melhor tratamento aplicado às partículas seria a lavagem em água quente (**L**) e, o pior tratamento, a lavagem em solução de cal (**LSC**), o que não foi confirmado em experimentos posteriores.

As curvas de hidratação envolvendo a mistura de cimento e casca de arroz indicaram a existência de incompatibilidade química, traduzida por uma temperatura máxima de hidratação inferior a 50 °C (SANDERMANN & KHOLE “apud” MOSLEMI & LIM, 1984). Esta temperatura de 50 °C, é considerada como mínima para caracterizar um material como aceitável, na produção de compósitos à base de cimento.

Observando as curvas de hidratação dos dois tipos de cimento empregado, verificou-se que os efeitos da incompatibilidade química foram mais acentuados no caso do uso do cimento CP II-E-32 (Figura 4.3-a). Em ambos os casos, verifica-se que as reações exotérmicas da hidratação do cimento ocorreram em uma fase inicial, rapidamente suprimida pela presença de agentes inibidores de pega.

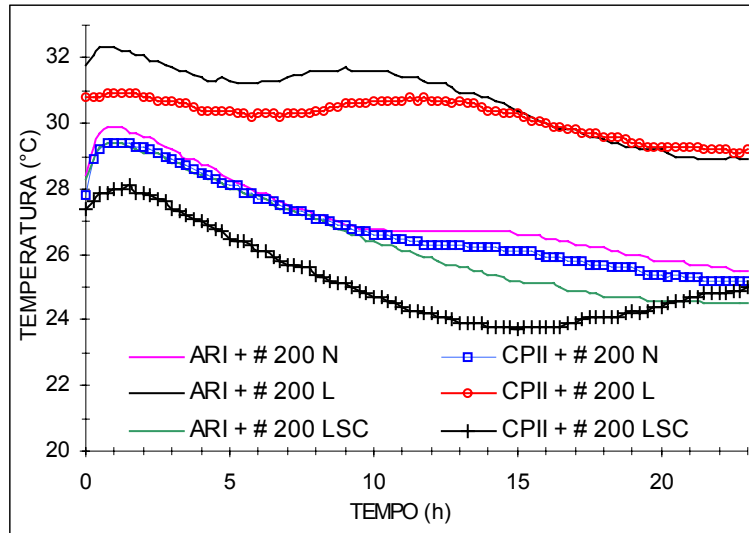


Figura 4.3-a: Detalhe das curvas de hidratação (# 200): CP V-ARI e CP II-E-32

4.2.3.2. Influência da granulometria na incompatibilidade química

Na Figura 4.4 são apresentadas as curvas de hidratação para o material casca de arroz passante na peneira de malha # 100 (partículas com diâmetro variando entre 0,15 mm e 0,075 mm).

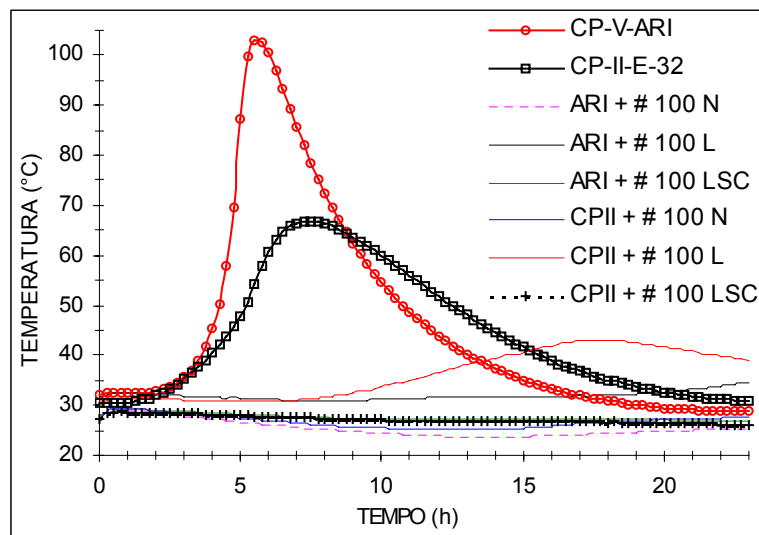


Figura 4.4: Curvas de hidratação (# 100): CP V-ARI e CP II-E-32

O comportamento dos materiais passantes na peneira de # 100 foi semelhante ao daquele apresentado pelo material de # 200, ou seja, uma temperatura máxima de hidratação inferior ao mínimo necessário, de 50 °C. No entanto, no tratamentos lavado (L), para ambos os tipos de cimento, evidenciou-se a existência de um pico de temperatura.

Na Figura 4.5 são apresentadas as curvas de hidratação para o material casca de arroz passante na peneira de malha # 50 (partículas com diâmetro variando entre 0,30 mm e 0,15 mm).

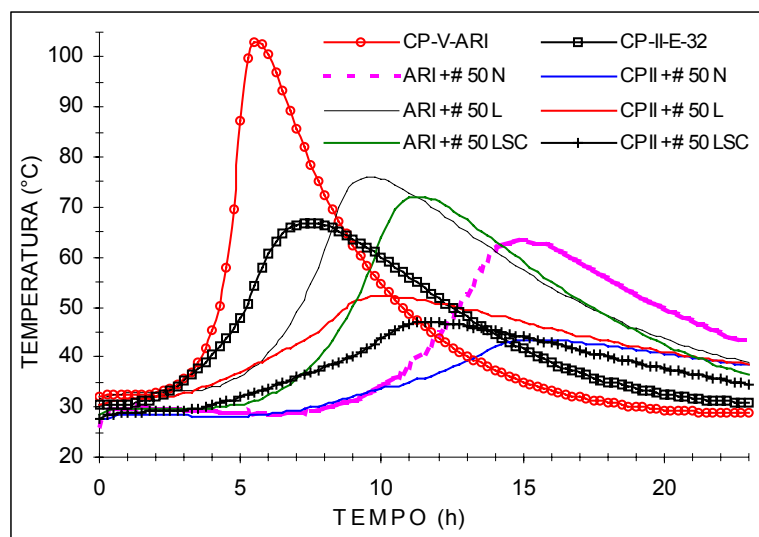


Figura 4.5: Curvas de hidratação (# 50): CP V-ARI e CP II-E-32

No caso dos materiais passantes na peneira de # 50, a temperatura máxima de hidratação somente foi inferior a 50 °C para as misturas de cimento CP II-E-32, nas condições natural (N) e lavado em solução de cal (LSC). Para os demais tratamentos, os resultados indicaram um comportamento adequado do material, inclusive apresentando picos de temperatura mais elevados do que aqueles observados na pasta de CP II-E-32.

A Figura 4.6 apresenta as curvas de hidratação do material casca de arroz passante na peneira de malha # 30 (partículas com diâmetro variando entre 0,60 mm e 0,30 mm).

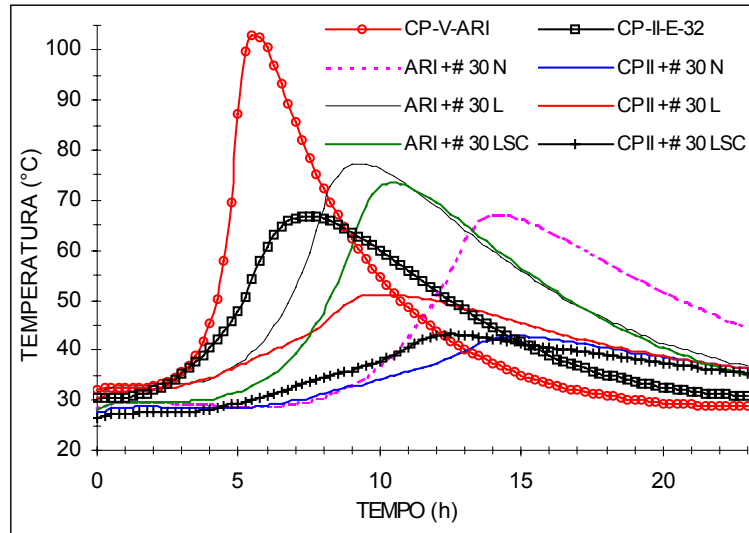


Figura 4.6: Curvas de hidratação (# 30): CP V-ARI e CP II-E-32

O comportamento dos materiais passantes na peneira de # 30 foi semelhante ao daquele apresentado pelos materiais de # 50, com uma temperatura máxima de hidratação (condição natural (N) e lavado em solução de cal (LSC) – CP II-E-32) inferior a 50 °C.

A Figura 4.7 apresenta, de forma simplificada, os efeitos da condição e da granulometria do material, sobre a temperatura máxima de hidratação.

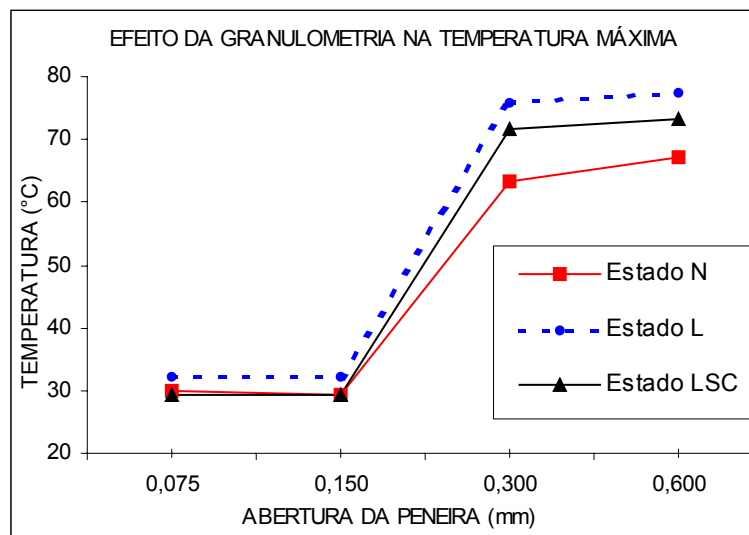


Figura 4.7: Efeitos da granulometria e condição do material, na temperatura máxima de hidratação do cimento CP V-ARI

Assim, verificou-se que o material na condição lavado (L) apresentou menor incompatibilidade química com o cimento do que os materiais na condição lavado em solução de cal (LSC) ou na condição natural (N).

O efeito do material passante na peneira # 200 mostrou-se muito semelhante ao do material passante na peneira # 100. Ou seja, aparentemente, o material passante em qualquer das peneiras citadas apresenta grau de inibição similar na pega do cimento. Tal constatação permite reduzir de forma acentuada o tempo dispendido na preparação do material fino. Do ponto de vista prático, deve-se então considerar, na avaliação da incompatibilidade química do material casca de arroz sobre o cimento, a quantidade de partículas finas (diâmetro menor que 0,42 mm) presentes.

Uma melhor avaliação do material casca de arroz, através de curvas de hidratação, foi obtida utilizando-se o mesmo material empregado na manufatura das placas de compósito, de acordo com os resultados obtidos no ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos, que serão apresentados no item 4.2.4.

Na Figura 4.8 são apresentadas as curvas de hidratação do material casca de arroz, de frações granulométricas 10 mm, 5 mm, 3 mm e uma mistura das frações granulométricas 10 mm e 5 mm, definida como (10+5) mm, na condição lavado em solução de cal (LSC), para o cimento CP V-ARI, na qual se fez emprego do acelerador de pega cloreto de cálcio (3% da massa de cimento).

As referidas curvas indicaram uma melhoria na compatibilidade do material casca de arroz com o cimento. O uso do acelerador de pega cloreto de cálcio, para a condição lavado em solução de cal (LSC), foi definido no ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos.

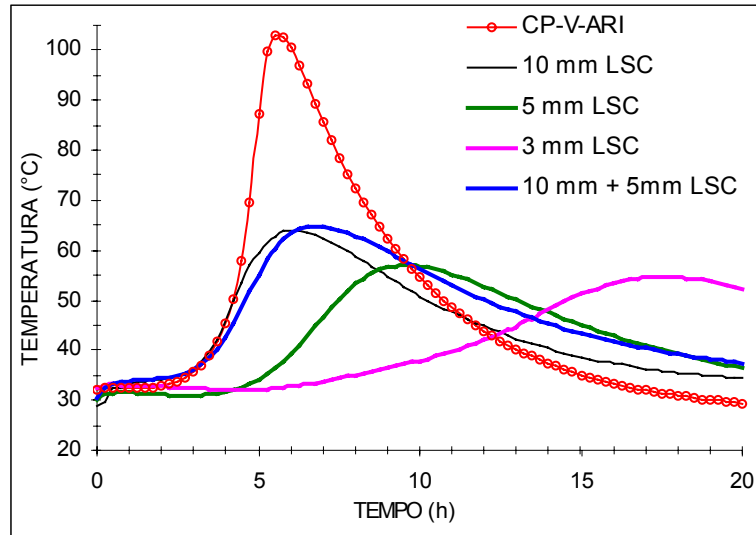


Figura 4.8: Curvas de hidratação: efeito da fração granulométrica e do traço

Nesta Figura, a curva de hidratação correspondente ao material 3 mm encontra-se bem destacada, com uma temperatura máxima de hidratação muito próxima à do material 5 mm, porém, com um tempo necessário para atingi-la, muito maior.

Verificou-se ainda que, em termos de tempo e temperatura máxima de hidratação, este foi o pior resultado, o que vem a contrariar o resultado obtido no ensaio de compressão simples.

4.2.3.3. Considerações gerais a respeito da incompatibilidade química entre a matriz de cimento e a casca de arroz:

- Temperaturas acima de 50 °C são desejáveis (SANDERMANN et al., 1960) para que haja a pega e endurecimento do cimento, isto porque as reações de hidratação são relativas à taxa de formação dos hidratados do cimento, ao passo que a resistência é relativa à estrutura efetiva dos cristais hidratados.

- MILLER & MOSLEMI (1991) avaliaram a diferença relativa na geração de calor entre pastas de cimento-aditivos e o cimento puro. Os autores afirmaram que as características de hidratação da mistura cimento-madeira não parecem ser um bom avaliador da compatibilidade química, quando se analisa a resistência à tração.
- Considerando-se apenas o tempo necessário para atingir-se o pico de temperatura (WEATHERWAX & TARKOW (1964, 1967), podem ocorrer as seguintes situações:
 - a) Tempos idênticos: duas misturas podem apresentar temperaturas distintas, não podendo ser consideradas como igualmente compatíveis;
 - b) Tempos diferentes: nem sempre uma mistura cujo pico aparece após o de outra mistura é menos compatível.
- Considerando-se apenas a temperatura máxima (VALENZUELA, 1989):
 - a) Se as temperaturas forem similares, tempos idênticos podem não significar o mesmo comportamento das misturas, pois as inclinações das curvas podem ser diferentes (MOSLEMI et al., 1983; MOSLEMI & LIM, 1984; HOFSTRAND et al., 1984);
 - b) Se as temperaturas forem similares, tempos diferentes podem indicar o efeito retardador de certas substâncias contidas na fitomassa.
- A comparação das áreas (HACHMI, 1987 “apud” HACHMI & MOSLEMI, 1989) sob as curvas de hidratação pressupõe a necessidade de um intervalo para a integração. A escolha do limite máximo do tempo para definir a curva é de fundamental importância para que o método consiga êxito. A pasta de cimento apresenta pico de temperatura entre 8 e 12 horas. Após esse tempo começa a ocorrer o abaixamento da temperatura e,

nesse caso, o isolamento térmico do calorímetro deve ser eficaz. Misturas com pico de temperatura superior a 16 h, por exemplo, terão áreas comparadas com a área da pasta de cimento, com 4 h ou mais, após o surgimento do pico de temperatura.

- Verificou-se que, quanto mais fino for o material (#100 e # 200), maior será a sua incompatibilidade química com o cimento CP V-ARI, denotado pela diminuição substancial da temperatura máxima de hidratação, combinado com um aumento significativo no tempo para alcançar o pico de temperatura. Comportamento semelhante foi observado para o cimento CP II-E-32, embora as temperaturas (em geral) tenham sido muito inferiores às obtidas quando do uso do CP V-ARI.
- Analisando-se os efeitos da granulometria das partículas e dos tratamentos efetuados sobre as mesmas, observou-se que os fatores tempo/temperatura, em relação à pasta pura de cimento CP V-ARI, tornaram-se mais importantes à medida que o tamanho das partículas se reduziu. Aparentemente, a comparação entre o tempo para a ocorrência da temperatura máxima das misturas e da pasta pura de cimento é menos adequado do que a comparação entre as temperaturas máximas atingidas.

Em resumo, todos os métodos apresentados mostram-se incapazes de prever particularidades das diferentes fitomassas empregadas, conduzindo, geralmente, a resultados totalmente antagônicos.

Como tendência no desenvolvimento de pesquisa envolvendo o estudo calorimétrico das reações de pega/endurecimento de misturas de cimento, tem sido empregado pelo Laboratoire du Génie des Procédés, da Universidade Henri Poincaré – Nancy I – França, parâmetros como o fluxo de calor (mW/g de cimento) e/ou a entalpia das reações de hidratação (J/g de cimento), o que parece ser uma melhor opção de análise.

As reações endotérmicas/exotérmicas envolvidas no processo de hidratação permitem, desta forma, estabelecer um mínimo de energia no sistema para que o processo de pega e/ou endurecimento de misturas com cimento ocorra de forma eficaz. Tal prática é de uso freqüente na indústria de chapas de madeira-cimento pelo emprego de aceleradores de pega que, segundo MOSLEMI et al. (1983), tem por função acelerar ou aumentar a reação exotérmica do cimento, aumentando a formação de estruturas cristalinas.

Esta vertente traduz melhor os efeitos da compatibilidade madeira-cimento, tendo em vista que na indústria utilizam-se relações cimento-madeira da ordem de 2:1, menores que a utilizada nas curvas de hidratação, de 13:1, bem como materiais de granulometria mais grosseira, com possível influência na condutibilidade térmica do sistema.

Na Figura 4.9 tem-se a curva de entalpia da reação de hidratação do CP V-ARI, utilizando a referida metodologia (traço de 1:0,40;0,60 - cimento:casca de arroz;água).

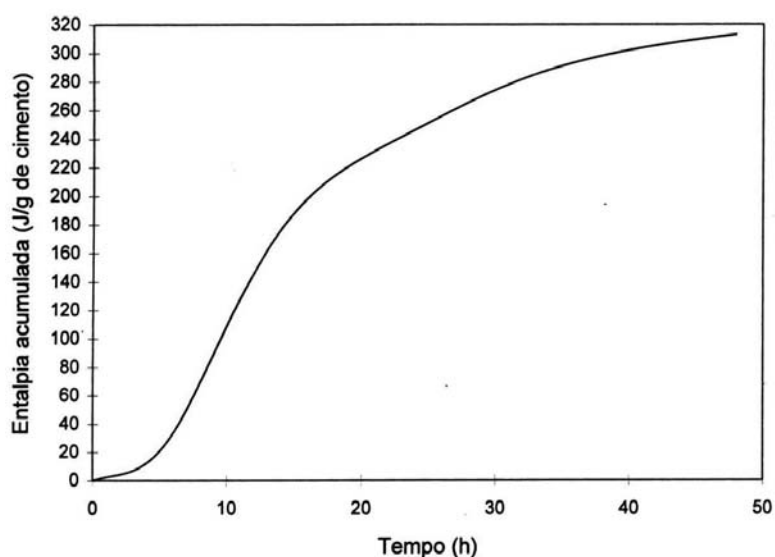


Figura 4.9: Entalpia da reação de hidratação do cimento CP V-ARI

A curva de entalpia da reação de hidratação do cimento CP V-ARI, indicada na Figura 4.10, refere-se à mistura de cimento e casca de arroz (#200) na condição natural (N).

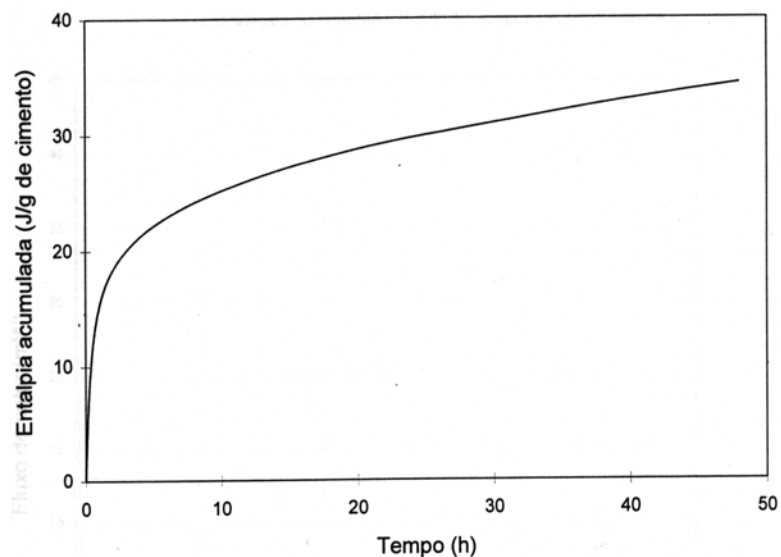


Figura 4.10: Entalpia da reação de hidratação: ARI + # 200 N

A curva de entalpia da reação de hidratação do cimento CP V-ARI, indicada na Figura 4.11, refere-se à mistura de cimento e casca de arroz (#200) na condição lavado (L).

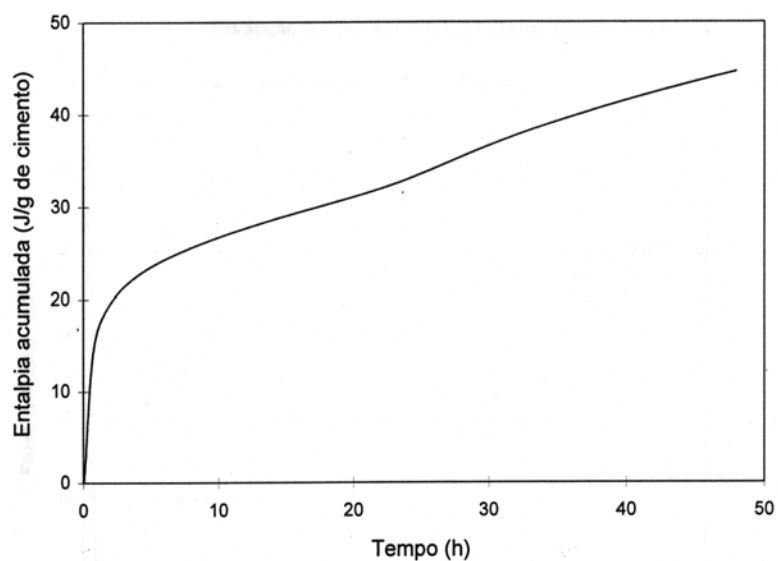


Figura 4.11: Entalpia da reação de hidratação: ARI + # 200 L

A curva de entalpia da reação de hidratação do cimento CP V-ARI, indicada na Figura 4.12, refere-se à mistura de cimento e casca de arroz (# 200) na condição lavado em solução de cal (LSC).

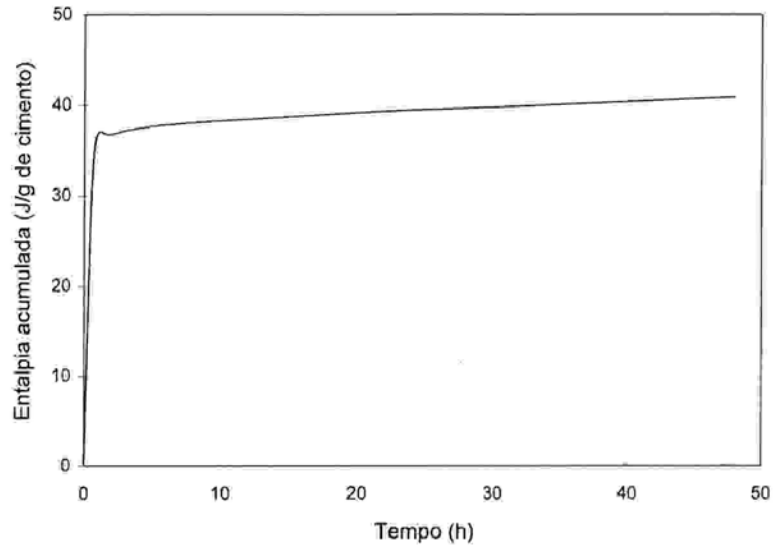


Figura 4.12: Entalpia da reação de hidratação: ARI + # 200 LSC

Pode-se observar nas figuras precedentes, analisadas pelo Prof. E. MOUGEL (ENSTIB-Epinal-France), a influência do material casca de arroz, nas diferentes condições, sobre a entalpia das reações de hidratação do cimento CP V-ARI. A entalpia acumulada de 300 J/g de cimento, após 50 h de reação, reduziu-se para menos de 1/10, pela presença da casca de arroz, quer fosse natural, lavada ou lavada em solução de cal.

4.2.4. Ensaios de compressão simples

4.2.4.1. Avaliação dos resultados do ensaio de compressão

No Quadro 4.7 são apresentados, de forma sintética, os resultados dos ensaios à compressão simples dos corpos-de-prova cilíndricos (média aritmética de três repetições), bem como uma análise estatística simplificada (SANEST).

Quadro 4.7: Resultado do ensaio de compressão simples (MPa) e análise estatística simplificada (SANEST)

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.: De cada interação de fatores, 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). A média geral foi de 3,02 MPa e o coeficiente de variação, de 12,81%

Considerações:

Dos valores apresentados no Quadro 4.7, foram destacados, em **negrito**, os casos em que os compósitos atenderam ao critério de apresentar resistência à compressão simples de, no mínimo, 2,0 MPa.

Os valores destacados para o material na condição lavado em solução de cal (LSC), foram, geralmente, superiores aos demais, considerando-se a faixa granulométrica específica, associada ao tipo de cimento utilizado.

A análise estatística dos resultados, ao nível de 5% de probabilidade, evidenciou que, para a maioria dos casos, não ocorreu diferença significativa entre as resistências à compressão simples das frações granulométricas 5 mm e 3 mm para a condição lavado em solução de cal (LSC), independentemente do tipo de cimento empregado.

Para os materiais nas condições natural (N) e lavado (L), só ocorreram diferenças significativas entre as duas frações granulométricas quando se fez emprego do acelerador de pega cloreto de cálcio ou da mineralização das partículas, para o cimento CP V-ARI.

No caso do material na condição natural (N), empregando-se o cimento CP II-E-32, houve diferença significativa somente quando se fez uso do sulfato de alumínio – $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$. Nos demais tratamentos e condições, não se encontrou diferença significativa entre as frações granulométricas 5 mm e 3 mm.

Avaliando-se a condição do material, verificou-se que os melhores resultados de resistência em compressão simples foram obtidos com o material na condição lavado em solução de cal (LSC), exceto quando se fez uso do tratamento mineralização combinado com o cimento CP V-ARI, onde o material na condição natural (N) apresentou melhores resultados, sendo ambos, porém, estatisticamente iguais o nível de 5% de probabilidade.

Na avaliação dos efeitos dos tratamentos, verificou-se que a mineralização apresentou os melhores resultados de resistência à compressão, nas condições natural (N) e lavado (L), não havendo, porém, diferença significativa do tratamento com acelerador de pega cloreto de cálcio, quando se fez uso do cimento CP V-ARI.

Para o material na condição lavado em solução de cal (LSC), os melhores resultados de resistência à compressão simples foram obtidos com o tratamento acelerador de pega cloreto de cálcio – CaCl_2 .

No caso do uso do cimento CP II-E-32, o tratamento lavado em solução de cal (LSC) não apresentou diferença significativa em relação ao tratamento mineralização.

As frações granulométricas 5 mm e 3 mm apresentaram valores de resistência à compressão simples, com diferença significativa quando se utilizou o cimento CP V-ARI,

para os tratamentos mineralização e acelerador de pega cloreto de cálcio (exceto na condição LSC). Para os demais tratamentos não se encontrou diferença significativa.

No caso do uso do cimento CP II-E-32, somente no tratamento acelerador de pega sulfato de alumínio, para os materiais nas condições natural (N) e lavado em solução de cal (LSC), foi que houve diferença significativa entre os valores de resistência à compressão simples, ao nível de 5% de probabilidade.

Os compósitos obtidos com o material casca de arroz na condição lavado em solução de cal (LSC) foram os únicos a atender o requisito de resistência mínima de 2,0 MPa utilizado como referência, independentemente do tipo de cimento empregado e da fração granulométrica, exceto para o material onde combinou-se a fração granulométrica 10 mm com o cimento CP II-E-32.

4.2.4.2. Tipos de fissura observados nos corpos-de-prova cilíndricos

Por ocasião do ensaio de compressão simples, realizado com velocidade de carregamento constante de 0,3 MPa/s, em corpos-de-prova (Cp) cilíndricos, foram observados quatro tipos de ruptura (Figura 4.13).

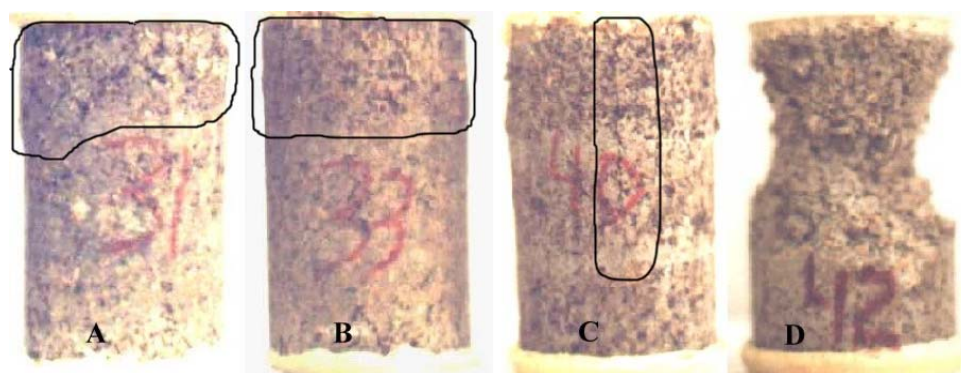


Figura 4.13: Padrões de ruptura encontrados no ensaio de compressão

A ruptura do tipo **(A)** foi identificada como sendo um tipo de esmagamento acompanhado de fendilhamento (crushing and splitting), no plano axial; (Cp 31 = condição Natural, fração granulométrica 3 mm, cimento CP V-ARI, acelerador de pega cloreto de cálcio; 18,65% de umidade, no ensaio; Resistência à compressão simples = 6,62 MPa).

A ruptura do tipo **(B)**, foi identificada como sendo um tipo de esmagamento (crushing), com deformação perceptível na direção transversal ao carregamento (estufamento); (Cp 33 = condição Natural, fração granulométrica 3 mm, cimento CP V-ARI, acelerador de pega cloreto de cálcio; 21,92% de umidade, no ensaio; Resistência à compressão simples = 6,67 MPa).

A ruptura do tipo **(C)**, foi identificada como sendo um tipo de fendilhamento (splitting) que pode denotar um material apresentando defeitos internos, provavelmente decorrentes da incompatibilidade química entre a biomassa vegetal e o cimento; (Cp 40 = condição Natural, fração granulométrica 3 mm, cimento CP V-ARI, acelerador de pega sulfato de alumínio; 19,83% de umidade, no ensaio; Resistência à compressão simples = 5,53 MPa).

A ruptura do tipo **(D)** foi provocada pelo cisalhamento em forma de cunha (wedge shearing); (Cp 42 = condição Natural, fração granulométrica 3 mm, cimento CP V-ARI, acelerador de pega sulfato de alumínio; 20,23% de umidade, no ensaio; Resistência à compressão simples = 5,40 MPa).

4.3. Resultados relativos às placas

4.3.1. Definição de parâmetros: tipo de cimento, tratamento, condição do material, fração granulométrica e traços empregados na produção das placas

Com base nos resultados do ensaio de compressão simples dos corpos-de-prova cilíndricos, foram definidos os seguintes parâmetros:

- a) Tipo de cimento: **CP V-ARI**;
- b) Tratamento: uso do **acelerador de pega cloreto de cálcio – CaCl_2 (3%)**
- c) Condição do material: **lavado em solução de cal – LSC**;
- d) Fração granulométrica: **10 mm, 5 mm e, (10+5) mm** (composta por 65% de 10 mm e 35% de 5 mm, visto que não foi observada diferença entre as frações granulométricas 3 mm e 5mm).

4.3.2. Quantidade de materiais

A quantidade de materiais foi determinada experimentalmente, tendo-se para isto, fixado a quantidade de casca de arroz, que é o elemento crítico na dosagem pelo fato de apresentar maior variação volumétrica. Os demais componentes foram obtidos de acordo com o traço empregado para cada fração granulométrica, na confecção de corpos-de-prova cilíndricos.

No Quadro 4.8 encontra-se a quantidade de materiais utilizados na confecção das placas, para uma espessura estimada em 15 mm.

Quadro 4.8: Quantidade de material, por placa, em gramas

Material	10 mm	5 mm	(10 + 5) mm
Cimento	4000	3307	3590
Casca de arroz	1400	1400	900 + 500
Água	2000	1654	1795
CaCl ₂	120,00	99,21	107,70

Considerações:

No cálculo da quantidade de cimento para as frações granulométricas 10 mm e 5 mm, optou-se por utilizar o valor do traço, sem arredondamento, o que resultou em traços de 1:0,35 e de 1:0,42, respectivamente, o que elevou o consumo de cimento. No caso da mistura das duas frações granulométricas, fez-se a média aritmética dos mesmos, adotando-se o valor de traço de 1:0,39, com o objetivo claro de se reduzir o consumo de cimento, prevendo-se uma eventual melhoria na resistência em função de uma melhor distribuição granulométrica, não apresentada pelas frações granulométricas 10 mm e 5 mm, de forma isolada.

4.3.3. Avaliação das características das placas

4.3.3.1. Ensaio de flexão estática

4.3.3.1.1. Avaliação dos resultados do ensaio de flexão estática

No Quadro 4.9 são apresentados os resultados do ensaio de flexão estática das placas de compósito à base de casca de arroz, de frações granulométricas 10 mm, 5 mm e (10+5) mm. As posições **1** e **2** correspondem, respectivamente, às posições internas (**1**) ou

externas (2) de uma placa, tendo sido apresentadas anteriormente nas Figuras 3.7 e 3.8, para os materiais nas condições seco e carbonatado. No caso do material úmido, correspondente às peças 3 (interna) e 4 (externa).

Quadro 4.9: Resultado do ensaio de flexão estática (MPa) e análise estatística simplificada (SANEST)

	SECO	ÚMIDO	CARBONATADO
Posição 1	$10 = (10+5) = 5$	$10 = (10+5) \neq 5$	$(10+5) \neq 10 \neq 5$
	$5,80 = 5,05 = 4,59$	$4,14 = 3,86 \neq 2,30$	$6,51 \neq 4,92 \neq 3,26$
Posição 2	$10 = (10+5) = 5$	$10 = (10+5) \neq 5$	$(10+5) = 10 \neq 5$
	$5,72 = 5,12 = 4,75$	$3,83 = 3,65 \neq 2,09$	$5,99 = 5,17 \neq 3,85$

OBS.: De cada interação de fatores, são indicados (ordem decrescente) o resultado da análise estatística para as diferentes frações granulométricas (primeira linha), bem como os valores médios obtidos (segunda linha, média de três repetições). Média Geral = 4,47 MPa; Coeficiente de Variação = 18,14%; Diferença Mínima Significativa = 0,85 MPa.

Considerações:

Analisando-se as médias da variável resistência à compressão simples, utilizando o programa SANEST, verificou-se que, para um nível de 5% de probabilidade:

- Não** houve diferença significativa entre os corpos-de-prova retirados das placas nas posições 1 (interna) e 2 (externa), exceto para as placas confeccionadas com material de fração granulométrica 5 mm, na condição carbonatado, onde os corpos-de-prova da posição 2 apresentaram melhores resultados;
- Não** houve diferença significativa entre os materiais das diferentes frações granulométricas empregadas, quando ensaiados na condição seco;
- Não** houve diferença significativa entre os materiais de frações granulométricas 10 mm e (10+5) mm, quando ensaiados na condição úmido. Os materiais de fração granulométrica 5 mm foram inferior e estatisticamente diferente dos demais;

- d) Os materiais das diferentes frações granulométricas, ensaiados na condição carbonatado, foram significativamente diferentes entre si, sendo o material de fração granulométrica (10+5) mm superior aos demais;
- e) **Não** se verificou a existência de diferença significativa entre os materiais ensaiados nas condições seco e carbonatado, sendo ambos superiores e diferentes dos corpos-de-prova ensaiados na condição úmido;
- f) Dentro do material de fração granulométrica 10 mm, **não** se verificou a existência de diferença significativa entre os estados seco e carbonatado, sendo ambos superiores e diferentes estatisticamente do estado úmido;
- g) Dentro do material de fração granulométrica 5 mm, verificou-se a existência de diferença significativa entre as diferentes condições, sendo a condição seco superior aos demais;
- h) Dentro do material de fração granulométrica (10+5) mm, verificou-se a existência de diferença significativa entre as diferentes condições.

4.3.3.1.2. Avaliação dos resultados de massa específica aparente das placas

No Quadro 4.10 são apresentados os resultados da análise estatística (SANEST) da variável massa específica aparente das placas utilizadas no ensaio de flexão estática.

Quadro 4.10: Resultado da análise estatística da variável massa específica aparente (g/cm^3) e análise estatística simplificada (SANEST)

	SECO	ÚMIDO	CARBONATADO
Posição 1	$10 \neq (10+5) = 5$	$10 = (10+5) \neq 5$	$(10+5) \neq 10 = 5$
	$1,45 \neq 1,37 = 1,31$	$1,59 = 1,56 \neq 1,41$	$1,46 \neq 1,36 = 1,30$
Posição 2	$10 = (10+5) \neq 5$	$10 = (10+5) \neq 5$	$(10+5) \neq 10 \neq 5$
	$1,46 = 1,40 \neq 1,32$	$1,57 = 1,53 \neq 1,41$	$1,48 \neq 1,37 \neq 1,28$

OBS.: De cada interação de fatores, são indicados (ordem decrescente) o resultado da análise estatística para as diferentes frações granulométricas (primeira linha), bem como os valores médios obtidos (segunda linha, média de três repetições). Média Geral = 1,42 MPa; Coeficiente de Variação = 4,2%; Diferença Mínima Significativa = 0,06 MPa.

Considerações:

Analisando-se as médias da variável massa específica aparente (g/cm^3), utilizando o programa SANEST, verificou-se que, para um nível de 5% de probabilidade:

- Não** houve diferença significativa entre os corpos-de-prova extraídos das posições **1** (interna) e **2** (externa);
- Verificou-se, para o material na condição seco, a existência de diferença significativa entre os materiais de frações granulométricas 10 mm e (10+5) mm. Já, entre os materiais de fração granulométrica (10+5) mm e 5 mm, **não** se verificou a existência de diferença significativa;
- Não** houve diferença significativa entre materiais de frações granulométricas 10 mm e (10+5) mm, na condição úmido. O material de fração granulométrica 5 mm apresentou massa específica aparente inferior e estatisticamente diferente dos demais;
- Os materiais das diferentes frações granulométricas, na condição carbonatado, foram significativamente diferentes entre si, sendo o material de fração granulométrica (10+5) mm superior aos demais;

- e) Verificou-se a existência de diferença significativa entre o material na condição úmido e os demais estados. Entre os materiais nas condições seco e carbonatado, não se verificou diferença significativa;
- f) Dentro do material de fração granulométrica 10 mm, verificou-se a existência de diferença significativa entre as diferentes condições, sendo o material no estado carbonatado o de menor massa específica aparente;
- g) Dentro do material de fração granulométrica 5 mm, verificou-se a existência de diferença significativa entre a condição úmido e as demais condições. Entre os materiais nas condições seco e carbonatado, não se verificou diferença significativa;
- h) Dentro dos materiais de fração granulométrica (10+5) mm, verificou-se a existência de diferença significativa entre as diferentes condições.

4.3.3.1.3. Considerações gerais, envolvendo as variáveis resistência à compressão e massa específica aparente

Avaliando-se os resultados das variáveis resistência à compressão simples e massa específica aparente, indicados pelo programa SANEST, verificou-se que:

- (a) As placas são uniformes, em termos de posição de amostragem, tendo em vista que **não** se verificou diferença significativa em relação à posição;
- (b) O material na condição úmido é significativamente diferente das demais condições. Os materiais na condição seco e carbonatado não são estatisticamente diferentes;
- (c) Os materiais de frações granulométricas 10 mm e (10+5) mm não são estatisticamente diferentes;

- (d) O material de fração granulométrica 5 mm é inferior e estatisticamente diferente dos demais materiais, apresentando, contudo, melhor acabamento superficial;
- (e) A carbonatação, interpretada como uma técnica de envelhecimento precoce (idade mais avançada do material), permite evidenciar a existência de diferença significativa entre as frações granulométricas (10+5) mm e 10 mm, sendo o material de fração granulométrica (10+5) mm superior ao de 10 mm.

4.3.3.1.4. Comportamento das placas no ensaio de flexão

Para avaliar o comportamento do material compósito utilizou-se, como elemento de comparação, materiais de aplicação já tradicionais junto ao mercado consumidor. Entre os materiais disponíveis no mercado, optou-se por aqueles disponíveis na carpintaria da UNICAMP, principalmente pela facilidade na obtenção de peças de pequenas dimensões (corpos-de-prova), normalmente de descarte. Entre os materiais disponíveis, optou-se pelo uso de aglomerados e compensado. A distinção entre os diferentes tipos de aglomerado baseou-se na estrutura interna do material (partículas uniformes ou em camadas distintas – o material das faces contrasta com o material do miolo) e na presença ou ausência de revestimento melamínico).

No caso do compensado, utilizou-se apenas um tipo que apresentou, como características perceptíveis, a boa qualidade do acabamento externo (lixado) e sua constituição (sete lâminas de madeira, sendo cinco estruturais e duas de acabamento).

Um produto denominado comercialmente por MDF (Medium Density Fiberboard), também foi testado. Este material apresentou, como característica principal, a

homogeneidade (não permitem a distinção das fibras), além de um excelente acabamento estético.

No Quadro 4.11, apresenta-se o resultado dos ensaios à flexão estática para os diferentes materiais testados.

Quadro 4.11: Resultado dos ensaios de flexão estática (MPa)

Placa	Estado	MOE	T _{LP}	T _R
10 mm	Seco	2946	2.74	5.37
	Úmido	2701	1.86	3.88
	CO ₂	3142	2.51	5.01
5 mm	Seco	2477	3.17	4.46
	Úmido	1556	1.28	2.10
	CO ₂	2504	1.84	3.26
(10+5) mm	Seco	2484	3.14	4.77
	Úmido	2522	1.78	3.66
	CO ₂	3953	3.15	6.36
Agl. U. s/rev.	Seco	2047	6.25	9.78
	Úmido	1435	3.53	6.83
Agl. M. c/rev.	Seco	4159	12.19	16.02
	Úmido	3533	6.49	10.20
Agl. U. c/rev.	Seco	3420	9.30	10.89
	Úmido	1986	4.21	8.07
Comp. Lam.	Seco	12756	19.82	37.50
	Úmido	11829	19.39	35.04
MDF	Seco	2357	15.42	27.43
	Úmido	362	2.81	3.95

OBS.: MOE = módulo de elasticidade; T_{LP} = tensão no limite de proporcionalidade; T_R = tensão na ruptura; **Agl. U. s/rev.** = aglomerado uniforme sem revestimento; **Agl. U. c/rev.** = aglomerado uniforme com revestimento; **Agl. M. c/rev.** = aglomerado misto com revestimento; **Comp. Lam.** = compensado laminado.

Os valores apresentados indicam que o material compósito apresenta uma baixa resistência à flexão, principalmente na condição úmida (após 48 horas de imersão).

A aplicação do material compósito fica, desta forma, restrita a ambientes protegidos da umidade, sendo sua melhor aplicação em condições secas.

O material compósito pode ser considerado como adequado se na pior condição (úmida), atender às exigências práticas. Traz como principal vantagem, no entanto, a manutenção de sua estrutura que, apesar da perda de resistência, não sofre desagregação com facilidade, a exemplo do que ocorre com os aglomerados (fragmentação) e compensados (descolamento das lâminas).

Na Figura 4.14 é apresentado o gráfico carga x deformação, para o material confeccionado com casca de arroz na fração granulométrica 10 mm, na condição seco.

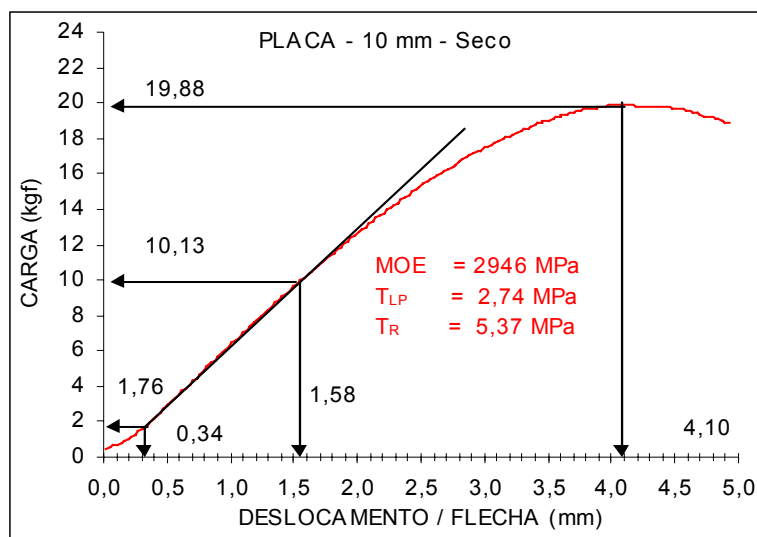


Figura 4.14: Gráfico carga x deformação: 10 mm, seco

O mesmo material, após um período de saturação (24 horas de imersão), apresentou uma redução de cerca de 25% na resistência à flexão (Figura 4.15).

Observou-se que os materiais compósitos apresentaram uma deformação gradual, caracterizando, desta forma, a ductilidade do material. O mesmo comportamento foi observado em alguns dos materiais utilizados como comparação.

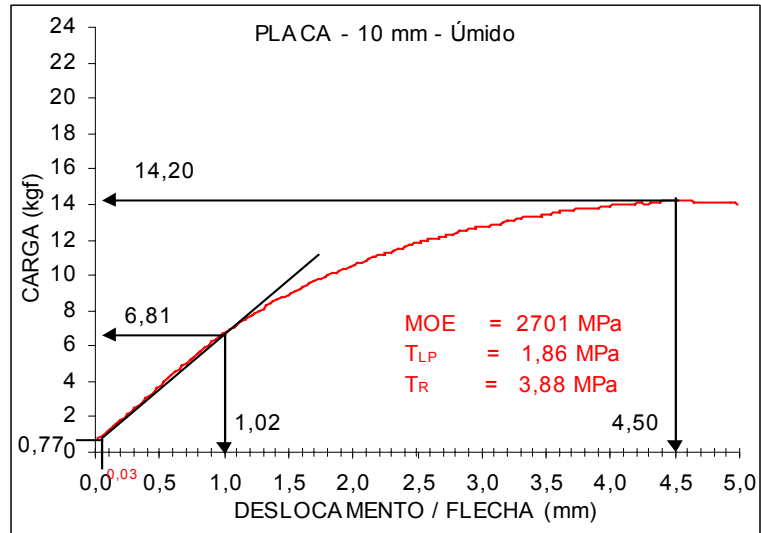


Figura 4.15: Gráfico carga x deformação: 10 mm, úmido

Na Figura 4.16 é apresentado o gráfico do material aglomerado com revestimento (melamínico). A deformação permanente até a ruptura foi de cerca de 1,9 mm ($T_R \neq T_{LP}$).

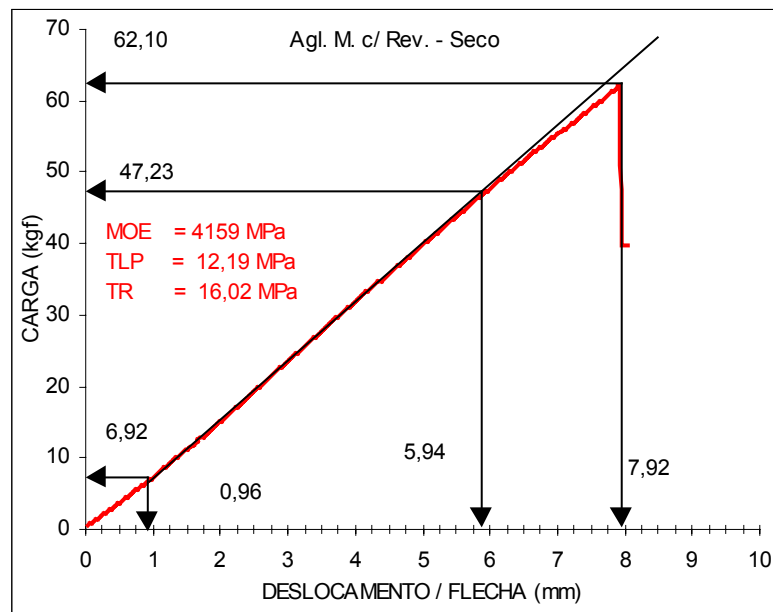


Figura 4.16: Gráfico carga x deformação: aglomerado misto com revestimento, seco

Na Figura 4.17 é apresentado o gráfico do material aglomerado sem revestimento.

A ruptura, brusca, ocorreu após uma deformação de cerca de 4 mm ($T_R - T_{LP}$).

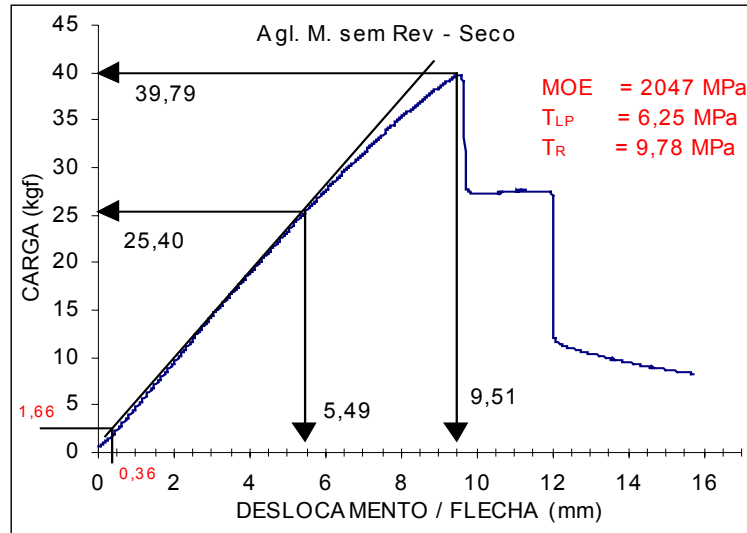


Figura 4.17: Gráfico carga x deformação: aglomerado misto sem revestimento, seco

A deformação à qual se fez referência está associada ao diferencial entre a tensão na ruptura (T_R) e a tensão no limite de proporcionalidade (T_{LP}), que corresponde à região da curva onde os materiais apresentam deformações permanentes.

Assim, pôde-se verificar que a presença de revestimento impõe um comportamento diferenciado proporcionando, ao material, menor deformação no trecho referenciado (50%, em relação ao material sem revestimento).

4.3.3.1.5. Tipos de Fissura

Na Figura 4.18 pode-se observar uma ruptura típica para o material compósito elaborado com material de granulometria 10 mm, na condição seco.

A ruptura atingiu uma extensão máxima de 15 mm, no sentido do comprimento da peça (seção longitudinal).



Figura 4.18: Fissura em compósito à base de casca de arroz, ensaiado à flexão

A observação do ângulo de inclinação da linha de ruptura, no plano da espessura (Figura 4.19), indicou a ocorrência de colapso por cisalhamento.

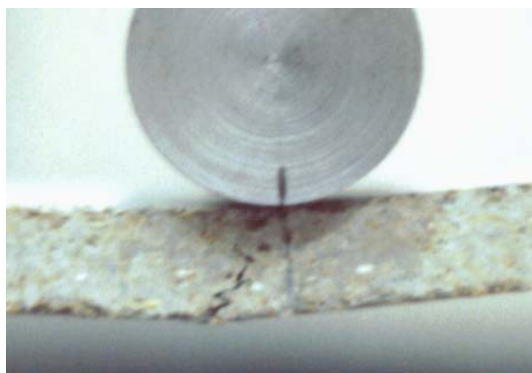


Figura 4.19: Ângulo de inclinação da fissura em compósito ensaiado à flexão

Na Figura 4.20 pode-se observar uma ruptura típica do material aglomerado **com** e **sem** revestimento. A ruptura do material com revestimento está concentrada em uma única região, ao passo que a do material sem revestimento assemelha-se à ruptura do compósito.



Figura 4.20: Fissura em aglomerados com e sem revestimento, ensaiados à flexão

O ângulo de inclinação da linha de ruptura, no plano da espessura (Figura 4.21), indicou a ocorrência de colapso por cisalhamento, a exemplo do que ocorreu nos compósitos.

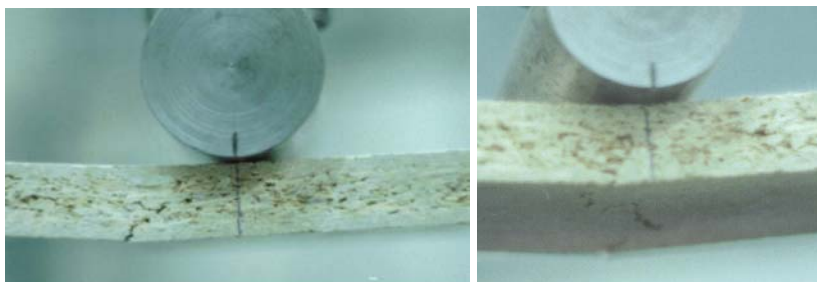


Figura 4.21: Ângulo de inclinação da fissura em aglomerados com e sem revestimento, ensaiados à flexão

4.3.3.2. Ensaio de compressão paralela à superfície

4.3.3.2.1. Avaliação dos resultados

No Quadro 4.12 são apresentadas as médias dos resultados, para um nível de 5% de probabilidade, dos ensaios de compressão paralela à superfície (**CPS**, em MPa), da massa específica aparente (**mea**, em g/cm³) e da velocidade de propagação da onda ultrasonora (**Vel. ultrasom**, em m/s), dos corpos-de-prova extraídos de placas confeccionadas com material nas frações granulométricas de 10 mm, 5 mm e (10+5) mm.

Quadro 4.12: Resultado do ensaio de compressão paralela à superfície (MPa), massa específica aparente, velocidade de propagação do ultrassom e análise estatística simplificada (SANEST)

	CPS (MPa) ⁽¹⁾	mea (g/cm ³) ⁽²⁾	Vel. ultrassom (m/s) ⁽³⁾
SECO	10 = (10+5) = 5	10 ≠ (10+5) ≠ 5	[10 = (10+5)] ≠ 5
	8,70 = 8,50 = 8,12	1,44 ≠ 1,39 ≠ 1,34	[2347 = 2276] ≠ 2106
ÚMIDO	10 = (10+5) = 5	10 ≠ (10+5) ≠ 5	[(10+5) = 10] ≠ 5
	7,61 = 7,37 = 6,87	1,60 ≠ 1,55 ≠ 1,50	[2608 = 2605] ≠ 2447
CARBONATADO	[(10+5) = 10] ≠ 5	[10 = (10+5)] ≠ 5	[10 = (10+5)] ≠ 5
	[9,21 = 8,99] ≠ 7,38	[1,43 = 1,41] ≠ 1,33	[2307 = 2295] ≠ 2134

OBS.: (1) Média = 8,08 MPa Coeficiente de Variação = 13,15% D.M.S. (5%) = 1,08 MPa
(2) Média = 1,44 g/cm³ Coeficiente de Variação = 2,75% D.M.S. (5%) = 0,04 g/cm³
(3) Média = 2347 m/s Coeficiente de Variação = 3,03% D.M.S. (5%) = 72 m/s

Considerações:

1 – Em relação a resistência à compressão paralela à superfície:

- Em geral, **não** se verificou a existência de diferença significativa entre as médias dos corpos-de-prova confeccionados com materiais de diferentes frações granulométricas;
- Em geral, **não** se verificou a existência de diferença significativa entre as médias dos materiais nas condições carbonatado e seco, sendo estas superiores e significativamente diferentes da médias dos materiais na condição úmido;
- Dentro dos materiais de fração granulométrica 10 mm, 5 mm e (10+5) mm, **não** se verificou a existência de diferença significativa entre as médias dos materiais nas condições carbonatado e seco, sendo estas superiores e significativamente diferentes da média dos materiais na condição úmido, exceto no caso do material de fração granulométrica 5 mm, onde as médias dos materiais nas condições carbonatado e úmido não apresentaram diferença significativa.

2 – Em relação à massa específica aparente:

- a) Em geral, **não** se verificou a existência de diferença significativa entre as médias dos materiais de fração granulométrica 10 mm e (10+5) mm, sendo ambas superiores e significativamente diferentes da média dos materiais de fração granulométrica 5 mm;
- b) Em geral, **não** se verificou diferença significativa entre as médias dos materiais nas condições carbonatado e seco, sendo estas inferiores e significativamente diferentes da média dos materiais na condição úmido;
- c) Dentro dos materiais de fração granulométrica 10 mm, 5 mm e (10+5) mm, **não** se verificou a existência de diferença significativa entre as médias dos materiais nas condições seco e carbonatado, sendo estas inferiores e significativamente diferentes da média dos materiais na condição úmido.

3 – Em relação à velocidade de propagação da onda ultrasonora:

- a) Em geral, **não** se verificou a existência de diferença significativa entre as médias das velocidades de propagação da onda ultrasonora nos materiais de fração granulométrica 10 mm e (10+5) mm, sendo estas superiores e significativamente diferentes da média de velocidade de propagação da onda ultrasonora nos materiais de fração granulométrica 5 mm;
- b) Em geral, **não** se verificou a existência de diferença significativa entre as médias de velocidade de propagação da onda ultrasonora nos materiais nas condições carbonatado e seco, sendo estas inferiores e significativamente diferentes da média da velocidade de propagação da onda ultrasonora nos materiais na condição úmido;
- c) Dentro dos materiais de fração granulométrica 10 mm, 5 mm e (10+5) mm, **não** se verificou a existência de diferença significativa entre as médias de velocidade de propagação da onda ultrasonora nos materiais nas condições carbonatado e seco, sendo

estas inferiores e significativamente diferentes da média da velocidade de propagação da onda ultrasonora nos materiais na condição úmido.

4.3.3.2.2. Comportamento dos corpos-de-prova no ensaio à compressão paralela à superfície

Na avaliação do comportamento do material compósito, utilizou-se, como elementos de comparação, materiais semelhantes aos empregados nos ensaios à flexão estática, ou seja, aglomerados, compensado laminado e MDF. No Quadro 4.13 são apresentados os resultados dos ensaios de compressão paralela à superfície e de velocidade de propagação da onda ultrasonora, para os diferentes materiais testados.

Quadro 4.13: Resultado dos ensaios de compressão paralela à superfície (CPS) e a velocidade de propagação da onda ultrasonora.

Placa	Estado	CPS (MPa)	Vel. ultrasom (m/s)
10 mm	Seco	8.70	2347
	Úmido	7.61	2605
	CO ₂	8.99	2307
5 mm	Seco	8.12	2106
	Úmido	6.87	2447
	CO ₂	7.38	2134
(10+5) mm	Seco	8.50	2276
	Úmido	7.37	2608
	CO ₂	9.21	2295
Agl. M. s/rev.	Seco	8.91	2813
	Úmido	0.63	1228
Agl. M. c/rev.	Seco	13.96	2787
	Úmido	6.10	3934
Agl. U. c/rev.	Seco	7.09	2248
	Úmido	1.41	1722
Comp. Lam.	Seco	19.89	4722
	Úmido	6.10	3934
MDF	Seco	13.23	2632
	Úmido	2.42	1369

OBS.: Seco = material ensaiado no teor de umidade estabilizado ao ar; Úmido = material ensaiado saturado; CO₂ = material ensaiado após a carbonatação.

Os valores apresentados indicaram que o material compósito apresentou, como característica principal, uma reduzida perda na resistência à compressão, quando submetido ao efeito da umidade (saturação).

Em relação à velocidade de propagação da onda ultrasonora, verificou-se que os valores foram dispersos, não apresentando um comportamento uniforme que permitisse uma avaliação mais precisa do material compósito. Os materiais aglomerados e compensado apresentaram uma velocidade de propagação da onda ultrasonora maior na condição seco que na condição úmido, exceção feita ao material aglomerado misto com revestimento. Nos compósitos, o que se verificou foi o oposto, ou seja, uma velocidade de propagação da onda ultrasonora maior na condição úmido do que na condição seco.

4.3.3.2.3. Tipos de fissura

As fissuras observadas, após a aplicação do ensaio de compressão nos corpos-de-prova, podem ser classificadas genericamente em grupos. Na Figura 4.22 pode-se observar os principais tipos encontrados nos ensaios de compressão paralela à superfície tanto para compósitos como para compensados, aglomerados e MDF.

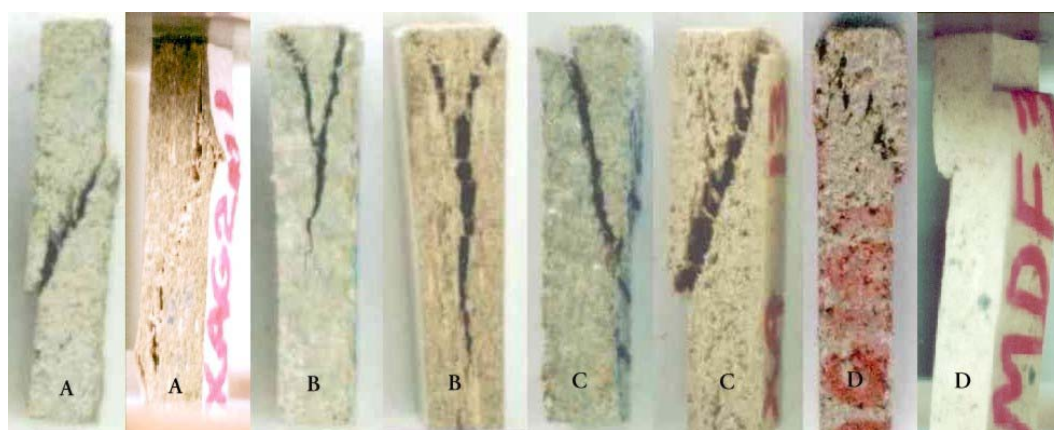


Figura 4.22: Padrões de ruptura encontrados no ensaio de compressão

A ruptura do tipo (A), identificada como o cisalhamento (shear) na sua forma mais característica, está associada a um plano de menor resistência onde a tensão máxima ocorre a aproximadamente 45° em relação ao eixo axial. A ruptura do tipo (B) é provocada por um tipo de cisalhamento, em forma de cunha (wedge shearing). A ruptura do tipo (C) é um tipo de cisalhamento (shear) que pode identificar um material como heterogêneo, ou ainda, identificar irregularidades na superfície de contato dos corpos-de-prova com o equipamento utilizado no ensaio, o que neste caso, poderia ser minimizado através do capeamento. Estas falhas muitas vezes não são perceptíveis dada a característica heterogênea dos compósitos produzidos.

A ruptura do tipo (D) é uma combinação de esmagamento e cisalhamento (crushing and shearing), induzidos por altos teores de umidade.

4.3.3.2.4. Correlação entre os parâmetros de avaliação

4.3.3.2.4.1. Entre a massa específica aparente e a velocidade de propagação da onda ultrasonora

Através dos valores dos coeficientes de determinação (R^2) obtém-se a correlação entre as variáveis. Verificou-se que, entre as variáveis massa específica aparente (**mea**) e velocidade de propagação da onda ultrasonora (**Vel. ultrasom**), o coeficiente de determinação médio foi superior a 83%, (média das correlações em função da condição e da fração granulométrica do material utilizado na fabricação das placas).

Na Figura 4.23 são indicados os coeficientes de determinação (R^2) entre as variáveis massa específica aparente e velocidade de propagação da onda ultrasonora.

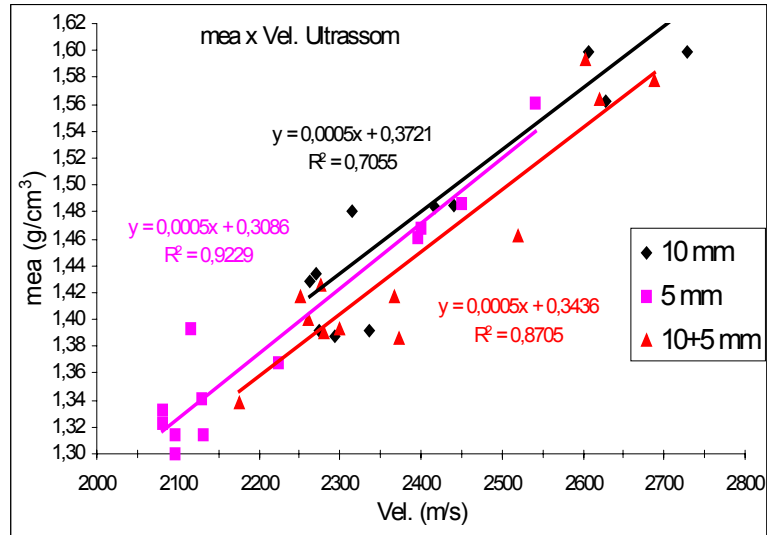


Figura 4.23: Correlação entre os parâmetros mea e Vel. Ultrassom

4.3.3.2.4.2. Entre a resistência à compressão paralela à superfície e a velocidade de propagação da onda ultrasonora

Na Figura 4.24 são indicados os coeficientes de determinação (R^2) entre as variáveis resistência à compressão paralela à superfície e velocidade de propagação da onda ultrasonora.

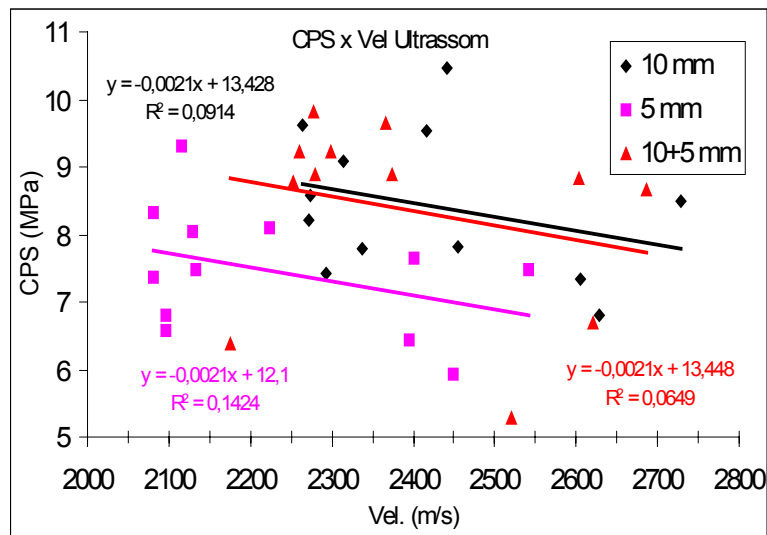


Figura 4.24: Correlação entre os parâmetros CPS e Vel. ultrasom

Avaliando-se os coeficientes de determinação (R^2), foi possível verificar que, para este material, a técnica do ultrassom, como um ensaio não destrutivo, não apresentou resultados satisfatórios que permitissem sua utilização na avaliação das características do material. A causa da dispersão dos valores não ficou evidente, sendo apenas possível verificar que, em termos de comportamento, os resultados para as diferentes granulometrias são semelhantes.

Deve-se contudo observar que, enquanto a resistência à compressão está associada à estrutura cristalina formada, a velocidade de propagação da onda ultrasonora está associada com a disposição desta estrutura (homogeneidade, compacidade, entre outros fatores), que lhe permitiriam a melhor forma de propagação.

Como os materiais biológicos podem apresentar, dentre outras propriedades, a de isolamento acústico, sua possível interferência na propagação da onda ultrasonora, em função da aleatoriedade da disposição das partículas, poderia explicar a dispersão dos valores encontrados. Nesta linha de raciocínio, surge a possibilidade de se estudar o ultrassom como um instrumento de avaliação das propriedades de isolamento acústico.

Todas as possibilidades consideradas somente poderão ser verificadas através de ensaios específicos, que fogem ao âmbito desta pesquisa.

4.3.3.2.4.3. Entre a resistência à compressão paralela à superfície e a massa específica aparente

Na Figura 4.25 são indicados, para cada fração granulométrica, a equação da reta com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2), indicadores da correlação (R) entre as variáveis resistência à compressão e massa específica aparente.

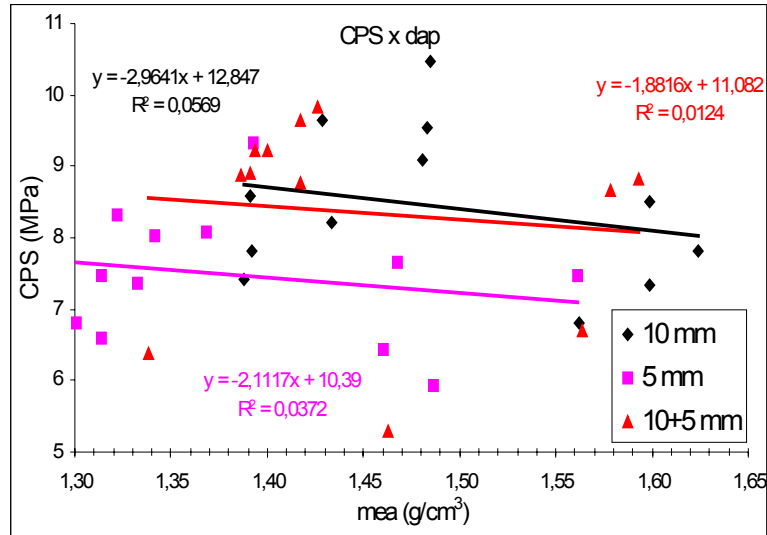


Figura 4.25: Correlação entre os parâmetros **CPS** e **mea**

Assim como na avaliação da correlação entre resistência à compressão paralela à superfície e velocidade de propagação da onda ultrasonora, neste caso a causa da dispersão dos valores não ficou evidente, sendo apenas possível constatar, em termos de comportamento, a semelhança nos resultados.

4.3.3.3. Considerações gerais sobre a massa específica aparente dos materiais utilizados nos ensaios de flexão estática e de compressão paralela

Utilizando o programa SANEST, verificou-se que, em relação à variável massa específica aparente (mea), os materiais ensaiados à flexão estática não diferiram significativamente dos materiais utilizados no ensaio de compressão paralela à superfície, para um nível de 5% de probabilidade. Dentre as granulometrias estudadas, verificou-se que os materiais obtidos com o emprego da fração granulométrica 5 mm apresentaram os **menores** resultados, aliados a um comportamento heterogêneo, apresentando, como vantagem, uma baixa densidade.

4.3.3.4. Ensaio de absorção de água e variação dimensional

No Quadro 4.14 são apresentados os resultados do ensaio de absorção de água, expressos em percentuais de massa e volume.

Quadro 4.14: Percentuais relativos de absorção de água (24 h de imersão)

	% em volume	% em massa
10 mm	1,45	10,07
5 mm	1,11	13,44
(10+5) mm	4,38	11,70
Agl. M. s/rev.	13,37	63,34
Agl. U. c/rev.	9,53	33,39
Agl. M. c/rev.	14,76	67,00
Comp. Lam.	2,87	32,64

Analisando-se os resultados do Quadro 4.14 verificou-se que os materiais compósitos apresentaram, em geral, os menores valores percentuais de absorção de água.

Na Figura 4.26 são apresentadas as curvas de absorção de água para os diferentes materiais testados.

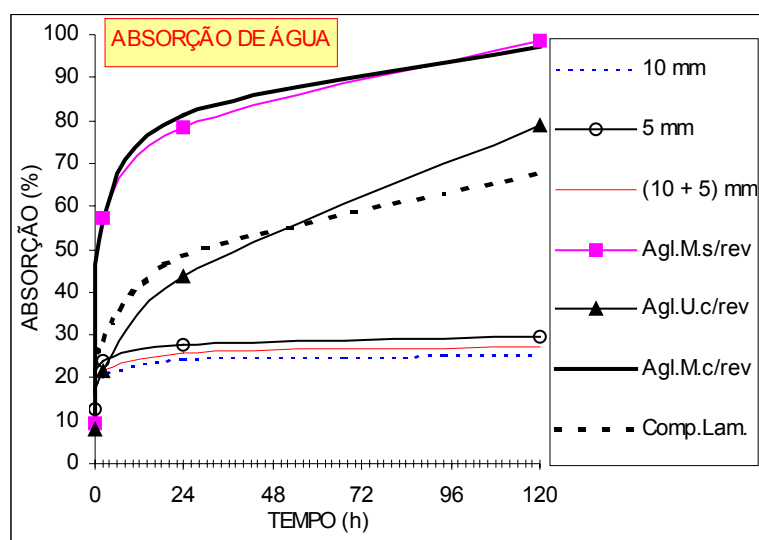


Figura 4.26: Curvas de absorção de água

Na Figura 4.26 fica evidente a baixa absorção de água pelos materiais compósitos, ao longo do tempo de imersão, sendo importante destacar que os materiais aglomerados e compensado sofrem desagregação de sua estrutura (desagregação do material particulado ou descolamento das lâminas que os compõem) quando expostos à ação da umidade, o mesmo não ocorrendo com os materiais compósitos.

Esta característica do material compósito apresentar baixa capacidade de absorção de água/retenção de umidade, ao longo do tempo de imersão, deve-se principalmente ao aglomerante que, por recobrir as fibras, limita sua absorção/expansão.

Outro fator que influenciou a capacidade de absorção de água/retenção de umidade nos compósitos foi o percentual de finos, onde o material de fração granulométrica 10 mm apresentou os menores percentuais, seguido da fração granulométrica (10+5) mm. A fração granulométrica 5 mm foi a que apresentou os maiores percentuais de finos e, em consequência, os piores resultados de absorção/retenção de água.

Na Figura 4.27 são apresentadas as curvas de variação volumétrica, para os diferentes materiais testados.

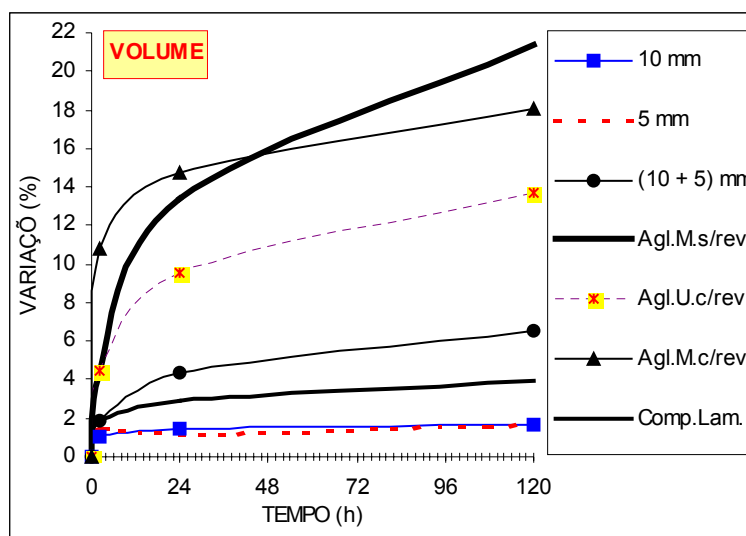


Figura 4.27: Curvas de variação volumétrica

As curvas de variação volumétrica foram obtidas a partir das variações volumétricas dos corpos-de-prova, em função da percentagem de umidade absorvida. Essas curvas indicaram a maior ou menor capacidade de um material de absorver ou reter umidade.

Avaliando-se o comportamento dos materiais em relação à variação volumétrica, verificou-se que os compósitos apresentaram, em geral, os menores percentuais, o que se atribui à combinação dos fatores estrutura do material e aglomerante utilizado.

A estrutura de um material depende de sua composição (lâminas, material particulado, percentual de finos) e disposição dos mesmos, ao passo que o adesivo/aglomerante utilizado (orgânico ou inorgânico) cria uma camada de revestimento sobre as partículas. Tanto a estrutura do material como o revestimento das partículas influem nas variações dimensionais de um material por facilitarem ou restringirem a retração/inchamento, em função da perda ou absorção de água.

No Quadro 4.15 são apresentados os resultados do ensaio de variação dimensional, para os materiais testados.

Quadro 4.15: Variações dimensionais nos materiais testados (24 h de imersão)

	Comp. (mm/m)	Larg. (mm/m)	Esp. (mm/m)
10 mm	3,32	2,59	8,60
5 mm	3,02	2,42	7,24
(10+5) mm	3,82	4,65	8,15
Agl. M. s/rev.	5,86	4,98	124,14
Agl. U. c/rev.	2,76	5,83	87,48
Agl. M. c/rev.	3,80	7,33	138,01
Comp. Lam.	1,40	3,16	24,23

OBS.: Comp. = comprimento; Larg. = largura; Esp. = espessura

A principal característica observada nos compósitos (Quadro 4.15) foi a sua baixa variação dimensional em espessura, quando comparados com os demais materiais ensaiados.

Na Figura 4.28 são apresentadas as curvas de variação dimensional, em espessura, para os diferentes materiais testados.

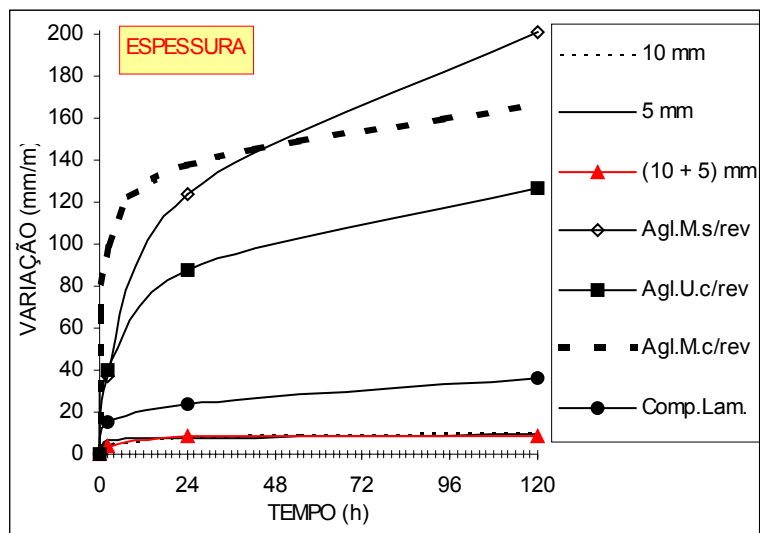


Figura 4.28: Curvas de variação dimensional: espessura

Na Figura 4.29 são apresentadas curvas que relacionam a variação da absorção de água com a variação do volume dos corpos-de-prova, para os diferentes materiais testados.

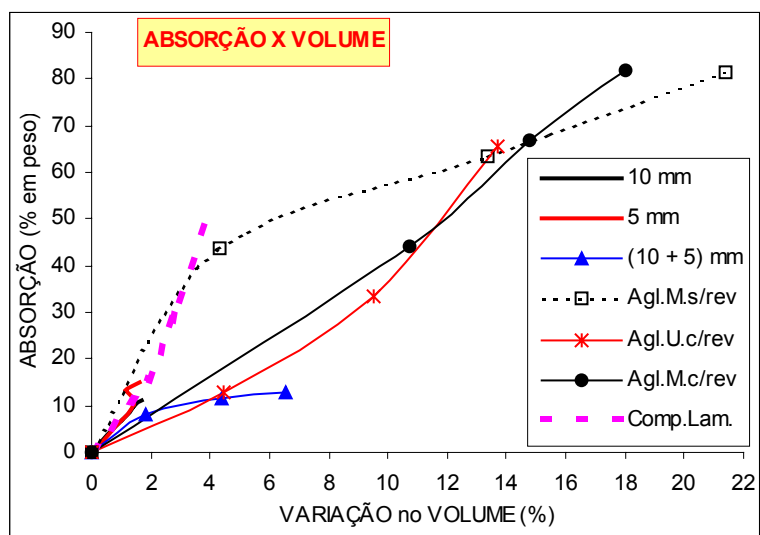


Figura 4.29: Curvas de correlação: absorção x volume

A utilização de um revestimento pode melhorar o desempenho dos materiais compósitos, em relação à absorção de água e à variação dimensional, o que somente poderá ser comprovado através de ensaios. Esta consideração é baseada no fato de que revestimentos impermeabilizantes (melamínicos) utilizados em aglomerados reduziram as variações dimensionais devidas à uma menor absorção de água (Figura 4.29).

4.4. Avaliação do consumo de materiais

Tendo em vista a dificuldade de se produzir corpos-de-prova nas mesmas condições daquelas utilizadas para a produção das placas, ocorreu uma variação no consumo de materiais.

Estes resultados não foram apresentados anteriormente devido ao caráter de exclusão utilizado na seleção dos melhores tratamentos, indicados através do ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.

Desta forma, apresenta-se, no Quadro 4.16, o consumo de materiais, por metro cúbico de compósito, apenas para os materiais selecionados para o processo de produção das placas, bem como o consumo real, por metro cúbico de placa produzida.

Quadro 4.16: Consumo de materiais (kg/m³ de compósito)

	CP's CILÍNDRICOS		PLACAS		
	10 mm	5 mm	10 mm	5 mm	(10+5) mm
CIMENTO	548	621	822	710	785
CASCA	195	263	288	301	306
ÁGUA	411	466	411	355	392
Acel. CaCl ₂	16	19	25	21	24

Verificou-se que, desta forma, para o material 10 mm, o percentual (diferencial) entre os resultados obtidos na confecção dos corpos-de-prova cilíndricos e aqueles obtidos

na confecção de placas inviabilizaria uma comparação entre ambos, sendo superior a 30%, exceto no consumo de água. No caso do material 5 mm, este percentual foi inferior à 15%.

Teoricamente, corpos-de-prova cilíndricos de fração granulométrica (10+5) mm, confeccionados com 65% de material de fração granulométrica 10 mm e 35% de material de fração granulométrica 5 mm, apresentariam um consumo de materiais inferior em 40% ao consumo de materiais indicados no Quadro 4.16.

5. CONCLUSÕES

A partir da análise dos resultados obtidos pode-se concluir que:

A – Em relação à incompatibilidade cimento-casca de arroz

- A granulometria do material casca de arroz e o tipo de cimento influenciaram de forma significativa o aspecto da curva de hidratação da mistura;
- Quanto mais fino foi o material utilizado, maior foi o efeito inibitório;
- O uso de material passante na peneira # 100 evidenciou o efeito benéfico da lavagem das partículas;
- O efeito da granulometria nas características de hidratação foi confirmado quando do uso de misturas de casca de arroz das três frações granulométricas (10, 5 e 3 mm), com a pasta de cimento com acelerador (CaCl_2 a 3%). Quanto mais fino foi o material utilizado, maior foi o aumento no tempo necessário para a ocorrência do pico de temperatura, sendo essa última ligeiramente decrescente com a diminuição do tamanho das partículas;

- A entalpia acumulada da reação de hidratação do cimento CP V-ARI foi cerca de 320 J/g, após 50 horas de reação. Tal valor, após a adição do material casca de arroz # 200, reduziu-se para 35 J/g (natural), 45 J/g (lavado) e de 19 J/g (lavado em solução de cal).

B – Em relação à resistência do compósito obtido

- Dentre os tratamentos das partículas, a lavagem da casca de arroz em solução de cal proporcionou a obtenção dos melhores resultados, em testes de compressão;
- O uso do cloreto de cálcio, principalmente quando combinado com o cimento CP V-ARI e, com partículas tratadas em solução de cal, forneceu os maiores valores em compressão, quando utilizadas as granulometrias 5 e 3 mm;
- O efeito da mineralização das partículas foi inferior àquele ocasionado pelo uso isolado do cloreto de cálcio, como acelerador;
- Placas ensaiadas na condição úmida apresentaram redução na resistência à flexão, quando comparadas com placas idênticas submetidas à cura ao ar livre ou carbonatadas;
- Não foi observada correlação entre a densidade, ou entre a velocidade de propagação da onda ultrasonora, com o módulo de ruptura das placas, nos ensaios de flexão.

C – Em relação à estabilidade dimensional

- Comparado com materiais à base de madeira e resinas orgânicas o compósito casca de arroz-cimento Portland situou-se em posição intermediária. Ressalta-se, no entanto, a grande estabilidade dimensional do compósito quando confrontado com tais materiais.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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 D1037-78B. Philadelphia, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, Rio de Janeiro. **NBR 5733** – Cimento Portland de alta resistência inicial, especificação. Rio de Janeiro, 1991. 5 p.

_____ **NBR 7211** - Agregado para concreto, especificação. Rio de Janeiro, 1983. 5p.

_____ **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 7225** – Materiais de pedra e agregados naturais, terminologia. Rio de Janeiro, 1993. 4 p.

_____ **NBR 7251** – Agregado em estado solto: Determinação da massa unitária método de ensaio. Rio de Janeiro, 1982. 3 p.

_____ **NBR 9533** – Compensado: Determinação da resistência à flexão estática, método de ensaio. Rio de Janeiro, 1986. 5 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 9939** – Agregados: Determinação do teor de umidade total, por secagem, em agregado gráudo. Rio de Janeiro, 1987. 2 p.

- _____ **NBR 11578** – Cimento Portland composto, especificação. Rio de Janeiro, 1991. 8 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.
- BERALDO, A. L. Madeiras. In: BERALDO, A. L.; NÄÄS, I. de A.; FREIRE, W. J. Materiais para Construções Rurais. Rio de Janeiro: LTC, 1991. Cap.2, p.7-62.
- BERALDO, A. L. Compósitos biomassa vegetal-cimento. In: XXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 1994, Campinas. Anais... Campinas: SBEA, 1994a. 2 v v.1, p.23.
- 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. Nancy : Université de Nancy I, 1994b. 171 p. Dissertação (Thèse de Docteur em Sciences du Bois).
- BERALDO, A. L.; MOUGEL, E.; ZOULALIAN, A. Materiais de construção obtidos à partir de resíduos vegetais. In: V EBRAMEM - ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRA. ANAIS..., Vol. 2, 1995. p. 11-19.
- BERALDO, A. L. & ROLIM, M. M. Efeito de tratamentos sobre a resistência à compressão de compósitos cimento-madeira de reflorestamento. In: CADIR 96- IV CONGRESO ARGENTINO Y II INTERNACIONAL DE INGENIERIA RURAL - ANAIS ..., (10), 1996. p. 773-778.
- BERALDO, A. L. & ZUCCO, L. L. Casca-de-arroz e cimento Portland: Possibilidades de utilização em construções. In: VII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO: QUALIDADE NO PROCESSO CONSTRUTIVO – ENTAC 98. UFSC. Florianópolis. ANAIS..., Vol. 2, 1998. p. 29-34.
- BIBLIS, E. J. & LO, C. F. Sugar and others wood extractives: effect on the setting of southern pine-cement mixtures. In: Forest Products Journal, 18 (8), 1968. p. 28-34.
- BODIG, J. & JAYNE, B. A. Mechanics of Wood and Wood Composites. Van Nostrand Reinhold Company: 1982. 711 p.
- FONSECA, Martha R. M. Química Integral, 2º Grau. São Paulo : FTD, 1993. p. 387.

- GRANDI, L. A. C. Placas pré-moldadas de argamassa de cimento e pó de serra. Campinas : Universidade Estadual de Campinas, 1995. 128 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). – Departamento de Construções Rurais, Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP.
- 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.
- HACHMI, M. & MOSLEMI, A. A. Correlation between wood-cement compatibility and wood extractives. In: Forest Products Journal, v. 39 (6), 1989. p.55-58.
- HOFSTRAND, A. D.; MOSLEMI, A. A.; GARCIA, J. F. Curing characteristics of wood particles from nine northern Rocky mountain species mixed with Portland cement. In: Forest Products Journal, v. 34 (2), 1984. p.57-61.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE - Anuário Estatístico do Brasil. 1995. p. 3-41
- IRLE, M. & SIMPSON, H. Agricultural residues for cement-bonded composites. In: Inorganic-Bonded Wood and Fiber Composite-Materials. v. 3, 1992. p.54-58.
- LATORRACA, J. V. de F. Estudo da viabilidade do uso da espécie *Eucalyptus dunnii* (Maid) na manufatura de painéis de madeira-cimento. Curitiba : Universidade Federal do Paraná, 1996. 94 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais).
- LEE, A. W. C. & HONG, Z. Compressive strength of cylindrical samples as an indicator of wood-cement compatibility. In: Forest Products Journal, v. 36 (11/12), 1986. p. 87-90.
- LEE, A. W. C.; PHILLIPS, D. R.; HSE, C. Y. Effect of cement/wood ratio and wood storage conditions on hydration temperature, hydration time, and compressive strength of wood-cement mixtures. In.: Wood and Fiber Science, v. 19 (3), 1987. p. 262-268.
- LEE, A. W. C. & SHORT, P. H. Pretreating hardwood for cement-bonded excelsior board. In: Forest Products Journal, v. 39 (10), 1989. p. 68-70.
- MI-GEIDA. Contribuição ao desenvolvimento da agroindústria. Vol. 8 - Arroz. Ministério do Interior-Grupo Executivo de Irrigação para o Desenvolvimento Agrícola. 1972. p 19.

- MILLER, D. P. & MOSLEMI, A. A. Wood-cement composites: Effect of model compounds on hydration characteristics and tensile strength. In: 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. In: Wood and Fiber Science. v. 15 (2), 1983. p. 164-176.
- MOSLEMI, A. A. & LIM, Y. T. Compatibility of southern hardwoods with Portland cement. In: Forest Products Journal, v. 34 (718), 1984. p. 22-26.
- 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. In: Cement & 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. 1996. p. 53-62.
- RAMÍREZ SARMIENTO, C. S. & FREIRE, W. J. Tratamentos aplicados ao bagaço de cana-de-açúcar visando sua utilização para fins de material de construção. In: Workshop: Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de Construção Civil. PCC-USP. São Paulo. Anais. 1996. p. 132-137.
- RASHWAN, M. S.; HATZINIKOLAS, M.; ZMAVC, R. Development of a lightweight, low-cost concrete block using wood residue. In: Forest Products Journal, 42 (5), 1992. p. 57-64.
- READING, T. J. Deleterious effects of wood forms on concrete surfaces. In: Concrete International, Nov (1985). p. 57-62.
- 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.
- SERRANO, J.S. & CASTRO, J.V. Materiales de construcción con propiedades aislantes a base de cascara de arroz. In: Informes de la Construcción, Instituto Eduardo Torroja, Madri, v.37, nº 372, (7), 1985. p.53-64.

- SILVEIRA, A.; FERREIRA, A. A.; DAL MOLIN, D. C. C. A cinza da casca-de-arroz como adição mineral. In: Workshop: Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de Construção Civil. PCC-USP. São Paulo. ANAIS. 1996. p.39-45.
- SIMATUPANG, M. H. Degradations of glucose, cellobiose, and wood under the influence of Portland cement paste. Holzforschung, v. 40 (3), 1986. p. 149-155.
- SIMATUPANG, M. H.; LANGE, H.; KASIM, A.; SEDDIG, N. Influence of wood species on the setting of cement and gypsum. In: International Congres on Fiber and Particleboards Bonded with Inorganic Binders. v. 1, 1988. p. 33-42.
- VALENZUELA, W. Contribution à la détermination de l'aptitude d'essences forestières pour la fabrication de panneaux de fibro-ciment. Belgique: Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux, 1989. 135 p. Tese (Doutorado em Ciências Agrônômicas).
- WEATHERWAX, R. C. & TARKOW, H. Effect of wood on setting of Portland cement. In: Forest Products Journal, v. 14 (12), 1964. p.567-570.
- _____ Effect of wood on setting of Portland cement: Decayed wood as an inhibitor. In: Forest Products Journal, v. 17 (7), 1967. p.30-32.
- ZHENGtian, L. & MOSLEMI, A. A. Influence of chemical additives on the hydration characteristics of western larch wood-cement-water mixtures. In: Forest Products Journal, v. 37 (7), 1985. p. 37-43