

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**AVALIAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DE TIJOLOS DE SOLO-
CIMENTO E DE SOLO-CAL ADICIONADOS DE CASCA DE
ARROZ**

ANA PAULA DA SILVA MILANI

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2005

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**AVALIAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DE TIJOLOS DE SOLO-
CIMENTO E DE SOLO-CAL ADICIONADOS DE CASCA DE
ARROZ**

Dissertação submetida à Banca Examinadora
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Agrícola na área de concentração
em Construções Rurais e Ambiente.

ANA PAULA DA SILVA MILANI

Orientador: Prof. Dr. Wesley Jorge Freire

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2005

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

M598a	Milani, Ana Paula da Silva Avaliação físico-mecânica de tijolos de solo-cimento e de solo-cal adicionados de casca de arroz / Ana Paula da Silva Milani. --Campinas, SP: [s.n.], 2005. Orientador: Wesley Jorge Freire. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola. 1. Materiais de construção. 2. Resíduos vegetais - reaproveitamento. I. Freire, Wesley Jorge. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.
-------	--

Título em Inglês: Physical-mechanical evaluation of soil-cement and soil-lime bricks added of rice husk.

Palavras-chave em Inglês: Building material e Vegetable residues recycling

Área de concentração: Construções Rurais e Ambiente

Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Jorge Luís Akasaki e Antonio Ludovico Beraldo

Data da defesa: 18/02/2005

“Ser mestre não é apenas lecionar, ensinar. Não é apenas transmitir matéria. Ser mestre é ser instrutor, amigo, guia e companheiro. É caminhar com o aluno, passo a passo, e transmitir a este os segredos da caminhada. Ser mestre é principalmente acreditar, pois todo aluno tem um potencial escondido que merece ser apontado e desenvolvido.....”

Aos meus pais, Olicio e Carolina, por não medirem esforços para a minha educação.....

À minha irmã, Karla Rosa, pelo incentivo e amizade.....

À família Milani, que me acolheu e me fez sua integrante.....

.....ofereço

Ao meu grande amor e companheiro, Marcio, por ter trilhado esse caminho comigo.....

.....dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força e coragem para superar os obstáculos da vida.

Ao Prof. Dr. Wesley Jorge Freire, que quando deveria ser simplesmente meu orientador, foi meu amigo e em sua amizade encontrei compreensão e incentivo para seguir os meus caminhos.

Ao professor, Antonio Ludovico Beraldo, pelo apoio, incentivo e atenção na solução de problemas.

Às técnicas do Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas da FEAGRI/UNICAMP, Gisleiva e Flávia, pela amizade, carinho e auxílio na condução da execução experimental.

Às secretarias da Pós-graduação Ana, Marta e Rosângela, pelo atendimento sempre eficiente e carinhoso.

Aos funcionários do Campo Experimental, pela amizade e auxílio na execução de ensaios de campo.

Aos técnicos e auxiliares do Laboratório de Protótipos do DMAQ, Luís e Chicão, pelo auxílio, sem os quais a criação e adequação dos equipamentos utilizados no experimento não seriam possíveis.

Aos técnicos do Laboratório de Solos da Faculdade de Engenharia Civil, que muito colaboraram na execução dos ensaios preliminares.

Aos colegas, em especial, Rita de Cássia, Lóris, Martha, Lia, Edílson, Régis, Wellington, Juliana, Flávio, Jean e César, pela sincera amizade e inesquecíveis momentos vividos.

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.

Ao Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki, pelo incentivo para a realização do curso de mestrado.

A agência financiadora CAPES pela concessão da bolsa.

A todos que, mesmo não sendo citados, ofereceram-me apoio para a realização deste, deixo meu humilde agradecimento.....

.....**muito obrigada.**

SUMÁRIO

	Página
Epígrafe	iii
Dedicatória	iv
Agradecimentos	v
Sumário	vi
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xii
Resumo	xvi
Abstract	xvii
1. INTRODUÇÃO	01
2. OBJETIVOS	03
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	04
3.1. SOLO-CIMENTO / SOLO-CAL	04
3.1.1. Fundamentos da estabilização do solo	04
3.1.2. Características dos sistemas solo-cimento e solo-cal compactados	05
3.1.3. Solo-cimento como componente construtivo	07
3.1.4. Solo-cal como componente construtivo	13
3.2. COMPÓSITOS À BASE DE BIOMASSA VEGETAL E AGLOMERANTES MINERAIS	15
3.2.1. Casca de arroz	15
3.2.2. Compósitos	17
3.2.3. Incompatibilidade química entre a biomassa vegetal e o cimento	21
3.2.4. Tratamentos para minimização da incompatibilidade química	24
3.2.5. Compósitos à base de biomassa vegetal – cimento / cal como componente construtivo	26
3.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS	29

4. MATERIAL E MÉTODOS	31
4.1. MATERIAL	31
4.2. MÉTODOS	34
1º Etapa - Preparação e caracterização física dos materiais	34
2º Etapa - Estudo de dosagem das misturas de solo-cimento-casca de arroz e de solo-cal-casca de arroz	37
3º Etapa – Caracterização físico-mecânica dos corpos-de-prova confeccionados a partir das misturas de solo-aglomerante–casca de arroz escolhidas na etapa do estudo de dosagem	41
4º Etapa – Caracterização físico-mecânica dos tijolos confeccionados a partir de misturas de solo-aglomerante–casca de arroz escolhidas na etapa do estudo de dosagem	47
5º Etapa - Análise estatística	52
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
5.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS	53
5.1.1. Material casca de arroz	53
5.1.2. Material solo	55
5.2. ESTUDO DE DOSAGEM DAS MISTURAS DE SOLO-AGLOMERANTE-CASCA DE ARROZ	57
5.2.1. Ensaio de compactação normal de Proctor	57
5.2.2. Ensaio preliminar de compressão simples	65
5.2.3. Relação entre a massa específica aparente seca máxima e a resistência à compressão simples dos corpos-de-prova confeccionados a partir das misturas de solo-aglomerante-casca de arroz	71
5.3. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DOS CORPOS-DE-PROVA CONFECCIONADOS A PARTIR DOS TRATAMENTOS COM SOLO-CIMENTO–CASCA DE ARROZ	75
5.3.1. Massa específica aparente seca e grau de compactação	75
5.3.2. Resultados dos ensaios destrutivos aplicados aos corpos-de-prova	76
5.3.3. Resultados do ensaio não destrutivo aplicado aos corpos-de-prova	84

5.3.4. Combinação dos métodos destrutivos e não destrutivos na avaliação dos corpos-de-prova	87
5.4. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DOS TIJOLOS CONFECCIONADOS A PARTIR DOS TRATAMENTOS COM SOLO-CIMENTO-CASCA DE ARROZ	90
5.4.1. Massa específica aparente seca e grau de compactação dos tijolos	90
5.4.2. Resultados dos ensaios destrutivos aplicados aos tijolos	91
5.4.3. Resultados do ensaio não destrutivo aplicado aos tijolos	96
5.4.4. Combinação dos métodos destrutivos e não destrutivos na avaliação dos tijolos	98
6. CONCLUSÕES	100
6.1. ENSAIOS PRELIMINARES APLICADOS ÀS MISTURAS DE SOLO-AGLOMERANTE-CASCA DE ARROZ	100
6.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DAS MISTURAS DE SOLO-CIMENTO-CASCA DE ARROZ	101
6.3. ENSAIO NÃO DESTRUTIVO APLICADO ÀS MISTURAS DE SOLO-CIMENTO-CASCA DE ARROZ	101
6.4. CONCLUSÕES GERAIS	102
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Triturador de casca de arroz	33
Figura 2. Prensa de CBR	33
Figura 3. Máquina universal de ensaios	34
Figura 4. Máquina para fabricação de tijolos	34
Figura 5. Aparelho de ultra-som	33
Figura 6. Casca de arroz natural	36
Figura 7. Casca de arroz tratada	36
Figura 8. Corpo-de-prova cilíndrico sob compressão simples	43
Figura 9. Corpo-de-prova cilíndrico sob compressão diametral	43
Figura 10. Corpos-de-prova cilíndricos imersos em água	44
Figura 11. Teste de ultra-som sendo aplicado ao corpo-de-prova	46
Figura 12. Fabricação dos tijolos	48
Figura 13. Tijolos à espera dos ensaios	48
Figura 14. Prismas de tijolos	49
Figura 15. Tijolos sob compressão	49
Figura 16. Tijolos imersos em água	49
Figura 17. Eixos de leitura do tempo de propagação da onda ultra-sônica nos tijolos	50
Figura 18. Teste de ultra-som aplicado ao tijolo	51
Figura 19. Curvas de compactação do solo arenoso adicionado do teor de 8% das combinações cimento-casca de arroz.	63
Figura 20. Curvas de compactação do solo arenoso adicionado do teor de 12% das combinações cimento-casca de arroz.	63
Figura 21. Curvas de compactação do solo arenoso adicionado do teor de 8% das combinações cal-casca de arroz.	63

Figura 22.	Curvas de compactação do solo arenoso adicionado do teor de 12% das combinações cal-casca de arroz.	63
Figura 23.	Curvas de compactação do solo argiloso adicionado do teor de 8% das combinações cimento-casca de arroz.	64
Figura 24.	Curvas de compactação do solo argiloso adicionado do teor de 12% das combinações cimento-casca de arroz.	64
Figura 25.	Curvas de compactação do solo argiloso adicionado do teor de 8% das combinações cal-casca de arroz.	64
Figura 26.	Curvas de compactação do solo argiloso adicionado do teor de 12% das combinações cal-casca de arroz.	64
Figura 27.	Valores de resistência à compressão simples e de massa específica aparente seca máxima dos corpos-de-prova de solo arenoso-cimento-casca de arroz.	72
Figura 28.	Valores de resistência à compressão simples e de massa específica aparente seca máxima dos corpos-de-prova de solo arenoso-cal-casca de arroz.	72
Figura 29.	Valores de resistência à compressão simples e de massa específica aparente seca máxima dos corpos-de-prova de solo argiloso-cimento-casca de arroz	73
Figura 30.	Valores de resistência à compressão simples e de massa específica aparente seca máxima dos corpos-de-prova de solo argiloso-cal-casca de arroz.	73
Figura 31.	Valores de resistência à compressão simples e de massa específica aparente seca máxima dos corpos-de-prova de solo argiloso adicionado de elevados teores das combinações cimento-casca de arroz.	74
Figura 32.	Valores de resistência à compressão simples, aos 7 e 28 dias, dos corpos-de-prova de solo-cimento-casca de arroz.	80
Figura 33.	Valores de resistência à tração na compressão diametral, aos 7 e 28 dias, dos corpos-de-prova de solo-cimento-casca de arroz.	80
Figura 34.	Corpo-de-prova de solo-cimento após ensaio de compressão.	82
Figura 35.	Corpo-de-prova de solo-cimento-casca após ensaio de compressão.	82

Figura 36.	Capacidade de absorção de água dos corpos-de-prova de solo-cimento-casca.	83
Figura 37.	Velocidade da onda ultra-sônica em função do tempo nos corpos-de-prova.	85
Figura 38.	Representação gráfica das equações de regressão (velocidade x massa específica aparente) para o solo arenoso.	87
Figura 39.	Representação gráfica das equações de regressão (velocidade x massa específica aparente) para o solo argiloso.	88
Figura 40.	Representação gráfica das equações de regressão (resistência x velocidade) para o solo arenoso.	89
Figura 41.	Representação gráfica das equações de regressão (resistência x velocidade) para o solo argiloso.	89
Figura 42.	Valores de resistência à compressão simples, aos 7, 28 e 60 dias, dos tijolos de solo-cimento-casca de arroz.	94
Figura 43.	Capacidade de absorção d'água dos tijolos de solo-cimento-casca.	94

LISTA DE TABELAS

	Páginas
Tabela 1. Quantidade de cimento recomendada (% em volume) para obter determinada resistência à compressão do bloco de solo-cimento, a partir do Índice de Plasticidade do solo.	8
Tabela 2. Resultados dos ensaios de tijolos de solo-cimento.	9
Tabela 3. Caracterização físico-mecânica de misturas de solo-cimento.	9
Tabela 4. Tensões de ruptura (MPa) de corpos-de-prova de solo-cimento.	11
Tabela 5. Resistência à compressão simples e capacidade de absorção de água dos tijolos de solo-cimento.	12
Tabela 6. Resistência à compressão simples de corpos-de-prova de solo-cal (MPa).	14
Tabela 7. Resistência à compressão simples de tijolos de solo-cal (MPa).	14
Tabela 8. Caracterização físico-mecânica de misturas de solo-cal.	15
Tabela 9. Produção de arroz em casca no Brasil – safra 2003.	16
Tabela 10. Propriedades mecânicas dos compósitos à base de argamassa de cimento Portland e areia.	19
Tabela 11. Propriedades mecânicas dos tijolos de solo-cimento-bagaço de cana-de-açúcar (médias de três repetições).	27
Tabela 12. Propriedades mecânicas dos tijolos de solo-cal-resíduos agroindustriais.	29
Tabela 13. Características físicas da casca de arroz estudada.	53
Tabela 14. Distribuição em tamanho da casca de arroz natural, a partir de 50,0 g do material, em condição anidra.	54
Tabela 15. Distribuição em tamanho da casca de arroz após trituração, a partir de 50,0 g do material, em condição anidra.	55
Tabela 16. Distribuição em tamanho da casca de arroz tratada, a partir de 50,0 g do material, em condição anidra.	55
Tabela 17. Características físico-mecânicas dos solos estudados.	56
Tabela 18. Análise de variância referente aos efeitos das adições no solo arenoso sobre a variável massa específica aparente seca máxima (kN/m ³).	58

Tabela 19.	Análise de variância referente aos efeitos das adições no solo arenoso sobre a variável umidade ótima (%).	58
Tabela 20.	Análise de variância referente aos efeitos das adições no solo argiloso sobre a massa específica aparente seca máxima (kN/m³).	58
Tabela 21.	Análise de variância referente aos efeitos das adições no solo argiloso sobre a variável umidade ótima (%).	59
Tabela 22.	Valores de massa específica aparente seca máxima do ensaio de compactação normal de Proctor aplicado ao solo arenoso adicionado das combinações de aglomerante-casca de arroz.	60
Tabela 23.	Valores de umidade ótima do ensaio de compactação normal de Proctor aplicado ao solo arenoso adicionado das combinações de aglomerante - casca de arroz.	60
Tabela 24.	Valores de massa específica aparente seca máxima do ensaio de compactação normal de Proctor aplicado ao solo argiloso adicionado das combinações de aglomerante-casca de arroz.	61
Tabela 25.	Valores de umidade ótima do ensaio de compactação normal de Proctor aplicado ao solo argiloso adicionado das combinações de aglomerante-casca de arroz.	61
Tabela 26.	Análise de variância referente aos efeitos das adições no solo arenoso sobre a variável resistência à compressão simples preliminar de corpos-de-prova (MPa).	65
Tabela 27.	Análise de variância referente aos efeitos das adições no solo argiloso sobre a variável resistência à compressão simples preliminar de corpos-de-prova (MPa).	65
Tabela 28.	Resistência à compressão simples preliminar (MPa), aos 7 dias, de corpos-de-prova confeccionados com solo arenoso adicionado de diferentes combinações de aglomerante-casca de arroz (sem imersão em água).	66
Tabela 29.	Resistência à compressão simples preliminar (MPa), aos 7 dias, de corpos-de-prova confeccionados com solo argiloso adicionado de diferentes combinações de aglomerante-casca de arroz (sem imersão em água).	66
Tabela 30.	Ganhos de resistência proporcionados pelo aumento do teor da combinação cimento-casca de arroz.	68

Tabela 31.	Valores de massa específica aparente seca máxima ($\gamma_{\text{máx}}$) e umidade ótima ($h_{\text{ótima}}$) do ensaio de compactação de Proctor aplicado ao solo argiloso adicionado dos teores de 14% e 18% das combinações cimento-casca.	70
Tabela 32.	Resistência à compressão simples (MPa), aos 7 dias, de corpos-de-prova confeccionados com solo argiloso adicionado dos teores de 14% e 18% das combinações cimento-casca (sem imersão em água).	70
Tabela 33.	Valores médios da massa específica aparente seca e grau de compactação dos corpos-de-prova cilíndricos confeccionados com diferentes tratamentos de solo-cimento-casca de arroz.	76
Tabela 34.	Análise de variância referente aos efeitos dos tratamentos sobre a variável resistência à compressão simples de corpos-de-prova (MPa).	77
Tabela 35.	Análise de variância referente aos efeitos dos tratamentos sobre a variável resistência à tração na compressão diametral de corpos-de-prova (MPa).	77
Tabela 36.	Análise do efeito da interação entre os fatores tipo de tratamento e idade nos valores médios da resistência à compressão simples dos corpos-de-prova de solo-cimento-casca de arroz (MPa).	78
Tabela 37.	Análise do efeito da interação entre os fatores tipo de tratamento e idade nos valores médios da resistência à tração na compressão diametral dos corpos-de-prova de solo-cimento-casca (MPa).	78
Tabela 38.	Resistência à compressão simples (MPa), aos 7 e 28 dias, de corpos-de-prova confeccionados com diferentes tratamentos de solo adicionado de combinações cimento-casca de arroz.	79
Tabela 39.	Resistência à tração na compressão diametral (MPa), aos 7 e 28 dias, de corpos-de-prova confeccionados com diferentes tratamentos de solo adicionado de combinações cimento-casca de arroz.	79
Tabela 40.	Capacidade de absorção d'água (%), aos 7 dias, de corpos-de-prova confeccionados com diferentes tratamentos de solo-cimento-casca.	83
Tabela 41.	Valores para a confirmação do uso do transdutor de 45 kHz - seção plana para as medições nos corpos-de-prova.	84
Tabela 42.	Valores médios da massa específica aparente dos corpos-de-prova (kN/m^3).	86

Tabela 43.	Valores médios da velocidade de propagação da onda ultra-sônica dos corpos-de-prova (m/s).	86
Tabela 44.	Valores médios do módulo de elasticidade dinâmico em função da idade para os corpos-de-prova de solo-cimento-casca de arroz (MPa).	86
Tabela 45.	Valores médios da massa específica aparente seca e grau de compactação dos tijolos confeccionados com diferentes tratamentos de solo adicionado de combinações de cimento-casca de arroz.	91
Tabela 46.	Análise de variância referente aos efeitos dos tratamentos sobre a variável resistência à compressão simples de tijolos (MPa).	92
Tabela 47.	Análise do efeito da interação entre os fatores tipo de tratamento e idade nos valores médios da resistência à compressão simples dos tijolos de solo-cimento-casca (MPa).	92
Tabela 48.	Resistência à compressão simples (MPa), aos 7, 28 e 60 dias, de tijolos confeccionados com diferentes tratamentos de solo-cimento-casca de arroz.	93
Tabela 49.	Absorção d'água (%), aos 7 dias, de tijolos confeccionados com diferentes tratamentos de solo-cimento-casca de arroz.	93
Tabela 50.	Valores médios da velocidade da onda ultra-sônica nas três direções dos tijolos (conforme Figura 17).	96
Tabela 51.	Valores médios da massa específica aparente dos tijolos (kN/m³).	97
Tabela 52.	Valores médios da anisotropia total (ΔM) dos tijolos, em %.	98
Tabela 53.	Valores médios de resistência anisotrópica (R_A) dos tijolos, em kg/%cm².	98

RESUMO

No Brasil existem sérios problemas ambientais no que se refere à extração indiscriminada de recursos naturais e à constante geração de resíduos agroindustriais. Buscando soluções que minimizem esta degradação ambiental, o presente trabalho pesquisou misturas de solo + aglomerante mineral + resíduo agroindustrial, sendo utilizado, como recurso natural, a terra; como estabilizante, o cimento e a cal; e, como resíduo agroindustrial, a casca de arroz. O principal objetivo da pesquisa foi estudar os efeitos da adição de combinações de cimento-casca de arroz e de cal-casca de arroz nas propriedades físico-mecânicas de um solo predominantemente arenoso e outro solo predominantemente argiloso, bem como avaliar a viabilidade técnica da confecção de tijolos de solo-cimento-casca de arroz e solo-cal-casca de arroz. Para tal, foram realizados o fracionamento, peneiramento e pré-tratamento (em solução de cal) da casca de arroz; estudo de dosagem das misturas de solo-aglomerante-casca de arroz através de ensaios de compactação normal de Proctor e ensaio de compressão simples. A partir deste estudo preliminar, as misturas de solo-aglomerante-casca de arroz que melhores resultados apresentaram em termos de desempenho mecânico foram utilizadas para a confecção de corpos-de-prova e tijolos para posterior caracterização físico-mecânica. A avaliação dos corpos-de-prova de solo-aglomerante-casca de arroz consistiu na aplicação dos ensaios de compressão simples, de tração na compressão diametral, aos 7 e 28 dias, de absorção d'água e de ultra-som. Já os tijolos de solo-aglomerante-casca de arroz foram submetidos aos ensaios de compressão simples aos 7, 28 e 60 dias, de absorção de água e de ultra-som. Depois de determinadas e estatisticamente analisadas as principais características físicas e mecânicas das misturas de solo-aglomerante-casca de arroz, pôde-se concluir que o solo arenoso, adicionado de 12% de combinações de cimento-casca de arroz, apresentou-se como promissor material para utilização na fabricação de tijolos prensados a serem utilizados em construções e instalações rurais.

Palavras chaves: materiais alternativos de construção, resíduos agroindustriais, solo-aglomerante mineral.

ABSTRACT

The environmental concern related to the indiscriminate extraction of Brazilian natural resources and the ceaseless agricultural and industrial waste generation became a serious problem demanding for a quick solution. So this work was done in order to minimize the environment degradation by using rice husk added to mixtures of soil and cement or lime aiming at the obtainment of an alternative construction material. For this purpose, two different types of soil, a sandy soil and a clayey one, were treated with different amounts of cement, lime and rice husk before being submitted to physical and mechanical tests. The rice husk preparation consisted of grinding, sieving, and pre-treatment with lime solution followed by physical analysis in laboratory conditions. The different mixtures of soil, cement, lime and rice husk were tested for compaction and unconfined compression. The specimens molded according to the treatments applied to the mixtures were subsequently submitted to compression testing at 7 and 28 days old as well as to water absorption and to ultrasonic pulse velocity tests. The soil-cement/lime-rice husk mixtures presenting the best results in terms of mechanical strength were utilized for specimen molding and brick manufacturing, the specimens being tested for both the compression and the splitting tensile strength at 7 and 28 days old as well as to water absorption and ultrasonic pulse velocity tests. On the other hand, the bricks were tested to compression at 7, 28 and 60 days old, to water absorption and to ultrasonic pulse velocity. The obtained data were then statically analyzed and the results showed that the sandy soil added of 12% of the cement and rice husk combination was the best treatment in terms of physical and mechanical properties, pointing out its promising use as an alternative material for brick manufacture to be used in rural construction.

Keywords: alternative construction material, agricultural and industrial residues, soil-cement or lime.

1. INTRODUÇÃO

A terra crua foi um dos primeiros materiais de construção empregados pelo homem. Data-se que há cerca de dez mil anos começaram as primeiras edificações para abrigar o homem das intempéries, com a utilização de terra, pedras, madeiras e palhas. No Brasil, a prática também é antiga, principalmente no meio rural e regiões interioranas, sendo destaque a utilização da terra no adobe, pau-a-pique e taipa de pilão. Porém, com o advento da tecnologia e industrialização, a terra se tornou um material construtivo secundário e de baixo valor comercial e cultural.

Paralelamente a este progresso tecnológico, que a cada dia traz inovações nos produtos industrializados e otimização de sua produção, são extraídos de forma indiscriminada recursos naturais que quase sempre resultam na geração de resíduos que não são reaproveitados pelo homem, provocando poluição permanente e grande preocupação com o meio ambiente.

Atualmente, a atividade agroindustrial de beneficiamento de arroz destaca-se pela elevada produção do resíduo casca de arroz, representando não só um problema econômico através do desperdício como também um sério problema ambiental. Essa casca de arroz, quando não utilizada de forma direta (cama de galinheiro, condicionador de solos), é descartada e lançada em aterros e estradas vicinais ou mesmo queimada a céu aberto ou utilizada como combustível para secagem de grãos, produzindo toneladas de cinzas consideradas prejudiciais à saúde humana.

Outro problema freqüente em países em desenvolvimento, como o Brasil, é a grande demanda de habitações que, por sua vez, tem-se deparado com a falta de materiais tradicionais de construção necessários à edificação das unidades residenciais e comunitárias, ora pelo custo elevado do produto, ora pelo afastamento dos centros produtores destes elementos.

Visando soluções que minimizem esta degradação ambiental e ao mesmo tempo reduzam os custos do produto final, há a necessidade do desenvolvimento de materiais e técnicas que utilizem racionalmente os recursos naturais, necessitem de pouco investimento financeiro, gerem tecnologias apropriadas, busquem conteúdo energético de fontes próximas ao local da construção e reaproveitem os materiais residuais de agroindústrias e madeireiras para redução da queima ou lançamento em locais e condições inadequadas.

Neste âmbito, pesquisadores vêm estudando o resgate do material solo como componente construtivo; porém, para a melhoria do seu comportamento, sob o ponto de vista de aplicação à engenharia, diversos produtos como cimento, cal, aditivos químicos e fibras vegetais vêm sendo adicionados a ele, conferindo ótimos resultados para aplicação em construções rurais. Ainda concentrada na fabricação de um material de menor impacto ambiental, a utilização conjunta de resíduos vegetais e matrizes cimentantes tem-se mostrado um caminho em potencial, pois além da redução de descarte ou queima dos resíduos, estes acabam substituindo parcialmente algumas matérias-primas convencionais. Na Índia tem-se intensificado as pesquisas e a industrialização de elementos construtivos (telhas, placas prensadas, pisos) fabricados a partir de compósitos à base de resíduos agroindustriais e matrizes cimentantes.

A presente pesquisa se reveste de especial importância porque envolve o estudo de materiais não convencionais e se propõe a acompanhar o processo tecnológico envolvido, assim como a buscar condições de minimizar a possível degradação ambiental quando aqueles materiais são produzidos a partir do aproveitamento de resíduos agrícolas e/ou agroindustriais. Os resultados surpreendentes, em termos de resistência mecânica, obtidos com a adição de aglomerantes minerais ao solo, abrem a possibilidade de um maior aprofundamento nos estudos sobre as propriedades físicas e mecânicas do material obtido frente às mais diversas condições de fabricação e de solicitações.

Por outro lado, considerando-se a necessidade de minimizar o descarte da casca de arroz em condições e locais inadequados e aproveitando a potencialidade físico-química desse material, pretende-se, nesta pesquisa, incorporar este resíduo a misturas de solo-cimento e de solo-cal com a finalidade de obter um material alternativo de construção, de boas características físico-mecânicas, que possa ser usado em construções rurais na forma de tijolos ou blocos prensados para o erguimento de paredes não portantes, muros, pisos, ou quaisquer outras aplicações para as quais este material seja adequado.

2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho foi estudar os efeitos da adição de combinações de cimento-casca de arroz e de combinações de cal-casca de arroz nas propriedades físico-mecânicas de um solo arenoso e de um solo argiloso.

Os objetivos específicos foram:

- definir a adequada fração granulométrica da casca de arroz a ser utilizada nas misturas de solo-cimento-casca e solo-cal-casca de arroz;
- adotar o melhor tratamento a ser aplicado à casca de arroz para amenizar as reações de incompatibilidade química com a matriz cimentante;
- através dos ensaios preliminares de compactação e de compressão simples, identificar combinações de cimento-casca de arroz e combinações de cal-casca de arroz que, ao serem adicionadas ao solo, promovam melhorias nas suas propriedades físico-mecânicas;
- com base nos resultados preliminares e priorizando a máxima adição de casca de arroz aliada ao mínimo consumo de aglomerante (cimento ou cal), definir combinações de aglomerante-casca de arroz a serem adicionados ao solo para a confecção de corpos-de-prova e tijolos de misturas de solo-aglomerante-casca de arroz;
- determinar as características físicas e mecânicas dos corpos-de-prova e tijolos de solo-aglomerante-casca de arroz, além da determinação das velocidades de propagação da onda ultra-sônica;
- verificar a relação entre os dados obtidos dos ensaios destrutivos e não destrutivos, estabelecendo correlações matemáticas;
- definir e recomendar, para fins de fabricação de tijolos prensados não queimados, a mistura de solo-aglomerante-casca de arroz mais adequada em termos de tipo de solo, teor dos componentes da mistura, resistência à compressão simples, resistência à tração na compressão diametral e capacidade de absorção d'água.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. SOLO-CIMENTO / SOLO-CAL

3.1.1. FUNDAMENTOS DA ESTABILIZAÇÃO DO SOLO

Num sentido amplo, a estabilização do solo consiste em modificar as características do sistema solo-água-ar com a finalidade de se obter propriedades necessárias a uma aplicação particular. Agentes estabilizadores como o cimento, a cal, aditivos químicos, fibras vegetais ou mesmo a estabilização granulométrica, vêm sendo utilizados em larga escala para aquela finalidade.

Na estabilização do solo com cimento ocorrem reações de hidratação dos silicatos e aluminatos presentes no cimento, formando um gel que preenche parte dos vazios da massa e une os grãos adjacentes do solo, conferindo a ele resistência inicial; paralelamente, ocorrem reações iônicas que provocam a troca de cátions das estruturas argilominerais do solo com os íons de cálcio provenientes da hidratação do cimento adicionado. Devido a esta troca, o solo torna-se mais granular, a adesividade é reduzida e a sensibilidade à variação de umidade e a variação volumétrica se tornam menores. Além destas modificações iniciais, Abiko (1980) afirmou que, ao longo do tempo, formam-se compostos cimentantes que contribuem para o melhoramento de propriedades do material (resistência, durabilidade, estabilidade volumétrica).

Na estabilização do solo com cal ocorre primeiramente hidratação da cal modificando o pH do solo e provocando floculação das argilas em razão das reações de troca catiônica. Imediatamente o material sofre redução da expansão e da retração e melhora sua plasticidade. Com o tempo, o ataque da argila pela cal produz reações pozolânicas e fenômenos de carbonatação, conferindo melhores características geo-mecânicas ao conjunto (GUIMARÃES, 1995).

Relatos de Barbosa e Tolêdo Filho (1997) apontaram que as reações no sistema solo-cimento ocorrem com boa intensidade se a fração argila presente no solo contiver grandes percentagens de caulinita e ilita, pois estas fixam menos cal, possibilitando melhor hidratação do cimento. Portanto, de uma forma geral, a ação do cimento traz bons resultados em solos

classificados como arenosos. Já, para o sistema solo-cal, os resultados são expressivos quando a cal reage com a argila montmorilonita, pois, como esta tem ligação interfoliar frágil, há maior facilidade de penetração da cal.

3.1.2. CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS SOLO-CIMENTO E SOLO-CAL COMPACTADOS

Conforme registros da literatura, as alterações nos sistemas solo-estabilizante compactados são o aumento do limite de plasticidade, a diminuição do limite de liquidez e o achatamento das curvas de compactação com aumento do teor ótimo de umidade e diminuição da massa específica aparente seca máxima.

Svenson (1981) observou estas modificações no estudo da estabilização de um solo podzólico vermelho amarelo, textura argilosa ($A_{2-4(0)}$), com cal nos teores de 0%, 3%, e 5%, sendo que o peso específico aparente seco máximo sofreu um decréscimo do seu valor com o acréscimo do teor de cal, enquanto que, para a umidade ótima, os aumentos foram proporcionais ao acréscimo do teor de cal.

Os solos com índices de plasticidade e limites de liquidez elevados são mais difíceis de serem estabilizados, contudo quando o solo-estabilizante é utilizado na fabricação de elementos construtivos, uma pequena plasticidade faz-se necessária para transmitir às peças produzidas uma coesão suficiente para que possam ser manuseadas. Afritos e Ferreira (1986), estudando a estabilização de solos com a utilização de cal e hidróxido de sódio (NaOH) diluído em água, relataram que a adição de cal reduziu consideravelmente o índice de plasticidade da mistura, enquanto que a soda teve comportamento similar ao de um desfloculante.

As características físico-mecânicas tanto do solo-cimento como do solo-cal compactados dependem do tipo de solo (granulometria, fração argila, grau de plasticidade), do tipo e teor do agente estabilizante, e das condições de compactação e cura.

Dependendo dos teores percentuais de argilas caulinita, ilita e montmorilonita, presentes no solo, pode-se indicar o melhor tipo de estabilizante a ser adicionado a esse determinado solo. Em solos da região de Ilha Solteira (SP), segundo Alcântara et al. (1995), é predominante a presença no solo de caulinita e hematita; estes solos, quando estabilizados com

6% ou 8% de cal, apresentam ganhos de resistência à compressão com o decorrer do tempo, embora em níveis inferiores aos dos solos estabilizados com 10% de cimento, nos quais se observam melhores desempenhos mecânicos.

Quanto mais fina a granulometria do solo, maior é sua área específica, o que significa que a área a ser envolvida pelo aglomerante é maior. De um modo geral, solos de granulometria desuniforme são ideais, pois além de requererem menor teor de estabilizante, os espaços existentes entre os grãos maiores são preenchidos por partículas menores do próprio solo e, neste caso, os produtos formados das reações de solo-aditivo, ao invés de preencher os vazios, agem de forma integral na ligação entre os grãos. Quando a granulometria do solo não é adequada, pode-se corrigi-la adicionando-se outros tipos de solo, tal como nos trabalhos realizados por Sousa e Barbosa (2000), quando dois tipos de solo caracterizados como arenosos foram corrigidos com a adição de finos (silte + argila), assim promovendo a coesão do solo para moldagem de tijolos prensados.

O teor ótimo de cimento ou cal a ser adicionado ao solo depende dos critérios técnicos (resistência, durabilidade) que se pretende alcançar. Abiko (1985), ao analisar sistemas de solo-cimento e solo-cal para componentes de alvenaria, indicou, para solos arenosos, o traço de 1:10, 1:12 e 1:14 (cimento: solo seco, em volume) e, para solos argilosos, a adição de 5% a 10% (em massa) de cal.

As propriedades físico-mecânicas (resistência à compressão, absorção d'água e durabilidade) do sistema solo-cal e solo-cimento compactados estão intimamente relacionadas com as condições de cura (umidade e temperatura) e compactação, ou seja, deve-se trabalhar com umidades de moldagem em torno do teor ótimo pois, quanto mais denso o sistema, maior a sua resistência. Quanto maior for o efeito da estabilização do solo, menor deve ser a perda de massa, indicando que o componente construtivo possui durabilidade e resistência (PICCHI et al., 1990).

Svenson (1981) estudou a estabilização de um solo podzólico vermelho amarelo, textura argilosa (A_{2-4} , IG = 0), com cal nos teores de 0%, 3%, e 5%, sendo os corpos-de-prova curados aos 14, 28 e 90 dias, em três condições de umidade, antes de serem ensaiados. Foram realizados ensaios de compressão simples, de tração na compressão diametral, assim como de análise mineralógica. Para os valores de resistência à compressão simples, houve um acréscimo com o aumento do teor de cal aplicado, bem como com o tempo de cura, em relação

ao solo natural. No entanto, para o teor de 3% de cal, houve uma diminuição na resistência de aproximadamente 5%, para os períodos de cura de 14 e 90 dias. No caso específico da resistência à tração na compressão diametral, houve um aumento com a adição da cal, ganho este não significativo com o acréscimo de 3% para 5%, nem com o acréscimo do tempo de cura.

Mendonça et al. (1996) estudaram a estabilização de dois solos da região de Viçosa (MG) utilizando a cal como estabilizador e cura acelerada, e concluíram que a atividade pozolânica entre a cal e o solo está ligada à temperatura de cura. Quando curada à baixa temperatura, o aumento na resistência mecânica das misturas é pequeno, ao passo que, para temperaturas mais elevadas, essas resistências evoluem com extrema rapidez.

3.1.3. SOLO-CIMENTO COMO COMPONENTE CONSTRUTIVO

A partir de pesquisas mais aprofundadas sobre a estabilização do solo com cimento, o mesmo passou a ser usado, principalmente na pavimentação de estradas. Somente ao final da década de 1940, através de algumas instituições como a Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP, o Centro de Pesquisas e Desenvolvimento de Camaçari/BA – CEPED, e o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT , o Brasil resolveu utilizar o solo-cimento como material alternativo de construção.

Walker (1995) fabricou blocos prensados de solo estabilizado com cimento Portland, utilizando solo argiloso corrigido com areia de rio para melhorar as reações de estabilização com o cimento e as condições de trabalhabilidade. As proporções da mistura do solo argiloso : areia foram entre 100% solo : 0% areia e 15% solo : 85% areia (em volume), resultando em dois tipos de solos corrigidos. Já a adição de cimento nos solos corrigidos foram de 1:10, 1:15 e 1:20 (cimento : solo corrigido, em volume). Após a prensagem manual, os blocos apresentaram-se nas dimensões de 295 mm x 140 mm x 130 mm e foram recobertos com plástico durante 28 dias, e umedecidos nos sete primeiros dias. Com os resultados dos ensaios de compressão simples, durabilidade por ciclos de molhamento e secagem, e retração na secagem aplicados nos blocos, o autor relacionou o índice de plasticidade do solo com a quantidade de cimento adequada para obter determinada resistência à compressão dos blocos na condição saturada (**Tabela 1**). O referido autor concluiu que a resistência à compressão e a

durabilidade dos blocos aumentaram com a elevação do teor de cimento e diminuíram com o aumento da porcentagem de argila. Quanto aos valores de retração na secagem, os blocos confeccionados com solo com índice de plasticidade abaixo de 20, foram aceitos, visto que o autor baseou-se no valor limite de retração de 0,10%.

Tabela 1. Quantidade de cimento recomendada (% volume) para obter determinada resistência à compressão do bloco de solo-cimento, a partir do Índice de Plasticidade do solo.

Índice de Plasticidade do solo	Quantidade de cimento recomendada (% em volume) para obter a resistência à compressão do bloco de solo-cimento (saturado)		
	1 MPa	2 MPa	3 MPa
< 15	5%	7%	10%
15 – 20	5%	10%	Inadequado
20 – 25	6,5%	Inadequado	
25 – 30	8,5%		
30 – 35	10%		
> 35	Inadequado		

Fonte: Walker (1995).

No estudo de fissuras em paredes de tijolos de solo-cimento, realizado por Nascimento (1992), foram utilizados, para construção dos painéis, tijolos confeccionados com solos argiloso (A₄), areno-argiloso (A₂₋₆) e arenoso (A₂₋₄) estabilizados com cimento (7%, em massa). Os tijolos foram moldados em prensa hidráulica e, durante a cura, permaneceram úmidos durante 7 dias e protegidos das intempéries. Os resultados de resistência à compressão simples e de absorção d'água (**Tabela 2**) dos tijolos permitiram, à autora, verificar que as resistências ultrapassaram o valor mínimo exigido pela norma, sugerindo que o teor de cimento a ser adicionado no solo poderia ser ainda menor. Com relação aos valores de absorção d'água, os tijolos de solo-cimento apresentaram valores aceitáveis pela norma. Dentre os três tipos de solo utilizados, o que apresentou melhor desempenho frente à resistência à compressão e absorção d'água, foi o solo arenoso.

Tabela 2. Resultados dos ensaios de tijolos de solo-cimento.

Tipo de solo	Resistência à compressão simples (MPa)			Absorção d'água (%)	
	7 dias	28 dias	90 dias	7 dias	28 dias
Argiloso	3,26	3,29	3,58	18,1	17,4
Areno-argiloso	2,48	3,03	3,38	12,9	12,9
Arenoso	3,82	3,90	4,55	12,9	11,9

Fonte: Nascimento (1992).

Ferreira (2003) estudou a resistência à compressão simples e absorção d'água do material solo-cimento através da determinação experimental em corpos-de-prova cilíndricos, tijolos e painéis. Os solos utilizados foram A₂₋₄ (arenoso) e A₅₋₆ (argiloso), sendo adicionados a estes solos os teores de 6% e 10% de cimento Portland. Os resultados encontrados pelo autor para resistência à compressão simples e absorção d'água estão mostrados na **Tabela 3**. O referido autor, com base nesses valores, recomendou solos com características semelhantes às daquelas do solo arenoso estudado para estabilização com cimento, sendo um material promissor para o atendimento às demandas por tecnologias apropriadas.

Tabela 3. Caracterização físico-mecânica de misturas de solo-cimento.

Tratamentos	Corpos-de-prova				Tijolos			
	Resistência (MPa)			Absorção (%)	Resistência (MPa)			Absorção (%)
	7 dias	28 dias	56 dias	7 dias	7 dias	28 dias	56 dias	7 dias
aren + 6% cim	0,73	1,31	2,04	10,70	0,77	0,83	0,72	11,86
aren +10% cim	2,09	2,74	4,50	11,00	1,39	1,84	1,83	11,53
arg + 6% cim	0,30	0,44	0,67	27,00	0,50	0,39	0,37	26,09
arg +10% cim	0,67	1,07	1,10	27,80	1,01	0,67	0,60	25,21

Fonte: Ferreira (2003).

Arini (1999), com base nas experiências práticas efetuadas em laboratórios e canteiros de obra, dissertou sobre a tecnologia de produção da alvenaria estabilizada por cimentação, concluindo que tijolos de solo estabilizados com 6% de cimento, em volume, são mais indicados para utilização como tijolos estruturais, e tijolos estabilizados com 1% ou 2% de cimento, em volume, para utilização como material de vedação.

Cartilhas como “O Solo-Cimento na Fabricação do Tijolo Modular”, produzida pela empresa Sahara (1998); livros e boletins técnicos como “Manual de Construção com Solo-Cimento”, produzido pelo CEPED (1984a), o “O Solo-Cimento e suas Aplicações Rurais”, produzido pela ABCP (1989), o “Solo-Cimento para fins construtivos” de Myrrha (2003); relatórios técnicos como “Paredes Monolíticas de Solo-Cimento: Hospital Adriano Jorge”, produzido pela ABCP (1979), etc., ajudaram a difundir as técnicas construtivas do sistema solo-cimento, bem como apresentar ao usuário as vantagens e confiabilidade que se deve ter no produto.

Neves (1990) relatou as atividades realizadas pelo CEPED dentro do seu Programa de Tecnologia de Habitação – THABA, relacionadas com a determinação de parâmetros de resistência; a durabilidade e impermeabilidade do sistema solo-cimento compactado; o desenvolvimento de sistemas construtivos simples e de fácil aprendizagem; a transferência deste processo de construção através de cursos, manuais e publicações; a redução dos custos de produção e de energia; as avaliações pós-ocupação com satisfação do usuário, etc. Os resultados mostraram que o solo-cimento compactado oferece características adequadas para seu emprego na execução de paredes monolíticas.

O objetivo do trabalho de Soares et al. (2004) foi apresentar os resultados dos ensaios de estabilização com cimento de dois solos da cidade de Santa Maria-RS, através dos quais tornou-se viável a construção de uma habitação com paredes monolíticas de solo-cimento. O estudo compreendeu a estabilização de dois solos (A_{2-4} A_{1-b}) com cimento tipo CP-IV, utilizando-se os traços 1:12, 1:13 e 1:15 (cimento : solo) em massa. Foram moldados 6 corpos-de-prova para cada traço, sendo 3 para ruptura aos 7 dias de idade e 3 para 28 dias. A **Tabela 4** apresenta os resultados médios de resistência à compressão dos corpos-de-prova, na qual os autores observaram que todos os traços das duas amostras de solos atenderam à especificação do CEPED, que recomenda a resistência mínima à compressão de 1 MPa (aos 28 dias de idade) para uso em paredes monolíticas de solo-cimento.

Tabela 4. Tensões de ruptura (MPa) de corpos-de-prova de solo-cimento.

Amostra de solo	Traço 1:12		Traço 1:13		Traço 1:15	
	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
A ₂₋₄	1,70	2,90	1,70	2,44	1,60	2,10
A _{1-b}	1,83	2,80	1,69	2,50	1,67	2,45

Fonte: Soares et al. (2004).

Quanto à construção da casa de solo-cimento, Soares et al. (2004) utilizaram o solo A₂₋₄ e o traço 1:12, em função da durabilidade. A fundação da casa foi feita em concreto ciclópico, as paredes monolíticas foram executadas através da compactação do solo dentro de fôrmas, em camadas de 15 cm, com um soquete com peso variando de 2,5 kg a 3,0 kg, sendo as paredes internas construídas com 13,5 cm de espessura e as externas com 20 cm. Segundo relatos finais dos autores, a técnica de construção de habitações com paredes monolíticas pode ser adotada facilmente, necessitando de uso de ferramentas simples e proporcionando geração de trabalho e renda para a mão-de-obra pouco qualificada. A habitação possui bom estado de conservação após 1 ano de uso, não havendo trincas nas paredes e infiltração de umidade, comprovando seu bom desempenho frente às intempéries. O excelente conforto térmico, a boa resistência e aparência da habitação foram as características do sistema construtivo que causaram a satisfação do proprietário.

Dentro do Programa de Melhoria da Moradia dos Funcionários de Baixa Renda da Universidade Federal de Goiás (Conjunto Nossa Morada, Goiânia-GO), Ferreira et al. (2003) estudaram tijolos prensados de solo-cimento, em paredes de alvenaria auto-portante, empregados no referido programa habitacional, comparando-os com tijolos maciços comuns e tijolos furados, com o intuito de definir critérios de aplicação prática, controle de patologias e comparação de custos. Foi empregado, na fabricação dos tijolos de solo-cimento, um solo A₆₍₁₎, tendo sido corrigida sua granulometria com a adição de 10% de areia média, e a ele incorporado o teor de 10% de cimento Portland (CP II-E 32). Na fabricação dos tijolos foi empregada uma máquina de fabricação de tijolos de acionamento mecânico e a cura foi efetuada, após 6 horas de moldagem e durante os sete primeiros dias, com aspersão de água através de regador munido de chuveiro em um galpão de modo a evitar os efeitos do vento e a

incidência dos raios solares. De todos os lotes de tijolos de solo-cimento foram retirados três tijolos os quais foram submetidos aos ensaios de compressão simples e absorção d'água (Tabela 5).

Tabela 5. Resistência à compressão simples e capacidade de absorção d'água dos tijolos de solo-cimento.

Repetições	Resistência à compressão simples (MPa)			Absorção d'água (%)
	7 dias	28 dias	56 dias	7 dias
Amostra 1	2,21	2,72	3,86	14,40
Amostra 2	1,98	2,58	3,20	14,70
Amostra 3	2,15	2,60	3,37	15,00
Média	2,11	2,63	3,48	14,70

Fonte: Ferreira et al. (2003).

Ferreira et al. (2003) observaram um período de 28 dias entre a fabricação e o uso dos tijolos a fim de se garantir que os efeitos da retração volumétrica devido à secagem fossem minimizados. Para a fabricação da casa de tijolos de solo-cimento, a fundação empregada pelos autores foi a do tipo direta e contínua, através do assentamento de dois tijolos em espelho e posterior preenchimento com concreto. Para o assentamento dos tijolos de solo-cimento utilizaram-se da argamassa de traço 1:2:9 (cimento, cal e areia média) em volume e fator água/cimento 0,50 e, para cobertura, lajes confeccionadas através da combinação de vigotas pré-moldadas de perfil triangular (10x10x10 cm³) e lajotas (20x20x10 cm³). Devido ao ótimo acabamento final, a alvenaria de tijolos de solo-cimento foi entregue com paredes internas sem revestimento, sendo, no entanto, as paredes externas impermeabilizadas. Ao final da construção, os referidos autores puderam notar que a ocorrência de fissuras na casa de solo-cimento foi mais de ordem estética do que estrutural. Em relação à parte econômica, dentro das mesmas condições de comparação, o custo da casa de tijolo de solo-cimento foi 17,5% menor do que o da casa de tijolo maciço comum, e 85% menor do que o da casa de tijolo furado.

3.1.4. SOLO-CAL COMO COMPONENTE CONSTRUTIVO

O sistema solo-cal, apesar de suas antigas aplicações e intensivas pesquisas, e apesar de ser um material de boa funcionalidade e reduzidos custos, ainda não possui uma normatização. No entanto, centros de tecnologias e pesquisas e até mesmo setores industriais da construção, lançaram cartilhas para a difusão deste sistema, a exemplo da Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial - NUTEC (1985) com o “Manual de Fabricação de Tijolos de Solo-Cal”.

Akasaki (1999), avaliando o comportamento de misturas de solo-cal como alternativa para a fabricação de tijolos maciços crus, verificou a grande potencialidade da mistura, respondendo o solo areno-argiloso (A₄) mais favoravelmente ao tratamento com cal. Segundo o autor, os teores de cal recomendados para se alcançar maior resistência da mistura variaram entre 4% a 10%, tendo o teor 10% de cal promovido maiores valores de resistência à compressão simples e tração na compressão diametral no decorrer de 180 e 360 dias.

Picchi et al. (1990) utilizaram solo latossólico e cal cálcica para a confecção de tijolos de solo-cal em prensa manual. Após a realização dos ensaios, os autores concluíram que a resistência à compressão do tijolo cresce com o teor de cal, mas apresenta um pico para o teor de 10% de cal e para o tempo de cura ambiente de 28 dias, tendo este teor apresentado melhor comportamento frente à variação dimensional, absorção d'água, durabilidade e resistência à compressão simples. Observaram, também, o comportamento dos tijolos com relação ao tipo de cura durante 91 dias e ressaltaram a importância da manutenção da umidade. Os valores de resistência dos tijolos de solo-cal, após cura de 28 dias em ambiente natural, atingiram 2 MPa, estando os teores de absorção d'água compreendidos entre 20,6% e 25,6%.

Alcântara et al. (1996) pesquisaram a estabilização de solos com cal em construções rurais, visando como principal objetivo a avaliação da resistência mecânica final do material solo-cal quando consideradas as influências das condições de preparo e de exposição. A estabilização de solos com cal é mais eficiente em solos argilosos ou argilo-siltosos, por apresentarem bom desempenho mecânico quando adicionados de 8% de cal hidratada. Os corpos-de-prova e tijolos de solo-cal foram curados nas condições mostradas nas **Tabelas 6 e**

7. Os resultados de resistência à compressão simples, também mostrados nas **Tabelas 6 e 7**, levaram Alcântara et al. (1996) às seguintes conclusões: o desempenho do material sob o ponto de vista da manutenção de resistência independeu do tipo de exposição ao meio externo; mas, com relação às condições de preparo, a impossibilidade de um controle rigoroso do grau de compactação para a confecção de tijolos resultou em valores de resistência à compressão simples de 0,65 MPa para tijolos e 1,28 MPa para corpos-de-prova aos 30 dias de idade (ensaios realizados após 24 h de imersão dos mesmos), visto que os corpos-de-prova foram moldados em prensa de mini-CBR e os tijolos, em prensa manual.

Tabela 6. Resistência à compressão simples de corpos-de-prova de solo-cal (MPa).

Idade	Selados	Expostos ao ambiente interno	Expostos ao ambiente externo	Imersos em água
6 meses	3,3	2,1	1,5	2,3
12 meses	1,6	1,9	1,4	2,4

Fonte: Alcântara et al. (1996).

Tabela 7. Resistência à compressão simples de tijolos de solo-cal (MPa).

Idade	Selados	Expostos ao ambiente interno	Expostos ao ambiente externo	Imersos em água
6 meses	1,8	1,3	1,1	1,4
12 meses	1,4	1,9	1,8	1,8

Fonte: Alcântara et al. (1996)

Guimarães (1997) relatou que painéis de tijolos de solo-cal, construídos em local sem qualquer proteção, expostos às intempéries por 4 anos, não apresentaram defeitos em qualquer das variações – tijolo à vista ou tijolo revestido, suportando bem a aplicação de carregamentos normais. Para a fabricação destes tijolos, utilizou-se o teor de 10% de cal hidratada, sendo os mesmos prensados manualmente no teor de umidade ótima fornecido pelo “teste do bolo”. A cura ambiente dos painéis observou o procedimento adotado de 3 dias recobertos com plástico e 7 dias expostos às intempéries, sendo umedecidos diariamente. Quanto à resistência à compressão simples, houve ganhos nos valores com o decorrer do tempo: 30 dias – 0,86 MPa;

120 dias – 0,94 MPa; 180 dias – 2,07 MPa, reforçando o conceito da continuidade dos processos das reações de formação de compostos cimentantes na mistura solo-cal.

Ferreira (2003) estudou a resistência à compressão simples e absorção d'água do material solo-cal através da determinação experimental em corpos-de-prova cilíndricos e tijolos. Os solos utilizados foram A₂₋₄ (arenoso) e A₅₋₆ (argiloso), sendo adicionados a estes solos os teores de 6% e 10% de cal hidratada. Os resultados encontrados por Ferreira (2003) para resistência à compressão simples e absorção d'água estão mostrados na **Tabela 8**, no entanto, segundo o autor, nenhum resultado foi satisfatório em termos de desempenho físico-mecânico para utilização como material de construção.

Tabela 8. Caracterização físico-mecânica de misturas de solo-cal.

Tratamentos	Corpos-de-prova				Tijolos			
	Resistência (MPa)			Absorção (%)	Resistência (MPa)			Absorção (%)
	7 dias	28 dias	56 dias	7 dias	7 dias	28 dias	56 dias	7 dias
aren + 6% cal	0,27	0,28	0,24	10,30	0,54	0,74	0,79	13,79
aren +10% cal	0,29	0,29	0,29	12,90	0,45	0,76	0,92	13,40
arg + 6% cal	0,61	0,72	0,65	26,00	1,52	1,17	0,60	26,01
arg +10% cal	0,85	0,89	0,92	26,10	2,00	2,14	1,08	27,09

Fonte: Ferreira (2003).

3.2. COMPÓSITOS À BASE DE BIOMASSA VEGETAL E AGLOMERANTES MINERAIS

3.2.1. CASCA DE ARROZ

A utilização da biomassa vegetal vem apresentando um grande potencial de reaproveitamento na área da construção rural e civil, requerendo uma avaliação não só nos aspectos econômicos como nos aspectos tecnológicos (resistência mecânica, módulo de

elasticidade, afinidade com os aglomerantes minerais, estabilidade química e geométrica, durabilidade e destino final do produto).

Sarmiento (1996) definiu o termo geral biomassa vegetal como sendo as inúmeras variedades de matéria-prima vegetal resultantes das atividades agrícolas, florestais e agroindustriais, dentro das quais estariam compreendidas as partículas e fibras vegetais. Tal biomassa vegetal pode exercer a função de enchimento ou reforço da matriz.

Dentre as variedades da biomassa vegetal, a atividade agroindustrial de beneficiamento de arroz destaca-se pela elevada produção do resíduo casca de arroz. Dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2004) mostraram que o Brasil produziu cerca de 10,3 milhões de toneladas de arroz em casca no ano de 2003, o que equivale a cerca de 2,1 milhões de toneladas de casca de arroz (cascas de arroz representam cerca de 20% do peso do grão). A região sul do Brasil, no ano de 2003, foi a maior produtora nacional de arroz em casca, com aproximadamente 57% da produção total do país (**Tabela 9**).

Tabela 9. Produção de arroz em casca no Brasil – safra 2003.

Região	Produção (toneladas)	Produção Nacional (%)
Norte	1.264.568	12,3
Nordeste	1.099.113	10,6
Sudeste	309.391	3,0
Sul	5.925.125	57,3
Centro-Oeste	1.736.406	16,8
Brasil	10.334.603	100,0

Fonte: IBGE - Levantamento sistemático da produção agrícola, 2003.

Diversos autores citados por Silveira et al. (1996) definiram a casca de arroz como sendo uma capa lenhosa oca, dura e altamente silicosa, composta por 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica, em base anidra.

Segundo o Conselho de Desenvolvimento Industrial (1985), a casca de arroz é correntemente queimada a céu aberto ou utilizada como combustível (queima da casca em fornalhas para secagem de grãos), produzindo toneladas de cinzas que acabam poluindo o meio ambiente.

Baker (1992) relatou que a situação da queima indiscriminada de palha e casca de arroz é agravante na região da Califórnia – Estados Unidos, pois a fumaça e as cinzas produzidas estão causando sérios problemas de saúde à população, inclusive raros tipos de câncer.

3.2.2. COMPÓSITOS

Beraldo (1997) definiu compósito biomassa vegetal – aglomerante mineral (CBVC), como sendo a associação da biomassa vegetal com um aglomerante mineral qualquer (cimento Portland, cimento magnesiano, cal, gesso, etc.) e, em certos casos, aditivos (aceleradores, plastificantes, etc.) que, em função das diferentes proporções de constituintes e da granulometria das partículas vegetais utilizadas, pode levar à obtenção de uma larga faixa de produtos.

Freire (1991) relatou que a presença de fibras em matrizes cimentantes introduz modificações ao sistema, tais como: acréscimo de resistência à tração (principalmente fibras de alto módulo de elasticidade), acréscimo na resistência ao impacto (caso de fibras de baixo módulo de elasticidade), controle da fissuração e mudança do comportamento na ruptura (devido à ductilidade conferida ao compósito).

Conforme dados da literatura, para a obtenção de um compósito com características físico-mecânicas desejáveis, é necessário que o processo de fabricação garanta um certo grau de adensamento, adequada porosidade e um bom envolvimento das fibras pela matriz, o que se consegue via compactação manual, prensagem ou vibração. Outra exigência importante são as dimensões (comprimento, diâmetro) e volume das fibras a serem adicionadas aos compósitos, pois valores excessivos comprometem a interação entre a fibra e a matriz, aumentando a porosidade e o volume de água de amassamento e tornando pouco significativo o ganho de resistência à tração.

Rim et al. (1999) estudaram a influência da proporção de partículas de madeira sobre as propriedades térmicas e mecânicas de compósitos feitos de argila + cimento + partículas de madeira. As amostras do compósito tinham as seguintes composições em peso: a) 10% de agregado de madeira: 60% madeira do norte (conífera) e 40% madeira dos trópicos (Ag) + 70% de argila (Cl) + 20% cimento CPA CEM I 52,5 (Ce) + 71% de água (W%); b) 20% Ag + 60% Cl + 20% Ce + 79% W; c) 30% Ag + 50% Cl + 20% Ce + 87% W; d) 40% Ag + 40% Cl + 20% Ce + 95% W. Os autores concluíram que a adição de madeira na mistura melhorou as características de isolamento térmico, com aumento na capacidade de deformação do compósito, e redução nas propriedades mecânicas de compressão.

Coutts e Ni (1995) avaliaram o comprimento de fibras de *Pinus radiata* quanto à resistência à flexão e à resistência à propagação de fissuras em compósitos bem como a relação da resistência mecânica com o aumento do volume de fibras. Foram utilizadas fibras com comprimentos entre 0,3 mm e 3,13 mm. Os resultados indicaram um aumento na resistência à flexão com o aumento no comprimento da fibra, mas uma diminuição da resistência com o aumento no volume de fibras. Os autores também constataram aumento na resistência à propagação de fissuras com o aumento no comprimento das fibras, o que significa maior energia necessária para arrancar as fibras da matriz, garantindo a elas melhor capacidade de absorver impactos.

Com o objetivo de avaliar os resíduos fibrosos fibra de sisal bucha de campo, sisal bucha de máquina da produção de *baler twine*, fibrinhas extraídas do pó residual do coco, rejeito de polpa celulósica de eucalipto, fibra do pseudocaule da bananeira, e malva tipo 4, Savastano Jr. (2000) produziu compósitos com matriz de argamassa de cimento Portland CP II-32 F e areia e as fibras vegetais mencionadas anteriormente. Para a mistura e moldagem manual dos compósitos, o autor utilizou relação água/cimento 0,5, relação cimento : areia de 1 : 1,5, teor em volume de fibras de 2%, e comprimento das fibras da ordem de 1 a 3 cm. Os corpos-de-prova de compósitos, após a cura por imersão em água, durante 7 dias, e ao ar, até completar 42 dias de idade, foram submetidos aos ensaios de tração na flexão com quatro cutelos, compressão axial e tração na compressão diametral. Analisando os resultados das propriedades mecânicas (**Tabela 10**) destes compósitos, Savastano Jr. (2000) associou as baixas resistências mecânicas ao maior volume de vazios, porém com a compensação de aumento da energia absorvida pelas fibras, durante o processo de fissuração da matriz frágil. O

autor concluiu que o uso de macrofibras (feixes de células individuais) trouxe o inconveniente da difícil homogeneidade no interior da matriz, o que afetou negativamente a compacidade do compósito, reduziu a superfície de contato da fibra-matriz, e, conseqüentemente, revelou os baixos valores de resistências mecânicas dos compósitos cimentícios reforçados com macrofibras vegetais. Em destaque entre os compósitos pesquisados, a fibra de sisal bucha de *baler twine* originou o compósito de melhor desempenho frente à absorção de energia no ensaio de flexão, demonstrando bom desempenho da fibra-matriz na condição pós-fissurada.

Tabela 10. Propriedades mecânicas dos compósitos à base de argamassa de cimento Portland e areia.

Fibra vegetal	Resistência à tração na flexão aos 42 dias (MPa)	Energia de fratura na flexão aos 42 dias (N.mm)	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	Resistência à tração aos 28 dias (MPa)
Padrão sem fibra	5,84	283	37,3	4,61
Sisal bucha de campo	3,44	237	19,8	2,82
Sisal bucha de <i>baler twine</i>	5,20	4097	17,7	3,88
Coco pó residual	4,48	440	25,8	3,95
Rejeito de polpa de eucalipto	5,32	417	23,2	3,68
Pseudocaule da bananeira	4,54	341	22,5	3,48
Malva tipo 4	4,75	1338	16,1	3,69

Fonte: Savastano Jr. (2000).

O CEPED (1984b) analisou o comportamento das fibras de coco e de sisal em argamassas, considerando os seguintes aspectos: variação da matriz, sendo testadas argamassas de cimento Portland comum e areia fina e uma argamassa de cimento, cal e areia; variação do processo de fabricação, testando a compactação, a vibração e a prensagem na moldagem de vigas de compósitos; variação do fator água/cimento, tendo em vista a trabalhabilidade. Foram efetuados ensaios à flexão nas vigas e determinações da absorção d'água, porosidade e massa específica das mesmas. Avaliando os resultados destes ensaios, o

CEPED (1984b) relatou que a adição de fibra de sisal nas argamassas aumentou a resistência à flexão do compósito. Mesmo utilizando uma matriz com cal, não se observou melhoria na trabalhabilidade do compósito cimento–fibra vegetal. Quanto à influência do método de fabricação de vigas de compósitos, a prensagem do material durante sua moldagem acarretou valores de massa específica aparente e resistência à flexão mais elevados, e valores de porosidade e de absorção d'água menores.

Avaliando o comportamento do compósito solo-fibras vegetais, Ghavami et al. (1999) concluíram que a introdução de 4% de fibras de sisal ou de fibras de coco (ambas com comprimento de 50 mm) no solo da região de Taperoá – Paraíba conferiu considerável ductibilidade ao compósito e um aumento não significativo da resistência à compressão. Para diminuir a absorção d'água pelas fibras, os autores aplicaram tratamentos impermeabilizantes (produtos químicos Cipla e Piche), mas não observaram redução significativa na capacidade de absorção das fibras.

Prabakar e Sridhar (2002) verificaram o comportamento mecânico de um solo (características areno-siltosas) adicionado de fibras de sisal, sendo utilizado para confecção da misturas de solo-sisal os teores de 0,25 – 0,50 – 0,75 – 1,00% de sisal, em peso, e quatro comprimentos de fibras, compreendo 10, 15, 20 e 25 mm. Para estudar os efeitos do volume e dimensões da fibra de sisal nas propriedades físico-mecânicas do solo-fibra, foram aplicados os ensaios de compactação e compressão triaxial. Com os resultados desses ensaios, os autores concluíram que a fibra de sisal pode ser considerada um bom reforço da matriz solo.

Jauberthie et al. (2003) estudaram misturas compostas por cimento e casca de arroz, utilizando o traço 1:0,33:0,56 (cimento : casca de arroz : água). Para analisarem a evolução das propriedades físico-mecânicas das argamassas de cimento-casca de arroz, os autores armazenaram, durante 1 ano, os corpos-de-prova de cimento-casca de arroz nas seguintes condições: temperatura de 20 °C e 50% umidade relativa, e 20 °C e 95% umidade relativa. Comparando os resultados entre as argamassas armazenadas em umidade relativa baixa (50%) e argamassas armazenadas em umidade relativa alta (95%), os autores concluíram que as condições ambientais interferiram de forma significativa nas propriedades do material, sendo que a umidade baixa levou as misturas de cimento-casca de arroz a baixos valores de resistência à compressão e altos valores de resistência à flexão, assim indicando a ação das fibras como reforço da matriz cimentante. Já as argamassas de cimento-casca de arroz na

condição de umidade alta apresentaram bom desenvolvimento das reações pozolânicas, porém houve deterioração da casca de arroz.

3.2.3. INCOMPATIBILIDADE QUÍMICA ENTRE A BIOMASSA VEGETAL E O CIMENTO

De acordo com diversos pesquisadores, as principais vantagens que o compósito apresenta na aplicação como material de construção são: leveza, bom isolamento térmico, relevante absorção acústica, considerável resistência à tração e grande disponibilidade de matéria-prima para sua confecção. Porém, segundo vários pesquisadores, a maior desvantagem está na incompatibilidade entre a biomassa vegetal e a matriz cimentante.

As fibras vegetais são compostas por grande número de células fibrosas, aglomeradas por meio de substâncias intercelulares amorfas. Os principais constituintes das fibras são a celulose, a hemicelulose e a lignina. Além destes, as fibras contêm numerosas substâncias naturais tais como: taninos, resinas e extrativos. A biomassa vegetal se degrada em meio alcalino devido às substâncias presentes na mesma (principalmente lignina e hemicelulose) que sofrem decomposição química (hidrólise, lixiviação), e, em consequência, destroem o arranjo estrutural das fibras (AGOPYAN, 1991). Assim, a capacidade de reforço das fibras e a resistência mecânica do compósito diminuem e, conseqüentemente, o produto final apresenta instabilidade dimensional.

Além do problema da degradação da biomassa vegetal em meio alcalino, os constituintes das fibras vegetais (em particular os açúcares), em contato com a água de amassamento, solubilizam-se e inibem a pega do cimento, o que afeta negativamente as reações de hidratação do cimento (tempo e temperatura máxima de hidratação). Beraldo (1997) afirmou que os fatores que afetam a compatibilidade química entre a biomassa vegetal e o cimento são: escolha da natureza da biomassa vegetal, época de corte, tipo de estocagem, e distribuição em tamanho (comprimento e diâmetro) das partículas vegetais.

Para se avaliar a compatibilidade entre a biomassa vegetal e o cimento, os ensaios laboratoriais mais utilizados são: medida do calor de hidratação e verificação do comportamento mecânico da mistura mediante ensaios de compressão simples ou de tração na compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos.

Pesquisas realizadas por Zucco (1999) confirmaram o efeito da granulometria de partículas vegetais nas características de hidratação do cimento. A mistura de casca de arroz moída, nas frações granulométricas definidas de 10 mm, 5 mm e 3 mm, com pasta de cimento (CP V-ARI) e 3% de cloreto de sódio, revelou que, quanto mais finas fossem as partículas utilizadas na mistura, maior seria o aumento no tempo necessário para ocorrer o pico de temperatura e, conseqüentemente, a diminuição substancial da temperatura máxima de hidratação.

Latorraca (2000), variando o tipo de cimento, espécies de madeira *Eucalyptus* e a granulometria de partículas do compósito cimento-madeira, concluiu que, dentro das características da termometria (temperatura máxima de hidratação e tempo para atingir máxima temperatura) e resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos, o cimento Portland ARI foi o mais adequado para o uso em chapas de cimento-madeira. Com relação às espécies de madeira, as *Eucalyptus robusta* e *Eucalyptus urophylla* foram as que apresentaram os melhores resultados em termos de temperatura e tempo de hidratação do cimento e compressão axial, dentre as espécies estudadas; contudo, a granulometria das partículas teve influência significativa na resistência à compressão axial, tendo aquelas de tamanho intermediário proporcionado resistências mais elevadas.

Outro ensaio freqüentemente utilizado para a caracterização de compósitos é a aplicação de técnicas não destrutivas como ultra-som, que consiste na emissão de 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 (BERALDO, 1997b). Segundo o autor, o ensaio revela grandes potencialidades sempre que venha acompanhado de correlações com outros ensaios.

No caso do concreto e da madeira, o método acústico do ultra-som já vem sendo utilizado há vários anos para a determinação de diversos parâmetros, tais como resistência à compressão simples e módulo de elasticidade dinâmico ou módulo dinâmico de Young, além da detecção de patologias e defeitos (BERALDO et al., 2000).

Bodig e 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.

Martins (2002), estudando compósitos à base de argamassa reforçada com partículas de bambu, encontrou forte correlação matemática entre os dados de velocidade ultra-sônica e os de resistência à compressão simples, sendo a curva de potência o modelo de regressão que melhor se adequou à dispersão dos dados.

Ferreira (2003) aplicou ensaios destrutivos e não destrutivos em corpos-de-prova confeccionados de solo adicionado de aditivos químicos (cimento, cal, silicato de sódio), e observou a ocorrência de boas correlações entre a velocidade de propagação do pulso ultra-sônico e a resistência à compressão simples.

Mesa Valenciano (2004), ao estudar a durabilidade de compósitos à base de cimento e reforçados com materiais lignocelulósicos, determinou as resistências à compressão simples e velocidades ultra-sônicas desses compósitos e afirmou que estas variáveis estão correlacionadas entre si, sendo que as equações de regressão que melhor se ajustaram foram as do tipo exponencial.

Por outro lado Zucco (1999), aplicando o ensaio de ultra-som em compósitos fabricados com argamassa e casca de arroz, não encontrou correlação entre a velocidade de propagação da onda ultra-sônica com a resistência à compressão paralela à superfície das placas. O autor relatou que a dispersão dos valores encontrados pode ser explicada pela presença de biomassa vegetal no compósito, a qual, possivelmente, interferiu na propagação da onda em função da aleatoriedade da disposição das partículas.

Beraldo et al. (2000a) verificaram a adequação do uso do método da impulsão ultra-sônica no estudo do comportamento dos compósitos à base de partículas tratadas de bambu e pasta de cimento. Os autores destacaram que a evolução da velocidade de propagação da onda ultra-sônica através dos corpos-de-prova obedeceu a uma lei exponencial, tendendo a estabilizar-se em torno de uma semana após a fabricação. Quando foi efetuada a cura ao ar livre, não foi possível, segundo os autores, separar a influência da umidade do corpo-de-prova da magnitude da velocidade, pois os resultados foram mascarados por modificações ocorridas na estrutura do material durante a secagem.

3.2.4. TRATAMENTOS PARA MINIMIZAÇÃO DA INCOMPATIBILIDADE QUÍMICA

Diversos estudos visando minimizar o efeito negativo das substâncias inibidoras contidas na biomassa vegetal em presença do cimento, apresentaram, como solução, pré-tratamentos físicos e/ou químicos para as partículas vegetais.

Beraldo (1997) indicou os seguintes tratamentos: lavagem das partículas em água quente ou solução aquosa, que permite a remoção de extrativos que se solubilizam na água, e a utilização de aceleradores de pega (como o cloreto de cálcio, sulfato de alumínio e silicato de sódio), que fazem com que o cimento se hidrate antes que os constituintes das partículas vegetais afetem a reação de hidratação do cimento. Alguns autores citados por Agopyan (1991) sugeriram a impregnação das partículas vegetais com agentes repelentes à água (como o neutrol) ou a impregnação das mesmas (“mineralização”) com agentes bloqueadores das reações de decomposição (como silicatos e sulfatos de sódio, magnésio ou alumínio).

Análises de resíduos agroindustriais, após lavagem à quente, mostraram que o teor de carboidratos solúveis (CHOS), presentes no bagaço de cana-de-açúcar, foi reduzido em 88%, enquanto que óleos e resinas encontrados no pó de serra e casca de arroz foram eliminados, minimizando em grande parte as possíveis reações inibitórias com a matriz cal (AKASAKI e SILVA, 2001).

Grandi (1991) dissertou sobre o uso do pó de serra, como material de construção, em misturas secas e argamassa. Foram moldadas duas séries de corpos-de-prova, a primeira com cimento, pó de serra (diâmetro máximo de 2,4 mm) e água, e cimento, cal, pó de serra e água (sem preocupar-se com o tratamento do pó de serra); a segunda, lavando-se o pó de serra em solução alcalina de água e cal. Segundo o referido autor, dados de relatórios técnicos de química indicaram haver uma quantidade apreciável de extrativos em misturas de cimento e pó de serra sem tratamento. Quanto aos resultados do ensaio de compressão simples, os corpos-de-prova da segunda série apresentaram maiores valores de resistência à compressão.

Beraldo e Zucco (1998) estudaram a viabilidade do uso de casca de arroz em compósito à base de cimento Portland e verificaram a potencialidade apresentada pelo resíduo vegetal, já que a incompatibilidade entre a casca de arroz e o cimento pode ser contornada

com o uso de técnicas simples, como a lavagem da biomassa vegetal em solução aquosa ou adição de aceleradores de pega do cimento.

Estudando a influência de aditivos químicos tais como o SnCl_2 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, FeCl_3 , $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$, AlCl_3 , Diethanolamine (DEA) e CaCl_2 nas reações de hidratação ocorrentes na mistura de madeira, cimento e água, Zhengtian e Moslemi (1985) concluíram que a utilização destes aceleradores resultou na redução significativa dos efeitos inibitórios de substâncias da madeira “western larch” (*Larix occidentalis*) na reação de hidratação do cimento, destacando-se o acelerador CaCl_2 (5% em massa) que, dentre os aditivos estudados, provocou a elevação da temperatura máxima de hidratação em 59 °C e a diminuição do tempo de reação (8 horas).

Para a melhoria do processo de hidratação do cimento em compósitos à base de cimento, areia e serragem, Rashwan et al. (1992) adicionaram às misturas os aceleradores químicos CaCl_2 , MgCl_2 , FeCl_2 e Na_2S , e constataram que, dentre estes aditivos pesquisados, o CaCl_2 foi o que resultou em melhores efeitos positivos no processo de hidratação do cimento, além de apresentar o menor custo.

O comportamento descrito acima foi compatível com os estudos realizados por Latorraca (2000). O autor afirmou que a adição de CaCl_2 (4%) em compósitos de cimento-madeira (*Eucalyptus*) foi o aditivo que melhor desempenhou a função de acelerador de pega e de endurecimento do cimento dentre os aditivos estudados.

Beraldo et al. (2000b) pesquisaram mais profundamente os efeitos da espécie vegetal, do tipo de cimento e do tratamento químico utilizado, sobre a resistência à compressão de compósitos. As espécies vegetais escolhidas para a mistura com pasta de cimento (CP V-ARI e CP II-E-32) foram provenientes de resíduos de fabricação de lápis (*Pinus caribaea*), de serrarias (*Eucalyptus saligna*, *Erismia uncinatum*, *Cedrela sp*) e bambu (*Dendrocalamus giganteus*). Estas passaram por seis tipos de tratamentos que consistiram: utilização natural das partículas vegetais; natural com adição de acelerador CaCl_2 ; natural com adição de acelerador $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$; lavagem das partículas vegetais em água quente por um período de 2 h a 80 °C; lavagem e adição de CaCl_2 ; lavagem e adição de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$. Dentre estes tratamentos, a combinação de lavagem das partículas vegetais e adição de 3% de cloreto de cálcio permitiu homogeneizar a resistência dos compósitos à compressão, independente da espécie vegetal utilizada.

Aplicando o pré-tratamento que compreendeu a imersão das fibras de bagaço de cana-de-açúcar em água fervente durante 30 minutos, e o tratamento químico de “mineralização”, que consistiu na imersão das fibras em solução de silicato de sódio e posteriormente em solução de sulfato de alumínio, Mesa Valenciano e Freire (1999) conseguiram reduzir os teores de açúcar residual encontrados no bagaço e diminuir a capacidade de absorção d’água das fibras de bagaço de cana-de-açúcar após tratamento químico.

3.2.5. COMPÓSITOS À BASE DE BIOMASSA VEGETAL – CIMENTO / CAL COMO COMPONENTE CONSTRUTIVO

Grandi (1995) confeccionou placas pré-moldadas de argamassa de cimento e pó de serra, sendo a moldagem realizada em fôrmas de base porosa, sob adensamento vibratório mecânico, cura feita em condições ambientais normais e desforma após 72 horas. O autor concluiu que o compósito de cimento e pó de serra apresentou comportamento elasto-plástico, alta capacidade de absorção d’água e adequação para utilização em forros e paredes.

Para a fabricação de placas de compósitos à base de cimento e bagaço de cana-de-açúcar, Aggarwal (1995) adotou a relação água / cimento de 0,40 e variou a quantidade de bagaço de cana-de-açúcar entre 5% e 20% (em massa), a pressão de moldagem da placa entre 1 MPa e 5 MPa e a desmoldagem entre 1 h e 10 h. Após a cura de 10 dias e aplicação dos ensaios de absorção d’água, tração na flexão e tração na compressão diametral nos corpos-de-prova de compósitos, o autor concluiu que o bagaço de cana-de-açúcar pode ser utilizado para produção de componentes construtivos de compósitos à base de cimento, recomendando para a confecção de placas a adição de 12% a 16% (em massa) de bagaço, de 2 a 3 MPa de pressão na moldagem e o mínimo de 6 h para a desmoldagem das mesmas. O autor ainda destacou que os compósitos de bagaço-cimento apresentaram-se leves e com bons resultados frente à variação de umidade e secagem, sendo recomendados tanto para uso interno como externo nas construções.

Mesa Valenciano e Freire (1999) fabricaram tijolos prensados de solo-cimento-fibras de bagaço de cana-de-açúcar, utilizando o bagaço mecanicamente desmedulado e tratado quimicamente. Os resultados revelaram o melhor comportamento do solo arenoso quando

estabilizado com 3% de cimento (em massa), e valores satisfatórios de resistência à compressão simples aos 60 dias (2,8 MPa) dos tijolos confeccionados a partir da mistura de solo arenoso + cimento + 20% de bagaço de cana de açúcar (**Tabela 11**). Os autores concluíram que, de um modo geral, os tijolos de solo-cimento-fibra de bagaço de cana de açúcar apresentam altos valores de absorção d'água e baixos valores de resistência quando comparados com tijolos cerâmicos ou mesmo tijolos de solo-cimento.

Tabela 11. Propriedades mecânicas dos tijolos de solo-cimento-bagaço de cana-de-açúcar (médias de três repetições).

Tratamentos	Resistência à compressão simples			Absorção d'água (%)
	7 dias	28 dias	60 dias	
aren + 3% de cimento	0,35	0,46	0,50	13,09
aren + 3% cimento + 10% bagaço	0,79	1,70	1,89	22,75
aren + 3% cimento + 20% bagaço	1,03	2,17	2,80	30,05

Fonte: Mesa Valenciano e Freire (1999)

Zucco (1999) submeteu diferentes frações de casca de arroz (10 mm casca de arroz em sua forma natural; 5 mm e 3 mm frações obtidas por moagem) a alguns tratamentos visando a fabricação de placas de compósito à base de cimento CP V-ARI. Os tratamentos consistiram em: a) lavagem das partículas de casca de arroz em solução de cal; b) lavagem das partículas de casca de arroz em solução de cal e adição de acelerador de pega (cloreto de cálcio) na mistura casca de arroz + cimento + água; c) “mineralização” das partículas de casca de arroz. Após prensagem e cura das placas de compósito à base de cimento e casca de arroz, estas foram submetidas a ensaios de compressão, tendo os dados obtidos mostrados que os melhores resultados foram alcançados pelos compósitos fabricados com partículas de casca de arroz lavadas em solução de cal e, em particular, os compósitos confeccionados com partículas de 5 mm previamente lavadas e adicionadas de cloreto de cálcio. Como resultado dos ensaios de flexão estática, compressão paralela à superfície, variação dimensional e absorção d'água, verificou-se que o material apresentou boa estabilidade dimensional quando comparado com aglomerados e compensados comerciais.

Savastano Jr. (2000) confeccionou telhas com argamassa de cimento Portland CP II-32 F e areia reforçada com as fibras residuais: sisal bucha de campo, sisal bucha de máquina da produção de *baler twine*, fibrinhas extraídas do pó residual do coco, rejeito de polpa celulósica de eucalipto, fibra do pseudocaule da bananeira, malva tipo 4. Segundo o autor, as telhas estudadas apresentaram propriedades físicas e mecânicas satisfatórias, exigidas pelas normas técnicas pertinentes, com exceção das telhas reforçadas com fibra de sisal bucha de campo (capacidade de carga inferior a 680 N) e fibra de bananeira (empenamento superior a 3 mm). Dos resíduos selecionados, as fibras de sisal bucha de *baler twine* mostraram a melhor capacidade de reforço da telha à base de cimento Portland e areia, com destaque para elevada absorção de energia na condição pós-fissurada.

Utilizando argamassa de cimento (CP II-E-32) e casca de arroz (em sua forma natural) para confecção de blocos vazados (9 x 19 x 39 cm³) e pisos, Beraldo e Tojal (2001) verificaram que a mistura é uma boa alternativa para a fabricação de componentes construtivos que não desempenhem função estrutural e possui uma grande aplicabilidade em moradias populares. Seguindo a mesma linha de estudo, Govindarao, citado por Youngquist et al. (1996), afirmou que a adição de casca de arroz em blocos de cimento melhorou as propriedades térmicas e acústicas do componente construtivo.

Akasaki e Silva (2001) estudaram composições da mistura de solo + água + estabilizante + resíduo agroindustrial para confeccionar tijolos, utilizando como estabilizante 10% de cal (em peso) e os materiais residuais casca de arroz (em sua forma natural), pó de serra e bagaço de cana-de-açúcar (desmedulado), previamente submetidos à lavagem em água quente. Os tijolos confeccionados com diferentes misturas de solo-cal-resíduos (**Tabela 12**) foram submetidos a ensaios de compressão simples, absorção d'água, variação dimensional e durabilidade por molhamento e secagem. De um modo geral, os resultados mostraram aos autores que a incorporação de resíduos agroindustriais nos tijolos de solo-cal afeta negativamente as propriedades mecânicas do mesmo, sendo que, quanto maior fosse o teor destes resíduos adicionados à composição solo-cal, menores seriam os valores de resistências à compressão simples dos tijolos e maiores valores de absorção d'água (**Tabela 12**). Para os autores, apenas o teor de 5% de casca de arroz na composição solo-cal apresentou-se como promissor resíduo a ser incorporado aos tijolos. Os autores reforçaram a idéia da necessidade

de aplicação de tratamentos químicos e fragmentação do resíduo casca de arroz para obter compósitos com melhores desempenhos frente às propriedades mecânicas.

Tabela 12. Propriedades mecânicas dos tijolos de sol-cal-resíduos agroindustriais.

Composições dos tijolos de solo-cal-resíduos agroindustriais	Resistência à compressão simples aos 28 dias (MPa)	Absorção d'água (%)
solo + 10% de cal – testemunha	0,96	16,07
solo + 10% de cal + 5% de bagaço de cana	0,59	23,66
solo + 10% de cal + 10% de bagaço de cana	0,40	30,43
solo + 10% de cal + 15% de bagaço de cana	0,35	39,61
solo + 10% de cal + 5% de casca de arroz	0,79	27,44
solo + 10% de cal + 5% de pó de serra	0,76	20,97
solo + 10% de cal + 10% de pó de serra	0,60	27,38
solo + 10% de cal + 15% de pó de serra	0,55	30,58

Fonte: Akasaki e Silva (2001).

3.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A geração de resíduos florestais e agrícolas no Brasil, segundo Souza (1997), assume valores expressivos. Segundo o autor, são geradas atualmente nada menos que 3 milhões de toneladas de casca de arroz, 23 milhões de toneladas de resíduos florestais (serrarias) e mais de 60 milhões de toneladas de bagaço de cana-de-açúcar. Logicamente que nem todo este resíduo é desperdiçado; o setor agrícola já utiliza boa parte de casca de arroz e as usinas de açúcar e álcool, quase todo o bagaço. Infelizmente a pequena porcentagem que ainda não é utilizada representa um grande problema. O autor identificou os seguintes fatores inibidores para a plena utilização dos resíduos florestais e agrícolas: custo do transporte, heterogeneidade, sazonalidade, falta de tecnologia e pouco investimento no processo de reciclagem.

Por outro lado, os materiais alternativos solo-cimento, solo-cal e compósitos à base de biomassa vegetal e matriz cimentante são promissores nos âmbitos econômico, social e funcional. Sua utilização pode contribuir no sentido de baratear os custos envolvidos em pequenas construções, possibilitando a inserção de tecnologias apropriadas, a obtenção de um produto menos poluente que os convencionais, de baixo consumo energético, gerando processos de reaproveitamento de resíduos agroindustriais e suprimindo as necessidades construtivas de instalações populares e rurais.

Porém, ainda há necessidade de se estudar, mais aprofundadamente, aspectos técnicos (propriedades mecânicas e durabilidade) dos materiais alternativos, assim como normatizar os procedimentos de ensaio, execução, fabricação e dimensionamento dos mesmos. Deve-se levar em consideração, também, a importância da disseminação desta tecnologia para o meio produtivo, tentando assim melhorar a aceitabilidade e emprego do material pelo usuário.

4. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Laboratório de Materiais e Estruturas (LME) da Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI/ UNICAMP).

Para se alcançar os objetivos propostos na presente pesquisa, foram utilizados os materiais e observados os métodos descritos a seguir.

4.1. MATERIAL

♦ Solo

Foram utilizados dois solos pertencentes a classes texturais distintas, uma predominantemente arenosa e outra predominantemente argilosa. Os solos foram submetidos aos diversos tratamentos com a finalidade de avaliar os seus efeitos sobre a qualidade dos diferentes materiais formados.

Procurou-se trabalhar com um tipo de solo que atendesse às condições ideais para a confecção de tijolos prensados, ou seja, um solo bem graduado, com teores de silte mais argila variando de 10% a 35%; e outro solo do próprio local (FEAGRI/UNICAMP), que não satisfizesse essas condições.

O solo arenoso foi coletado em uma área pertencente ao Conjunto Residencial Cosmos (antigo Jd. Florence II), no município de Campinas-SP. Já o solo argiloso foi coletado em uma área pertencente ao Campo Experimental da FEAGRI/UNICAMP, no município de Campinas-SP

♦ Cimento

Foi utilizado o cimento Portland CPIII-RS-40 (cimento de alto-forno resistente a sulfatos), da marca NASSAU, cujas características físicas, químicas e mecânicas atenderam aos requisitos da norma NBR 5735 (ABNT, 1991).

A escolha do cimento CPIII-RS-40 deveu-se à sua maior disponibilidade no comércio de materiais de construção, visto que o mesmo está substituindo o cimento CPII-E-32. O cimento CPIII-RS-40 foi adquirido em casa idônea do ramo da construção civil.

◆ **Cal**

Foi utilizada cal hidratada CH-III (de uso corrente em pinturas), da marca MINERCAL, a qual atendeu às especificações da norma NBR 7175 (ABNT, 1992a). Foi também adquirida em casa comercial do ramo da construção civil.

◆ **Água**

Em todo o experimento foi utilizada água potável fornecida pela rede pública.

◆ **Casca de arroz**

A casca de arroz utilizada foi fornecida pela beneficiadora de arroz ALIBABÁ, localizada no município de Itu - SP.

◆ **Equipamentos de laboratório**

Os seguintes equipamentos de laboratório foram empregados para a realização dos ensaios:

- peneiras de 4,8; 2,39; 1,19; 0,59; 0,297; 0,149 e 0,074 mm de abertura de malhas, agitador mecânico para os ensaios de análise granulométrica dos solos e de distribuição em tamanho da casca de arroz;
- aparelho de Casagrande, picnômetro e bomba de vácuo para determinação dos índices físicos dos solos;
- moinho de martelo, da marca TRAPP (1,5 HP), com peneira de 5 mm de abertura de malha para triturar o material casca de arroz (**Figura 1**);
- balança analítica, da marca MARTE, com sensibilidade de 0,01 g;
- estufa de temperatura regulável, da marca FANEM, para a determinação de umidade;
- prensa CBR para a realização dos ensaios preliminares de compressão simples dos corpos-de-prova, da marca SOLOTEST, com capacidade de 5000 kgf (**Figura 2**);
- máquina universal para a realização dos ensaios de compressão simples e de tração na compressão diametral dos corpos-de-prova, e ensaio de compressão simples dos tijolos, da marca DYNATEST, com dispositivo de controle de velocidade de carregamento e capacidade de 250.000 kN (**Figura 3**);

- moldes cilíndricos metálicos e soquete para a realização do ensaio de compactação de Proctor e moldagem dos corpos-de-prova;
- câmara úmida para a cura dos corpos-de-prova e dos tijolos;
- máquina para fabricação de tijolos, da marca SOLOTEST, com capacidade de fabricação de três tijolos por prensagem, tijolos tipo II ($23 \times 11 \times 5 \text{ cm}^3$) (**Figura 4**);
- aparelho portátil de ultra-som (*Ultrasonic Tester*) para a realização dos ensaios não-destrutivos, da marca STEINKAMP/mod.BP7, com emissão do impulso na frequência de 45 kHz e dotado de dois transdutores de contato de seção plana (**Figura 5**);
- outros (pá de pedreiro, espátulas, becker, serra circular, etc.).



Figura 1. Triturador de casca de arroz.



Figura 2. Prensa de CBR.



Figura 5. Aparelho de ultra-som.



Figura 3. Máquina universal de ensaios.



Figura 4. Máquina para fabricação de tijolos.

4.2. MÉTODOS

Adotou-se para o desenvolvimento da presente pesquisa um esquema experimental que consistiu na execução de cinco etapas fundamentais, a saber.

1º ETAPA - PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS

◆ Material casca de arroz

A casca de arroz, tão logo recebida no LME, foi acondicionada em sacos plásticos e estocada em recinto fechado para posterior processo de preparação. Esta condição do material foi considerada como casca de arroz natural (**Figura 6**).

Em todos os casos, para incorporar a casca de arroz aos sistemas solo-cimento e solo-cal, foi realizada a preparação da casca, aplicando-se processos mecânicos (trituração e peneiramento) e tratamento químico (lavagem em solução de cal).

A primeira fase da preparação do material casca de arroz consistiu na trituração da casca de arroz em moinho de martelo (dentro do triturador utilizou-se uma peneira de 5 mm de abertura de malha) para redução de seu tamanho, a fim de aumentar sua superfície específica,

uniformizar a fração utilizável, facilitar sua adesão com os aglomerantes químicos utilizados, no caso o cimento e a cal, e melhorar as características estéticas do produto final. O material, então triturado, foi considerado como casca de arroz fracionada.

Após o processo de trituração, o material foi passado através de peneira de 4,8 mm de abertura nominal de malha para uniformizar o tamanho da fração, e em peneira nº 40 (0,42 mm de abertura de malha) para eliminar os finos que, no caso, não são benéficos para as reações de estabilização que ocorrem no sistema solo-aglomerante. Portanto, após a aplicação dos processos de trituração e peneiramento, obteve-se aquela que foi considerada a fração utilizável de casca de arroz.

Como fase final da preparação do material casca de arroz, aplicou-se à fração utilizável o tratamento de lavagem em solução de cal $[Ca(OH)_2]$ proposto por Serrano e Castro (1985) e Beraldo e Zucco (1998), a fim de proporcionar melhoria da compatibilidade química entre a casca de arroz e os aglomerantes cimento e cal. Assim, de acordo com o processo original, a quantidade de cal empregada foi de 5% da massa da casca e a razão entre a solução de cal e a casca de arroz foi de 10:1. Conforme relatos de Zucco (1999), este tratamento foi o mais eficaz para a casca de arroz, visto que este resíduo, por não ser fibroso, não apresenta resultados significativos quando tratado com silicatos e sulfatos de sódio, magnésio ou alumínio.

A fração utilizável de casca de arroz permaneceu em imersão total na solução de cal por um período de 24 h. Em seguida, foi lavada para a remoção do excesso de água que continha cal e extrativos e colocada ao ar livre para secagem, durante pelo menos 3 dias (**Figura 7**). Finalizados os processos de preparação do material casca de arroz, o mesmo foi acondicionado em um recipiente hermeticamente fechado e utilizado à medida da necessidade.

Para efeitos de comparação, foram realizados ensaios de caracterização física da casca de arroz nas seguintes condições: a casca de arroz quando recebida em laboratório (casca natural), a casca de arroz após processo de trituração (casca fracionada) e casca de arroz após trituração, peneiramento e tratamento em solução de cal (casca tratada). Os ensaios físicos consistiram na:

- determinação porcentual da distribuição em tamanho da casca de arroz, para a qual procedeu-se de forma semelhante à análise granulométrica dos solos, NBR 7181 (ABNT, 1984a);
- determinação do teor de umidade, pelo método da estufa a 105 °C, durante 24 h. O teor de umidade foi obtido pela **Equação 1**.

$$h = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \cdot 100 \quad (1)$$

onde:

h = teor de umidade do material (%);

M_1 = massa final da amostra seca em estufa (g);

M_2 = massa inicial da amostra nas referidas condições (g).

- determinação da massa unitária na condição solta, seguindo-se a norma NBR 7251 (ABNT, 1982).



Figura 6. Casca de arroz natural.



Figura 7. Casca de arroz tratada.

◆ **Material Solo**

Em todo o experimento foi utilizada a fração de solo passante na peneira de 4,76 mm de abertura de malha. As amostras então peneiradas, foram secas ao ar e acondicionadas em caixas especiais até o momento de serem utilizadas.

Foi realizada a preparação das amostras de solo para os ensaios de caracterização e de compactação, conforme a norma NBR 6457 (ABNT, 1986a). Os ensaios aplicados ao solo foram os seguintes:

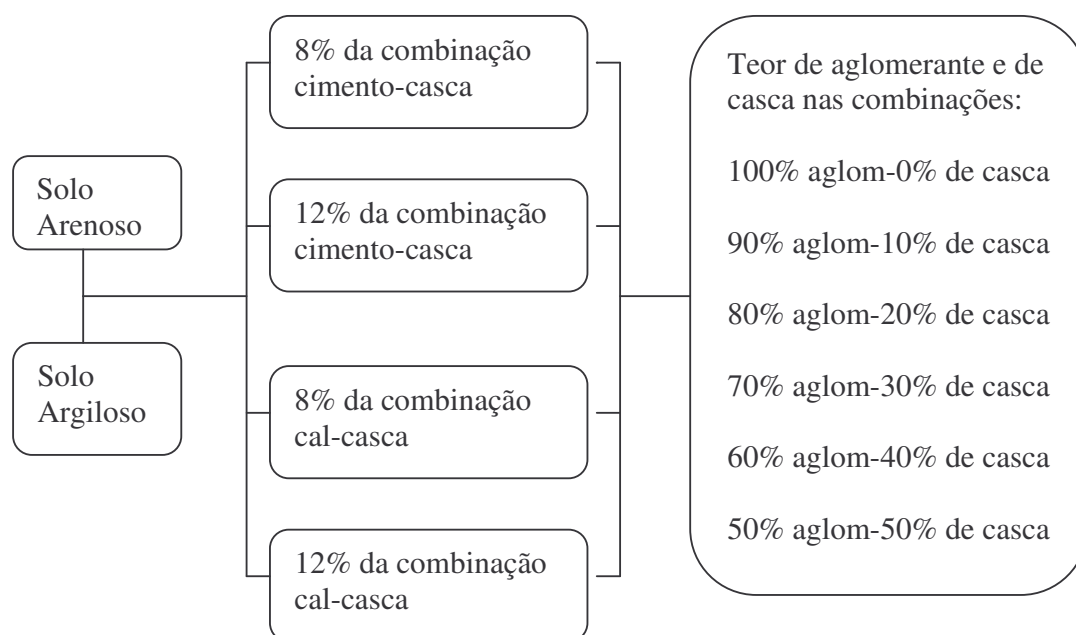
- determinação da massa específica dos sólidos do solo, de acordo com a norma NBR 6508 (ABNT, 1984b);
- análise granulométrica, por sedimentação e peneiramento, de acordo com a norma NBR 7181 (ABNT, 1984a);
- determinação dos limites de liquidez e de plasticidade dos solos, de acordo com as normas NBR 6459 (ABNT, 1984c) e NBR 7180 (ABNT, 1984d), respectivamente;
- ensaio de compactação normal de Proctor, aplicado aos solos para determinação da massa específica aparente seca máxima e da umidade ótima correspondente, de acordo com a norma NBR 7182 (ABNT, 1986b).

2º ETAPA - ESTUDO DE DOSAGEM DAS MISTURAS DE SOLO-CIMENTO-CASCA DE ARROZ E DE SOLO-CAL-CASCA DE ARROZ

◆ **Definição da composição das misturas de solo-cimento-casca de arroz e de solo-cal-casca de arroz**

Com o objetivo de maximizar a adição de casca de arroz e diminuir o consumo dos aglomerantes cimento ou cal nas misturas de solo-aglomerante-casca de arroz, adotou-se, para estudos de dosagem, diversas misturas (% em relação à massa do solo seco) preparadas conforme o esquema fatorial mostrado a seguir.

Esquema Fatorial do Estudo de Dosagem



Portanto, as combinações de (% cimento - % casca de arroz) e de (% cal - % casca de arroz) que foram adicionadas aos solos observaram às seguintes proporções:

C₁ – solo sem adição (testemunha)

C₂ – 8% da combinação (100% de aglomerante - 0% casca de arroz)

C₃ – 8% da combinação (90% de aglomerante - 10% casca de arroz)

C₄ – 8% da combinação (80% de aglomerante - 20% casca de arroz)

C₅ – 8% da combinação (70% de aglomerante - 30% casca de arroz)

C₆ – 8% da combinação (60% de aglomerante - 40% casca de arroz)

C₇ – 8% da combinação (50% de aglomerante - 50% casca de arroz)

C₈ – 12% da combinação (100% de aglomerante - 0% casca de arroz)

C₉ – 12% da combinação (90% de aglomerante - 10% casca de arroz)

C₁₀ – 12% da combinação (80% de aglomerante - 20% casca de arroz)

C₁₁ – 12% da combinação (70% de aglomerante - 30% casca de arroz)

C₁₂ – 12% da combinação (60% de aglomerante - 40% casca de arroz)

C₁₃ – 12% da combinação (50% de aglomerante - 50% casca de arroz)

Apesar de estudos já realizados terem indicado que as reações de estabilização do solo arenoso são mais eficientes com o cimento e, para o solo argiloso, com a cal, na presente pesquisa fez-se necessário estudar os efeitos dos tipos de combinações aglomerantes-casca de arroz sobre os solos estudados.

O teor de 8% da combinação aglomerante-casca foi escolhido em função das recomendações de diversos autores, que indicaram os teores de 4% a 10% de cimento ou de cal para a estabilização de solos arenosos e argilosos destinados à confecção de componentes construtivos, ou seja, as composições adotadas para o estudo de dosagem incorporaram aos solos teores de estabilizante que variaram de 4% a 8%, que se encontram compreendidos dentro da faixa usualmente recomendada. Já a adição de 12% da combinação aglomerante-casca de arroz foi adotada a favor da segurança, tendo em vista que a incorporação de casca de arroz à mistura certamente afetará negativamente o desempenho mecânico do sistema solo-aglomerante.

Para todos os ensaios aplicados às diferentes misturas de solo-cimento-casca de arroz e de solo-cal-casca de arroz, as quantidades pré-determinadas dos componentes foram misturadas manualmente, sendo primeiramente misturados o aglomerante (cimento ou cal) e o solo (arenoso ou argiloso), e depois a casca de arroz, até se conseguir homogeneidade e igual coloração da mistura, e, por último, adicionou-se a água. As diferentes misturas de solo-cal-casca de arroz-água, depois de apropriada homogeneização, foram deixadas em repouso, em condições ambientais, ao ar livre e à sombra, durante 2 horas, antes de serem utilizadas para quaisquer finalidades.

♦ Ensaio de compactação das diferentes misturas de solo-cimento-casca de arroz e de solo-cal-casca de arroz

Para a determinação do teor ótimo de umidade e da massa específica aparente seca máxima das diferentes misturas de solo-cimento-casca de arroz e de solo-cal-casca de arroz, foi realizado o ensaio de compactação segundo a norma NBR 12023 (ABNT, 1992b), conduzido com três repetições. As amostras foram previamente secas ao ar até constância de umidade, com reuso do material.

♦ **Ensaio preliminar de compressão simples dos corpos-de-prova confeccionados com diferentes misturas de solo-cimento-casca de arroz e de solo-cal-casca de arroz**

Para definir quais as misturas de solo-aglomerante-casca de arroz a serem utilizadas na etapa de caracterização físico-mecânica, fez-se necessário determinar-se a resistência à compressão simples dos corpos-de-prova confeccionados com as diferentes misturas de solo-cimento-casca de arroz e de solo-cal-casca de arroz. O ensaio foi realizado de forma semelhante à da norma NBR 12025 (ABNT, 1990b), sendo utilizada a prensa CBR e excluída a fase de imersão dos corpos-de-prova em água, antes do rompimento. Este procedimento foi adotado apenas para a obtenção de dados preliminares.

Para tal, a moldagem e a cura dos corpos-de-prova foram executadas de acordo com a norma NBR 12024 (ABNT, 1992a), utilizando-se, para a preparação das misturas, a quantidade de água indicada pelos ensaios de compactação. Foram moldados três corpos-de-prova (10 cm de diâmetro e 12,7 cm de altura) para cada mistura de solo-cal-casca de arroz e de solo-cimento-casca de arroz, os quais permaneceram em câmara úmida por um período de 7 dias para, em seguida, serem rompidos à compressão simples.

A resistência à compressão simples foi calculada individualmente para cada corpo-de-prova, dividindo-se a carga de ruptura pela área da seção transversal do mesmo. A resistência média foi determinada pela média aritmética de três repetições.

♦ **Escolha das misturas de solo-cimento-casca de arroz e de solo-cal-casca de arroz para a caracterização físico-mecânica**

Após a aplicação dos ensaios preliminares de compactação e de compressão simples aos corpos-de-prova, as misturas de solo-cimento-casca de arroz e solo-cal-casca de arroz escolhidas para a etapa de caracterização físico-mecânica foram as que apresentaram maior quantidade de casca incorporada aliada a um valor preliminar de resistência à compressão simples igual ou superior a 1,5 MPa, pois este valor foi considerado o mínimo necessário para que as misturas de solo-aglomerante-casca de arroz posteriormente pudessem ser utilizadas como componente construtivo.

3º ETAPA – CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DOS CORPOS-DE-PROVA CONFECCIONADOS A PARTIR DAS MISTURAS DE SOLO-AGLOMERANTE-CASCA DE ARROZ ESCOLHIDAS NA ETAPA DO ESTUDO DE DOSAGEM

♦ Moldagem e cura dos corpos-de-prova

A partir das misturas de solo-aglomerante-casca de arroz escolhidas na etapa do estudo de dosagem, foram moldados corpos-de-prova cilíndricos de acordo com os procedimentos indicados pela norma NBR 12024 (ABNT, 1992a). A mistura dos componentes foi feita de forma análoga àquela realizada na etapa do estudo de dosagem e a quantidade de água utilizada foi aquela determinada nos ensaios de compactação. Após a moldagem, os corpos-de-prova foram curados em câmara úmida durante 7 dias e deixados em ambiente de laboratório à espera do momento de serem submetidos aos ensaios de compressão simples, de tração na compressão diametral, de absorção de água e de ultra-som.

Durante a moldagem dos corpos-de-prova, procurou-se atingir um grau de compactação (GC) não menor que 95% e não maior que 105% em relação aos valores de massa específica aparente seca máxima obtidos nos ensaios de compactação, conforme recomendações de Bueno e Vilar (1999). Os valores do GC (%) foram obtidos pela **Equação 2**.

$$GC (\%) = \left(\frac{\gamma_c}{\gamma_s} \right) \times 100 \quad (2)$$

onde:

γ_c = massa específica aparente seca do corpo-de-prova (kN/m³);

γ_s = massa específica aparente seca máxima da mistura de solo-aglomerante-casca obtida pelo ensaio de compactação normal de Proctor (kN/m³).

Para cada mistura de solo-aglomerante-casca de arroz foram moldados 15 corpos-de-prova, sendo 6 deles destinados ao ensaio de compressão simples, nas idades de 7 e 28 dias, outros 6 destinados ao ensaio de tração na compressão diametral, também nas idades de 7 e 28 dias e os 3 restantes ao ensaio de absorção d'água aos 7 dias de idade.

Tanto para o ensaio de compressão simples, como para o ensaio de tração na compressão diametral, os corpos-de-prova, exceto os de solo natural (testemunhas), foram imersos em água por um período de quatro horas antes do rompimento.

♦ **Ensaio de compressão simples aplicado aos corpos-de-prova**

A determinação da resistência à compressão simples dos corpos-de-prova de misturas de solo-aglomerante-casca de arroz foi realizada de acordo com a norma NBR 12025 (ABNT, 1990b) (**Figura 8**).

A resistência à compressão simples foi calculada individualmente para cada corpo-de-prova, dividindo-se a carga de ruptura pela área da seção transversal do mesmo. A resistência média foi determinada pela média aritmética de três repetições.

♦ **Ensaio de tração na compressão diametral aplicado aos corpos-de-prova**

Este ensaio foi realizado de acordo com o “método brasileiro” ou “método Lobo Carneiro”, baseando-se nos procedimentos da norma NBR 7222 (ABNT, 1994), que consiste em submeter corpos-de-prova cilíndricos, semelhantes àqueles utilizados nos ensaios de compressão simples, à compressão diametral (**Figura 9**).

A tensão principal de tração, distribuída no plano diametral e normal ao plano da seção, é dada pela **Equação 3**. A resistência média foi determinada pela média aritmética de 3 repetições:

$$T = \frac{2.P}{\pi.d.L} \quad (3)$$

onde:

T = resistência à tração (MPa);

P = carga aplicada ao longo da geratriz (N);

d = diâmetro do corpo-de-prova (mm);

L = comprimento do corpo-de-prova (mm).



Figura 8. Corpo-de-prova cilíndrico sob compressão simples.



Figura 9. Corpo-de-prova cilíndrico sob compressão diametral.

♦ Ensaio de absorção d'água aplicado aos corpos-de-prova

Para a realização do ensaio de absorção d'água dos corpos-de-prova das misturas de solo-aglomerante-casca de arroz, os mesmos, após cura durante 7 dias, foram submersos em água por um período de 24 horas (**Figura 10**), sendo então dela retirados, enxutos e pesados (massa saturada).

Posteriormente, foram os mesmos secos em estufa a 105 °C, até constância de peso, para a determinação de sua massa seca. A diferença percentual entre a massa saturada e a massa seca do corpo-de-prova corresponde ao valor de sua capacidade total de absorção d'água, calculada em base seca. Os valores individuais de absorção d'água de cada corpo-de-prova, expressos em porcentagem, foram obtidos pela **Equação 4**, enquanto que a absorção média foi determinada pela média aritmética de 3 repetições.

$$A = \frac{M_2 - M_1}{M_1} 100\% \quad (4)$$

onde:

M_1 = massa do corpo-de-prova seco em estufa (g);

M_2 = massa do corpo-de-prova saturado (g);

A = absorção d'água (%).



Figura 10. Corpos-de-prova cilíndricos imersos em água.

◆ Ensaio de ultra-som aplicado aos corpos-de-prova

Antes da execução dos ensaios mecânicos ou ensaios destrutivos nos corpos-de-prova, efetuou-se o ensaio não-destrutivo para determinar o tempo de propagação da onda ultra-sônica nos corpos-de-prova, utilizando-se para tal, o aparelho de ultra-som. O ensaio de ultra-som visou detectar os possíveis defeitos na estrutura física dos corpos-de-prova, além de permitir o acompanhamento das mudanças ocorridas ao longo do tempo.

Baseado nos resultados de Ferreira (2003), escolheu-se o transdutor de contato para a emissão e recepção da onda ultra-sônica de 45 kHz de seção plana, pois, segundo o autor, este tipo de transdutor foi adequado para as medições em corpos-de-prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 12,7 cm de altura. Para uma melhor confiabilidade nos resultados, foram feitos testes preliminares durante os quais a velocidade de propagação da onda ultra-sônica foi medida nos corpos-de-prova. A partir dos valores de velocidade ultra-sônica, foi calculado o

comprimento da onda e confirmado a adequação do transdutor de 45 kHz - seção plana para as medições nos corpos-de-prova, sendo utilizadas as **Equações 5 e 6**.

$$V = \frac{d}{t} 1000 \quad (5)$$

onde:

V = velocidade da onda ultra-sônica (m/s);

d = distância percorrida pela onda (mm);

t = tempo transcorrido no percurso (μ s).

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (6)$$

onde:

λ = comprimento da onda (m);

V = velocidade ultra-sônica (m/s);

f = frequência da onda (Hz).

A evolução da velocidade de propagação da onda ultra-sônica em função das idades foi determinada para os corpos-de-prova durante os períodos de 0, 2, 4, 7, 14, 21 e 28 dias após a moldagem dos mesmos (**Figura 11**). Simultaneamente à realização das leituras dos tempos de propagação da onda nos corpos-de-prova, os mesmos foram pesados para posterior cálculo da massa específica aparente (**Equação 7**).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (7)$$

onde:

m = massa do corpo-de-prova (g);

V = volume do corpo-de-prova (cm^3);

ρ = massa específica aparente do corpo-de-prova (g/cm^3).

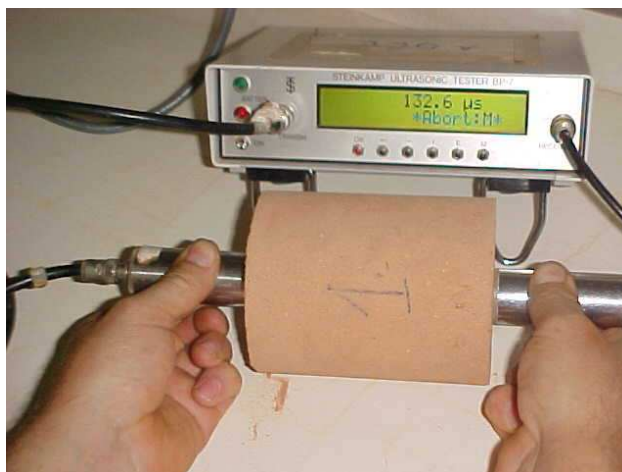


Figura 11. Teste de ultra-som sendo aplicado ao corpo-de-prova.

♦ Correlação entre os parâmetros de avaliação dos corpos-de-prova

Para o estudo das relações entre métodos destrutivos e não-destrutivos fez-se necessário correlacionar, para cada tratamento, os seguintes parâmetros:

- a velocidade de propagação da onda ultra-sônica e a massa específica aparente dos corpos-de-prova, obtendo-se os pares de valores (velocidade e massa) nas correspondentes idades (7 e 28 dias) e confeccionados os gráficos $y = f(x)$, onde:
 y = velocidade de propagação da onda ultra-sônica (m/s);
 x = massa específica aparente (kg/m^3).
- a velocidade de propagação da onda ultra-sônica e a resistência à compressão dos corpos-de-prova, obtendo-se os pares de valores (resistência e velocidade) nas correspondentes idades (7 e 28 dias) e confeccionados os gráficos $y = f(x)$, onde:
 y = resistência à compressão simples dos corpos-de-prova (MPa);
 x = velocidade de propagação da onda ultra-sônica (m/s).

♦ Módulo de elasticidade dinâmico dos corpos-de-prova

O módulo de elasticidade dinâmico foi obtido segundo as recomendações da American Society for Testing Material - ASTM, pelo método de ensaio C-597 – “Pulse

Velocity Through Concrete”, citado por Hamassaki (1987), que relaciona propriedades físicas do sólido com sua velocidade de onda ultra-sônica, através da **Equação 8**.

$$Ed = \rho V^2 \cdot 10^{-4} \quad (8)$$

onde:

Ed = módulo de elasticidade dinâmico (MPa);

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

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

4º ETAPA – CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DOS TIJOLOS CONFECCIONADOS A PARTIR DE MISTURAS DE SOLO-AGLOMERANTE-CASCA DE ARROZ ESCOLHIDAS NA ETAPA DO ESTUDO DE DOSAGEM

♦ Confeção dos tijolos de solo-aglomerante-casca de arroz

Os tijolos, referentes a cada mistura de solo-aglomerante-casca de arroz, foram moldados de acordo com a norma NBR 8491 (ABNT, 1984e). A mistura dos componentes foi feita manualmente, obedecendo à seqüência citada na etapa do estudo de dosagem. Utilizou-se o teor de umidade ótima do ensaio de compactação de Proctor, sendo a água adicionada aos poucos até se obter uniformidade de mistura para colocação nas fôrmas.

Para garantir que os tijolos fossem submetidos à pressão de compactação semelhante à do Proctor normal, executou-se uma regulação da prensa de tijolos relacionando-se a massa do tijolo com a massa do corpo-de-prova, e admitindo-se que ambos tivessem a mesma massa específica aparente seca máxima e a mesma umidade ótima.

Apesar da máquina manual de fabricação de tijolos apresentar-se com três posições para moldagem de três tijolos ao mesmo tempo, conforme relatos de Mesa Valenciano e Freire (1999), a energia de compressão aplicada pela mesma é variável, sendo as posições laterais mais deficientes. Portanto foi apenas utilizado o molde de posição central da máquina (**Figura 12**).

Após tais procedimentos, as misturas de solo-aglomerante-casca de arroz foram colocadas no molde central da prensa e então realizadas as prensagens, de acordo com os procedimentos indicados pela norma NBR 10832 (ABNT, 1989). Após a prensagem, os tijolos foram levados à câmara úmida para cura durante o período de 7 dias. Depois foram retirados da câmara úmida e colocados sobre uma bancada (**Figura 13**), à espera do momento de serem submetidos aos ensaios de compressão simples, de absorção d'água e de ultra-som.

Para cada mistura de solo-aglomerante-casca de arroz foram moldados 12 tijolos para os ensaios de compressão simples, sendo 4 deles para cada idade (7, 28 e 60 dias) e mais 3 tijolos para o ensaio de absorção de água aos 7 dias de idade.



Figura 12. Fabricação dos tijolos.



Figura 13. Tijolos à espera dos ensaios.

♦ Ensaio de compressão simples aplicado aos tijolos

De acordo com a norma brasileira NBR 8492 (ABNT, 1984f), os tijolos foram primeiramente serrados ao meio e superpostos, tendo suas faces unidas com uma camada de aproximadamente 2 mm de pasta de cimento, colocada com auxílio de espátula. Em seguida, procedeu-se ao capeamento das faces inferior e superior e das reentrâncias, sendo tudo feito com a mesma pasta de cimento. Logo após o endurecimento da pasta de cimento, os prismas de tijolos foram deixados por 24 horas imersos em água, antes de serem submetidos à compressão simples (**Figura 14 e 15**).

A resistência à compressão simples foi calculada individualmente para cada tijolo, dividindo-se a carga de ruptura pela área da seção transversal do mesmo. Foi descartado do grupo de quatro repetições um valor de resistência que se apresentou disperso em relação aos

demais valores, sendo, então, a resistência média determinada pela média aritmética de três repetições.



Figura 14. Prismas de tijolos.



Figura 15. Tijolos sob compressão.

♦ Ensaio de absorção d'água aplicado aos tijolos

O ensaio de absorção d'água aplicado aos tijolos foi realizado de acordo com os procedimentos da NBR 8492 (ABNT, 1984f). Os tijolos foram levados à estufa, entre 105 °C e 110 °C, até constância de peso, obtendo-se assim a massa do tijolo seco em estufa, em gramas. Em seguida, os tijolos foram imersos em água durante 24 h (**Figura 16**). Após este período, os tijolos foram retirados, enxugados superficialmente e novamente pesados, anotando-se sua massa saturada, em gramas. Os valores individuais de absorção d'água, expressos em porcentagem, foram obtidos pela **Equação 4** e a absorção média foi determinada pela média aritmética de três repetições.



Figura 16. Tijolos imersos em água.

◆ **Ensaio de ultra-som aplicado aos tijolos**

Sabe-se que a velocidade de propagação do ultra-som, bem como a atenuação da onda, são influenciados pela geometria do material estudado e pela frequência do equipamento utilizado. Sendo assim, para verificar tais pontos, analisou-se um parâmetro qualitativo que expressa a estrutura anisotrópica do tijolo, calculado pela **Equação 9** (CAZALLA et al., 1999).

$$\Delta M = 100\% \cdot \left[1 - \frac{2V_1}{(V_2 + V_3)} \right] \quad (9)$$

onde:

ΔM = anisotropia total (%);

V_1 = velocidade obtida através da menor distância do tijolo (m/s);

V_2 = velocidade obtida através da distância média do tijolo (m/s);

V_3 = velocidade obtida através do comprimento do tijolo (m/s).

Para a realização das leituras dos tempos de propagação da onda ultra-sônica nos tijolos, foi utilizado o mesmo equipamento e frequência adotados para o ensaio de corpos-de-prova, sendo feitas leituras nos períodos de 7, 28 e 60 dias e calculadas as referentes velocidades (V_1 , V_2 e V_3) de acordo com a **Equação 5**. As **Figuras 17 e 18** mostram os diferentes eixos de leitura da onda ultra-sônica nos tijolos de solo-aglomerante-casca de arroz.

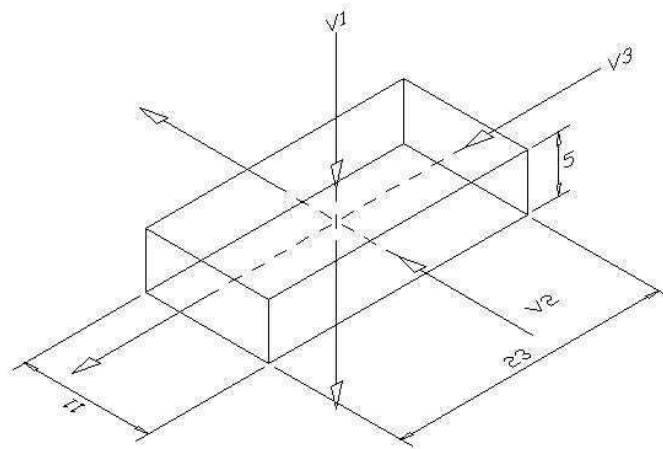


Figura 17. Eixos de leitura do tempo de propagação da onda ultra-sônica nos tijolos.

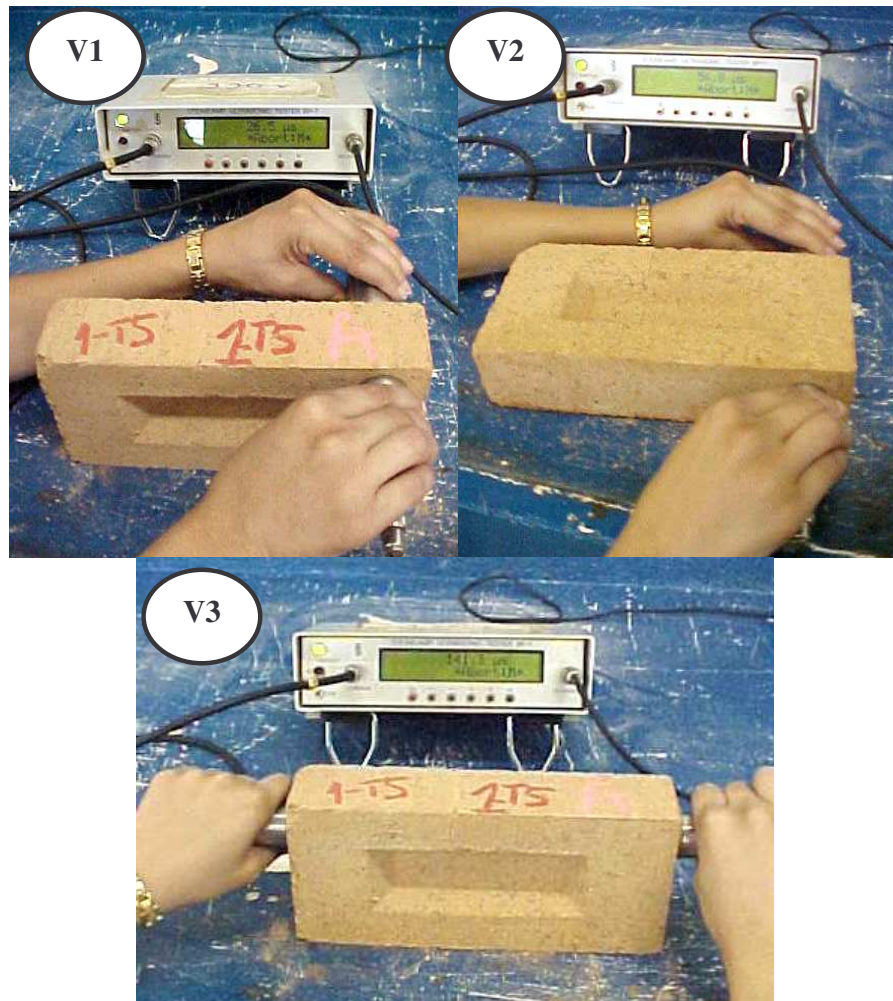


Figura 18. Teste de ultra-som aplicado ao tijolo.

♦ **Combinação de métodos destrutivos e não destrutivos para avaliação da qualidade dos tijolos**

Para o estudo das relações entre métodos destrutivos e não-destrutivos para a avaliação da qualidade dos tijolos adotou-se o parâmetro quantitativo proposto por Cultrone et al. (2001), denominado de resistência anisotrópica (**Equação 10**). Segundo os autores, este parâmetro é calculado através da combinação da resistência à compressão simples com a anisotropia total (**Equação 9**) do material sendo que, quanto maior o valor da resistência anisotrópica, melhor será a qualidade do material.

$$R_A = \frac{R_C}{\Delta M} \quad (10)$$

onde:

R_C = resistência à compressão simples do tijolo (kg/cm²);

ΔM = anisotropia total do tijolo (%);

R_A = resistência anisotrópica (kg / % cm²).

5º ETAPA - ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise estatística foi realizada através de uma análise de variância (ANOVA) para se determinar as variáveis que influíram nas propriedades do solo-aglomerante-casca de arroz.

Para a etapa de estudo de dosagem foi realizada uma análise de variância referente aos efeitos do tipo de aglomerante e do tipo de combinação aglomerante-casca sobre as variáveis: massa específica aparente seca máxima, umidade ótima e resistência à compressão simples. Para a etapa de caracterização físico-mecânica dos corpos-de-prova e dos tijolos, foi realizada uma análise referente aos efeitos do tipo de mistura solo-aglomerante-casca de arroz e das diferentes idades sobre as variáveis: resistência à compressão simples e resistência à tração na compressão diametral.

Não foi executada a análise de variância referente ao efeito do tipo de solo sobre as variáveis devido aos solos estudados serem de classes texturais distintas.

Utilizou-se um delineamento experimental inteiramente casualizado, em esquema fatorial, e da aplicação do teste de Tukey para a comparação das médias, ao nível de 5% de probabilidade estatística. Para tal foi empregado o pacote estatístico SANEST desenvolvido pelos pesquisadores Élio Paulo Zonta e Amauri Almeida Machado e comercializado pelo CIAGRI/ESALQ/USP.

Com o objetivo de definir se as curvas de resposta poderiam ser ajustadas matematicamente em função dos dados obtidos, foram determinadas as equações de regressão para cada caso, procurando-se estabelecer as possíveis correlações existentes entre as variáveis estudadas.

Em todos os casos, o número mínimo de repetições para cada mistura de solo-aglomerante-casca de arroz foi igual a três.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS

5.1.1. MATERIAL CASCA DE ARROZ

Na **Tabela 13** estão apresentados os resultados referentes à massa unitária (condição solta) e ao teor de umidade do material casca de arroz nas diferentes condições: casca natural, casca após processo de trituração (casca fracionada) e casca após processos de trituração, peneiramento, lavagem em solução de cal e secagem (casca tratada).

Tabela 13. Características físicas da casca de arroz estudada. *

Condição	Teor de umidade (%)	Massa unitária (g/cm ³)
Casca de arroz natural	10,4	0,11
Casca de arroz após trituração	8,7	0,24
Casca de arroz após trituração, peneiramento, lavagem e secagem	6,6	0,20

* Resultados de três repetições.

A casca de arroz natural apresentou um teor de umidade elevado em relação às demais condições devido ao processo de beneficiamento. O terceiro processo utilizado na preparação da casca de arroz para sua utilização nas misturas de solo-aglomerante-casca, resultou no maior decréscimo do teor de umidade (6,6%). Este teor de umidade foi importante para a realização da estocagem, podendo a casca ser estocada por um grande período (6 meses) sem o aparecimento de fungos e outros agentes que levariam à deterioração do material.

Quanto à massa unitária (condição solta), a casca de arroz natural caracterizou-se como um material leve e volumoso. Esta característica está relacionada ao tipo de estrutura física da casca (côncava e oca) que leva à grande presença de vazios entre elas. Já a casca de arroz triturada, peneirada, lavada e seca, teve sua superfície específica aumentada e,

conseqüentemente, a presença de vazios diminuída, conferindo ao material maior massa específica unitária (0,20 g/cm³). Este aumento de massa unitária tornou o material casca de arroz adequado para uma melhor adesão ao sistema solo-aglomerante.

Com relação à distribuição em tamanho da casca de arroz, na condição natural, a casca apresentou-se uniforme, estando 83% da sua massa compreendidos entre as peneiras de 4,8 mm e 1,2 mm, além da pouca presença de finos (**Tabela 14**). Posteriormente, após processo de trituração, a casca apresentou-se com aproximadamente 85% da sua massa compreendidos entre as peneiras de 1,2 mm e 0,42 mm, além da grande presença de finos (11,45%) (**Tabela 15**). Ao final da preparação do material casca de arroz, a distribuição em tamanho revelou que aproximadamente 84% da sua massa apresentaram-se com tamanho de 0,6 mm, representando a uniformização da fração utilizável e a presença não-significativa de finos (**Tabela 16**).

Tabela 14. Distribuição em tamanho da casca de arroz natural, a partir de 50,0 g do material, em condição anidra. *

Peneiras		Massa retida (g)	% Retida	% Acumulada
nº	mm			
4	4,800	0,00	0,00	0,00
8	2,400	26,37	52,74	52,74
16	1,200	15,40	30,80	83,54
30	0,600	6,90	13,79	97,33
40	0,420	0,64	1,27	98,60
60	0,250	0,30	0,61	99,21
100	0,150	0,22	0,43	99,64
200	0,075	0,18	0,36	100,00
Total		50,00	100,00	-
% de finos (menor que 0,42 mm) = 1,4%			Diâmetro máximo = 2,40 mm	

* Resultados de três repetições.

Tabela 15. Distribuição em tamanho da casca de arroz após trituração, a partir de 50,0 g do material, em condição anidra. *

Peneiras		Massa retida (g)	% Retida	% Acumulada
nº	mm			
8	2,400	0,00	0,00	0,00
16	1,200	1,97	3,95	3,95
30	0,600	36,74	73,49	77,43
40	0,420	5,56	11,11	88,55
60	0,250	3,09	6,17	94,72
100	0,150	1,41	2,83	97,55
200	0,075	1,23	2,45	100,00
Total		50,00	100,00	-
% de finos (menor que 0,42 mm) = 11,45%			Diâmetro máximo = 1,20 mm	

* Resultados de três repetições.

Tabela 16. Distribuição em tamanho da casca de arroz tratada, a partir de 50,0 g do material, em condição anidra. *

Peneiras		Massa retida	% Retida	% Acumulada
nº	Mm			
8	2,400	0,00	0,00	0,00
16	1,200	1,59	3,18	3,18
30	0,600	41,85	83,69	86,87
40	0,420	5,48	10,96	97,83
60	0,250	0,75	1,50	99,33
100	0,150	0,20	0,41	99,73
200	0,075	0,13	0,27	100,00
Total		50,00	100,00	-
% de finos (menor que 0,42 mm) = 2,17%			Diâmetro máximo = 1,20 mm	

Resultados de três repetições.

5.1.2. MATERIAL SOLO

A **Tabela 17** sumariza os resultados dos ensaios de caracterização física aplicados aos solos arenoso e argiloso.

Tabela 17. Características físico-mecânicas dos solos estudados. *

Parâmetros		Solo	
		Arenoso	Argiloso
Distribuição Granulométrica	Areia grossa (0,60 – 2,00 mm)	1,2%	1,6%
	Areia média (0,20 – 0,60 mm)	29,9%	9,2%
	Areia fina (0,06 – 0,20 mm)	41,0%	16,8%
	Silte (0,002 – 0,06 mm)	18,9%	34,5%
	Argila (< 0,002 mm)	8,9%	37,9%
	Porcentagem que passa na peneira n ° 200 (0,074 mm)	30,2%	76,4%
Índices físicos	Massa específica dos grãos	2,673 g/cm ³	3,063 g/cm ³
	Limite de Liquidez (LL)	NP	43,6%
	Limite de Plasticidade (LP)	NP	32,2%
	Índice de Plasticidade (IP)	NP	11,4%
Classificação	Descrição visual do solo	Areia siltosa	Argila siltosa
	Bureau of Public Roads	Arenoso	Argiloso
	Classificação AASHTO	A ₂₋₄	A ₇₋₅
Ensaio de compactação normal de Proctor	Massa específica aparente seca máxima (kN/m ³)	18,47	15,72
	Umidade ótima (%)	13,50	26,50

Resultados de três repetições.

NP = Não Plástico

Os índices físicos dos solos estudados (**Tabela 17**) mostraram que o solo arenoso caracterizou-se como um solo Não Plástico (NP), porém com uma quantidade suficiente de finos (argila + silte) para conferir à mistura a plasticidade necessária no momento de confecção de elementos construtivos. Já o solo argiloso caracterizou-se como um solo plástico, com um elevado Índice de Plasticidade (IP). Segundo literatura, quanto maior o índice de plasticidade do solo maior será a dificuldade de estabilizá-lo, já que o material estará mais sujeito às variações dimensionais, resultantes do inchamento do solo, quando úmido, e de sua retração, quando seco.

Quanto à distribuição granulométrica, o solo arenoso apresentou-se desuniforme, facilitando sua interação com o aglomerante. O solo argiloso apresentou grande quantidade de finos (aproximadamente 73% de silte + argila), o que, segundo a literatura, exigirá maiores quantidades de aditivos químicos para o processo de estabilização.

Segundo Abiko (1985), a prática tem demonstrado que os solos mais adequados para confecção de tijolos possuem as seguintes características: 100% de partículas passando na peneira ABNT 4,8 mm (nº 4); entre 10% a 50% passando na peneira ABNT 0,075 mm (nº 200); limite de liquidez $\leq 45\%$; e índice de plasticidade $\leq 18\%$. Dessa forma, os resultados dos ensaios preliminares de caracterização (**Tabela 17**) mostraram que o solo arenoso está de acordo com os pré-requisitos relatados pelo autor, porém o solo argiloso não atende à especificação de porcentagem de finos, pois apresentou 76% das partículas passando pela peneira nº 200.

A partir dos resultados da granulometria e dos índices físicos, os solos arenoso e argiloso foram classificados como A₂₋₄ e A₇₋₅, respectivamente, de acordo com o sistema da AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials).

Como esperado, o solo argiloso, por apresentar maior quantidade de finos, apresentou um valor de umidade ótima superior ao valor encontrado para o solo arenoso. Os valores de massa específica aparente seca máxima foram da ordem de 18,47 kN/m³ para o solo arenoso e de 15,72 kN/m³ para o solo argiloso, valores estes semelhantes aos encontrados por Mesa Valenciano (1999) e Ferreira (2003), os quais trabalharam, em suas pesquisas, com solos de características similares.

5.2. ESTUDO DE DOSAGEM DAS MISTURAS DE SOLO-AGLOMERANTE-CASCA DE ARROZ

5.2.1. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO NORMAL DE PROCTOR

Os valores médios da massa específica aparente seca máxima e da umidade ótima das misturas de solo-aglomerante-casca de arroz foram analisados estatisticamente e suas respectivas análises de variância estão apresentadas nas **Tabelas 18 à 21**.

Tabela 18. Análise de variância referente aos efeitos das adições no solo arenoso sobre a variável massa específica aparente seca máxima (kN/m³).

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
Tipo de aglomerante	1	1,69	1,69	748,19	0,00001
Tipo de combinação	12	27,35	2,27	1003,98	0,00001
Interação aglomerante x combinação	12	0,30	0,025	11,07	0,00001
Resíduo	52	0,11	0,00		
Total	77	29,47			
Média geral = 17,60 kN/m³		Coeficiente de variação = 0,27%			

Tabela 19. Análise de variância referente aos efeitos das adições no solo arenoso sobre a variável umidade ótima (%).

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
Tipo de aglomerante	1	1,80	1,80	46,45	0,00001
Tipo de combinação	12	109,60	9,13	235,68	0,00001
Interação aglomerante x combinação	12	2,20	0,18	4,73	0,00010
Resíduo	52	2,01	0,03		
Total	77	115,61			
Média geral = 14,97 %		Coeficiente de variação = 1,31%			

Tabela 20. Análise de variância referente aos efeitos das adições no solo argiloso sobre a massa específica aparente seca máxima (kN/m³).

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
Tipo de aglomerante	1	1,41	1,41	369,13	0,00001
Tipo de combinação	12	13,53	1,12	293,90	0,00001
Interação aglomerante x combinação	12	0,54	0,04	11,92	0,00001
Resíduo	52	0,19	0,00		
Total	77	15,69			
Média geral = 14,97 kN/m³		Coeficiente de variação = 0,41%			

Tabela 21. Análise de variância referente aos efeitos das adições no solo argiloso sobre a variável umidade ótima (%).

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
Tipo de aglomerante	1	27,95	27,95	363,03	0,00001
Tipo de combinação	12	61,49	5,12	66,54	0,00001
Interação aglomerante x combinação	12	9,57	0,79	10,36	0,00001
Resíduo	52	4,00	0,07		
Total	77	103,03			
Média geral = 28,09 %		Coeficiente de variação = 0,99%			

Os valores da massa específica aparente seca máxima e da umidade ótima das misturas de solo-cimento-casca de arroz e de solo-cal-casca de arroz obtidos do ensaio de compactação normal de Proctor estão mostrados nas **Tabelas 22 a 25**, sendo observada a legenda abaixo.

Tipo de combinação adicionada ao solo arenoso ou ao solo argiloso:

- C₁ – solo sem adição, (testemunha)
- C₂ – 8% da combinação (100% de aglomerante - 0% casca de arroz)
- C₃ – 8% da combinação (90% de aglomerante - 10% casca de arroz)
- C₄ – 8% da combinação (80% de aglomerante - 20% casca de arroz)
- C₅ – 8% da combinação (70% de aglomerante - 30% casca de arroz)
- C₆ – 8% da combinação (60% de aglomerante - 40% casca de arroz)
- C₇ – 8% da combinação (50% de aglomerante - 50% casca de arroz)
- C₈ – 12% da combinação (100% de aglomerante - 0% casca de arroz)
- C₉ – 12% da combinação (90% de aglomerante - 10% casca de arroz)
- C₁₀ – 12% da combinação (80% de aglomerante - 20% casca de arroz)
- C₁₁ – 12% da combinação (70% de aglomerante - 30% casca de arroz)
- C₁₂ – 12% da combinação (60% de aglomerante - 40% casca de arroz)
- C₁₃ – 12% da combinação (50% de aglomerante - 50% casca de arroz)

Tabela 22. Valores de massa específica aparente seca máxima do ensaio de compactação normal de Proctor aplicado ao solo arenoso adicionado das combinações de aglomerante-casca de arroz.

Tipo de aglomerante		$\gamma_{\text{máx}}$ - Massa específica aparente seca máxima (kN/m ³) – SOLO ARENOSO												
		C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃
Cimento	Média	18,47 b	18,64 a	18,22 c	18,03 d	17,72 f	17,50 g	17,11 i	18,52 ab	17,89 e	17,65 f	17,29 h	17,04 i	16,60 j
	DPM *	0,09	0,05	0,03	0,06	0,03	0,01	0,06	0,06	0,01	0,03	0,02	0,02	0,01
	CV (%)	0,48	0,26	0,16	0,36	0,18	0,03	0,36	0,31	0,06	0,18	0,13	0,09	0,03
Cal	Média	18,47 a	18,25 b	17,80 c	17,61 d	17,26 e	17,21 e	16,95 f	18,13 b	17,67 cd	17,30 e	17,07 f	16,76 g	16,37 h
	DPM	0,09	0,03	0,08	0,01	0,04	0,04	0,01	0,02	0,03	0,06	0,07	0,04	0,07
	CV (%)	0,48	0,17	0,45	0,07	0,20	0,25	0,03	0,13	0,16	0,33	0,38	0,24	0,42

* DPM – desvio padrão médio CV (%) – coeficiente de variação
Em cada linha, médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey (p<0,05).

Tabela 23. Valores de umidade ótima do ensaio de compactação normal de Proctor aplicado ao solo arenoso adicionado das combinações de aglomerante -casca de arroz.

Tipo de aglomerante		h _{ótima} - Umidade ótima (%) – SOLO ARENOSO												
		C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃
Cimento	Média	13,50 fg	13,40 g	13,82 efg	14,10 de	14,57 cd	15,67 b	16,00 b	13,45 g	14,02 def	14,83 c	15,63 b	16,57 a	17,12 a
	DPM *	0,20	0,10	0,08	0,17	0,25	0,29	0,00	0,38	0,23	0,12	0,31	0,21	0,19
	CV (%)	1,48	0,75	0,55	1,23	1,73	1,84	0,00	2,81	1,61	0,78	1,95	1,26	1,11
Cal	Média	13,50 f	13,80 ef	14,07 e	14,67 d	15,08 cd	15,27 c	16,13 b	13,97 ef	14,63 d	15,30 c	15,97 b	16,32 b	17,92 a
	DPM	0,20	0,17	0,15	0,06	0,18	0,25	0,15	0,06	0,15	0,26	0,06	0,16	0,24
	CV (%)	1,48	1,26	1,09	0,39	1,16	1,65	0,95	0,41	1,04	1,73	0,36	0,99	1,32

* DPM – desvio padrão médio CV (%) – coeficiente de variação
Em cada linha, médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey (p<0,05).

Tabela 24. Valores de massa específica aparente seca máxima do ensaio de compactação normal de Proctor aplicado ao solo argiloso adicionado das combinações de aglomerante-casca de arroz.

Tipo de aglomerante		$\gamma_{\text{máx}}$ - Massa específica aparente seca máxima (kN/m ³) – SOLO ARGILOSO												
		C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃
Cimento	Média	15,72 a	15,78 a	15,49 b	15,16 cd	14,98 de	14,81 ef	14,69 fg	15,75 a	15,27 c	14,95 e	14,83 ef	14,62 g	14,33 h
	DPM *	0,15	0,09	0,04	0,05	0,04	0,02	0,06	0,11	0,04	0,06	0,07	0,01	0,03
	CV (%)	0,92	0,56	0,24	0,33	0,23	0,16	0,38	0,70	0,24	0,41	0,44	0,04	0,21
Cal	Média	15,72 a	15,34 b	14,85 c	14,81 cd	14,66 de	14,60 ef	14,53 ef	15,33 b	14,94 c	14,84 c	14,54 ef	14,46 f	14,25 g
	DPM	0,15	0,03	0,04	0,04	0,03	0,00	0,03	0,04	0,03	0,03	0,07	0,05	0,02
	CV (%)	0,92	0,23	0,28	0,30	0,22	0,00	0,21	0,23	0,23	0,21	0,50	0,37	0,16

* DPM – desvio padrão média

CV (%) – coeficiente de variação

Em cada linha, médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey (p<0,05).

Tabela 25. Valores de umidade ótima do ensaio de compactação normal de Proctor aplicado ao solo argiloso adicionado das combinações de aglomerante-casca de arroz.

Tipo de aglomerante		$h_{\text{ótima}}$ - Umidade ótima (%) – SOLO ARGILOSO												
		C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃
Cimento	Média	26,50 ef	25,95 f	26,37 ef	27,37 d	28,33 bc	28,38 bc	28,73 ab	25,92 f	27,13 de	27,67 cd	27,67 cd	28,17 bc	29,23 a
	DPM *	0,50	0,40	0,06	0,15	0,12	0,13	0,23	0,08	0,21	0,12	0,47	0,15	0,15
	CV (%)	1,89	1,53	0,22	0,56	0,41	0,44	0,80	0,29	0,77	0,42	1,71	0,54	0,52
Cal	Média	26,50 e	27,70 d	28,83 bc	28,83 bc	29,67 a	29,70 a	29,77 a	28,28 cd	28,33 cd	28,43 cd	28,67 bc	28,87 bc	29,40 ab
	DPM	0,50	0,52	0,29	0,15	0,23	0,17	0,21	0,28	0,31	0,15	0,29	0,23	0,26
	CV (%)	1,89	1,88	1,00	0,53	0,78	0,58	0,70	0,97	1,08	0,54	1,01	0,80	0,90

* DPM – desvio padrão médio

CV (%) – coeficiente de variação

Em cada linha, médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey (p<0,05).

A análise de variância (**Tabelas 18 a 21**) mostrou que os fatores tipo de combinação aglomerante-casca e o tipo de aglomerante, bem como suas interações, promoveram efeitos significativos nas variáveis massa específica aparente seca máxima $\gamma_{\max}$ e umidade ótima h_{ot} .

A aplicação do teste de Tukey aos dados das **Tabelas 22 e 24** revelou que, tanto para o solo arenoso como para o solo argiloso, os maiores valores de massa específica aparente seca máxima foram apresentados pelas testemunhas (C_1) e pelos solos adicionados das combinações com teor de 100% de aglomerante (C_2 e C_8). Para ambos os solos, quando adicionadas as combinações com 100% de cimento (C_2 e C_8), houve um aumento não-significativo dos valores de $\gamma_{\max}$ em relação aos valores das testemunhas. Em contrapartida, as combinações com 100% de cal (C_2 e C_8) adicionadas aos solos arenoso e argiloso promoveram um decréscimo significativo dos valores de $\gamma_{\max}$ em relação aos valores das testemunhas. Esta redução deveu-se às reações iniciais do sistema solo-cal compactado, resultando em um material de maior porosidade.

Independente do tipo de combinação, a incorporação das combinações compostas pelo aglomerante cimento levaram os solos arenoso e argiloso a valores de $\gamma_{\max}$ e h_{ot} sempre maiores e menores, respectivamente, do que quando incorporadas as combinações com o aglomerante cal (**Tabelas 22 a 25**).

Todas as combinações que levaram teores de casca de arroz em sua composição apresentaram valores de $\gamma_{\max}$ inferiores aos valores das testemunhas e das misturas compostas por combinações de 100% de aglomerante. Para ambos os solos, tanto para as combinações de cimento-casca como para as combinações de cal-casca, quanto maior foi o teor de casca de arroz adicionado às combinações, maior foi a diminuição da massa específica aparente seca máxima e maior a elevação da umidade ótima, sendo estas variações estatisticamente significativas (**Tabelas 22 a 25 e Figuras 19 a 26**).

Independente do tipo de solo e do tipo de aglomerante, conforme se aumentava a quantidade de casca de arroz nas misturas, maior era a dificuldade de compactação, resultando, assim, na elevação do volume de vazios no sistema compactado. Portanto, como já esperado, as curvas de compactação foram mais pronunciadas no caso das misturas que continham combinações com 100% de aglomerante, enquanto que as misturas contendo combinações com alto teor de casca apresentaram as curvas mais achatadas, demonstrando o efeito negativo da adição de casca ao solo-aglomerante compactado (**Figuras 19 a 26**).

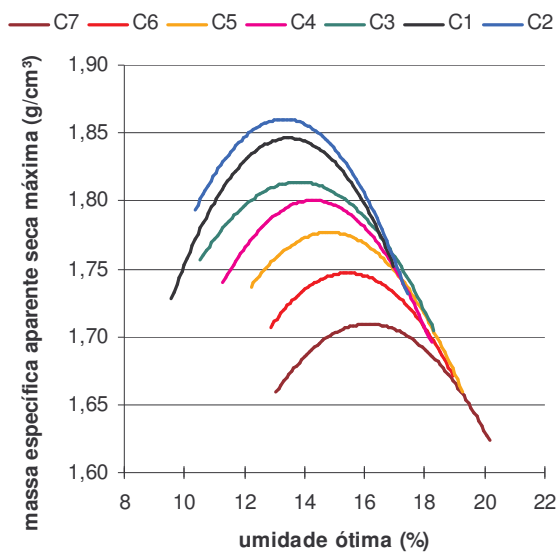


Figura 19. Curvas de compactação do solo arenoso adicionado do teor de 8% das combinações cimento-casca de arroz.

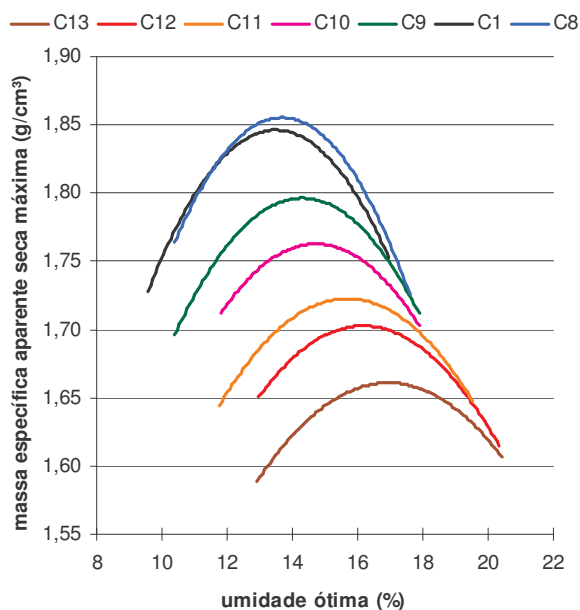


Figura 20. Curvas de compactação do solo arenoso adicionado do teor de 12% das combinações cimento-casca de arroz.

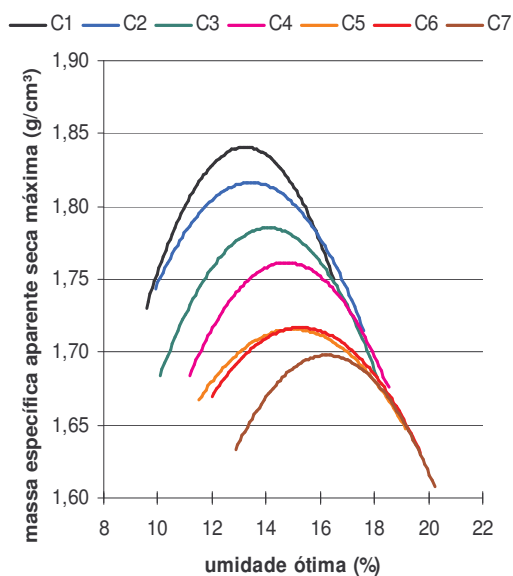


Figura 21. Curvas de compactação do solo arenoso adicionado do teor de 8% das combinações cal-casca de arroz.

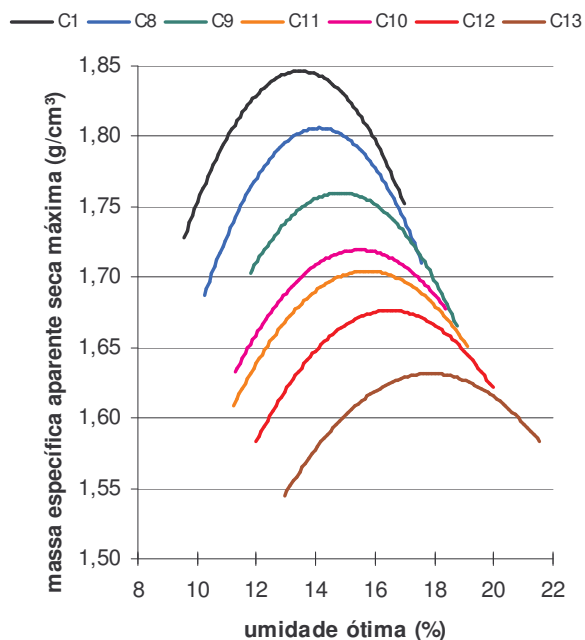


Figura 22. Curvas de compactação do solo arenoso adicionado do teor de 12% das combinações cal-casca de arroz.

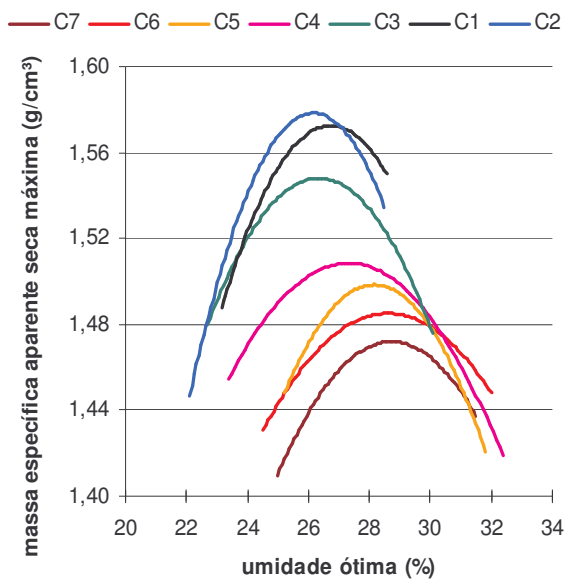


Figura 23. Curvas de compactação do solo argiloso adicionado do teor de 8% das combinações cimento-casca de arroz.

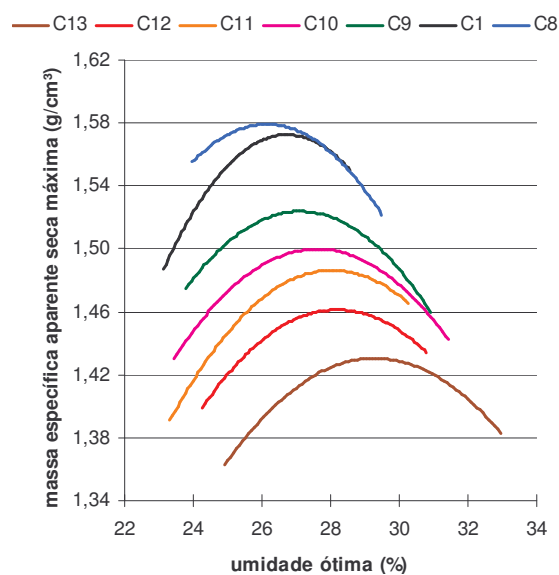


Figura 24. Curvas de compactação do solo argiloso adicionado do teor de 12% das combinações cimento-casca de arroz.

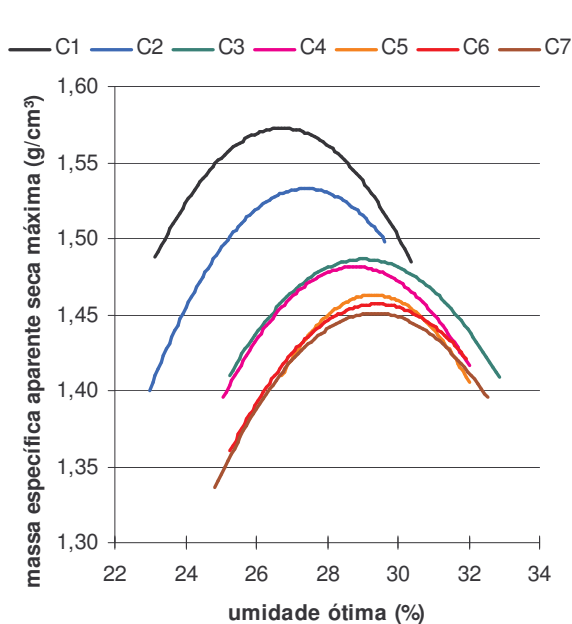


Figura 25. Curvas de compactação do solo argiloso adicionado do teor de 8% das combinações cal-casca de arroz.

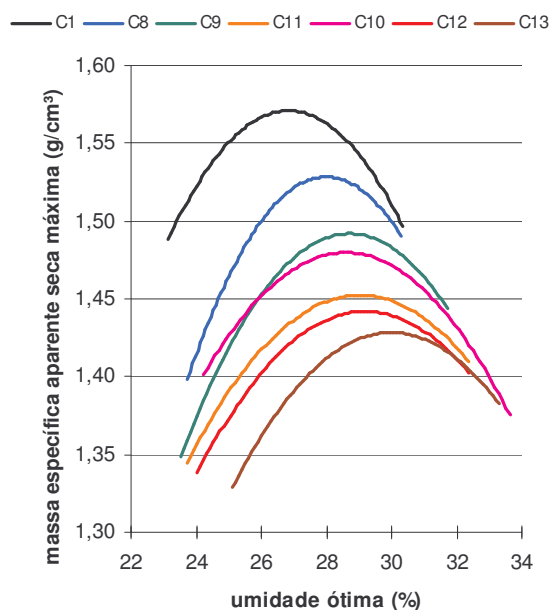


Figura 26. Curvas de compactação do solo argiloso adicionado do teor de 12% das combinações cal-casca de arroz.

5.2.2. ENSAIO PRELIMINAR DE COMPRESSÃO SIMPLES

Os valores médios preliminares de resistência à compressão simples dos corpos-de-prova confeccionados com diferentes misturas de solo-aglomerante-casca de arroz estão apresentados nas **Tabelas 28 e 29** e suas respectivas análises de variância encontram-se nas **Tabelas 26 e 27**.

A partir desta etapa foram descartadas as combinações **C₇** – 8% da combinação (50% de aglomerante-50% casca de arroz) e **C₁₃** – 12% da combinação (50% de aglomerante-50% casca de arroz) para a confecção de corpos-de-prova, pois as mesmas, quando adicionadas ao sistema solo-água, apresentaram problemas na trabalhabilidade da mistura e, conseqüentemente, dificuldades na realização do ensaio de compactação.

Tabela 26. Análise de variância referente aos efeitos das adições no solo arenoso sobre a variável resistência à compressão simples preliminar de corpos-de-prova (MPa).

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
Tipo de aglomerante	1	33,75	33,75	3764,53	0,00001
Tipo de combinação	10	15,22	1,52	169,74	0,00001
Interação aglom x combin.	10	12,14	1,21	135,41	0,00001
Resíduo	44	0,39	0,01		
Total	65	61,51			
Média geral = 1,04 MPa			Coeficiente de variação = 9,04%		

Tabela 27. Análise de variância referente aos efeitos das adições no solo argiloso sobre a variável resistência à compressão simples preliminar de corpos-de-prova (MPa).

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
Tipo de aglomerante	1	1,82	1,82	2753,78	0,00001
Tipo de combinação	10	1,65	0,16	249,38	0,00001
Interação aglom x combin.	10	1,06	0,10	160,26	0,00001
Resíduo	44	0,03	0,00		
Total	65	4,56			
Média geral = 0,39 MPa			Coeficiente de variação = 6,54%		

Tabela 28. Resistência à compressão simples preliminar (MPa), aos 7 dias, de corpos-de-prova confeccionados com solo arenoso adicionado de diferentes combinações de aglomerante-casca de arroz (sem imersão em água).

Resistência à compressão simples (MPa)		Solo arenoso adicionado de combinações aglomerante-casca de arroz										
		C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂
Cimento	Média	0,16 g	2,35 b A	1,84 c A	1,69 c A	0,95 e A	0,59 f A	3,45 a A	2,56 b A	2,47 b A	1,92 c A	1,40 d A
	DPM*	0,01	0,26	0,11	0,05	0,06	0,05	0,25	0,12	0,14	0,07	0,04
	CV (%)	5,26	10,91	5,92	2,97	5,89	7,97	7,25	4,75	5,86	3,55	2,96
Cal	Média	0,16 a	0,37 a B	0,34 a B	0,34 a B	0,34 a B	0,26 a B	0,38 a B	0,37 a B	0,36 a B	0,36 a B	0,36 a B
	DPM	0,01	0,01	0,06	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04
	CV (%)	5,26	3,70	16,32	4,78	5,44	1,22	2,22	2,26	4,04	2,66	10,00

* DPM – desvio padrão médio

CV (%) – coeficiente de variação

Em cada linha, médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey (p<0,05).

Em cada coluna, médias seguidas da mesma letra maiúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey (p<0,05).

Tabela 29. Resistência à compressão simples preliminar (MPa), aos 7 dias, de corpos-de-prova confeccionados com solo argiloso adicionado de diferentes combinações de aglomerante-casca de arroz (sem imersão em água).

Resistência à compressão simples (MPa)		Solo argiloso adicionado de combinações aglomerante-casca de arroz										
		C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂
Cimento	Média	0,21 f	0,65 c A	0,44 de A	0,43 de A	0,38 e A	0,37 e A	1,26 a A	0,93 b A	0,61 c A	0,48 d A	0,38 e A
	DPM*	0,03	0,03	0,07	0,03	0,04	0,01	0,02	0,01	0,03	0,01	0,03
	CV (%)	13,19	4,98	16,64	6,64	9,52	3,70	1,27	1,38	5,68	2,74	7,57
Cal	Média	0,21 bc	0,28 a B	0,22 abc B	0,21 c B	0,18 c B	0,18 c B	0,29 a B	0,29 a B	0,22 abc B	0,21 c B	0,20 c B
	DPM	0,03	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00
	CV (%)	13,19	5,36	5,52	2,69	1,52	0,87	4,36	3,10	0,00	3,33	2,44

* DPM – desvio padrão médio

CV (%) – coeficiente de variação

Em cada linha, médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey (p<0,05).

Em cada coluna, médias seguidas da mesma letra maiúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey (p<0,05).

A análise de variância (**Tabelas 26 e 27**) mostrou que os fatores tipo de combinação e tipo de aglomerante, bem como suas interações, promoveram efeitos significativos na variável resistência à compressão simples preliminar dos corpos-de-prova de solo-aglomerante-casca.

Tanto para o solo arenoso como para o solo argiloso, os valores de resistência à compressão simples, variaram, principalmente, em função do tipo de aglomerante utilizado na composição das combinações (**Tabela 26 e 27**). Dessa forma, independente dos teores de aglomerante e de casca de arroz, a utilização do aditivo cimento nas misturas de solo-aglomerante-casca de arroz resultou em melhores desempenhos frente à resistência à compressão simples do que quando utilizado o aditivo cal (**Tabelas 28 e 29**).

Em ambos os solos, a incorporação de combinações cal-casca não promoveu aumento significativo nos valores de resistência à compressão simples em relação às testemunhas (solos naturais). Independente do teor de cal e do teor de casca adicionado aos solos, os valores de resistência à compressão simples dos corpos-de-prova mantiveram-se na faixa de 0,18 MPa a 0,29 MPa para as misturas de solo argiloso-cal-casca de arroz e na faixa de 0,26 MPa a 0,38 MPa para as misturas de solo arenoso-cal-casca de arroz (**Tabelas 28 e 29**), valores estes estatisticamente iguais entre si e inadequados para alcançar os objetivos do presente trabalho. Esses resultados mostraram que os baixos valores de resistência mecânica das misturas foram causados pela ineficiência do agente estabilizador cal, e a presença da casca de arroz e a adição de diferentes combinações de cal-casca pouca influência tiveram nos resultados. Assim, o fator limitante para o bom desempenho mecânico das misturas solo-cal-casca de arroz foi a composição do solo (granulometria e tipo de argila).

Dessa forma, foram confirmados os relatos de Barbosa e Tolêdo Filho (1997) que enfatizaram o cimento como o melhor agente estabilizador para solos classificados como arenosos. Já, no caso dos solos argilosos, apesar de diversos relatos sobre sua boa estabilização com cal, acredita-se que o solo utilizado nas misturas contém baixa quantidade de argila montmorilonita, a qual, segundo a literatura, é ideal para fixar a cal e resultar em uma expressiva estabilização do sistema solo-cal. Ferreira (2003) encontrou valores de resistência à compressão simples para o solo argiloso (A_{5-6}) estabilizado com 6% e 10% de cal hidratada da ordem de 0,28 MPa, aos 7 dias. O autor também observou que, no decorrer de 56 dias, os resultados de resistência não sofreram alterações nos valores, sendo então descartada a ocorrência de reações pozolânicas ao longo do tempo.

Portanto, conforme resultados e discussão apresentados, optou-se pelo abandono do aglomerante cal para as etapas subseqüentes da pesquisa. Segundo Mendonça et al. (1996), a elevação da temperatura no processo de cura do solo-cal, acelera a atividade pozolânica do sistema; porém, este procedimento não se adequou à proposta do presente trabalho.

No que diz respeito à resistência à compressão simples dos corpos-de-prova confeccionados com solo arenoso (**Tabela 28**), a adição da combinação cimento-casca (independente dos teores dos componentes em questão) melhorou, significativamente, o desempenho mecânico do solo arenoso natural. Porém, quanto maiores foram os teores de casca de arroz na composição das combinações, menores foram os valores de resistência à compressão simples alcançados pelos corpos-de-prova.

Em relação à combinação **C₂** – 8% da combinação (100% de cimento-0% casca) adicionada ao solo arenoso, as reduções percentuais nos valores da resistência à compressão simples dos corpos-de-prova foram de 21,7% – 59,1% – 59,5% – 74,1%, respectivamente, para as combinações cimento-casca **C₃**, **C₄**, **C₅**, **C₆**. Já em relação à combinação **C₈** – 12% da combinação (100% de cimento-0% casca), as reduções foram de 25,8% – 28,4% – 44,3% – 59,4%, respectivamente, para as combinações cimento-casca **C₉**, **C₁₀**, **C₁₁**, **C₁₂**. Deve-se ressaltar que a diminuição dos valores de resistência não somente foi afetada pela presença da casca de arroz, mas também pela diminuição gradativa do teor de cimento nas combinações, visto que, quanto menores as quantidades de cimento, menor o efeito de estabilização no solo.

Considerando-se o parâmetro teor das combinações adicionadas ao solo arenoso, o aumento de 8% para 12% das combinações cimento-casca de arroz aumentou consideravelmente o valor de resistência à compressão simples das misturas correspondentes (**Tabela 30**), compensando o efeito negativo da casca de arroz.

Tabela 30. Ganhos de resistência proporcionado pelo aumento do teor de combinações.

Composição das diferentes combinações	Resistência à compressão simples (MPa)		Ganho de Resistência (%)
	8% da combinação	12% da combinação	
(100% cimento-0% casca)	2,35	3,45	46,8
(90% cimento-10% casca)	1,84	2,56	39,1
(80% cimento-20% casca)	1,69	2,47	46,1
(70% cimento-30% casca)	0,95	1,92	102,1
(60% cimento-40% casca)	0,59	1,40	137,3

Analisando o solo arenoso adicionado do teor de 8% da combinação cimento-casca de arroz (**Tabela 28**), apenas as combinações C₂, C₃ e C₄ apresentaram resistência à compressão maior que 1,5 MPa, enquanto que, para o teor de 12% da combinação cimento-casca, tal fato ocorreu com as combinações C₈, C₉, C₁₀ e C₁₁. Estatisticamente, não houve diferenças significativas entre as combinações C₂ e C₃ e entre as combinações C₉ e C₁₀.

Portanto, seguindo os critérios de maior teor de casca aliado ao valor mínimo de resistência à compressão simples de 1,5 MPa, as primeiras misturas (tratamentos) escolhidas para fins de caracterização físico-mecânica foram:

T₁ – Testemunha - solo arenoso sem adição

T₂ – solo arenoso + 8% da combinação (100% cimento-0% casca)

T₃ – solo arenoso + 8% da combinação (80% cimento-20% casca)

T₄ – solo arenoso + 12% da combinação (100% cimento-0% casca)

T₅ – solo arenoso + 12% da combinação (80% cimento-20% casca)

T₆ – solo arenoso + 12% da combinação (70% cimento-30% casca)

Já para o solo argiloso adicionado das combinações de cimento-casca de arroz, somente as combinações **C₈** - 12% da combinação (100% de cimento-0% casca) e **C₉** - 12% da combinação (90% de cimento-10% casca) resultaram em valores expressivos de resistência à compressão simples. Observou-se que o aumento do teor de 8% para 12% da combinação 100% de cimento-0% de casca promoveu um ganho de resistência de aproximadamente 94% do sistema solo argiloso-cimento, indicando que, quanto maior fosse o teor da combinação composta por cimento, maior seria a probabilidade de ganhos de resistência mecânica.

Assim, como nenhuma combinação composta por cimento atingiu o valor de resistência à compressão mínima de 1,5 MPa (**Tabela 30**), adotaram-se mais dois teores da combinação cimento-casca para serem incorporados ao solo argiloso. Os teores foram 14% e 18% da combinação cimento-casca, sendo que as variações de cimento e de casca foram de 100% de cimento a 0% de casca, e 80% de cimento a 20% de casca, em incrementos de 10%. Adotou-se o incremento máximo de 20% de casca visto que os teores de 14% e 18% da combinação cimento-casca já são por si só elevados.

Foram então realizados ensaios complementares de compactação normal de Proctor e de compressão simples de corpos-de-prova de solo argiloso-cimento-casca. As **Tabelas 31** e

32 apresentam, respectivamente, os valores médios de massa específica aparente seca máxima, umidade ótima e resistência à compressão simples dos corpos-de-prova confeccionados com solo argiloso adicionado dos teores de 14% e 18% das combinações cimento-casca de arroz.

Tabela 31. Valores de massa específica aparente seca máxima ($\gamma_{\text{máx}}$) e umidade ótima ($h_{\text{ótima}}$) do ensaio de compactação de Proctor aplicado ao solo argiloso adicionado dos teores de 14% e 18% das combinações cimento-casca.

Parâmetros		Misturas de solo argiloso-cimento-casca de arroz						
		C ₁	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆	C ₁₇	C ₁₈	C ₁₉
$\gamma_{\text{máx}}$ (kN/m ³)	Média	15,72 a	15,81 a	15,46 bc	15,02 d	15,81 a	15,48 b	15,04 d
	DPM*	0,15	0,01	0,03	0,02	0,01	0,03	0,02
	CV (%)	0,92	0,06	0,16	0,13	0,06	0,16	0,14
$h_{\text{ótima}}$ (%)	Média	26,50 ab	24,20 d	25,63 c	26,10 b	24,73 d	26,10 b	26,70 a
	DPM	0,50	0,10	0,06	0,10	0,12	0,17	0,10
	CV (%)	1,89	0,41	0,23	0,38	0,47	0,66	0,37

* DPM – desvio padrão médio

CV (%) – coeficiente de variação

Em cada linha, médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey (p<0,05).

Tabela 32. Resistência à compressão simples (MPa), aos 7 dias, de corpos-de-prova confeccionados com solo argiloso adicionado teores de 14% e 18% das combinações cimento-casca de arroz (sem imersão em água).

Resistência à compressão simples - (MPa)		Solo argiloso adicionado de combinações cimento-casca de arroz						
		C ₁	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆	C ₁₇	C ₁₈	C ₁₉
Cimento	Média	0,21 f	1,33 c	1,15 d	0,90 e	1,81 a	1,76 a	1,60 b
	DPM*	0,03	0,07	0,08	0,02	0,04	0,06	0,07
	CV (%)	13,19	5,03	6,55	1,85	2,25	3,46	4,48

* DPM – desvio padrão médio

CV (%) – coeficiente de variação

Em cada linha, médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey (p<0,05).

Legenda

C₁ – solo argiloso sem adição (testemunha)

C₁₄ – solo argiloso+ 14% da combinação (100% de cimento-0% casca de arroz)

C₁₅ – solo argiloso + 14%da combinação (90% de cimento-10% casca de arroz)

C₁₆ – solo argiloso + 14% da combinação (80% de cimento-20% casca de arroz)

C₁₇ – solo argiloso + 18% da combinação (100% de cimento-0% casca de arroz)

C₁₈ – solo argiloso + 18% da combinação (90% de cimento-10% casca de arroz)

C₁₉ – solo argiloso + 18% da combinação (80% de cimento-20% casca de arroz)

Os resultados mostrados na **Tabela 31** indicaram comportamento semelhante ao encontrado para o solo argiloso adicionado de menores teores das combinações de cimento-casca, ou seja, houve acréscimo não-significativo dos valores de $\gamma_{\max}$ em relação aos valores das testemunhas quando adicionadas as combinações com 100% de cimento, enquanto que a incorporação da casca de arroz proporcionou redução do $\gamma_{\max}$, tanto maiores quanto maiores foram as quantidades do resíduo nas misturas.

Os dados da **Tabela 32** revelaram que apenas o teor de 18% das combinações cimento-casca alcançou o valor de resistência mínima de 1,5 MPa, sendo então confirmada a constatação da etapa de caracterização do solo, ou seja, o solo argiloso necessitou de grandes quantidades de estabilizador para alcançar a resistência mecânica desejada no presente trabalho. Novamente os resultados apresentados reafirmaram que o solo argiloso provavelmente contém baixo teor de montmorilonita, pois se o mesmo apresentasse altas quantidades desse tipo de argila, a sua resistência mecânica não sofreria alterações quando tratado com cimento.

Destaca-se também o ganho de resistência proporcionado aos corpos-de-prova conforme o aumento do teor de cimento; porém, sob o aspecto econômico, foi inviável a elevação do cimento para teores superiores a 18%. Então, as demais misturas (tratamentos) escolhidas para fins de caracterização físico-mecânica foram:

T₇ – Testemunha - solo argiloso sem adição

T₈ – solo argiloso + 18% da combinação (100% cimento-0% casca)

T₉ – solo argiloso + 18% da combinação (90% cimento-10% casca)

T₁₀ – solo argiloso + 18% da combinação (80% cimento-20% casca)

5.2.3. RELAÇÃO ENTRE A MASSA ESPECÍFICA APARENTE SECA MÁXIMA E A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DOS CORPOS-DE-PROVA CONFECCIONADOS A PARTIR DAS MISTURAS DE SOLO-AGLOMERANTE-CASCA DE ARROZ

Nas **Figuras 27 a 31** estão mostrados os valores preliminares de resistência à compressão simples, aos 7 dias, e seus respectivos valores de massa específica aparente seca máxima dos corpos-de-prova confeccionados com as misturas de solo-aglomerante-casca.

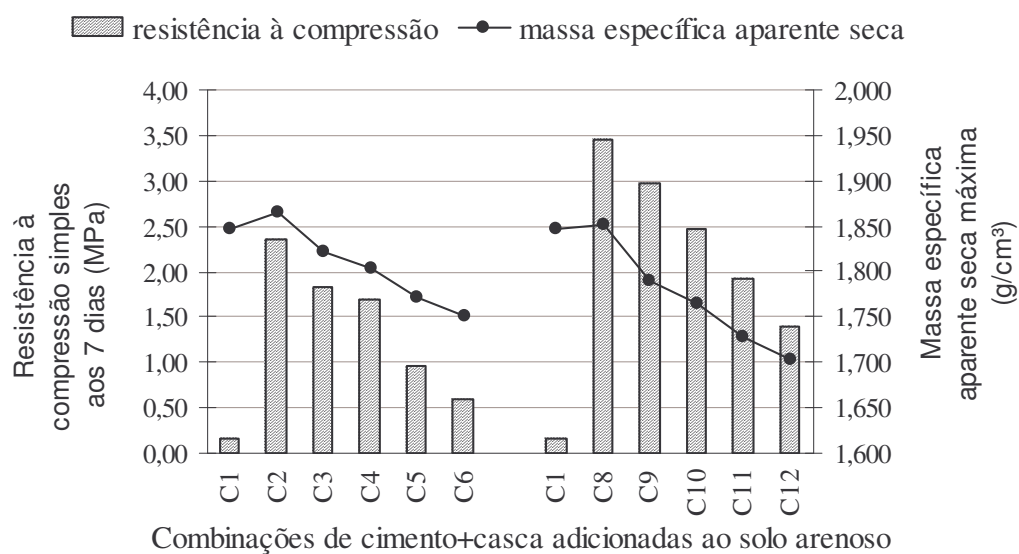


Figura 27. Valores de resistência à compressão simples e de massa específica aparente seca máxima dos corpos-de-prova de solo arenoso-cimento-casca de arroz.

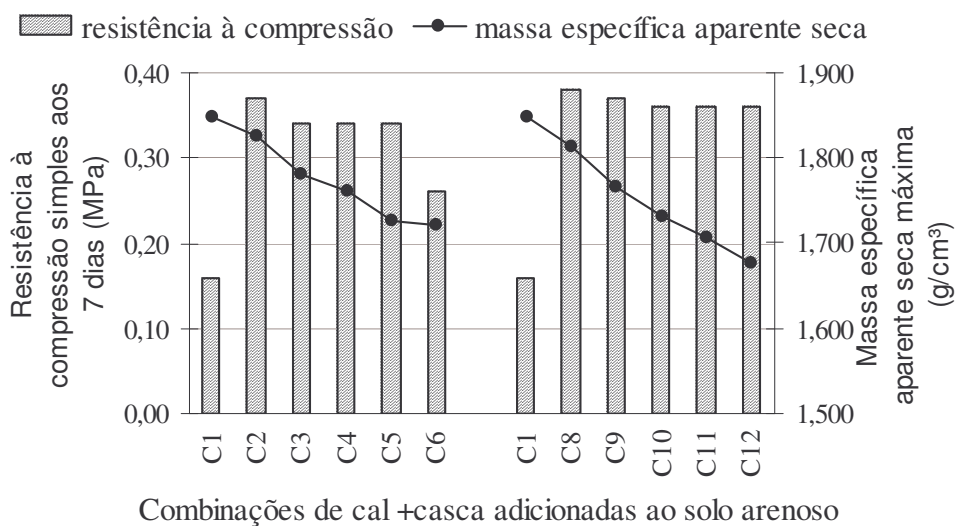


Figura 28. Valores de resistência à compressão simples e de massa específica aparente seca máxima dos corpos-de-prova de solo arenoso-cal-casca de arroz.

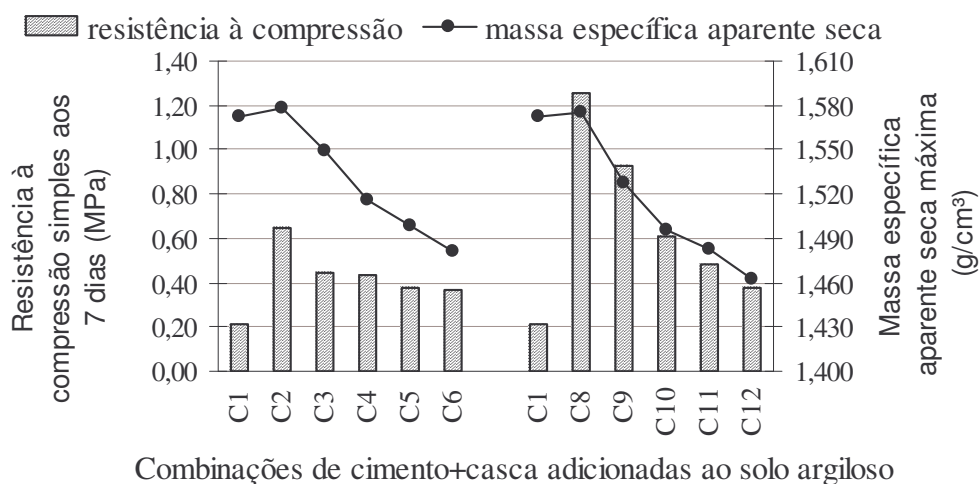


Figura 29. Valores de resistência à compressão simples e de massa específica aparente seca máxima dos corpos-de-prova de solo argiloso-cimento-casca de arroz.

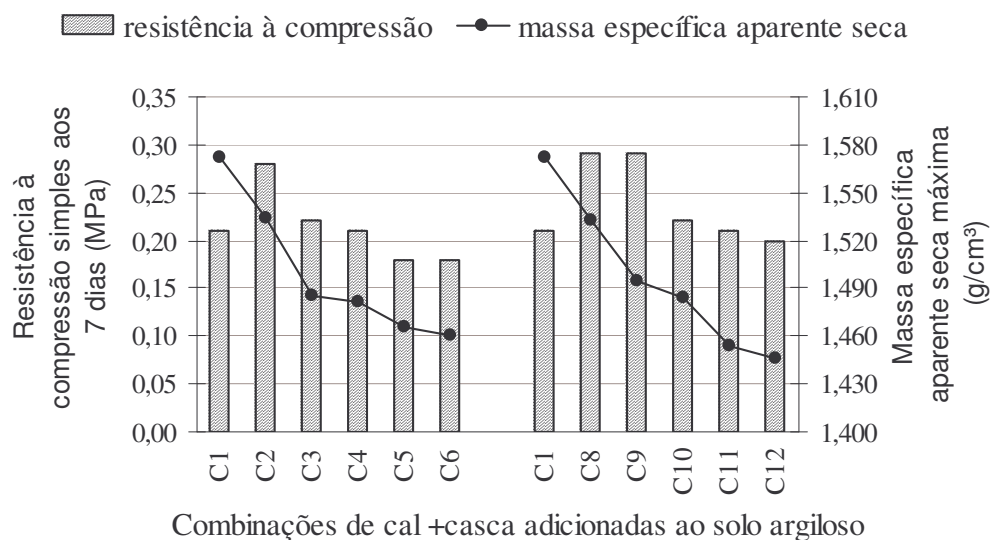


Figura 30. Valores de resistência à compressão simples e de massa específica aparente seca máxima dos corpos-de-prova de solo argiloso-cal-casca de arroz.

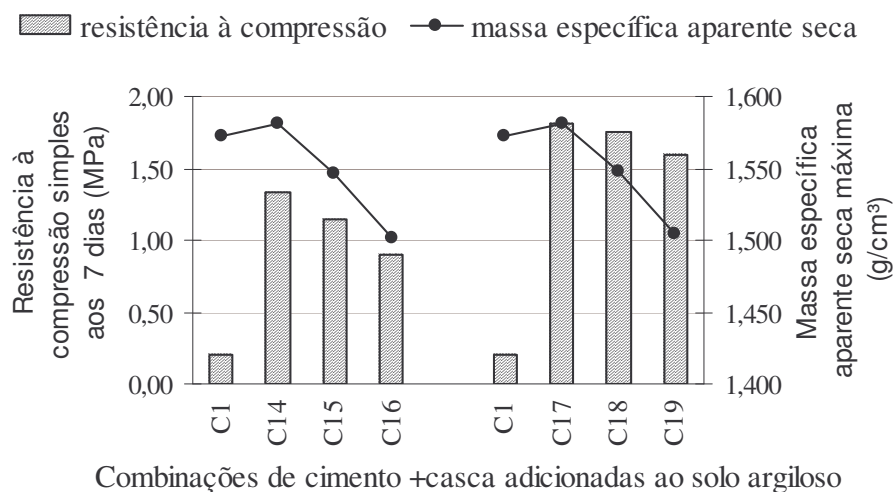


Figura 31. Valores de resistência à compressão simples e de massa específica aparente seca máxima dos corpos-de-prova de solo argiloso adicionado de elevados teores das combinações cimento-casca de arroz.

Pode-se notar que, ao se adicionar nos solos arenoso e argiloso combinações de cimento-casca (**Figuras 27, 29 e 31**), os valores de resistência à compressão simples e de massa específica aparente seca máxima (γ_{max}) diminuíram tanto mais quanto maior foi o teor de casca incorporada à mistura. Essa semelhança de comportamento pode ser explicada pela relação existente entre as propriedades físico-mecânicas do sistema solo-aglomerante compactado com a densidade, pois quanto menos vazios no sistema, melhor será a interação entre solo-aditivo e, conseqüentemente, maiores serão as resistências alcançadas.

Entretanto, a adição de combinações de cal-casca em ambos os solos (**Figuras 28 e 30**) proporcionou quedas bruscas de γ_{max} , tanto maior quanto maior foi o teor de casca incorporado. Os valores de resistência alcançados pelas diferentes misturas de solo-cal-casca de arroz não apresentaram alterações significativas conforme o aumento da quantidade de cal-casca adicionada, ficando restrita a relação entre a densidade e resistência das misturas solo-cal-casca de arroz. Este fato está relacionado às dificuldades de estabilização dos solos com o aglomerante cal, limitando assim o desempenho mecânico das misturas solo-cal-casca de arroz.

5.3. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DOS CORPOS-DE-PROVA CONFECCIONADOS A PARTIR DOS TRATAMENTOS COM SOLO-CIMENTO-CASCA DE ARROZ

5.3.1. MASSA ESPECÍFICA APARENTE SECA E GRAU DE COMPACTAÇÃO

A **Tabela 33** apresenta os valores médios da massa específica aparente seca e grau de compactação (**Equação 2**) alcançados pelos corpos-de-prova confeccionados a partir das misturas de solo-cimento-casca de arroz (tratamentos) escolhidas na etapa do estudo de dosagem. Esses corpos-de-prova foram destinados aos ensaios destrutivos e não-destrutivos.

Pela **Tabela 33** verificou-se que os valores do grau de compactação (GC) estão de acordo com as recomendações de Bueno e Vilar (1999), ou seja, GC não inferior a 95% e superior a 105%. Sendo assim, houve um controle adequado das condições de moldagem, sendo descartada a influência das variações de umidade de moldagem e de massa específica aparente seca nos resultados dos ensaios aplicados aos corpos-de-prova.

Tratamentos – misturas de solo-cimento-casca de arroz

T₁ – Testemunha - solo arenoso sem adição

T₂ – solo arenoso + 8% da combinação (100% cimento-0% casca)

T₃ – solo arenoso + 8% da combinação (80% cimento-20% casca)

T₄ – solo arenoso + 12% da combinação (100% cimento-0% casca)

T₅ – solo arenoso + 12% da combinação (80% cimento-20% casca)

T₆ – solo arenoso + 12% da combinação (70% cimento-30% casca)

T₇ – Testemunha - solo argiloso sem adição

T₈ – solo argiloso + 18% da combinação (100% cimento-0% casca)

T₉ – solo argiloso + 18% da combinação (90% cimento-10% casca)

T₁₀ – solo argiloso + 18% da combinação (80% cimento-20% casca)

Tabela 33. Valores médios da massa específica aparente seca e grau de compactação dos corpos-de-prova cilíndricos confeccionados com diferentes tratamentos de solo-cimento-casca de arroz.

Tipos de Tratamento	Massa específica aparente seca (kN/m ³)		Grau de compactação (%)	
	7 dias *	28 dias	7 dias	28 dias
T ₁	18,49 ± 0,07 (0,36)	18,51 ± 0,01 (0,44)	100,09 ± 0,36 (0,36)	100,21 ± 0,44 (0,44)
T ₂	18,40 ± 0,03 (0,17)	18,58 ± 0,01 (0,33)	98,70 ± 0,17 (0,17)	99,66 ± 0,33 (0,33)
T ₃	17,97 ± 0,07 (0,38)	18,10 ± 0,01 (0,13)	99,68 ± 0,38 (0,38)	100,37 ± 0,13 (0,13)
T ₄	18,46 ± 0,07 (0,36)	18,63 ± 0,01 (0,05)	99,65 ± 0,36 (0,36)	100,59 ± 0,05 (0,05)
T ₅	17,74 ± 0,08 (0,47)	17,82 ± 0,01 (0,10)	100,50 ± 0,47 (0,47)	100,97 ± 0,10 (0,10)
T ₆	17,23 ± 0,04 (0,22)	17,33 ± 0,01 (0,23)	99,67 ± 0,22 (0,22)	100,24 ± 0,23 (0,23)
T ₇	15,38 ± 0,25 (1,60)	15,36 ± 0,02 (1,50)	97,83 ± 1,56 (1,60)	97,71 ± 1,47 (1,50)
T ₈	15,70 ± 0,01 (0,04)	15,66 ± 0,01 (0,04)	99,30 ± 0,04 (0,04)	99,04 ± 0,04 (0,04)
T ₉	15,43 ± 0,03 (0,18)	15,42 ± 0,01 (0,13)	99,70 ± 0,18 (0,18)	99,62 ± 0,13 (0,13)
T ₁₀	15,15 ± 0,01 (0,03)	15,16 ± 0,01 (0,02)	100,74 ± 0,03 (0,03)	100,79 ± 0,02 (0,02)

* Valores médios ± desvio padrão (coeficiente de variação)

5.3.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS DESTRUTIVOS APLICADOS AOS CORPOS-DE-PROVA

Os valores médios de resistência à compressão simples e de resistência à tração na compressão diametral foram analisados estatisticamente e suas respectivas análises de variância estão apresentados nas **Tabelas 34 e 35**. Para os valores de capacidade de absorção d'água foi aplicado somente o teste de Tukey, visto que os resultados do ensaio variaram exclusivamente pelo tipo de tratamento.

Tabela 34. Análise de variância referente aos efeitos dos tratamentos sobre a variável resistência à compressão simples de corpos-de-prova (MPa).

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
Idade	1	5,90	5,29	354,96	0,00001
Tipo de tratamento	9	29,95	3,32	222,96	0,00001
Interação idade x tratam.	9	1,60	0,17	11,94	0,00001
Resíduo	40	0,59	0,015		
Total	59	37,45			
Média geral = 1,69 MPa				Coeficiente de variação = 7,22%	

Tabela 35. Análise de variância referente aos efeitos dos tratamentos sobre a variável resistência à tração na compressão diametral de corpos-de-prova (MPa).

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
Idade	1	0,08	0,08	123,31	0,00001
Tipo de tratamento	9	1,32	0,14	205,18	0,00001
Interação idade x tratam.	9	0,09	0,01	14,37	0,00001
Resíduo	40	0,03	0,00		
Total	59	1,52			
Média geral = 0,28 MPa				Coeficiente de variação = 9,65%	

Pelas **Tabelas 34 e 35**, pode-se afirmar que os fatores estudados, idade e tipo de tratamento, bem como suas interações, promoveram efeitos significativos nas variáveis resistência à compressão simples e resistência à tração na compressão diametral.

As **Tabelas 36 e 37** apresentam os resultados da análise do efeito da interação entre os fatores tipo de tratamento e idade nos valores médios de resistência à compressão simples e resistência à tração na compressão diametral dos corpos-de-prova cilíndricos confeccionados com diferentes tratamentos de solo-cimento-casca de arroz.

De acordo com resultados das **Tabelas 36 e 37**, independente da idade, os tratamentos de melhor desempenho mecânico foram T₄, T₅, T₂ e T₆, tratamentos estes, confeccionados com solo arenoso-cimento e solo arenoso-cimento-casca de arroz, mostrando que, quando adicionou-se combinações de cimento-casca nos solos, o solo arenoso foi superior ao solo argiloso em termos de resistência.

Tabela 36. Análise do efeito da interação entre os fatores tipo de tratamento e idade nos valores médios da resistência à compressão simples dos corpos-de-prova de solo-cimento-casca de arroz (MPa).

Fatores	Níveis	Obs.	Resistência (MPa)*
Tratamentos	T4	6	3,09 a
	T5	6	2,40 b
	T2	6	2,09 c
	T6	6	2,00 c
	T8	6	1,65 d
	T9	6	1,50de
	T3	6	1,46 de
	T10	6	1,27 e
	T7	6	0,92 f
	T1	6	0,51 g
Idade	28 dias	30	1,99 a
	7 dias	30	1,39 b

* Médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Tabela 37. Análise do efeito da interação entre os fatores tipo de tratamento e idade nos valores médios da resistência à tração na compressão diametral dos corpos-de-prova de solo-cimento-casca (MPa).

Fatores	Níveis	Obs.	Resistência (MPa)*
Tratamentos	T4	6	0,54 a
	T2	6	0,44 b
	T5	6	0,42 b
	T6	6	0,33 c
	T3	6	0,26 d
	T8	6	0,22 d
	T9	6	0,19 ef
	T7	6	0,14 fg
	T10	6	0,14 g
	T1	6	0,05 h
Idade	28 dias	30	0,31 a
	7 dias	30	0,23 b

* Médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

As **Tabelas 38 e 39** e as **Figuras 32 e 33** apresentam, respectivamente, os valores médios de resistência à compressão simples e resistência à tração na compressão diametral dos corpos-de-prova cilíndricos confeccionados com diferentes tratamentos de solo-cimento-casca de arroz.

Tabela 38. Resistência à compressão simples (MPa), aos 7 e 28 dias, de corpos-de-prova confeccionados com diferentes tratamentos de solo adicionado de combinações cimento-casca de arroz.

Resistência à compressão simples (MPa)		Tratamentos – solo adicionado de combinações cimento-casca de arroz									
		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	T ₉	T ₁₀
7 dias	Média	0,16 d B	1,90 b B	1,26 c B	2,70 a B	2,00 b B	1,83 b B	0,23 d B	1,37 c B	1,36 c B	1,14 c B
	DPM*	0,01	0,06	0,04	0,24	0,05	0,06	0,01	0,03	0,05	0,03
	CV (%)	2,62	3,27	3,21	9,02	2,33	3,37	1,87	2,28	3,46	3,06
28 dias	Média	0,40 g A	2,30 c A	1,66 ef A	3,48 a A	2,81 b A	2,18 cd A	0,71 g A	1,94 de A	1,64 ef A	1,40 f A
	DPM	0,06	0,27	0,03	0,14	0,05	0,04	0,24	0,26	0,03	0,02
	CV (%)	7,42	11,70	1,94	3,95	1,95	1,72	14,7	13,3	1,72	1,48

Tabela 39. Resistência à tração na compressão diametral (MPa), aos 7 e 28 dias, de corpos-de-prova confeccionados com diferentes tratamentos de solo adicionado de combinações cimento-casca de arroz.

Tração na compressão diametral (MPa)		Tratamentos – solo adicionado de combinações cimento-casca de arroz									
		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	T ₉	T ₁₀
7 dias	Média	0,01 f B	0,33 c B	0,20 de B	0,52 a B	0,41 b A	0,33 c A	0,04 f B	0,21 d A	0,18 de A	0,14 e A
	DPM*	0,01	0,09	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	CV (%)	20,15	26,67	11,15	3,53	2,25	0,96	17,59	2,62	7,68	2,48
28 dias	Média	0,10 f A	0,56 a A	0,32 c A	0,57 a A	0,43 b A	0,34 c A	0,25 d A	0,23 d A	0,20 de A	0,15 ef A
	DPM	0,01	0,02	0,03	0,03	0,01	0,02	0,03	0,03	0,01	0,01
	CV (%)	11,78	3,98	10,31	5,99	1,46	5,30	12,06	14,15	2,88	7,68

Para as Tabelas 38 e 39 : * DPM – desvio padrão médio CV (%) – coeficiente de variação
Em cada linha, médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey (p<0,05).
Em cada coluna , médias seguidas da mesma letra maiúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey (p<0,05).

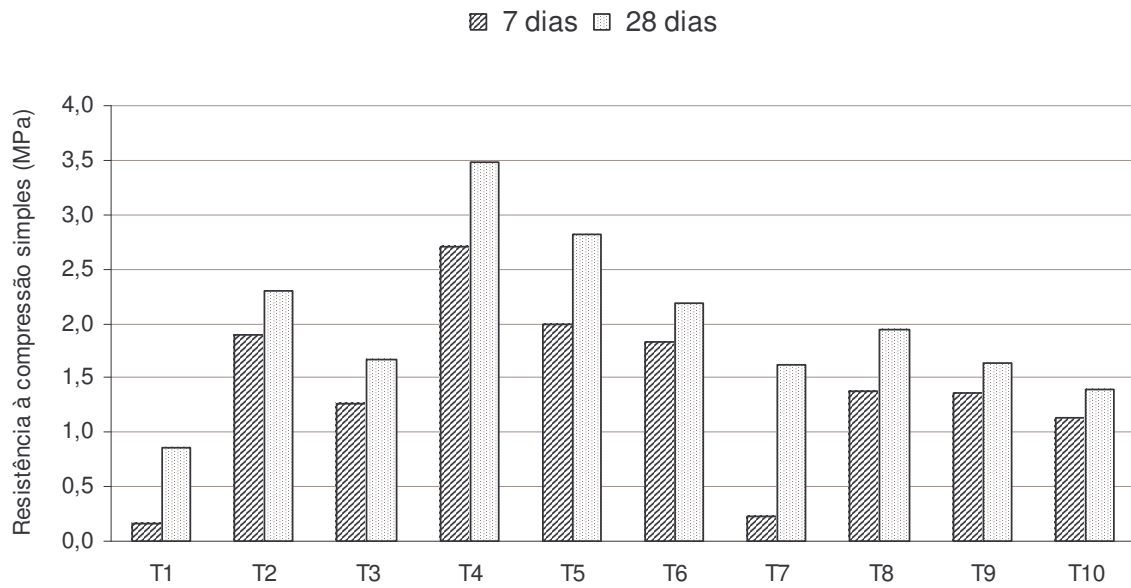


Figura 32. Valores de resistência à compressão simples, aos 7 e 28 dias, dos corpos-de-prova de solo-cimento-casca de arroz.

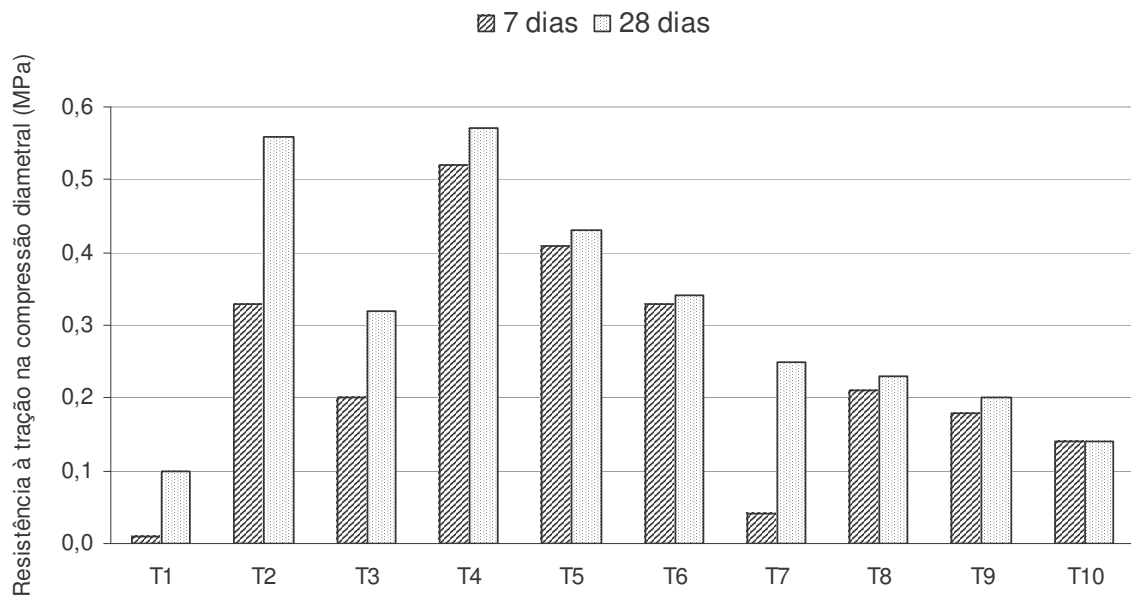


Figura 33. Valores de resistência à tração na compressão diametral, aos 7 e 28 dias, dos corpos-de-prova de solo-cimento-casca de arroz.

Com relação aos valores de resistência à compressão simples dos corpos-de-prova de solo-cimento-casca de arroz, aos 7 dias de idade (**Tabela 38**), o teste de Tukey mostrou que o maior valor foi apresentado pelo tratamento T₄, seguido dos tratamentos T₅, T₆ e T₂, estatisticamente iguais entre si. Por outro lado, os menores valores foram alcançados pelas testemunhas e os tratamentos T₃, T₉, T₈, T₁₀, os quais também não apresentaram diferenças significativas entre si. Aos 28 dias de idade, tenderam ao mesmo comportamento, conferindo o cimento maiores valores de resistência à compressão simples, e os tratamentos com maior adição de casca, os menores valores.

Os valores de resistência à tração na compressão diametral aos 7 e 28 dias apresentaram comportamento semelhante aos valores de resistência à compressão simples, sendo novamente destacados os tratamentos T₄, T₅, T₆ e T₂ por apresentarem melhor desempenho frente à resistência à tração na compressão diametral (**Tabela 39**).

O desempenho mecânico dos corpos-de-prova sempre foi maior aos 28 dias do que aos 7 dias para todos os tratamentos, sendo que os valores de resistência à compressão simples aumentaram a níveis estatisticamente significativos, chegando a um valor médio de 30% de ganho de resistência para cada tratamento (**Figura 32**). Já para os valores de resistência à tração na compressão diametral, a maioria dos tratamentos, aos 7 e 28 dias, não diferiu entre si (**Figura 33**). Este aumento de resistência mecânica ocorrido nas misturas de solo-cimento-casca indica a formação, ao longo do tempo, de compostos cimentantes que melhoram as propriedades mecânicas das mesmas (PICCHI et al., 1984). Acredita-se que o efeito de estabilização do solo com cimento foi mais significativo do que a influência negativa da casca de arroz ao sistema solo-cimento.

Observou-se que, durante a execução dos ensaios de compressão, os corpos-de-prova que levaram casca de arroz em sua composição sofreram grandes deformações (**Figuras 34 e 35**) com a aplicação do carregamento, mostrando que a casca de arroz, além de atuar como enchimento (carga mineral), também evidenciou a sua capacidade de absorver energia. Pode-se afirmar que a casca de arroz conferiu ao material solo-cimento ductibilidade. (BARBOSA e TOLÊDO FILHO, 1997).



Figura 34. Corpo-de-prova de solo-cimento após ensaio de compressão.



Figura 35. Corpo-de-prova de solo-cimento-casca após ensaio de compressão.

Para efeitos de padronização, os corpos-de-prova de solo natural também foram colocados em câmara úmida durante 7 dias e deixados a secar em ambiente de laboratório. Por causa disso pode-se explicar o aumento de suas resistências aos 28 dias, adquirido mediante a secagem, após entrarem em equilíbrio com a umidade ambiente.

Os valores de resistência à compressão simples alcançados pelos corpos-de-prova de solo-cimento-casca, quando comparados com os resultados encontrados na etapa preliminar, sofreram decréscimo de resistência, mas mantiveram o mesmo comportamento frente à adição das combinações de cimento-casca de arroz ao solo. Evidentemente, esta redução deveu-se ao fato da imersão dos corpos-de-prova em água antes do rompimento, o que não ocorreu na etapa do estudo de dosagem.

A **Tabela 40** e a **Figura 36** apresentam a capacidade de absorção de água dos corpos-de-prova cilíndricos confeccionados com diferentes tratamentos de solo-cimento-casca.

Tabela 40. Capacidade de absorção d'água (%), aos 7 dias, de corpos-de-prova confeccionados com diferentes tratamentos de solo-cimento-casca de arroz.

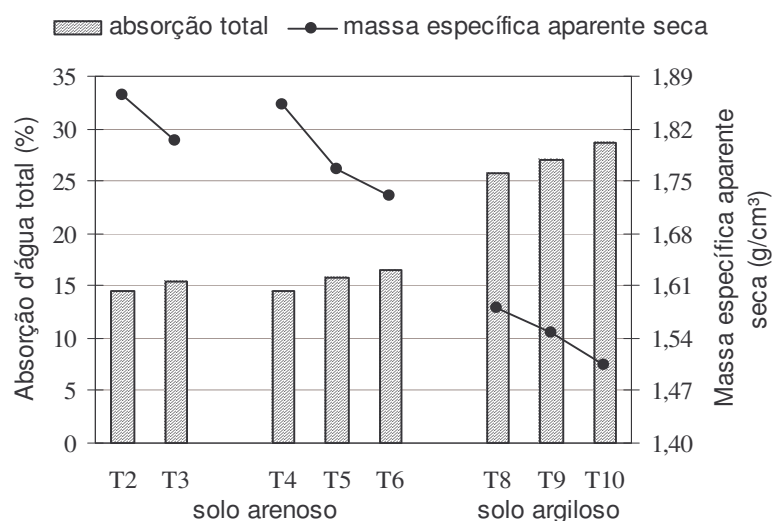
Absorção de água (%)	Tratamentos – solo-cimento-casca de arroz							
	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₈	T ₉	T ₁₀
Média	14,52 b	15,42 b	14,54 b	15,80 b	16,47 b	25,74 a	27,06 a	28,71 a
DPM *	0,33	0,43	0,59	0,33	0,16	0,27	0,40	0,49
CV (%)	0,23	2,82	4,07	2,09	0,95	1,05	1,47	1,69

* DPM – desvio padrão médio

CV (%) – coeficiente de variação

Médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey (p<0,05).

O ensaio de absorção d'água não foi aplicado aos solos naturais (testemunhas).

**Figura 36.** Capacidade de absorção d'água dos corpos-de-prova de solo-cimento-casca.

Quanto à absorção d'água, os menores valores foram alcançados pelos tratamentos T₂, T₃, T₄, T₅ e T₆, os quais não diferiram entre si (**Tabela 40**). Já os tratamentos T₈, T₉ e T₁₀, ou seja, os tratamentos compreendendo o solo argiloso, apresentaram valores de absorção d'água elevados, devido, principalmente, à grande quantidade de finos presente neste solo. Pode-se notar na **Figura 36** que, tanto para as misturas com solo arenoso como para as misturas com solo argiloso, os valores de absorção d'água tenderam a aumentar conforme o acréscimo da quantidade de casca de arroz incorporada à mistura, pois a mesma proporcionou aumentos na porosidade do material.

Observou-se que os valores de massa específica aparente seca comportaram-se de maneira inversa aos valores de absorção d'água (**Figura 36**), ou seja, quanto menor a massa

específica aparente seca, maior a capacidade de absorção de água. Esta relação pode ser explicada pela falta de interação entre o sistema solo-cimento-casca de arroz, mostrando que maiores volumes de vazios são incorporados ao sistema quanto maior for a adição de casca.

Em termos de resistência à compressão simples, somente os tratamentos T₄ e T₅, ou seja, a mistura de solo arenoso + 12% de cimento e a mistura de solo arenoso + 12% da combinação (80% de cimento-20% de casca de arroz), atenderam às especificações da NBR 8492 (ABNT, 1984f), empregada para tijolos prensados de solo-cimento. Essa norma estabelece, como mínimo, o valor médio de 2,0 MPa e nenhum valor inferior a 1,7 MPa aos 7 dias de idade. Em termos de capacidade de absorção d'água, somente os tratamentos com solo arenoso atenderam às especificações da NBR 8492 (ABNT, 1984f), que estabelece, como máximo, o valor médio de 20% e nenhum valor superior a 22%.

5.3.3. RESULTADOS DO ENSAIO NÃO DESTRUTIVO APLICADO AOS CORPOS-DE-PROVA

Os resultados dos testes preliminares para se definir o transdutor adequado para as medições em corpos-de-prova cilíndricos foram registrados e seus valores mostrados na **Tabela 41**.

Tabela 41. Valores para a confirmação do uso do transdutor de 45 kHz - seção plana para as medições nos corpos-de-prova.

Tratamento	Velocidade (m/s)	Tempo (μs)	Comprimento da onda (cm)
solo-cimento	2426	52,3	5,4
solo-cimento-casca	1831	69,4	4,1

A partir dos resultados apresentados na **Tabela 41**, pode-se confirmar a adequação do transdutor de 45 kHz - seção plana para as medições nos corpos-de-prova, pois o mesmo permite que pelo menos duas ondas completas percorram o corpo-de-prova de 12,7 cm.

A evolução da velocidade de propagação da onda ultra-sônica dos corpos-de-prova de solo-cimento-casca de arroz em função das idades esta representada na **Figura 37**.

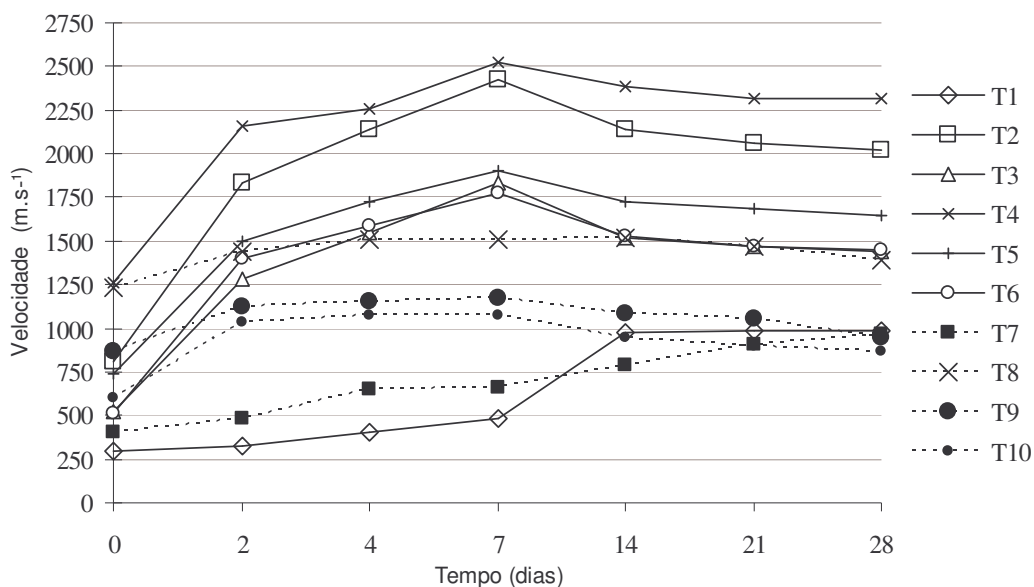


Figura 37. Velocidade da onda ultra-sônica em função do tempo nos corpos-de-prova.

As curvas de acompanhamento da velocidade de propagação da onda ultra-sônica através dos corpos-de-prova de solo-cimento-casca de arroz mostraram um aumento significativo da velocidade nos primeiros dias de cura, apresentando um pico no 7º dia. Entretanto, no decorrer dos 21 dias restantes, a velocidade de propagação da onda, nos corpos-de-prova de solo-cimento-casca de arroz, apresentou sensível diminuição (**Figura 37**).

Um dos fatores que influenciam na dispersão da onda ultra-sônica no material é a sua estrutura física, pois, quanto mais homogênea a estrutura, melhor será a forma de propagação da onda, indicando um material com bom comportamento mecânico. Sendo assim, avaliou-se que a presença de partículas vegetais nos corpos-de-prova e a ocorrência de variações de umidade (perda de água para o ambiente) devido à permanência dos mesmos em ambiente de laboratório, a partir do 8º dia de idade, resultaram em um material de maior porosidade e, conseqüentemente, os valores de velocidade tenderam a diminuir.

Apesar do ensaio de ultra-som não ter evidenciado a ocorrência de estabilização dos corpos-de-prova depois dos 7 dias de idade, as velocidades alcançadas nos corpos-de-prova apresentaram o mesmo comportamento, quer fossem relacionadas aos ensaios de compressão simples quer aos de tração na compressão diametral, ou seja, as maiores velocidades foram atingidas pelos tratamentos T₄, T₂, T₅ e T₆, sendo estes os tratamentos de melhor desempenho mecânico, independente da idade.

As **Tabelas 42, 43 e 44** apresentam, respectivamente, os valores médios da massa específica aparente, da velocidade de propagação da onda ultra-sônica e do módulo de elasticidade dinâmico dos corpos-de-prova (Calculado de acordo com a **Equação 8**).

Tabela 42. Valores médios da massa específica aparente dos corpos-de-prova (kN/m³).

Massa específica aparente		Tratamentos – solo-cimento-casca de arroz									
		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	T ₉	T ₁₀
7 dias	Média	20,88	20,53	20,30	20,58	20,01	19,75	19,40	19,18	19,26	18,95
	DPM *	0,10	0,18	0,09	0,25	0,11	0,02	0,06	0,20	0,11	0,04
	CV (%)	0,47	0,86	0,46	1,19	0,53	0,08	0,32	1,07	0,58	0,21
28 dias	Média	18,74	19,25	18,69	19,62	18,77	18,22	15,96	16,78	16,57	16,16
	DPM	0,03	0,17	0,08	0,26	0,13	0,02	0,02	0,26	0,16	0,01
	CV (%)	0,17	0,89	0,42	1,30	0,67	0,10	0,11	1,57	0,95	0,04

Tabela 43. Valores médios da velocidade de propagação da onda ultra-sônica dos corpos-de-prova (m/s).

Velocidade (m/s)		Tratamentos – solo-cimento-casca de arroz									
		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	T ₉	T ₁₀
7 dias	Média	483,81	2426,15	1831,70	2523,34	1900,69	1777,00	663,42	1510,52	1169,19	1074,06
	DPM*	9,53	95,34	48,49	82,47	62,37	64,83	18,44	86,28	28,97	52,88
	CV (%)	1,97	3,93	2,65	3,27	3,28	3,65	2,78	5,71	2,48	4,92
28 dias	Média	981,47	2019,25	1443,44	2320,65	1650,35	1452,10	970,49	1303,65	949,92	864,42
	DPM	4,73	22,60	23,79	32,74	26,63	15,91	43,28	127,34	58,45	43,42
	CV (%)	0,48	1,12	1,65	1,41	1,61	1,10	4,46	9,77	6,15	5,02

Tabela 44. Valores médios do módulo de elasticidade dinâmico em função da idade para os corpos-de-prova de solo-cimento-casca de arroz (MPa).

Módulo de elasticidade dinâmico (MPa)		Tratamentos – solo-cimento-casca de arroz									
		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	T ₉	T ₁₀
7 dias	Média	489	12089	6812	13107	7232	6241	861	4383	2633	2190
	DPM *	17,16	847,07	330,21	717,72	434,06	449,22	53,76	460,84	115,64	211,20
	CV (%)	3,51	7,01	4,85	5,48	6,00	7,20	6,24	10,51	4,39	9,64
28 dias	Média	1805	7852	3895	10565	5113	3842	1505	2866	1498	1209
	DPM	14,58	206,18	127,83	226,87	198,81	83,67	133,49	509,58	170,17	120,96
	CV (%)	0,81	2,63	3,28	2,15	3,89	2,18	8,87	17,78	11,36	10,00

Para as **Tabelas 42, 43 e 44:**

* DPM – desvio padrão médio

CV (%) – coeficiente de variação

Como esperado, pelo fato de ocorrer, em cada tratamento, variações de massa específica aparente, não foi possível separar a influência da umidade do corpo-de-prova da magnitude da velocidade, e, conseqüentemente, os valores do módulo de elasticidade dinâmico não expressaram corretamente o comportamento do material, sendo os resultados mascarados por modificações ocorridas na estrutura do material.

5.3.4. COMBINAÇÃO DOS MÉTODOS DESTRUTIVOS E NÃO DESTRUTIVOS NA AVALIAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA

As Figuras 38 e 39 ilustram as representações gráficas das equações de regressão para a velocidade de propagação da onda ultra-sônica em função da massa específica aparente para cada tratamento de solo arenoso-cimento-casca de arroz e de solo argiloso-cimento-casca de arroz, respectivamente.

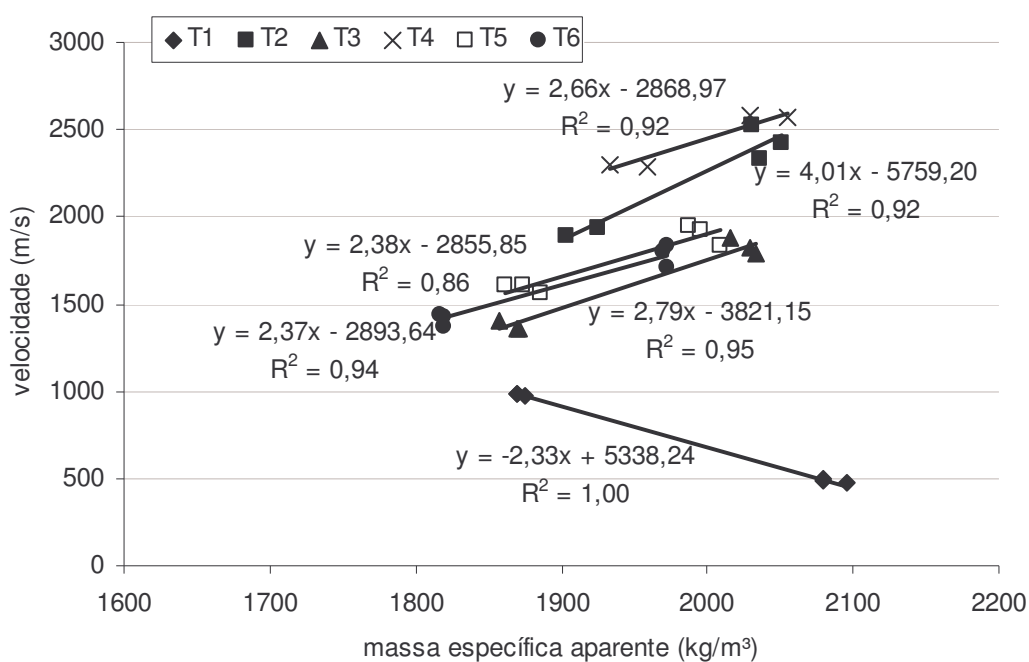


Figura 38. Representação gráfica das equações de regressão (velocidade x massa específica aparente) para o solo arenoso.

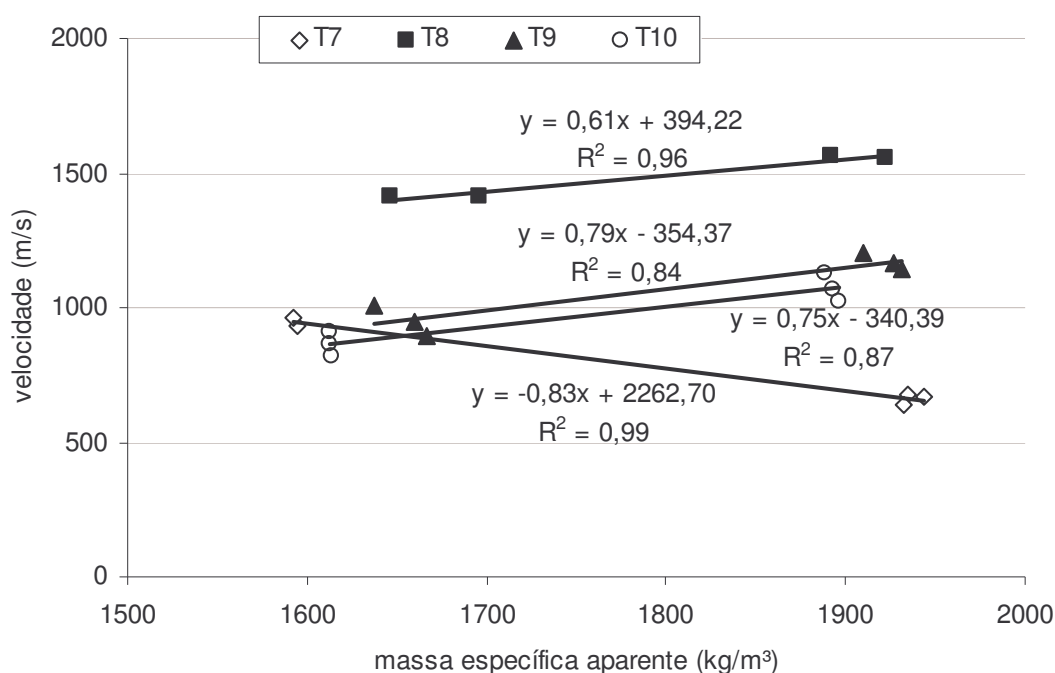


Figura 39. Representação gráfica das equações de regressão (velocidade x massa específica aparente) para o solo argiloso.

Com exceção das testemunhas (T_1 e T_7), houve uma correlação linear positiva entre a velocidade e a massa específica aparente para os corpos-de-prova de ambos os solos (**Figuras 38 e 39**). Tais resultados mostraram uma forte dependência entre as variáveis velocidade da onda ultra-sônica e a massa específica aparente.

As equações de regressão das **Figuras 38 e 39** mostraram que a velocidade de propagação da onda ultra-sônica está relacionada com a condição física (homogeneidade, compacidade) de cada tratamento de solo-cimento-casca de arroz.

As **Figuras 40 e 41** ilustram as representações gráficas das equações de regressão para a resistência à compressão simples em função da velocidade de propagação da onda ultra-sônica para os corpos-de-prova de cada tratamento de solo arenoso-cimento-casca de arroz e de solo argiloso-cimento-casca de arroz, respectivamente.

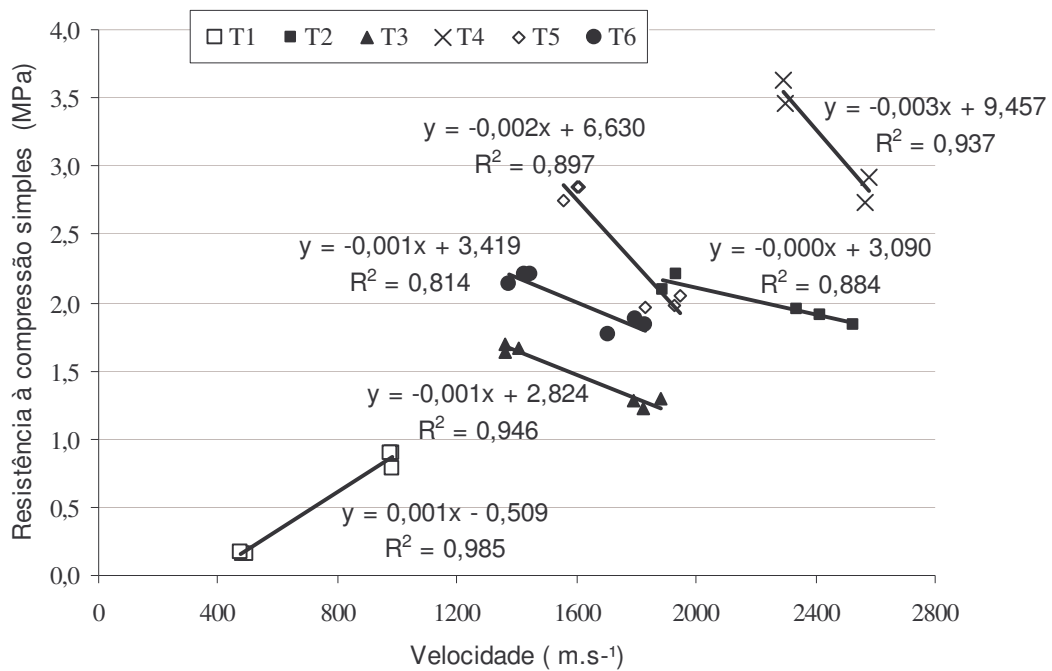


Figura 40. Representação gráfica das equações de regressão (resistência x velocidade) para o solo arenoso.

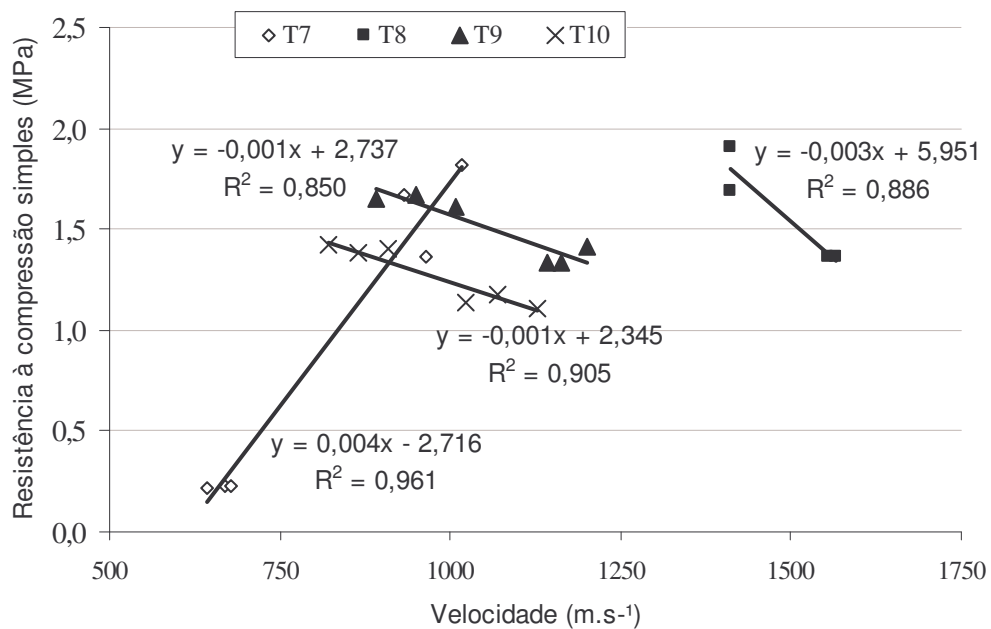


Figura 41. Representação gráfica das equações de regressão (resistência x velocidade) para o solo argiloso.

Com exceção das testemunhas (T_1 e T_7), houve uma correlação linear negativa entre a resistência e a velocidade para os corpos-de-prova de ambos os solos (**Figuras 40 e 41**). Os valores de R^2 , que em sua maioria foram próximos de um, indicaram que não houve dispersão dos valores, ou seja, houve uma boa uniformidade durante a execução dos ensaios de resistência e de ultra-som.

Portanto, as equações de regressão das **Figuras 40 e 41** mostraram um comportamento divergente entre a resistência e a velocidade, visto que a resistência à compressão está associada à estrutura cristalina formada e a velocidade de propagação da onda ultra-sônica com a condição física desta estrutura.

5.4. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DOS TIJOLOS CONFECCIONADOS A PARTIR DOS TRATAMENTOS COM SOLO-CIMENTO–CASCA DE ARROZ

5.4.1. MASSA ESPECÍFICA APARENTE SECA E GRAU DE COMPACTAÇÃO DOS TIJOLOS

A **Tabela 45** apresenta os valores médios da massa específica aparente seca e grau de compactação (**Equação 2**) alcançados pelos tijolos confeccionados a partir das misturas de solo-cimento–casca de arroz (tratamentos) escolhidas na etapa do estudo de dosagem. Esses tijolos foram destinados aos ensaios destrutivos e não-destrutivos.

Pela **Tabela 45** verificou-se que os valores do grau de compactação estão de acordo com as recomendações de Bueno e Vilar (1999).

Tratamentos – misturas de solo-cimento-casca de arroz

T₁ – Testemunha - solo arenoso sem adição

T₂ – solo arenoso + 8% da combinação (100% cimento-0% casca)

T₃ – solo arenoso + 8% da combinação (80% cimento-20% casca)

T₄ – solo arenoso + 12% da combinação (100% cimento-0% casca)

T₅ – solo arenoso + 12% da combinação (80% cimento-20% casca)

T₆ – solo arenoso + 12% da combinação (70% cimento-30% casca)

T₇ – Testemunha - solo argiloso sem adição

T₈ – solo argiloso + 18% da combinação (100% cimento-0% casca)

T₉ – solo argiloso + 18% da combinação (90% cimento-10% casca)

T₁₀ – solo argiloso + 18% da combinação (80% cimento-20% casca)

Tabela 45. Valores médios da massa específica aparente seca e grau de compactação dos tijolos confeccionados com diferentes tratamentos de solo adicionado de combinações de cimento-casca de arroz.

Tipo de Tratam	Massa específica aparente seca (kN/m³)			Grau de compactação (%)		
	7 dias *	28 dias	60 dias	7 dias	28 dias	60 dias
T ₁	18,54 ± 0,29 (1,55)	18,49 ± 0,21 (1,14)	18,33 ± 0,03 (0,19)	100,38 ± 1,56 (1,55)	100,08 ± 1,14 (1,14)	99,26 ± 0,19 (0,19)
T ₂	18,61 ± 0,03 (0,16)	18,59 ± 0,01 (0,06)	18,87 ± 0,05 (0,29)	99,82 ± 0,16 (0,16)	99,75 ± 0,06 (0,06)	101,21 ± 0,29 (0,29)
T ₃	18,04 ± 0,07 (0,38)	18,06 ± 0,04 (0,22)	18,22 ± 0,00 (0,01)	100,07 ± 0,38 (0,38)	100,18 ± 0,22 (0,22)	101,08 ± 0,01 (0,01)
T ₄	18,70 ± 0,13 (0,72)	18,71 ± 0,12 (0,63)	18,52 ± 0,17 (0,92)	100,99 ± 0,72 (0,72)	101,05 ± 0,64 (0,63)	100,01 ± 0,92 (0,92)
T ₅	17,62 ± 0,06 (0,34)	17,65 ± 0,03 (0,15)	17,70 ± 0,10 (0,59)	99,85 ± 0,34 (0,34)	99,98 ± 0,15 (0,15)	100,28 ± 0,59 (0,59)
T ₆	17,30 ± 0,06 (0,33)	17,31 ± 0,07 (0,40)	17,33 ± 0,02 (0,12)	100,07 ± 0,33 (0,33)	100,12 ± 0,40 (0,40)	100,20 ± 0,12 (0,12)
T ₇	15,05 ± 0,46 (3,07)	15,32 ± 0,26 (1,71)	15,77 ± 0,10 (0,62)	95,77 ± 2,94 (3,07)	97,43 ± 1,67 (1,71)	100,29 ± 0,62 (0,620)
T ₈	15,35 ± 0,08 (0,53)	15,36 ± 0,07 (0,46)	15,75 ± 0,14 (0,87)	97,10 ± 0,51 (0,53)	97,15 ± 0,44 (0,46)	99,60 ± 0,86 (0,87)
T ₉	15,06 ± 0,10 (0,66)	15,23 ± 0,13 (0,88)	15,61 ± 0,10 (0,65)	97,30 ± 0,64 (0,66)	98,36 ± 0,86 (0,88)	100,86 ± 0,65 (0,65)
T ₁₀	14,97 ± 0,12 (0,82)	14,98 ± 0,11 (0,74)	15,16 ± 0,05 (0,32)	99,55 ± 0,82 (0,82)	99,61 ± 0,73 (0,74)	100,80 ± 0,33 (0,32)

* Valores médios ± desvio padrão
(coeficiente de variação)

5.4.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS DESTRUTIVOS APLICADOS AOS TIJOLOS

Os valores médios de resistência à compressão simples foram analisados estatisticamente e sua respectiva análise de variância está apresentada na **Tabela 46**. Para os valores de capacidade de absorção d'água foi aplicado somente o teste de Tukey, visto que os resultados do ensaio variaram exclusivamente em função do tipo de tratamento.

Tabela 46. Análise de variância referente aos efeitos dos tratamentos sobre a variável resistência à compressão simples de tijolos (MPa).

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
Idade	2	4,24	2,12	167,46	0,00001
Tipo de tratamento	9	102,58	11,39	898,68	0,00001
Interação idade x tratam.	18	6,43	0,35	28,1946	0,00001
Resíduo	60	0,76	0,01		
Total	89	114,03			
Média geral = 1,80 MPa			Coeficiente de variação = 6,24%		

Pela **Tabela 46**, pode-se afirmar que os fatores estudados, idade e tipo de tratamento, bem como sua interação, promoveram efeitos significativos na variável resistência à compressão simples dos tijolos.

A **Tabela 47** apresenta os resultados da análise do efeito da interação entre os fatores tipo de tratamento e idade nos valores médios de resistência à compressão simples dos tijolos confeccionados com diferentes tratamentos de solo-cimento-casca de arroz.

Tabela 47. Análise do efeito da interação entre os fatores tipo de tratamento e idade nos valores médios da resistência à compressão simples dos tijolos de solo-cimento-casca (MPa).

Fatores	Níveis	Obs.	Resistência (MPa)*
Tratamentos	T4	6	4,20 a
	T2	6	3,01 b
	T5	6	2,43 c
	T8	6	1,60 d
	T6	6	1,58 d
	T3	6	1,55 d
	T9	6	1,36 e
	T10	6	1,09 f
	T7	6	0,72 g
	T1	6	0,48 h
Idade	60 dias	30	2,11 a
	7 dias	30	1,67 b
	28 dias	30	1,63 b

* Médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

De acordo com os resultados da **Tabela 47**, independente da idade, novamente, os tratamentos de melhor desempenho mecânico foram T₄, T₅, T₂ e T₆, confirmando os resultados obtidos no ensaio de compressão simples dos corpos-de-prova.

As **Tabelas 48 e 49** e as **Figuras 42 e 43** apresentam, respectivamente, os valores médios de resistência à compressão simples e absorção de água dos tijolos confeccionados com diferentes tratamentos de solo adicionado de combinações de cimento-casca de arroz.

Tabela 48. Resistência à compressão simples (MPa), aos 7, 28 e 60 dias, de tijolos confeccionados com diferentes tratamentos de solo-cimento-casca de arroz.

Resistência à compressão simples (MPa)		Tratamentos – solo-cimento-casca de arroz									
		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	T ₉	T ₁₀
7 dias	Média	0,48 h A	2,62 b B	1,64 d A	3,90 a B	2,26 c B	1,47 de B	0,67 gh A	1,47 de B	1,26 ef A	0,96 fg B
	DPM*	0,06	0,13	0,11	0,09	0,03	0,03	0,04	0,06	0,12	0,05
	CV (%)	12,80	4,85	6,75	2,34	1,46	2,17	5,46	4,36	9,42	5,23
28 dias	Média	0,48 f A	2,35 b C	1,31 cd B	3,54 a C	2,42 b AB	1,51 c B	0,78 ef A	1,47 c B	1,37 cd A	1,07 de AB
	DPM	0,05	0,16	0,04	0,24	0,07	0,13	0,08	0,14	0,10	0,04
	CV (%)	10,86	6,64	3,19	6,81	2,85	8,57	10,45	9,19	7,22	3,78
60 dias	Média	0,47 g A	4,07 b A	1,70 de A	5,17 a A	2,62 c A	1,78 d A	0,72 g A	1,89 d A	1,46 ef A	1,24 f A
	DPM	0,04	0,16	0,10	0,32	0,05	0,04	0,05	0,12	0,09	0,05
	CV (%)	8,60	3,91	5,62	6,18	1,77	2,24	6,67	6,49	6,14	4,26

Tabela 49. Absorção d'água (%), aos 7 dias, de tijolos confeccionados com diferentes tratamentos de solo-cimento-casca de arroz.

Absorção d'água aos 7 dias (%)		Tratamentos – solo-cimento-casca de arroz							
		T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₈	T ₉	T ₁₀
	Média	14,15 e	15,93 d	13,81 e	16,81 d	18,36 c	26,24 b	27,81 a	28,04 a
	DPM *	0,07	0,13	0,30	0,56	0,10	0,06	0,44	1,03
	CV (%)	0,05	0,82	2,14	3,36	0,52	0,02	1,57	3,66

Para as Tabelas 48 e 49 :

* DPM – desvio padrão médio

CV (%) – coeficiente de variação

Em cada linha, médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey (p<0,05).

Em cada coluna, médias seguidas da mesma letra maiúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey (p<0,05).

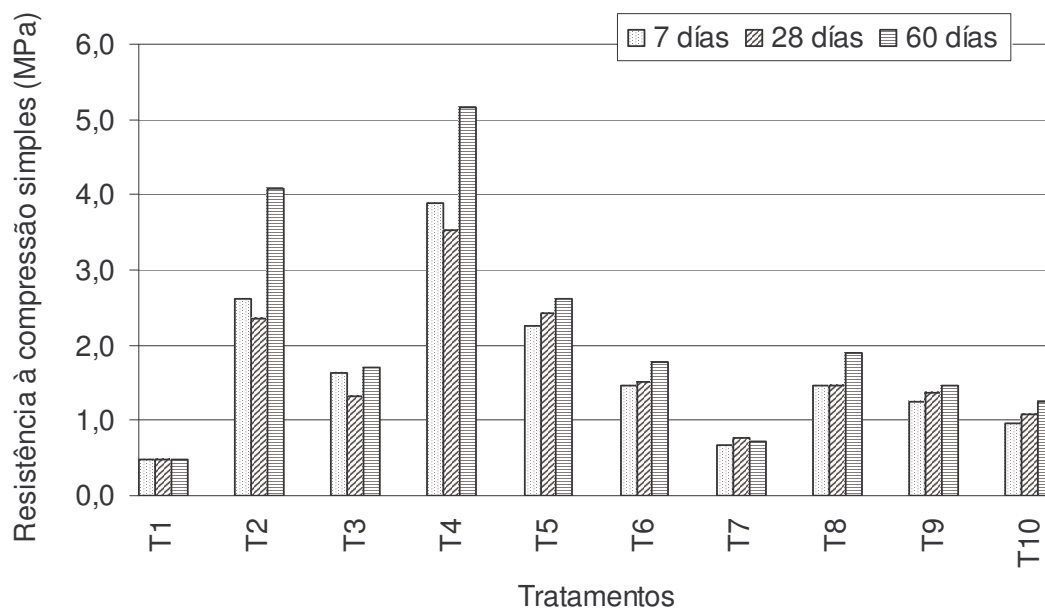


Figura 42. Valores de resistência à compressão simples, aos 7, 28 e 60 dias, dos tijolos de solo-cimento-casca de arroz.

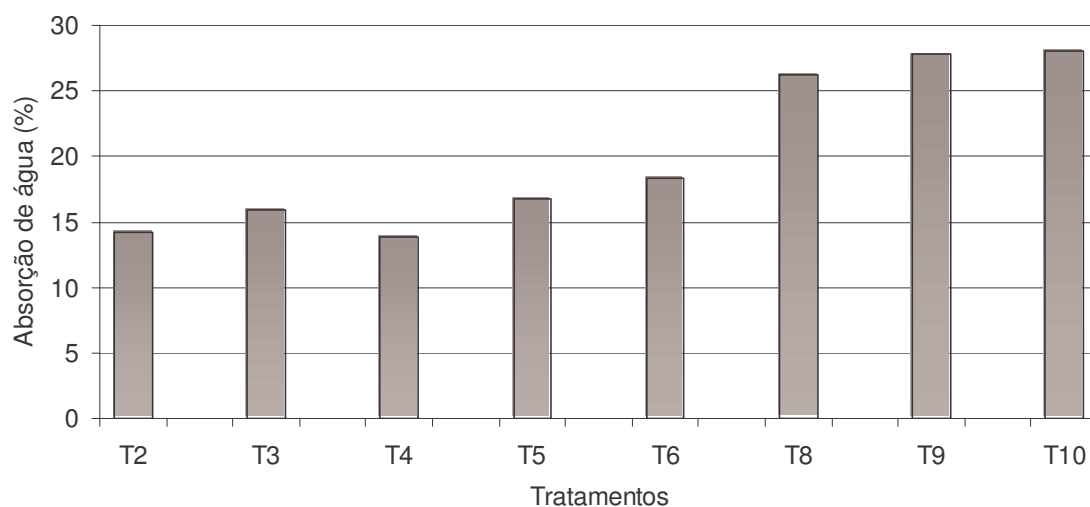


Figura 43. Capacidade de absorção d'água dos tijolos de solo-cimento-casca.

Para os valores de resistência à compressão simples dos tijolos de solo-cimento-casca de arroz (**Figura 42** e **Tabela 48**), aos 7 dias, o teste de Tukey mostrou que o maior valor foi alcançado pelo tratamento T₄ (3,90 MPa), seguido dos tratamentos T₂ (2,62 MPa) e T₅ (2,26 MPa), estatisticamente diferentes entre si. Por outro lado, os menores valores foram

alcançados pelas testemunhas T_1 (0,48 MPa) e T_7 (0,67 MPa), e pelo tratamento T_{10} (0,96 MPa), os quais não apresentaram diferenças significativas entre si. Aos 28 e 60 dias de idade, os valores de resistência à compressão tenderam ao mesmo comportamento já relatado para os corpos-de-prova cilíndricos de solo-cimento-casca de arroz.

Analisando a evolução da resistência à compressão simples dos tijolos ao longo de 60 dias (**Figura 42**), pode-se verificar que, dos 7 para 28 dias, alguns tratamentos sofreram diminuição em sua resistência enquanto que outros tenderam a aumentá-la, porém de forma não significativa. Entretanto, para todos os tratamentos (com exceção das testemunhas), os valores de resistência apresentados pelos tijolos foram sempre maiores aos 60 dias do que aos 7 e 28 dias. Este aumento de resistência mecânica ocorrido nas misturas de solo-cimento-casca de arroz reafirma a formação, ao longo do tempo, de compostos cimentantes que melhoram as propriedades mecânicas das mesmas.

Quanto à absorção d'água dos tijolos (**Figura 43 e Tabela 49**), os menores valores foram alcançados pelos tratamentos T_2 , T_3 , T_4 , T_5 e T_6 . Já os tratamentos T_8 , T_9 e T_{10} , ou seja, tratamentos compreendendo o solo argiloso, apresentaram valores de absorção d'água elevados. As principais explicações para o ocorrido, como mencionado anteriormente, são: grande quantidade de finos que possui o solo argiloso e a falta de interação entre a casca e o sistema solo-cimento levando à alta porosidade dos tijolos.

Os resultados sobre a caracterização físico-mecânica mostraram comportamento semelhante entre os corpos-de-prova cilíndricos e os tijolos, sendo que para ambos os casos, os tratamentos T_2 , T_4 e T_5 destacaram-se por apresentar melhores desempenhos frente à resistência à compressão simples e à absorção d'água. De forma geral, os valores de resistência à compressão simples e de absorção d'água encontrados para os tijolos foram próximos aos valores encontrados para os corpos-de-prova cilíndricos.

Novamente, em termos de resistência à compressão simples, somente os tratamentos T_4 e T_5 , ou seja, a mistura de solo arenoso + 12% de cimento e a mistura de solo arenoso + 12% da combinação (80% de cimento-20% de casca de arroz) atenderam às especificações da Norma Técnica Brasileira empregada para tijolos prensados de solo-cimento; em termos de capacidade de absorção d'água, somente os tratamentos com solo arenoso atenderam às especificações da Norma que estabelece, como máximo, o valor médio de 20% e nenhum valor superior a 22%.

5.4.3. RESULTADOS DO ENSAIO NÃO DESTRUTIVO APLICADO AOS TIJOLOS

As **Tabelas 50** e **51** apresentam, respectivamente, os valores da velocidade de propagação da onda para os três eixos de leitura dos tijolos e da massa específica aparente.

Tabela 50. Valores médios da velocidade da onda ultra-sônica nas três direções dos tijolos (conforme Figuras 17 e 18).

Velocidade -		Tratamentos – solo-cimento-casca de arroz									
V1 (m/s)		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	T ₉	T ₁₀
7 dias	Média	1082,69	2200,69	1702,82	2349,96	1781,97	1340,41	1017,39	1435,85	1318,93	1102,45
	DPM *	74,65	65,14	23,36	94,99	84,69	68,91	25,92	30,90	62,46	86,61
	CV (%)	6,89	2,96	1,37	4,04	4,75	5,14	2,55	2,15	4,74	7,86
28 dias	Média	1008,39	2161,66	1536,72	2391,51	1676,64	1305,17	1031,00	1362,65	1200,57	1010,75
	DPM	103,74	29,82	81,84	103,62	41,22	62,65	10,63	22,80	87,36	77,99
	CV (%)	10,29	1,38	5,33	4,33	2,46	4,80	1,03	1,67	7,28	7,72
60 dias	Média	1041,97	2057,64	1412,73	2270,10	1505,36	1149,66	1034,58	1273,38	1153,69	943,97
	DPM	21,71	8,47	77,93	52,44	43,57	19,89	12,27	8,17	35,16	50,60
	CV (%)	2,08	0,41	5,52	2,31	2,89	1,73	1,19	0,64	3,05	5,36
Velocidade -		Tratamentos – solo-cimento-casca de arroz									
V2 (m/s)		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	T ₉	T ₁₀
7 dias	Média	1150,66	2218,42	1839,53	2340,15	1953,14	1694,17	1149,39	1468,15	1323,73	1173,61
	DPM	106,50	47,83	13,36	69,90	37,78	17,68	75,14	42,45	56,65	39,59
	CV (%)	9,26	2,16	0,73	2,99	1,93	1,04	6,54	2,89	4,28	3,37
28 dias	Média	1057,76	2200,14	1759,10	2390,50	1994,46	1700,80	1046,09	1353,13	1312,24	1142,07
	DPM	34,53	72,21	10,68	57,22	38,90	40,83	14,46	36,71	35,19	55,37
	CV (%)	3,26	3,28	0,61	2,39	1,95	2,40	1,38	2,71	2,68	4,85
60 dias	Média	1076,68	2112,57	1690,18	2386,05	1889,07	1614,48	1038,72	1283,80	1186,34	1067,94
	DPM	3,98	62,80	34,69	76,50	58,66	1,37	22,73	21,85	31,92	47,22
	CV (%)	0,37	2,97	2,05	3,21	3,11	0,08	2,19	1,70	2,69	4,42
Velocidade -		Tratamentos – solo-cimento-casca de arroz									
V3 (m/s)		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	T ₉	T ₁₀
7 dias	Média	1114,00	2244,77	1852,98	2419,82	1949,93	1644,66	1057,71	1420,86	1342,64	1179,19
	DPM	101,70	21,35	19,45	40,99	25,68	24,31	10,66	33,27	21,22	23,29
	CV (%)	9,13	0,95	1,05	1,69	1,32	1,48	1,01	2,34	1,58	1,98
28 dias	Média	1103,62	2210,01	1779,76	2458,19	2004,74	1714,15	1022,15	1378,37	1278,80	1127,70
	DPM	38,01	44,19	35,99	13,00	16,16	27,07	10,94	7,66	32,73	41,21
	CV (%)	3,44	2,00	2,02	0,53	0,81	1,58	1,07	0,56	2,56	3,65
60 dias	Média	1108,37	2212,55	1718,15	2473,26	1979,98	1645,34	1042,78	1296,14	1225,38	1084,28
	DPM	33,08	31,44	33,81	22,76	13,83	18,27	16,20	26,42	6,42	25,45
	CV (%)	2,98	1,42	1,97	0,92	0,70	1,11	1,55	2,04	0,52	2,35

Tabela 51. Valores médios da massa específica aparente dos tijolos (kN/m³).

Massa específica aparente		Tratamentos – solo-cimento-casca de arroz									
		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	T ₉	T ₁₀
7 dias	Média	19,27	21,25	20,65	20,99	20,27	19,94	18,28	19,67	19,56	19,10
	DPM*	0,21	0,03	0,07	0,11	0,10	0,06	0,23	0,20	0,06	0,11
	CV (%)	1,10	0,16	0,35	0,52	0,50	0,28	1,25	1,02	0,29	0,57
28 dias	Média	18,75	20,60	19,94	20,33	19,66	19,28	18,10	19,27	19,09	18,58
	DPM	0,09	0,07	0,07	0,06	0,14	0,09	0,22	0,18	0,08	0,14
	CV (%)	0,48	0,35	0,34	0,30	0,70	0,46	1,20	0,92	0,44	0,77
60 dias	Média	18,75	20,38	19,62	20,17	19,38	18,89	18,04	18,85	18,55	17,96
	DPM	0,08	0,06	0,06	0,05	0,14	0,10	0,22	0,19	0,14	0,17
	CV (%)	0,42	0,32	0,32	0,27	0,71	0,53	1,24	1,01	0,74	0,96

* DPM – desvio padrão médio

CV (%) – coeficiente de variação

Independente da direção de propagação da onda no tijolo, à evolução da velocidade em função das idades (**Tabela 50**) apresentou comportamento semelhante ao constatado para os corpos-de-prova cilíndricos, sendo os resultados influenciados pelas alterações ocorridas na estrutura física dos tijolos (**Tabela 51**). Deve-se ressaltar que, independente da idade e da direção, os valores de velocidade de propagação da onda ultra-sônica nos tijolos foram sempre maiores quanto menores foram as quantidades de casca de arroz adicionadas nos tratamentos. Novamente destacaram-se os tratamentos T₂, T₄ e T₅, os quais apresentaram maiores velocidades de propagação da onda ultra-sônica.

Quando comparados os resultados encontrados no presente trabalho com as pesquisas realizadas por Ferreira (2003), os valores de resistência à compressão simples e de velocidade de onda ultra-sônica dos corpos-de-prova e dos tijolos de solo-cimento, aos 7 dias, apresentam grande proximidade. No entanto, o referido autor obteve uma forte correlação entre as variáveis: resistência à compressão simples e velocidade da onda ultra-sônica, o que diferiu dos resultados apontados nas tabelas e figuras anteriores. Deve-se salientar que Ferreira (2003) adotou o procedimento da permanência dos corpos-de-prova e dos tijolos de solo-cimento em câmara úmida até a idade de rompimento, mantendo assim, as respectivas massas específicas aparentes praticamente constantes ao longo do tempo. Além disso, por não se processar a secagem, não houve modificações estruturais nos materiais, tendo o ultra-som detectado apenas mudanças ocasionadas pela reação de hidratação do aglomerante.

5.4.4. COMBINAÇÃO DOS MÉTODOS DESTRUTIVOS E NÃO DESTRUTIVOS NA AVALIAÇÃO DOS TIJOLOS

As **Tabelas 52** e **53** apresentam, respectivamente, os valores médios de anisotropia total dos tijolos (**Equação 9**) e de resistência anisotrópica dos tijolos (**Equação 10**).

Tabela 52. Valores médios da anisotropia total (ΔM) dos tijolos, em %.

ΔM (%)	Tratamentos – solo-cimento-casca de arroz									
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	T ₉	T ₁₀
7 dias	4,38	1,39	7,77	1,26	8,69	19,71	7,81	0,60	1,07	6,29
28 dias	6,69	1,97	13,15	1,35	16,15	23,56	0,30	0,23	7,33	10,94
60 dias	4,63	4,85	17,10	6,57	22,18	29,47	0,59	1,29	4,33	12,28

Tabela 53. Valores médios de resistência anisotrópica (R_A) dos tijolos, em kg / % cm².

R_A (kg / % cm ²)	Tratamentos – solo-cimento-casca de arroz									
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	T ₉	T ₁₀
7 dias	1,09	18,92	2,11	30,91	2,60	0,75	0,86	24,53	11,79	1,53
28 dias	0,72	11,94	1,00	26,14	1,50	0,64	25,86	64,75	1,87	0,98
60 dias	1,02	8,39	0,99	7,87	1,18	0,60	12,14	14,70	3,37	1,01

Analizando-se os dados apresentados na **Tabela 52**, observa-se que os tijolos adicionados de casca de arroz foram mais anisotrópicos que os tijolos adicionados de combinações de 100% de cimento. Tais resultados podem ser explicados pela maior presença de espaços vazios nos tijolos de solo-cimento-casca de arroz, os quais interferiram na propagação da onda ultra-sônica. De um modo geral, os valores de anisotropia total dos tratamentos T₂, T₄ e T₈ foram baixos, indicando que não houve dispersões significativas entre os valores de velocidade de propagação da onda ultra-sônica nas três direções do material estudado. Os fatos citados acima reafirmam a forte dependência entre a velocidade de propagação da onda ultra-sônica e a condição física do material.

A adição ao solo de combinações compostas por 100% de cimento levou a maiores valores de resistência anisotrópica (**Tabela 53**). Porém, devido ao fato deste parâmetro estar condicionado à estrutura anisotrópica do tijolo para um estresse mecânico constante, não foi

possível identificar, no tratamento T₅, um tijolo de boa qualidade, visto que este tratamento, mesmo tendo apresentado um bom desempenho mecânico, apresentou também um alto valor de anisotropia. Assim, a utilização do parâmetro resistência anisotrópica não confirmou as melhores qualidades técnicas dos tijolos referentes aos tratamentos estudados, contrariando os promissores resultados apresentados pelos tijolos de solo-cimento-casca de arroz em relação ao desempenho mecânico e físico.

6. CONCLUSÕES

De acordo com as condições em que o trabalho foi realizado e após análise e interpretação dos dados experimentais obtidos, os resultados permitiram concluir que:

6.1. Ensaios preliminares aplicados às misturas de solo-aglomerante-casca de arroz

- a incorporação das combinações aglomerante-casca de arroz resultou em diminuição da massa específica aparente seca máxima de ambos os solos pesquisados, tanto maior quanto maiores foram as quantidades de casca de arroz adicionadas;
- a umidade ótima de compactação de ambos os solos decresceu com a redução do teor de casca de arroz incorporado às misturas solo-aglomerante-casca de arroz;
- a adição das combinações cal-casca de arroz não conferiu melhorias significativas em termos de resistência à compressão para ambos os solos, sendo alcançados valores insatisfatórios de resistência à compressão simples (0,18 a 0,29 MPa para as misturas de solo argiloso-cal-casca de arroz, e de 0,26 a 0,38 MPa para as misturas de solo arenoso-cal-casca de arroz);
- a incorporação das combinações cimento-casca de arroz melhorou significativamente o desempenho mecânico de ambos os solos, sendo que as combinações com 100% de cimento levaram aos maiores valores de resistência à compressão simples, enquanto que o aumento gradativo da quantidade de casca de arroz nas misturas solo-cimento-casca de arroz proporcionou a diminuição dos valores de resistência;
- para o solo arenoso a adição dos teores de 8% e 12% das combinações de cimento-casca de arroz foi adequada para alcançar o valor mínimo de resistência à compressão simples adotado na presente pesquisa (1,5 MPa); para o solo argiloso foi necessário a incorporação do teor de 18% da combinação de cimento-casca de arroz;

6.2. Caracterização físico-mecânica das misturas de solo-cimento-casca de arroz

- enquanto a adição de combinações com 100% de cimento a ambos os solos aumentou significativamente sua resistência à compressão simples, a incorporação de combinações com teores de casca de arroz afetou negativamente essa propriedade;
- os valores de resistência à compressão simples dos tratamentos com solo-cimento-casca de arroz foram sempre maiores aos 60 dias do que aos 7 e 28 dias;
- apesar dos baixos valores de resistência à tração na compressão diametral encontrados para os corpos-de-prova de solo-cimento-casca de arroz, os mesmos apresentaram comportamento semelhante aos valores de resistência à compressão simples;
- os menores valores de capacidade de absorção d'água foram alcançados para os tratamentos do solo arenoso com cimento e casca de arroz, os quais atenderam às especificações da NBR 8492;
- os tratamentos T₂ (solo arenoso + 8% de cimento), T₄ (solo arenoso + 12% de cimento), T₅ (solo arenoso + 12% da combinação 80% de cimento-20% de casca de arroz) e T₆ (solo arenoso + 12% da combinação 70% de cimento-30% de casca de arroz) destacaram-se por apresentar melhores desempenhos mecânicos no que se refere à resistência à compressão simples, resistência à tração na compressão diametral e absorção d'água;
- somente os tratamentos T₄ (solo arenoso + 12% de cimento) e T₅ (solo arenoso + 12% da combinação 80% de cimento-20% de casca de arroz) atenderam às especificações da Norma Técnica Brasileira empregada para tijolos prensados de solo-cimento, em termos de resistência à compressão simples e capacidade de absorção d'água.

6.3. Ensaio não destrutivo aplicado às misturas de solo-cimento-casca de arroz

- independente da idade, os maiores valores de velocidade da onda ultra-sônica foram alcançados pelos tratamentos T₄, T₂, T₅ e T₆, tratamentos que também apresentaram melhores desempenhos físico-mecânicos;
- os resultados de velocidade da onda ultra-sônica ao longo do tempo e do módulo de elasticidade dinâmico dos corpos-de-prova de solo-cimento-casca de arroz foram

mascarados por modificações ocorridas nas condições físicas do material, favorecidas pela presença da casca de arroz e a ocorrência de variações de umidade;

- não foi encontrada uma correlação positiva entre a velocidade de propagação da onda ultra-sônica e a resistência à compressão simples, pois não foi possível separar a influência das variações de umidade dos corpos-de-prova da magnitude da velocidade;
- os tijolos adicionados de casca de arroz foram mais anisotrópicos que os tijolos adicionados de combinações de 100% de cimento, efeito este devido principalmente à maior porosidade causada pela presença da casca de arroz.

6.4. Conclusões gerais

- pode-se afirmar que, independente do teor de cimento e de casca de arroz adicionados, o solo arenoso foi sempre superior ao solo argiloso em termos de desempenho físico-mecânico, avaliado pela resistência à compressão simples, resistência à tração na compressão diametral e capacidade de absorção de água;
- apesar da incorporação de casca de arroz afetar negativamente o comportamento mecânico de ambos os solos, a sua utilização combinada com o cimento mostrou que as reações de estabilização química que ocorrem entre o solo e o cimento foram mais significativas do que os efeitos negativos provocados pela presença da casca de arroz;
- de modo geral, os valores de massa específica aparente seca máxima, de resistência à compressão simples e de tração na compressão diametral das misturas de solo-cimento-casca de arroz decresceram com o aumento da quantidade de casca de arroz, enquanto que os valores de umidade ótima e de absorção d'água elevaram-se conforme o acréscimo do teor de casca de arroz;
- em face dos resultados obtidos, o solo arenoso estudado, adicionado de combinações adequadas de cimento-casca de arroz, mostrou-se promissor como material alternativo de construção, uma vez que racionaliza o uso da terra e minimiza o descarte da casca de arroz em condições e locais inadequados.
- para prosseguimento deste trabalho sugere-se estudar, mais aprofundadamente, aspectos técnicos como durabilidade, variação dimensional e propriedades termofísicas dos tijolos de solo-cimento-casca de arroz.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIKO, A. K. Tecnologias apropriadas: **tijolos e paredes monolíticas de solo-cimento**. 115 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1980.

_____. Sistemas solo-cal / solo-cimento. In: REUNIÃO ABERTA DA INDÚSTRIA DA CAL: O USO DA CAL NA ENGENHARIA CIVIL, 5., 1985, São Paulo. **Anais...** São Paulo: EPUSP / ABCP, 1985. p. 113-20.

AFRITOS, A. O.; FERREIRA, H. C. Estabilização química de um solo laterítico com cal + traços de NaOH. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLO E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 8., 1986, Porto Alegre. **Anais...**[S.l.]: ABMS, v. 2, 1986. p. 9-21.

AGGARWAL, L. K. Bagasse – reinforced cement composites. **Cement & Concrete Composites**, New York, EUA, v. 17, p. 107-12, 1995.

AGOPYAN, V. Materiais reforçados com fibras para construção civil nos países em desenvolvimento: **uso de fibras vegetais**. 204 p. Tese (Livre Docência em Engenharia da Construção Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

AKASAKI, J. L. **O tijolo cru como elemento construtivo de baixo impacto ambiental**. 322 p. Tese (Doutorado em Estruturas Ambientais Urbanas) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

AKASAKI, J. L.; SILVA, A. P. Estudio de la mezcla suelo-cal-residuos agroindustriales para fabricaciones de ladrillos. In: CONFERENCIA INTERNACIONAL ECOMATERIALES, 2., 2001, Santa Clara. **Anais...** Santa Clara: CIDEM, 2001. 1 CD-ROM.

ALCANTARA, M. A. M.; LIMA, D. C.; BUENO, B. S.; COSTA, L. M. Estabilização química dos solos em estradas agrícolas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 24., 1995, Viçosa, UFV. **Anais...** Viçosa: SBEA, 1995. n° 95-2-158.

ALCANTARA, M. A. M.; SILVA, S. A. M.; AGUILLAR, D. F.; SEGANTINI, A. A. S. Estabilização de solos com cal em construções rurais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 25., 1996, Bauru. **Anais...** Bauru: [s.n], 1996. 1 CD-ROM.

AMERICAN STANDARD FOR TESTING MATERIAL. **ASTM C-597**. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. 1983 apud HAMASSAKI, L. T. **Aspectos da aplicabilidade do ensaio do ultra-som em concreto**. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1987. 17 p. Boletim Técnico do Departamento de Engenharia de Construção Civil.

ARINI, R. Arquitetura de terra: **solo/cimento/cal**. 287 p. Tese (Doutorado em Estruturas Ambientais Urbanas) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, Rio de Janeiro. **NBR 5735** – Cimento Portland de Alto Forno. Rio de Janeiro, 1991. 10 p.

_____. **NBR 6457** - Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986a. 9 p.

_____. **NBR 6459** - Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984c. 6 p.

_____. **NBR 6508** - Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984b. 2 p.

_____. **NBR 7175** – Cal hidratada para argamassas. Rio de Janeiro, 1992a. 5 p.

Cap.7. Referências Bibliográficas

_____. **NBR 7180**-Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984d. 3 p.

_____. **NBR 7181** - Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984a. 13 p.

_____. **NBR 7182** - Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986b. 10 p.

_____. **NBR 7222** - Argamassa e Concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994. 6 p.

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

_____. **NBR 8491** - Tijolo maciço de solo-cimento. Rio de Janeiro, 1984e. 4 p.

_____. **NBR 8492** - Tijolo maciço de solo-cimento - Determinação da resistência à compressão e da absorção d'água. Rio de Janeiro, 1984f. 5 p.

_____. **NBR 10832** - Fabricação de tijolo maciço de solo-cimento com a utilização de prensa manual. Rio de Janeiro, 1989. 3 p.

_____. **NBR 12023** - Solo-Cimento - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1992b. 9 p.

_____. **NBR 12024** - Solo-Cimento - Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1992a. 8 p.

_____. **NBR 12025** - Solo-Cimento - Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1990b. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. Paredes monolíticas de solo-cimento: **Hospital Adriano Jorge**. São Paulo: ABCP, 1979. 55 p. Relatório técnico.

_____. **O solo cimento e suas aplicações rurais**. São Paulo: ABCP, 1989. 20 p. Boletim Técnico.

BAKER, P. New burning law will cost californians more. **Rice Journal**, Raleigh, U.S.A., v. 95, n. 4. p. 16-18, may. 1992.

BARBOSA, N. P.; TOLÊDO FILHO, R. D. Construção com terra crua. In: TOLÊDO FILHO, R. D.; NASCIMENTO, J. W. B.; GHAVAMI, K. **Materiais não convencionais para construções rurais**. Campina Grande: UFPB/SBEA, 1997. cap. 4, p. 113-43.

BERALDO, A. L. Compósito biomassa vegetal-cimento. In: TOLÊDO FILHO, R. D.; NASCIMENTO, J. W. B.; GHAVAMI, K. **Materiais não convencionais para construções rurais**. Campina Grande: UFPB/SBEA, 1997. cap.1, p. 1-43.

_____. **Compósitos de biomassa vegetal-cimento**. Manuscrito da disciplina Ap 399. Tópicos Especiais em Construções. Edições internas. Feagri/Unicamp 1997b.

BERALDO, A. L.; AZZINI, A.; BUCUR, V. Utilização de NDE em compósitos Bambu e Cimento Portland. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS, 19., 2000. **Anais....** São Paulo: [s.n], 2000a. 1 CD-ROM.

BERALDO, A. L.; LOPES, W. G. R.; CARVALHO, J. V.; ARZOLLA, J. A. P. R.; SEVEGNANI, K.; SOUZA, P. Efeito da espécie vegetal do tipo de cimento e do tratamento utilizado sobre a resistência à compressão de compósitos. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8., 2000b, Salvador. **Anais...**Salvador: [s.n], 2000b. 1 CD-ROM.

BERALDO, A. L.; TOJAL, J. H. V. Utilização de argamassa de cimento e casca de arroz em moradias populares. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...**Foz do Iguaçu: SBEA, 2001. 1 CD-ROM.

BERALDO, A. L.; ZUCCO, L. L. Compósitos à base de cimento Portland: estudos efetuados para viabilizar o uso da casca de arroz. In: BALBUENA, R. H.; BENEZ, S. H.; JORAJURIA, D. **Ingenieria rural y mecanización agraria en el ambito latino americano**. La Plata: [s.n.], 1998. p. 479-88.

BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of Wood and Wood Composites**. [S.l.]: Van Nostrand Reinhold Company, 1982. 711 p.

BUENO, B. S.; VILAR, O. M. **Mecânica dos Solos**. v. 1. São Carlos: Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 1999. 131p.

CAZALLA, O; SEBASTIÁN, E.; CULTRONE, G.; NECHAR, M.; BAGUR, M. G. Three way ANOVA interaction analysis and ultrasonic testing to evaluate air lime mortars used in cultural heritage conservation projects. **Cement & Concrete Research**, New York, EUA, v. 29: 1749-52. 1999.

CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO CAMAÇARI - CEPED. **Manual de construção com solo-cimento**. 3. ed. São Paulo: ABCP, 1984. 147 p.

_____. **Utilização de fibras vegetais na construção civil**. Camaçari: CEPED, 1984b. 61 p. Relatório nº 94 / 1984.

CONSELHO DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. Reciclagem dos resíduos agropecuários. In: _____. **Reciclagem dos resíduos urbanos, agropecuários, industriais e minerários**. Brasília: Secretaria Executiva, 1985. p. 57-81.

COUTTS, R. S. P.; NI, P. The relationship between wood pulp fibre properties and fibre cement composite performance. In: APPITA ANNUAL GENERAL CONFERENCE PROCEEDINGS, 49th., 1995. **Anais...**[S.l.: s.n.], 1995. 1 CD-ROM.

CULTRONE, G.; SEBASTIÁN, E.; CAZALLA O.; NECHAR, M.; ROMERO, R.; BAGUR, M. R. Ultrasound and mechanical tests combined with ANOVA to evaluate brick quality. **Ceramics International**, [S.l.], v. 27: 401-406. 2001.

FERREIRA, R. C. **Desempenho físico-mecânico e propriedades termofísicas de tijolos e mini-painéis de terra crua tratada com aditivos químicos**. 204 p. Tese (Doutorado em Construções Rurais) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2003.

FERREIRA, R. C.; SILVA, E. M.; FREIRE, W. J. Tijolos prensados de solo-cimento em alvenaria aparente auto-portante no “Conjunto Nossa Morada”, Goiânia-GO. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 3, 2003, São Carlos. **Anais...** São Paulo: [s.n.], 2003. 1 CD-ROM

FREIRE, W. J. Materiais Alternativos de Construção. In: BERALDO, A. L.; NAAS, I. A.; FREIRE, W. J. **Construções rurais: materiais**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1991. p. 105-61.

FUNDAÇÃO NÚCLEO DE TECNOLOGIA INDUSTRIAL - NUTEC. **Manual de Fabricação de Tijolo Solo-Cal**. [S.l.: s.n.], 1985. 26 p.

GHAVAMI, K.; TOLÊDO FILHO, R. D.; BARBOSA, N. P. Behaviour of composite soil reinforced with natural fibers. **Cement & Concrete Composites**, New York, EUA, v. 21, p. 39-48, 1999.

GRANDI, L. A. C. **Uso do pó de serra como material de construção, em misturas secas e argamassas**. 90 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991.

_____. **Placas pré moldadas de argamassa de cimento e pó de serra.** 128 f. Tese (Doutorado em Construções Rurais) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995.

GUIMARÃES, J. E. P. Solo-cal – Como construir. **Revista de Tecnologia da Construção**, São Paulo, ano 3, n. 18, set. 1995. Ficha Técnica 18.

_____. A cal: **fundamentos e aplicações na engenharia civil.** São Paulo: Pini, 1997. 285 p.

HAMASSAKI, L. T. **Aspectos da aplicabilidade do ensaio do ultra-som em concreto.** São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1987. 17 p. Boletim Técnico do Departamento de Engenharia de Construção Civil.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Levantamento sistemático da produção agrícola - 2004.** Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agricola>. Acesso em : 03 março. 2004.

JAUBERTHIE, R.; RENDELL, F.; TAMBA, S.; CISSË, I. K. Properties of cement – rice husk mixture. **Construction and Building Materials.** [S.l.], v. 17, p. 239-43, 2003.

LATORRACA, J. V. F. **Eucalyptus spp. na produção de painéis de cimento-madeira.** 182 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

MARTINS, S. A .C. F. **Pisos de argamassa reforçada com partículas de bambu.** 83 p. Dissertação (Mestrado em Construções Rurais) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

MENDONÇA, A. A.; SANTOS, M. F.; LIMA, D. C.; BUENO, B. S.; FONTES, M. P. F. Cura acelerada de misturas solo-cal: estudo de caso com dois solos de Viçosa – MG. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 30., 1996, Salvador. **Anais...** Rio de Janeiro: ABPV, 1996. v. 1, p. 425-432.

MESA VALENCIANO, M. C .; FREIRE, W. J. Tijolos de solo melhorado com cimento e fibras de bagaço de cana-de-açúcar: características físico-mecânicas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 28., 1999, Pelotas. **Anais...** Pelotas: [s.n], 1999. 1 CD-ROM.

MESA VALENCIANO, M. C . **Durabilidade de compósitos cimentícios com materiais lignocelulósicos.** 169 p. Tese (Doutorado em Construções Rurais) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

MYRRHA, M. A. L. Solo-cimento para fins construtivos. In: FREIRE, W. J.; BERALDO, A. L. **Tecnologia e materiais alternativos de construção.** Campinas: Editora da UNICAMP, 2003. cap.4, p. 95-120.

NASCIMENTO, A. A. P. **Estudo de fissuras em paredes de tijolos de solo-cimento destinadas a edificações habitacionais.** 148 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

NEVES, C. M. M. Tecnologia alternativa: solo-cimento na habitação popular. In: SEMINÁRIO REGIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, 1990, Recife. **Anais...** Recife: [s.n.], 1990. p. 22-30.

PICCHI, F. A.; CINCOTTO, M. A.; BARROS, J. M. C. Tijolos de solo-cal. **Revista A Construção**, São Paulo, p. 93-8, 1990. Tecnologia de edificações IPT / Ded90.

PRABAKAR, J.; SRIDHAR, R. S. Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behaviour of soil. **Construction and Building Materials**. New York, n.16, p.123 -31, 2002.

RASHWAN, M. S.; HATZINIKOLAS, M.; ZMAVC, R. Development of a lightweight, low-cost concrete block using wood residue. **Forest Products Journal**, Madison, EUA., v. 42, n. 5, p. 57-64, 1992.

RIM, K. A.; LEDHEM, A.; DOUZANE, O.; DHEILLY, R. M.; QUENEUDEC, M. Influence of the proportion of wood on the thermal and mechanical performances of clay-cement-wood composites. In: CEMENT AND CONCRETE RESEARCH, 21.,1999. **Anais...** [S.l.: s.n.], 1999, p. 269-76.

SAHARA – INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS LTDA. **Manual Informativo ilustrado – O Solo-Cimento na Fabricação do Tijolo Modular**. São Paulo, 1998. 30 p.

SARMIENTO, C. R. **Argamassa de cimento reforçada com fibras de bagaço de cana-de-açúcar e sua utilização como material de construção**. 110 p. Dissertação (Mestrado em Construções Rurais) - Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.

SAVASTANO JR., H. **Materiais à base de cimento reforçado com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo**. 144 p. Tese (Livre Docência em Engenharia da Construção Civil) - Faculdade de Zootecnia e de Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

SERRANO, J. S.; CASTRO, J. V. **Materiales de construcción con propiedades aislantes a base de cascara de arroz**. **Informes de la Construcción**, Instituto Eduardo Torroja, Madrid, v. 37, n. 372 (7), p. 53-64. 1985.

SILVEIRA, A.; FERREIRA, A. A.; DALMOLIN, D. C. C. A cinza da casca de arroz como adição mineral. In: WORKSHOP RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 1996, São Paulo. **Anais...** São Paulo: [s.n.], 1996. p. 39-45.

SOARES, J. M. D.; TOMAZETTI, R. R.; PINHEIRO, R. B. Habitação em paredes monolíticas de solo-cimento. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, São Paulo, Brasil. n.5, p.51-57, Agosto, 2004.

SOUSA, S. M. T.; BARBOSA, N. P. Estabilização granulométrica de solos para a confecção de tijolos prensados de terra crua. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8., 2000, Salvador. **Anais...** Salvador: [s.n.], 2000. 1 CD-ROM.

SOUZA, M. R. Tecnologias para usos alternativos de resíduos florestais: experiência do Laboratório de Produtos Florestais – IBAMA na área de utilização de resíduos florestais e agrícolas. In: WORKSHOP SULAMERICANO SOBRE USOS ALTERNATIVOS DE RESÍDUOS DE ORIGEM FLORESTAL E URBANA, 1997, Curitiba. **Anais...** Curitiba: Sepia, 1997. p. 49–62.

SVENSON, M. Estudo de misturas solo-cal sob carregamento dinâmico. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA, 1981, Rio de Janeiro. **Anais...**[S.l]: COPPE/UFRJ-CNPq-ABMS, 1981, p. 385-414.

ZHENG Tian, L.; MOSLEMI, A. A. Influence of chemical additives on the hydration characteristics of western larch wood-cement-water mixtures. **Forest Products Journal**, Madison, EUA., v. 35, n. 7, p. 37-43, 1985.

ZUCCO, L. L. **Estudo da viabilidade de fabricação de placas de compósitos à base de cimento e casca de arroz**. 118 p. Dissertação (Mestrado em Construções Rurais) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

Cap.7. Referências Bibliográficas

YOUNGQUIST, J. A.; KRZYSIK, A. M.; ENGLISH, B. W.; SPELTER, H. N.; CHOW, P. Agricultural fibers for use in building components. In: PROC. THE USE OF RECYCLED WOOD AND PAPER IN BUILDING APPLICATIONS, 1996. **Anais...**Madison: Forest Products Society, 1996. p. 123-134. Disponível em: <<http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf1996/young96a.pdf>>. Acesso em: 02 abr. 2003.

WALKER, P. J. Strength, durability and shrinkage characteristics of cement stabilized soil blocks. **Cement & Concrete Composites**, New York, EUA. , n. 17, p. 301-10, 1995.