

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**AVALIAÇÃO FÍSICA, MECÂNICA E TÉRMICA DO MATERIAL
SOLO-CIMENTO-CINZA DE CASCA DE ARROZ E SEU
DESEMPENHO COMO PAREDE MONOLÍTICA**

ANA PAULA DA SILVA MILANI

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2008

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**AVALIAÇÃO FÍSICA, MECÂNICA E TÉRMICA DO MATERIAL
SOLO-CIMENTO-CINZA DE CASCA DE ARROZ E SEU
DESEMPENHO COMO PAREDE MONOLÍTICA**

Tese submetida à Banca Examinadora para
obtenção do título de Doutor 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 2008

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

M598a Milani, Ana Paula da Silva
Avaliação física, mecânica e térmica do material solo-
cimento-cinza de casca de arroz e seu desempenho como
parede monolítica / Ana Paula da Silva Milani. --
Campinas, SP: [s.n.], 2008.

Orientador: Wesley Jorge Freire.
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Material 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 and thermal evaluation of material soil-
cement-rice husk ash and its performance on monolithic wall.

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

Área de concentração: Construções Rurais e Ambiência

Titulação: Doutor em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: José Wallace Barbosa do Nascimento, Jorge Luís Akasaki,
Lucila Chebel Labaki e Raquel Gonçalves.

Data da defesa: 19/02/2008

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da **Tese Doutorado** defendida por **Ana Paula da Silva Milani**, aprovada pela Comissão Julgadora em 19 de fevereiro de 2008, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



Prof. Dr. Wesley Jorge Freire - Orientador
FEAGRI/UNICAMP



Prof. Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento - Membro Titular
UFCG/PB



Prof. Dr. Jorge Luis Akasaki - Membro Titular
FEISUNESP



Prof.^a Dr.^a Lucila Chebel Labaki - Membro Titular
FEC/UNICAMP



Prof.^a Dr.^a Raquel Gonçalves - Membro Titular
FEAGRI/UNICAMP

“A vida não é busca do caminho da verdade,
mas sim o reconhecimento das verdades que
encontramos em nosso caminho.”

Gibran Kalil Gibran

Aos meus familiares, pelo incentivo e
amizade.....

.....ofereço

Ao meu grande amor e companheiro, Marcio, por estar
sempre a meu lado.....

.....dedico

AGRADECIMENTOS

À 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.

Aos professores, Antonio Ludovico Beraldo, Raquel Gonçalves e Lucila Chebel Labaki, pelo apoio, incentivo e atenção na solução de problemas.

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

À secretaria da Pós-graduação pelo atendimento sempre eficiente e carinhoso.

Aos funcionários do Campo Experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola e ao Sr. Leonardo Priess, pela amizade e auxílio na execução de ensaios de campo.

Aos técnicos do Laboratório de Solos e do Laboratório de Conforto Ambiental, ambos da Faculdade de Engenharia Civil, do Laboratório de Protótipos da Faculdade de Engenharia Agrícola, que muito colaboraram na execução dos ensaios.

Aos colegas, em especial, Lóris Zucco, Lia Pimentel e Michelle Rodrigues 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.

A agência financiadora CNPq pela concessão da bolsa.

A empresa Broto Legal Alimentos pelo fornecimento de matéria-prima (resíduo cinza de casca de arroz) para o desenvolvimento da presente pesquisa.

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

.....**muito obrigado.**

SUMÁRIO

	Página
Epígrafe	v
Dedicatória	vi
Agradecimentos	vii
Sumário	viii
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xvi
Resumo	xix
Abstract	xx
1. <u>INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA</u>	<u>01</u>
2. <u>OBJETIVOS</u>	<u>06</u>
2.1. OBJETIVO GERAL	06
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	06
3. <u>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</u>	<u>07</u>
3.1. SOLO	07
3.2. CIMENTO PORTLAND	09
3.3. CINZAS DE CASCA DE ARROZ	11
3.4. ESTABILIZAÇÃO DO SOLO	16
3.4.1. Estabilização do solo com cimento Portland	17
3.4.2. Fatores que influenciam a estabilização do solo-cimento compactado	18
3.5. SOLO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO	22
3.5.1. Solo-cimento como material de construção	24
3.5.2. Caracterização física e mecânica do solo-cimento e seu desempenho físico-mecânico como componente construtivo	27
3.5.3. Caracterização termofísica do solo-cimento e seu desempenho térmico como componente construtivo	37
3.5.4. Solo-cimento-cinza como material de construção	45
3.6. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE EDIFICAÇÕES	50

4. <u>MATERIAL E MÉTODOS</u>	53
4.1. MATERIAL	53
4.2. MÉTODOS	58
1º Etapa - Preparação e caracterização dos materiais	58
2º Etapa - Estudo de dosagem das misturas de solo-cimento-cinza de casca de arroz	60
3º Etapa – Caracterização físico-mecânica das misturas de solo-cimento–cinza de casca de arroz selecionadas na etapa do estudo de dosagem	65
4º Etapa – Análise estatística	70
5º Etapa - Construção de edificação-protótipo com o sistema de paredes monolíticas de solo-cimento–cinza de casca de arroz	71
6º Etapa - Desempenho das paredes monolíticas de solo-cimento–cinza de casca de arroz da edificação-protótipo	78
5. <u>RESULTADOS E DISCUSSÃO</u>	90
5.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	90
5.1.1. Material cinza de casca de arroz	90
5.1.2. Material solo	94
5.2. ESTUDO DE DOSAGEM DAS MISTURAS DE SOLO-CIMENTO-CINZA DE CASCA DE ARROZ	95
5.2.1. Ensaio de compactação normal de Proctor	95
5.2.2. Ensaio mecânicos preliminares	101
5.2.3. Escolha das misturas de solo-cimento-cinza para caracterização físico-mecânica	108
5.3. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DOS CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS CONFECCIONADOS COM MISTURAS DE SOLO-CIMENTO–CINZA	110
5.3.1. Massa aparente seca e grau de compactação	110
5.3.2. Resultados do ensaio de ultra-som e compressão simples	112

5.3.3. Resultados do ensaio de absorção de água	120
5.3.4. Resultados do ensaio de durabilidade	122
5.3.5. Escolha do tratamento solo-cimento-cinza para construção da edificação-protótipo	125
5.4. DESEMPENHO DAS PAREDES MONOLÍTICAS DE SOLO-CIMENTO-CINZA DE CASCA DE ARROZ	127
5.4.1. Desempenho do processo produtivo das paredes monolíticas de solo-cimento-cinza	127
5.4.2. Desempenho estrutural das paredes monolíticas de solo-cimento-cinza	131
5.4.3. Desempenho térmico das paredes monolíticas de solo-cimento-cinza	138
5.4.4. Desempenho físico-químico das paredes monolíticas de solo-cimento-cinza	148
5.4.5. Desempenho físico e durabilidade das paredes monolíticas de solo-cimento-cinza	151
5.4.6. Custo-benefício das paredes monolíticas de solo-cimento-cinza	153
6. <u>CONCLUSÕES</u>	155
6.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	155
6.2. ESTUDO DE DOSAGEM DAS MISTURAS DE SOLO-CIMENTO-CINZA DE CASCA DE ARROZ	155
6.3. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DOS CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS CONFECCIONADOS COM MISTURAS DE SOLO-CIMENTO-CINZA	156
6.4. DESEMPENHO DAS PAREDES MONOLÍTICAS DE SOLO-CIMENTO-CINZA DE CASCA DE ARROZ	156
6.5. CONCLUSÕES GERAIS	157
6.6. FUTURAS PESQUISAS	158
7. <u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	159
8. <u>ANEXOS</u>	174

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Imagem retroespalhada obtida pela Microscopia Eletrônica de Varredura da cinza de casca de arroz: (a) 100 μm , (b) 20 μm .	13
Figura 2. Resistência à compressão simples de corpos-de-prova de solo estabilizados com diferentes teores de cimento e processo de compactação.	21
Figura 3. Desempenho mecânico do solo-cimento: (a) teor de cimento, (b) decorrer do tempo.	33
Figura 4. Coeficiente de permeabilidade de misturas de solo-cimento.	33
Figura 5. Coeficiente de retração de misturas de solo-cimento.	33
Figura 6. Imagem de amostras de blocos ampliada 50x - 500 μm : (a) solo-cimento 6%, (b) solo-cimento 8%, (c) solo-cimento 12%.	34
Figura 7. Parâmetros de avaliação de desempenho térmico de vedações externas - paredes.	44
Figura 8. Relação entre umidade ótima, massa específica aparente seca e teores de aditivos adicionados ao solo.	49
Figura 9. Relação entre resistência e teores de aditivos incorporados ao solo.	49
Figura 10. Imagem da amostra de solo+4% cimento+20% cinza - 100x - 10 μm .	49
Figura 11. Diagrama de difração de raio-X das amostra de solo e de solo + 4% de cimento+ 20% de cinza.	50
Figura 12. (a) Forno de queima da casca de arroz e (b) estoque da cinza de casca de arroz.	54
Figura 13. Molde cilíndrico e compactador.	56
Figura 14. Molde retangular.	56
Figura 15. Soquete de madeira.	56
Figura 16. Aparelho de ultra-som Steimkamp/BP7.	57
Figura 17. Aparelho de ultra-som Panametrics/EPOCH4.	57
Figura 18. Máquina universal de ensaios com capacidade: (a) 15.000 kgf e (b) 25.000 kgf.	57

Figura 19.	Permeâmetro com carga variável.	57
Figura 20.	Sensores de medições térmicas.	57
Figura 21.	(a) Cinza de casca de arroz residual e (b) cinza de casca de arroz após peneiramento	59
Figura 22.	Esquema fatorial de estudo de dosagem.	61
Figura 23.	Ensaio de ultra-som aplicado aos corpos-de-prova.	64
Figura 24.	Ensaio de compressão simples aplicado aos corpos-de-prova.	64
Figura 25.	Procedimentos para os ensaios de absorção de água e durabilidade: (a) secagem dos corpos-de-prova e (b) molhamento dos corpos-de-prova.	68
Figura 26.	Mapa da UNICAMP – localização da edificação protótipo.	72
Figura 27.	(a) Terreno livre do Campo Experimental e (b) locação da obra no terreno	72
Figura 28.	Planta sem escala da edificação-protótipo.	73
Figura 29.	Corte AA sem escala da edificação-protótipo.	73
Figura 30.	(a) Escavação para fundação, (b) confecção de pilares ou guias de concreto, (c, d) fixação das guias de concreto, (e) estrutura final para levantamento das paredes monolíticas	75
Figura 31.	(a, b, c) Etapas para mistura manual de solo-cimento-cinza-água.	76
Figura 32.	(a) Conjunto de fôrmas, (b) compactação da mistura com soquete, (c) ranhuras executadas ao final da compactação.	76
Figura 33.	(a) Cura das paredes, (b) evolução do levantamento das paredes monolíticas	76
Figura 34.	Colocação das esquadrias: (a) da porta, (b) da janela.	77
Figura 35.	(a) Armadura da cinta superior e da laje pré-fabricada, (b) concretagem da laje.	77
Figura 36.	(a) Ático ventilado, (b) cobertura com telhas de fibro-cimento.	77
Figura 37.	Ensaio de compressão simples dos mini-painéis e localização dos extensômetros	80

Figura 38.	Leituras do tempo de propagação da onda nos mini-painéis: (a) Eixo 1 – largura; (b) Eixo 2 – espessura; (c) Eixo 3 – comprimento (direção de compactação).	82
Figura 39.	Matriz de rigidez de um sólido ortotrópico.	83
Figura 40.	Matriz de flexibilidade de um sólido ortotrópico.	83
Figura 41.	Placas solo-cimento-cinza.	84
Figura 42.	Equipamento para ensaio de condutividade.	84
Figura 43.	Estação meteorológica CEPAGRI.	86
Figura 44.	Medições térmicas no protótipo.	86
Figura 45.	Abertura da janela vedada.	86
Figura 46.	Abertura da porta vedada.	86
Figura 47.	Corpo-de-prova de solo-cimento-cinza no ensaio de permeabilidade à água.	88
Figura 48.	Imagem de Microscopia Eletrônica de Varredura da cinza de casca de arroz: (a) imagem ampliada em 2000x com pontos para análise química; (b) análise química qualitativa dos pontos – Espectrômetro de Energia Dispersiva.	93
Figura 49.	Diagrama de difração de raio-x da cinza de casca de arroz estudada.	93
Figura 50.	Curvas de compactação (Solo + CCA-A) 7% de cimento.	100
Figura 51.	Curvas de compactação (Solo + CCA-B) 7% de cimento.	100
Figura 52.	Curvas de compactação (Solo + CCA-A) 10% de cimento.	100
Figura 53.	Curvas de compactação (Solo + CCA-B) 10% de cimento.	100
Figura 54.	Curvas de compactação (Solo + CCA-A) 13% de cimento.	100
Figura 55.	Curvas de compactação (Solo + CCA-B) 13% de cimento.	100
Figura 56.	Valores médios de velocidade de onda ultra-sônica das diferentes misturas de solo-cimento-cinza CCA-A.	101
Figura 57.	Valores médios de velocidade de onda ultra-sônica das diferentes misturas de solo-cimento-cinza CCA-B.	101

Figura 58.	Relação entre a resistência e a densidade das combinações solo-cinza dentro do mesmo teor de cimento	106
Figura 59.	Relação entre a velocidade e a densidade das combinações solo-cinza dentro do mesmo teor de cimento.	107
Figura 60.	Relação entre a velocidade e a resistência das combinações solo-cinza dentro do mesmo teor de cimento.	107
Figura 61a.	Evolução da velocidade de propagação da onda ultra-sônica ao longo do tempo.	115
Figura 61b.	Evolução da resistência à compressão simples ao longo do tempo.	115
Figura 62a.	Relação entre velocidade e resistência dos tratamentos de solo-cimento-cinza dentro da mesma idade.	116
Figura 62b.	Relação entre velocidade e resistência dos tratamentos de solo-cimento-cinza dentro do mesmo tratamento – retirado idade de 180 e 360 dias.	119
Figura 63.	Corpo-de-prova de solo-cimento-cinza após ensaio de compressão simples.	118
Figura 64.	Evolução da capacidade de absorção de água ao longo do tempo.	121
Figura 65.	Relação entre ganho de resistência e capacidade de absorção de água para cada tratamento.	122
Figura 66.	Evolução da resistência à compressão simples ao longo do tempo dos corpos-de-prova após ciclos de molhamento e secagem.	124
Figura 67.	Edificação-protótipo: (a) vista sul e oeste, (b) vista norte e leste.	131
Figura 68.	Ruptura dos mini-painéis monolíticos de solo-cimento-cinza – aplicação da carga na direção de compactação – Eixo 3.	131
Figura 69.	Seqüência do carregamento aplicado aos mini-painéis de solo-cimento-cinza.	132
Figura 70.	Diagrama tensão x deformação do mini-painel de solo-cimento-cinza n°1.	132
Figura 71.	Diagrama tensão x deformação do mini-painel de solo-cimento-cinza n°2.	132
Figura 72.	Diagrama tensão x deformação do mini-painel de solo-cimento-cinza n°4.	133

Figura 73.	Diagrama tensão x deformação do mini-painel de solo-cimento-cinza n°5.	133
Figura 74.	Eixos de leitura do tempo de propagação da onda nos mini-painéis.	134
Figura 75.	Umidade relativa do ar no período de 19/01 a 06/02/2007 – verão.	142
Figura 76.	Temperatura do ar e temperatura superficial - verão.	142
Figura 77.	Umidade relativa do ar no período de 17/07 a 05/08/2007 – inverno.	142
Figura 78.	Temperatura do ar e temperatura superficial – inverno.	143
Figura 79.	Umidades médias ao longo do dia 02/02/2007 – dia típico verão.	143
Figura 80.	Temperaturas médias ao longo do dia 02/02/2007 – dia típico verão.	144
Figura 81.	Umidades médias ao longo do dia 31/07/2007 – dia típico inverno.	144
Figura 82.	Temperaturas médias ao longo do dia 31/07/2007 – dia típico inverno.	144
Figura 83.	Difratograma de raio-X da amostra de solo-cimento.	149
Figura 84.	Difratograma de raio-X da amostra de solo-cimento-cinza.	149
Figura 85.	MEV dos tratamentos: (a) imagem do solo-cimento (T2) ampliada em 100x; (b) imagem do solo-cimento-cinza (T5) ampliada em 100x.	150
Figura 86.	MEV dos tratamentos: (a) imagem do solo-cimento (T2) ampliada em 10.000x; (b) imagem do solo-cimento-cinza (T5) ampliada em 10.000x.	150
Figura 87.	Análise química qualitativa EDS dos tratamentos solo-cimento e solo-cimento-cinza.	150
Figura 88.	Fissuras ocorridas na edificação-protótipo: (a) porta – fachada sul, (b) janela – fachada norte.	152
Figura 89.	Manchas de bolor na edificação-protótipo –fachada oeste.	152

LISTA DE TABELAS

		Páginas
Tabela 1.	Composição química de cinzas de casca de arroz, % em massa, base seca.	13
Tabela 2.	Resultados dos ensaios de misturas de solo-cimento (MPa).	21
Tabela 3.	Sistemas construtivos de vedação utilizados em diversos países Latino-americanos	23
Tabela 4.	Resultados dos ensaios de tijolos de solo-cimento.	27
Tabela 5.	Quantidade de cimento recomendada (% volume) para obter determinada resistência à compressão do bloco de solo-cimento (saturado).	28
Tabela 6.	Características mecânicas das paredes de tijolos de terra cura.	29
Tabela 7.	Resistência à compressão simples e absorção d'água dos tijolos de solo-cimento.	30
Tabela 8.	Tensões de ruptura (MPa) de corpos-de-prova de solo-cimento.	32
Tabela 9.	Tensões de ruptura (MPa) de paredes de solo-cimento.	35
Tabela 10a.	Resistência térmica superficial interna e externa.	39
Tabela 10b.	Resistência térmica de câmaras de ar com largura muito maior que a espessura.	39
Tabela 10c.	Absortância (α) para radiação solar (ondas curtas).	41
Tabela 11.	Características termofísicas do solo-cimento.	42
Tabela 11b.	Principais propriedades térmicas da parede de tijolos de solo-cimento.	42
Tabela 12.	Valores médios de resistência à compressão e absorção de água de tijolos de solo-cimento com adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar semi-beneficiadas.	46
Tabela 13.	Ensaio realizados com tijolos de solo-cimento com adição de cinzas beneficiadas.	47
Tabela 14.	Valores de ensaio preliminar para a confirmação do uso do transdutor de onda longitudinal, de frequência de 45 kHz, seção exponencial.	63

Tabela 15.	Programação de ensaios e quantidades de corpos-de-prova para cada ensaio em determinadas idades.	65
Tabela 16.	Valores de ensaio preliminar para a confirmação do uso do transdutor de onda longitudinal, de frequência de 100 kHz, seção plana.	81
Tabela 17.	Características físicas da cinza de casca de arroz.	90
Tabela 18.	Distribuição em tamanho das cinzas a partir de 100,00 g do material.	90
Tabela 19.	Características físico-químicas da cinza de casca de arroz.	92
Tabela 20.	Características físicas do solo estudado.	94
Tabela 21.	Análise de variância referente aos efeitos das adições no solo sobre a variável massa específica aparente seca máxima (g/cm^3).	96
Tabela 22.	Análise de variância referente aos efeitos das adições no solo sobre a variável umidade ótima (%).	96
Tabela 23.	Valores de massa específica aparente seca máxima do ensaio de compactação normal de Proctor aplicado à combinação solo-cinza estabilizada com cimento.	97
Tabela 24.	Valores de umidade ótima do ensaio de compactação normal de Proctor aplicado à combinação solo-cinza estabilizada com cimento.	98
Tabela 25.	Análise de variância referente aos efeitos das adições no solo sobre a variável velocidade de onda ultra-sônica preliminar de corpos-de-prova (m/s) – aos 7 dias de idade.	102
Tabela 26.	Análise de variância referente aos efeitos das adições no solo sobre a variável resistência à compressão simples preliminar de corpos-de-prova (MPa) – aos 7 dias de idade.	102
Tabela 27.	Valores de velocidade de onda ultra-sônica, aos 7 dias, de corpos-de-prova confeccionados com diferentes combinações de solo-cinza estabilizados com cimento (sem imersão em água).	103
Tabela 28.	Valores de resistência à compressão simples, aos 7 dias, de corpos-de-prova confeccionados com diferentes combinações de solo-cinza estabilizados com cimento (sem imersão em água).	104
Tabela 29.	Ganho de resistência proporcionado pelo aumento do teor de cimento.	106
Tabela 30.	Valores médios de controle da massa específica aparente seca e grau de compactação dos corpos-de-prova cilíndricos.	110

Tabela 31.	Valores médios da massa específica aparente seca e do grau de compactação dos corpos-de-prova cilíndricos para cada idade.	111
Tabela 32.	Análise de variância referente aos efeitos dos tratamentos sobre a variável velocidade de onda ultra-sônica (m/s).	112
Tabela 33.	Análise de variância referente aos efeitos dos tratamentos sobre a variável resistência à compressão simples (MPa).	112
Tabela 34.	Velocidade de onda ultra-sônica (m/s), aos 7, 30, 60, 90, 120, 180 e 360 dias, de corpos-de-prova confeccionados sob diferentes tratamentos	113
Tabela 35.	Resistência à compressão simples (MPa), aos 7, 30, 60, 90, 120, 180 e 360 dias, de corpos-de-prova confeccionados sob diferentes tratamentos.	114
Tabela 36.	Análise de variância referente aos efeitos dos tratamentos sobre a variável capacidade de absorção de água (%).	120
Tabela 37.	Capacidade de absorção de água (%), aos 7, 30, 60 e 90 dias, de corpos-de-prova confeccionados sob diferentes tratamentos.	120
Tabela 38.	Resultados do ensaio de durabilidade de corpos-de-prova confeccionados sob diferentes tratamentos.	123
Tabela 39.	Transformação do traço em massa para traço em volume – Tratamento T5.	128
Tabela 40.	Comparação entre os tratamentos solo-cimento e solo-cimento-cinza enfocando o consumo de materiais para execução de 1 m ³ de parede monolítica.	130
Tabela 41.	Desempenho estrutural dos mini-painéis de solo-cimento-cinza aos 180 dias.	133
Tabela 42.	Desempenho estrutural dos mini-painéis de solo-cimento-cinza aos 360 dias.	134
Tabela 43.	Valores médios de velocidade de onda ultra-sônica longitudinal e transversal dos mini-painéis de solo-cimento-cinza, aos 7 dias de idade.	135
Tabela 44.	Principais características térmicas da parede monolítica de solo-cimento-cinza	139
Tabela 45.	Comparação entre dois sistemas construtivos enfocando o custo de material por metro quadrado e o consumo de tempo da mão-de-obra por metro quadrado.	153

RESUMO

No Brasil existem sérios problemas ambientais no que se refere à constante geração de resíduos agroindustriais e a falta de tecnologias e materiais de construção energeticamente eficientes. Buscando um material alternativo de construção que minimize esta degradação ambiental e reduza os custos energéticos do produto final, no presente trabalho foram pesquisadas diferentes misturas de solo-cimento-cinza de casca de arroz, de forma a resgatar o uso da terra crua como elemento construtivo sustentável e proporcionar à cinza residual de casca de arroz uma destinação final adequada. O principal objetivo da pesquisa foi estudar as características de diferentes misturas de solo-cimento-cinza priorizando a máxima incorporação de cinza residual aliado ao mínimo consumo do estabilizante cimento para obtenção de um material que atenda às solicitações usuais de paredes de vedação, bem como submeter o material solo-cimento-cinza a avaliações de desempenho na construção de paredes monolíticas para habitações, quer sejam urbanas ou rurais. Para tal, foram realizados o peneiramento da cinza de casca de arroz e o estudo de dosagem das misturas de solo-cimento-cinza através de ensaios de compactação normal de Proctor e de ensaios de compressão simples e de ultra-som. A partir deste estudo preliminar, as misturas de solo-cimento-cinza que melhores resultados apresentaram foram utilizadas para a determinação de suas outras características físicas e mecânicas sendo, posteriormente, selecionadas para a construção de uma edificação protótipo, cujos desempenho estrutural, desempenho térmico e desempenho físico das paredes monolíticas de solo-cimento-cinza de casca de arroz foram avaliados e analisados tecnicamente. Pôde-se concluir que o solo arenoso, quando substituído por 7,5% de cinza (em massa) e estabilizado com 10% de cimento, apresentou-se como um material alternativo de construção de boa qualidade, de baixo custo e com potencialidade para construção de componentes construtivos em habitações de interesse social.

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 ash added to mixtures of soil and cement aiming at the obtainment of an alternative construction material. For this purpose, a sandy soil was treated with different amounts of cement and rice husk ash before being submitted to physical and mechanical tests. The rice husk ash preparation consisted of grinding and sieving later followed by physical characteristics determination in laboratory conditions. The different mixtures of soil, cement and rice husk ash were firstly tested for compaction and unconfined compression and afterwards by many others physical and mechanical tests in order to determine their main characteristics. The soil-cement-rice husk ash mixture presenting the best results in terms of mechanical strength, water absorption and ultrasonic wave velocity was utilized for the construction of a prototype building whose structural, thermic and physical performances of the soil-cement-rice husk ash monolithic walls were technically analysed. The results showed that the sandy soil partially substituted by 7.5% of rice husk ash and stabilized with 10% of cement was the best treatment, pointing out its promising use as an alternative material for rural construction.

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A cada dia o progresso tecnológico traz inovações nos produtos industrializados e otimização de sua produção; porém, paralelamente a este progresso, são extraídos de forma indiscriminada recursos naturais que quase sempre resultam na geração de resíduos que não são aproveitados pelo homem, provocando danos ambientais algumas vezes irreversíveis.

A geração de resíduos florestais e agrícolas no Brasil assume valores expressivos, que não só representam um problema econômico através do desperdício como também um sério problema ambiental. A atividade agroindustrial de beneficiamento de arroz destaca-se pela elevada produção do resíduo casca de arroz, anotando-se que, nos primeiros anos do século XXI, foram geradas cerca de 2,5 milhões de toneladas anuais de casca de arroz (cascas de arroz representam cerca de 20% do peso do grão). Essa casca de arroz, quando não utilizada de forma direta (cama de galinheiro, condicionador de solos, etc.), é queimada a céu aberto ou utilizada como combustível para secagem de grãos, produzindo toneladas de cinzas residuais. Fatores como a sazonalidade, a falta de tecnologia e o pouco investimento no processo de reciclagem ou de reutilização, tornam a cinza residual de casca de arroz um sério problema ambiental, sendo a maioria descartada e lançada em aterros ao longo de estradas vicinais ou, mesmo clandestinamente, nos rios.

Outro problema freqüente em países emergentes, como o Brasil, é a grande demanda de habitações que, por sua vez, tem-se deparado com a incessante aplicação de tecnologias e materiais de construção energeticamente ineficientes, ou seja, intensa utilização de técnicas e materiais construtivos que necessitam de grande consumo de energia para sua produção, como por exemplo, cimento, aço, alumínio, tijolos cerâmicos, alvenaria de tijolos cerâmicos, etc. Estudos sobre as questões energéticas e ambientais constataam que a energia consumida pela indústria da construção civil representa mais de 20% do consumo mundial de combustíveis e que a continuação do uso de métodos e materiais convencionais de construção que utilizam cimento, aço, agregados e cerâmica, promoverá uma escassez de todos estes materiais de construção no país, além de provocar um enorme impacto ambiental devido ao maior volume de gás carbônico gerado para produzi-los, demonstrando que o atual sistema de construção é insustentável sob ponto de vista da disponibilidade de recursos naturais e do meio ambiente.

Visando soluções que minimizem esta degradação ambiental e ao mesmo tempo reduzam os custos energéticos do produto final, procurou-se desenvolver materiais e técnicas que utilizem racionalmente os recursos naturais, necessitem de pouco investimento financeiro, gerem tecnologias apropriadas, utilizem materiais de baixo consumo energético e reaproveitem os materiais residuais de agroindústrias como forma de evitar seu lançamento em locais e condições inadequadas. Dessa forma, estar-se-á contribuindo com a eficiência energética, sustentabilidade e conservação dos recursos naturais no que se refere ao menor impacto das construções em tais questões energéticas e ambientais.

Dentro desse âmbito, pesquisadores vêm procurando estudar e difundir tecnologias apropriadas nas construções em geral (civis e rurais), sendo promissores materiais de construção o cimento com fibras e/ou resíduos industriais e agroindustriais, o solo quimicamente estabilizado, e os cimentos pozolânicos produzidos em pequenas fábricas.

Nessa linha, tem-se destacado a utilização das cinzas vegetais como material pozolânico para a obtenção de aglomerantes alternativos. Em princípio, qualquer cinza vegetal predominantemente silicosa, que possa ser produzida no estado vítreo e com finura adequada, pode ser utilizada como aglomerante pozolânico; porém, sua reatividade dependerá da composição morfológica e do processo de produção da cinza, como tempo de queima, temperatura de combustão e grau de moagem.

A maior parte das pesquisas concentra-se nas cinzas de casca de arroz, pois fatores como grande conteúdo de cinza (entre 18% e 20%) na casca de arroz, o elevado teor de sílica, o tipo de estrutura física da sílica (estrutura alveolar, de grande superfície específica) e a disponibilidade da casca de arroz, contribuem para o destaque deste resíduo na utilização como pozolanas. Estudos indicam que o processo de calcinação da casca de arroz é a chave para a atividade pozolânica da cinza resultante, visto que as cinzas de casca de arroz que apresentam em sua composição alto teor de sílica amorfa (obtidas através de processos de queima com temperaturas controladas entre 400 °C e 700 °C) são consideradas adequadas para produção de cimentos pozolânicos. Evidentemente, nem toda casca é queimada em temperaturas controladas, e esse tipo de processo acaba gerando cinzas com presença de sílica cristalina, quimicamente inativas.

Ainda voltado à fabricação de um material de menor impacto ambiental, o resgate da terra crua como material alternativo tem-se mostrado um caminho promissor, visto que a

eliminação do processo de queima do solo (argila) para produção de tijolos cerâmicos diminui significativamente o lançamento de CO₂ na atmosfera, além, também, do material terra caracterizar-se como um elemento propulsor de tecnologias apropriadas. Para a melhoria do comportamento do solo quanto à sua aplicação em obras de engenharia, diversos produtos estão sendo utilizados como agentes estabilizadores, melhorando assim a resistência à compressão simples, resistência à tração na compressão diametral, resistência ao cisalhamento, módulo de deformação, capacidade de carga, rigidez, compacidade e consistência, expansão e contração, resistência ao desgaste e resistência à erosão.

Dentre os inúmeros procedimentos de estabilização do solo, os que têm sido identificados como soluções práticas e econômicas são o do solo-cimento, o do solo-cal, o do solo-betume, o do solo-resina, a estabilização granulométrica, a estabilização com cinzas volantes (“fly-ash”), a estabilização com o emprego de sais (cloretos), ácidos (ácido fosfórico), lignina, silicatos de sódio (“water glass”) e de cálcio, aluminatos de cálcio, sulfatos de potássio, óxidos de ferro, a estabilização com cinzas pozolânicas de turfas e restos de atividade agrícola (casca de arroz, casca de amendoim, bagaço de cana-de-açúcar, etc.), materiais e fibras vegetais (partículas de madeira, fibras de sisal e de coco, sobras de papel, polpa de celulose, etc.).

Os resultados surpreendentes, em termos de resistência mecânica, obtidos com a adição de agentes estabilizadores ao solo, abrem a possibilidade de um maior aprofundamento nos estudos sobre as propriedades físico-mecânicas e termofísicas do material obtido frente às mais diversas condições de fabricação e de solicitações, assim como há a necessidade de normatização dos procedimentos de ensaio, execução, fabricação e dimensionamento dos mesmos para melhor aceitabilidade técnica e cultural do fabricante e/ou usuário.

Por outro lado, entende-se que todo processo de utilização de um resíduo disponível em grande quantidade e sem destinação pela indústria que o produz pode levar vantagens econômicas, técnicas, ecológicas e energéticas a toda a sociedade. Considerando-se que grande parte das pesquisas enfoca as cinzas de casca de arroz de alta pozolanicidade, estende-se a necessidade dos estudos às cinzas de baixa atividade pozolânica. Portanto, nesta pesquisa, incorporou-se este tipo de cinza de casca de arroz a misturas de solo-cimento como carga mineral, possibilitando assim um destino final a este resíduo, assim como a obtenção de um

material alternativo de construção que atenda às solicitações usuais de moradias urbanas e/ou rurais na forma de paredes maciças compactadas.

Em face disto, a presente pesquisa se reveste de especial importância porque envolve o estudo de materiais não convencionais e se propõe a acompanhar o processo tecnológico e a eficiência energética envolvida, assim como a buscar condições de minimizar a possível degradação ambiental quando aqueles materiais são produzidos a partir do aproveitamento de resíduos agroindustriais e da terra crua.

Dentro deste contexto, neste trabalho estudou-se as propriedades físico-mecânicas de misturas de solo-cimento-cinza de casca de arroz. Ao final desta caracterização, a mistura de solo-cimento-cinza que apresentou melhor qualificação para atender às solicitações usuais de parede de vedação, foi selecionada para a construção de uma edificação-protótipo, sendo então avaliados o desempenho físico, mecânico e térmico dessa mistura quando utilizada na construção de paredes monolíticas, bem como a durabilidade pelo envelhecimento acelerado (molhamento e secagem) e o custo do referido componente construtivo considerando as condições construtivas e regionais encontradas durante o desenvolvimento da pesquisa.

Para o embasamento do presente trabalho foi realizada intensa revisão bibliográfica sobre o assunto, procurando-se descrever o processo de estabilização e as principais propriedades do sistema solo-cimento compactado. Ainda no Capítulo 3 - Revisão Bibliográfica - foram abordadas as principais características físicas, mecânicas e térmicas do material solo-cimento e seu desempenho como material de construção. E, por último, foi realizado um apanhado sobre as recentes pesquisas com solo-cimento adicionado de cinzas vegetais residuais.

No Capítulo 4 - Material e Métodos - foram descritos os materiais, os equipamentos e a metodologia adotada para o desenvolvimento do trabalho, sendo elencadas seis etapas: 1º Etapa - preparação e caracterização dos materiais, 2º Etapa - estudo de dosagem das misturas de solo-cimento-cinza de casca de arroz, 3º Etapa - ensaios físico-mecânicos para a caracterização das misturas de solo-cimento-cinza de casca de arroz selecionadas na etapa do estudo de dosagem, 4º Etapa - análise estatística, 5º Etapa - descrição das etapas da construção de edificação-protótipo com o sistema de paredes monolíticas de solo-cimento-cinza de casca de arroz e 6º Etapa - ensaios para avaliação do desempenho das paredes monolíticas de solo-cimento-cinza de casca de arroz da edificação-protótipo.

No Capítulo 5 – Resultados e Discussão – foram apresentados os resultados obtidos durante a pesquisa e a análise estatística aplicada aos mesmos, de forma a caracterizar as diferentes misturas de solo-cimento-cinza pelos parâmetros de resistência à compressão simples, de durabilidade (ciclos de molhamento e secagem), de absorção de água e de velocidade de propagação da onda ultra-sônica; e verificar o enquadramento destas misturas dentro das especificações das normas para materiais de construção semelhantes (solo-cimento). Posteriormente, foi registrado o desempenho do processo construtivo da edificação-protótipo e apresentado o desempenho do material solo-cimento-cinza como parede monolítica, sendo avaliados os requisitos módulo de ruptura, módulo de elasticidade, calor específico, condutibilidade térmica, transmitância térmica, capacidade térmica, atraso térmico e permeabilidade à água.

No Capítulo 6 – Conclusões – foram enumeradas algumas conclusões baseadas nos resultados discutidos ao longo das avaliações física, mecânica e térmica do material solo-cimento-cinza; e feitas sugestões tanto para aplicação destes resultados como para realização de trabalhos futuros.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Estudar as características de diferentes misturas de solo-cimento-cinza de casca de arroz priorizando a máxima incorporação de cinza residual aliado ao mínimo consumo do estabilizante cimento para obtenção de um material que atenda às solicitações usuais de paredes de vedação, bem como submeter o material solo-cimento-cinza de casca de arroz a avaliações de desempenho na construção de paredes monolíticas para habitações, quer sejam urbanas ou rurais.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Adicionar ao solo diferentes doses de cinza de casca de arroz, como carga mineral, possibilitando a redução do volume de solo empregado e oferecendo destinação final e adequada às cinzas residuais (cinza sem atividade pozolânica).
- Estabilizar as diversas misturas de solo-cinza de casca de arroz com diferentes teores de cimento visando à obtenção de materiais mais estáveis, resistentes e duráveis.
- Verificar a influência do tipo e teor de cinza de casca de arroz e do teor de cimento sobre as propriedades das misturas de solo-cimento-casca de arroz.
- Definir e recomendar, para fins de construção de paredes monolíticas, o tratamento solo-cimento-cinza de casca de arroz mais adequado em termos de dose empregada, resistência a esforços mecânicos, estabilidade, durabilidade e absorção de água.
- Construir uma edificação-protótipo utilizando o sistema construtivo de paredes monolíticas com o material solo-cimento-cinza de casca de arroz e avaliar o desempenho dessas vedações a partir das exigências mínimas de habitabilidade e uso, sendo utilizado os seguintes parâmetros de avaliação de desempenho: resistência aos esforços mecânicos, deformabilidade, durabilidade, permeabilidade; desempenho térmico e custo-benefício do componente construtivo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. SOLO

Segundo a literatura, o solo pode ser definido como sendo um conjunto de partículas sólidas provenientes da desagregação de rochas por ações físicas e químicas, com água e ar em seus espaços intermediários. Estas partículas sólidas apresentam diferentes tamanhos, formas e composições químicas, fatos esses importantes na determinação das propriedades do solo.

Vários pesquisadores, tais como Terzaghi e Peck (1962), Caputo (1980), Vargas (1981), Abiko (1980), Houben e Guillaud (1994), Barbosa e Tolêdo Filho (1997); descreveram as propriedades do solo, sendo a composição mineralógica, a composição granulométrica e a estrutura morfológica, características essenciais para o estudo e aplicação do solo como material de construção. Com base nestes autores, as partículas do solo são assim classificadas:

- Pedregulho (\varnothing 4,80 mm a 50 mm) e areia (\varnothing 0,05 mm a 4,80 mm): são sólidos de quartzo (SiO_2 cristalina) de formas arredondadas ou angulares e com rugosidade superficial, que mobilizam o atrito interno entre os grãos e, conseqüentemente, propiciam maiores resistências aos esforços mecânicos.
- Silte (\varnothing 0,005 mm a 0,05 mm): são sólidos de forma achatada ou poliédrica que apresentam pouca ou nenhuma plasticidade e propiciam a diminuição do atrito interno devido ao rearranjo das partículas ao sofrer compactação.
- Argila (\varnothing inferior a 0,005 mm): são partículas lamelares ou alongadas, quimicamente ativas e denominadas de argilominerais. Apresenta grande superfície específica, alto grau de plasticidade e pode ser constituída por três frações principais: caulinita, ilita e montmorilonita. Estes componentes são os que podem reagir bem ou não com os estabilizantes químicos incorporados ao solo, devido à sua Capacidade de Troca Catiônica¹. Entende-se que a caulinita é menos susceptível a variações de volume por absorção de água e possui menor capacidade de troca catiônica que as ilitas; por sua vez, as montmorilonitas são mais instáveis em virtude de sua fácil expansão pela água, a qual molda uma estrutura porosa que facilita a troca catiônica.

Contudo, o tipo e a quantidade de cátions trocáveis pelos argilominerais explica o fato que leva solos com partículas da mesma forma e estrutura semelhantes a apresentarem comportamentos mecânicos diferentes.

Outro ponto importante para caracterizar o solo é quanto à sua plasticidade, ou seja, a propriedade do solo que consiste na sua maior ou menor capacidade de ser moldado sob certas condições de umidade. Para tanto, existem os limites de consistência do solo (limites de Atterberg), definindo o limite de contração (LC) como sendo o teor de umidade abaixo do qual o solo passa da condição “semi-sólida” para a condição “sólida”; o limite de plasticidade (LP) como sendo o teor de umidade abaixo do qual o solo torna-se quebradiço, ou seja, adquire uma condição “semi-plástica”; o limite de liquidez (LL) como sendo o teor de umidade que corresponde à transição entre a condição de consistência fluida (teor de umidade acima do LL) e a de consistência plástica (teor de umidade abaixo do LL e acima do LP) e o índice de plasticidade (IP) como sendo o teor de umidade dentro da qual o solo possui plasticidade, sendo calculado pela diferença numérica entre LL e LP.

A compactação do solo, outra propriedade relevante, é o processo de aplicação sobre este de cargas dinâmicas com a finalidade de reduzir seu volume de vazios, a fim de se conseguir maior resistência (VARGAS, 1981). Segundo os princípios da Mecânica dos Solos, a densidade do solo compactado é função do teor de umidade no momento da compactação, ou seja, o teor de umidade ótima promove uma lubrificação das partículas, facilitando, quando se imprime uma energia de compactação, o preenchimento de todos os vazios possíveis. Assim, o solo compactado reduz sua permeabilidade, compressibilidade e capacidade de absorção de água, tornando-se mais estável. Portanto é imprescindível conhecer a umidade ótima do solo numa determinada energia de compactação aplicada para obter sua massa específica aparente seca máxima.

¹ Define-se Capacidade de Troca Catiônica (miliequivalentes/100g) como a capacidade dos argilominerais, devido às cargas negativas de íons adsorvidos em sua superfície, de atrair e trocar cátions com o meio aquoso, influenciando nas propriedades físico-químicas do material.

3.2. CIMENTO PORTLAND

O cimento Portland é uma substância alcalina, composta, em sua maior parte, de silicatos e aluminatos de cálcio que, por hidrólise, dão origem a compostos cristalinos hidratados e gel. Os principais compostos, silicatos e aluminatos, liberam hidróxido de cálcio durante a reação com a água. Os cristais que se formam apresentam formas alongadas, prismáticas, ou formas de agulhas de monossilicatos de cálcio hidratados e de aluminatos hidratados; esses cristais aciculares acabam se entrelaçando à medida que avança o processo de hidratação, criando a estrutura que vai assegurar a resistência típica das pastas, argamassas e concretos. O gel do cimento desenvolve-se espontaneamente sobre a superfície mineral, ligando-se aos oxigênios expostos, crescendo por polimerização dos grupos SiO_4 e incorporando íons de cálcio livre à superestrutura formada pelos grupamentos de SiO_4 (TAYLOR, 1992).

De forma sucinta, o processo tecnológico de obtenção do aglomerante hidráulico cimento se dá através da mistura da rocha calcária (britada e moída) com a argila (moída) em proporções adequadas. Essa mistura atravessa um forno giratório, cuja temperatura interna chega a alcançar $1450\text{ }^\circ\text{C}$. Esse calor transforma a mistura em um novo material denominado clínquer, que se apresenta sob forma de pelotas. Na saída do forno, é bruscamente resfriado e finalmente moído, sendo transformado em pó.

As adições são outras matérias-primas misturadas ao clínquer, na fase de moagem, para obtenção dos diversos tipos de cimento disponíveis no mercado. São elas o gesso, as escórias de alto-forno, materiais pozolânicos e materiais carbonáticos. O gesso tem como função básica regular o tempo de pega e endurecimento do cimento. As escórias de alto-forno, que até pouco tempo eram consideradas um material sem maior utilidade, têm propriedades aglomerantes semelhantes ao clínquer, o que melhora a durabilidade e resistência final do cimento.

No Brasil, são produzidos cinco tipos de cimento Portland, que possuem a seguinte nomenclatura:

CP I – Cimento Portland Comum

CP I-S - Cimento Portland Comum com adição

CP II – E – Cimento Portland Composto com Escória

CP II – Z – Cimento Portland Composto com Pozolana
CP II – F – Cimento Portland Composto com Filer
CP III – Cimento Portland de Alto Forno
CP IV - Cimento Portland Pozolânico
CP V – ARI - Cimento Portland de Alta Resistência Inicial.

Além desses tipos, existe o cimento branco, o cimento resistente a sulfatos (RS) e o cimento de baixo calor de hidratação.

O conhecimento dos produtos formados pela hidratação do cimento, bem como os diversos fatores que constituem essa reação, é de grande importância para o uso prático do cimento Portland. De fato, por se tratar de um componente do sistema solo-cimento, é preciso compreender algumas características tecnológicas desse material. As propriedades dos componentes principais do cimento em hidratação são as seguintes:

- silicato tricálcico (C_3S)- maior responsável pela resistência mecânica em todas as idades após fabricação, especialmente até o 1º mês de cura (presença de 42% a 60%);
- silicato bicálcico (C_2S)- responsável pela resistência mecânica em idades mais avançadas e, conseqüentemente, da durabilidade do material (presença de 14% a 35%);
- aluminato tricálcico (C_3A)- contribui para a resistência inicial. Libera uma grande quantidade de calor de hidratação. Por apresentar uma grande rapidez de pega é regularizado pela adição de gesso (presença de 6% a 13%);
- ferroaluminato tetracálcico (C_4AF)- não contribui para a resistência mecânica. Apresenta boa resistência ao ataque de sulfatos (presença de 5% a 10%).

Tais silicatos apresentam uma velocidade de reação muito variável com a água. Para que 80% de cada um possa se hidratar deve-se esperar intervalos de tempos da ordem de: 6 dias (C_3A), 10 dias (C_3S), 50 dias (C_4AF) e 100 dias (C_2S). O aumento gradual da resistência pode se estender por vários anos.

A compreensão dos tipos de cimento e de suas propriedades, aliada ao correto entendimento das variáveis que constituem os solos, significa ampliar as possibilidades de desenvolvimento do solo-cimento-cinza de casca de arroz na busca de um material de melhor desempenho mecânico frente às solicitações de serviço.

3.3. CINZA DE CASCA DE ARROZ

A utilização de resíduos de diferentes processos industriais vem apresentando um grande potencial de aproveitamento na área da construção civil e rural, requerendo uma avaliação não só nos aspectos econômicos como nos aspectos tecnológicos (resistência mecânica, módulo de elasticidade, estabilidade química e geométrica, durabilidade). Cincotto (1989) destacou os seguintes fatores para o uso de resíduos na obtenção de novos materiais de construção civil: necessidade de redução do custo da construção, elevada quantidade de matéria-prima que é consumida, preocupação com o esgotamento dessas reservas e custos relacionados com o processamento e transporte dos resíduos.

Dentre os resíduos agroindustriais, as cinzas vegetais ocupam lugar de destaque, pois apresentam composição físico-química com potencial para produção de material aglomerante e quantidade disponível suficiente para justificar o desenvolvimento de sistema de manuseio, processamento e transporte deste resíduo (FERREIRA et al., 1997).

As cinzas vegetais que contenham elevado teor de sílica, como a cinza de casca de arroz, podem, eventualmente, ser utilizadas na estabilização de solos e aterros sanitários; na fabricação de vidros, de isolantes térmicos, de tijolos prensados e de materiais refratários; na forma de adições minerais em argamassas e concretos; bem como na produção de cimento pozolânico² dependendo das condições em que as cinzas foram obtidas.

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. Através de análises de microscopia eletrônica e difração de raios X, Jauberthie et al. (2000) observaram que a sílica presente na casca de arroz ocorre na forma cristalina e amorfa. Segundo os autores, a sílica amorfa apresenta estrutura alveolar e encontra-se concentrada na superfície externa da casca. Já a sílica cristalina na casca é provavelmente decorrente da contaminação do solo por areias.

² Pozolanas ou materiais pozolânicos são materiais silicosos ou sílico-aluminosos que, por si só, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, porém quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades cimentíceas (FREIRE, 1997).

A cinza de casca de arroz é o resíduo proveniente da queima da casca de arroz em fornalhas, a céu aberto ou em fornos especiais à temperatura controlada. Sendo a cinza de casca de arroz um sub-produto das indústrias beneficiadoras de arroz, ressalta-se a grande disponibilidade mundial desse resíduo.

Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2007), o Brasil produziu cerca de 10,3 milhões de toneladas de arroz em casca no ano de 2006, contra uma produção mundial de 520 milhões de toneladas. Considerando-se que a cinza de casca de arroz representa cerca de 4% do peso do arroz em casca, a atividade agroindustrial de beneficiamento de arroz, somente no Brasil, tende a gerar anualmente aproximadamente 412 mil toneladas de cinzas. Esse valor é de grande relevância e acarreta problemas de disposição final desse resíduo além de problemas relacionados com ambiente.

Pouey (2006), Della et al. (2001) e Prudêncio Jr. et al. (2003) afirmaram que as empresas beneficiadoras de arroz são as principais consumidoras da casca de arroz. Durante o processo de beneficiamento do arroz tem-se como resíduo a casca de arroz, que devido ao seu alto poder calorífico aproximadamente de 16.720 kJ/kg e custo praticamente nulo, vem cada vez mais substituindo a lenha empregada na geração de calor e de vapor necessários para os processos de secagem e parboilização dos grãos. Como se trata, geralmente, de empresas de pequeno porte, a maioria não apresenta controle tecnológico no processo da queima das cascas, gerando cinzas de casca de arroz denominadas cinzas residuais, ou ainda não possuem processos para aproveitamento e descarte adequados das cinzas produzidas, que são geralmente depositadas em terrenos baldios ou lançadas em cursos de água, ocasionando poluição e contaminação de mananciais.

Portanto, ao se aproveitar a cinza de casca de arroz em algum processo tecnológico estar-se-á contribuindo para a despoluição do meio ambiente, acarretando benefícios técnicos, econômicos, energéticos e ecológicos.

A cinza de casca de arroz é um material leve, volumoso e altamente poroso (**Figura 1**). Quanto à sua composição química, apresenta alto teor de sílica e, independentemente das condições de calcinação ao qual foi submetida a casca, não há diferença significativa entre os resultados analíticos obtidos em cinzas de diferentes procedências. A **Tabela 1** mostra esse comportamento entre as cinzas de casca de arroz pesquisadas por diversos autores.

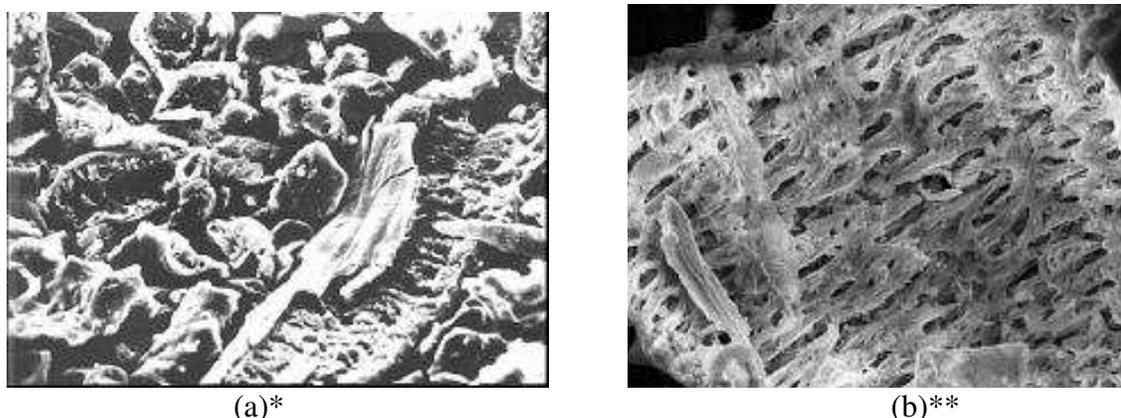


Figura 1. Imagem retroespalhada da cinza de casca de arroz obtida pela microscopia eletrônica de varredura: (a) 100 μm , (b) 20 μm .
 Fonte: * Hasparyk et al. (2003) e ** Pouey (2006).

Tabela 1. Composição química de cinzas de casca de arroz, % em massa, base seca.

Constituintes da cinza	Autores			
	Guedert et al. (1989)	Cincotto (1989)	Da Fonseca (1993)	Stroeven et al. (1999)
Sílica	93,11	94,7	91,24	96,7
Al ₂ O ₃	0,92	0,09	1,46	0,08
Fe ₂ O ₃	0,40	1,46	0,96	0,03
CaO	0,52	0,99	0,69	0,30
MgO	0,85	0,95	0,50	0,16
Na ₂ O	0,12	0,04	0,20	-
K ₂ O	1,12	1,75	2,23	0,73
SO ₃	-	0,21	0,05	-

As cinzas obtidas durante a combustão da casca de arroz apresentam formas estruturais variáveis (amorfa e/ou cristalina), dependendo do tipo de queima (grelha, leito fluidizado), tempo e temperatura de calcinação. O efeito das condições de combustão interfere diretamente nas seguintes propriedades das cinzas de casca de arroz: massa específica, superfície específica, cor e estrutura morfológica.

Segundo Metha (1977) e Nakata citado por Della et al. (2001), cinzas oriundas de cascas queimadas entre 400 °C e 500 °C possuem área superficial entre 120 m²/g a 150 m²/g, quando queimadas a 600 °C possuem área superficial em torno de 80 m²/g, as temperaturas de

queima oscilando em torno de 800 °C resultam em cinzas com área superficial entre 5 m²/g a 10 m²/g, e acima de 900 °C, o valor da área superficial encontra-se abaixo de 5 m²/g. A tendência ao decréscimo da área superficial com o aumento da temperatura está relacionada com o fato da superfície das partículas sofrerem fusão e agregarem-se umas às outras. Quanto à massa específica, esta propriedade varia entre 1,30 g/cm³ a 2,20 g/cm³.

Conforme Krishnarao et al. (2001) e Dafico e Prudêncio Jr. (2002), a cinza de casca de arroz, em geral, resulta em cor que varia do cinza ao preto devido à presença de impurezas inorgânicas junto ao carbono fixo não queimado, ou ainda branco e/ou rosado, o que indica combustão em elevadas temperaturas e longo tempo de exposição.

A estrutura morfológica da sílica presente nas cinzas de casca de arroz afeta diretamente a atividade pozolânica da mesma. Pesquisas indicam que a queima da casca de arroz sob temperaturas elevadas (acima de 850 °C) destrói a estrutura alveolar da sílica amorfa presente na casca de arroz, resultando no aparecimento de formas cristalinas de sílica (quartzo, cristobalita e tridimita), sendo estas relativamente inativas, pois apresentam baixa solubilidade em água e nenhuma capacidade aglomerante. Já as temperaturas inferiores a 400 °C resultam em cinzas com elevado teor de carbono de efeitos comprovadamente adversos sobre suas características pozolânicas, pois o carbono, além de não participar das reações de hidratação, sua presença significa menor teor de pozolana disponível para reação. Dados da literatura indicam que teores de até 12% de carbono nas cinzas não causam prejuízos.

Quando a calcinação da casca de arroz é realizada a temperaturas controladas (400 °C a 850 °C), há a remoção da matéria orgânica e a preservação da sílica no estado amorfo, resultando em cinzas de maior solubilidade em meio aquoso e com capacidade aglomerante. Dessa forma, para a permanência da sílica altamente reativa, é recomendada a queima da casca de arroz a temperaturas entre 450 °C a 700 °C, durante 3 a 4 horas (FREIRE,1991).

Grande parte dos trabalhos direciona-se para a utilização da cinza de casca de arroz como material pozolânico para obtenção de aglomerantes alternativos. Tais trabalhos utilizam-se de cinzas oriundas de queima em condições controladas e de processo de moagem para obtenção de partículas com diâmetro médio abaixo de 15 µm ou com alta área específica. Freire (1991) afirma que, de um modo geral, a cinza de casca de arroz misturada com cal resulta em um cimento estruturalmente tão bom quanto o cimento Portland, salvo que esta mistura apresenta baixa resistência inicial, uma vez que qualquer ganho de resistência deverá

ser obtido da reação pozolânica entre a cinza e a cal hidratada. Já quando misturadas com o cimento Portland, a cinza resulta num material cimentante que, por sua vez, permite a obtenção de argamassas e concretos de alta resistência.

Em contrapartida, algumas pesquisas revelaram que as cinzas de casca de arroz obtidas através da calcinação sem o controle efetivo do tempo e da temperatura apresentaram desempenho satisfatório, tanto quanto as cinzas queimadas com temperaturas controladas. Estes fatos foram observados em pesquisas de Isaia (1995) e Santos (1997), onde os concretos e argamassas elaborados com cimento pozolânico à base de cinza de casca de arroz (obtida sem controle de temperatura e com presença de cristais de sílica) mostraram bons resultados quando submetidos a ensaios de qualidade. Os referidos autores explicaram que este notável desempenho mecânico ocorreu devido ao efeito “filler” (preenchimento de vazios) gerado pela presença da sílica de elevada área específica e do carbono não combusto, que é um material extremamente fino; ambos constituintes das cinzas de casca de arroz estudadas.

Diante disso, vale salientar que as adições de materiais pozolânicos em argamassas e concretos podem atuar fisicamente, preenchendo os vazios da zona interfacial entre as partículas de agregados e a matriz de cimento e, conseqüentemente, reduzindo a porosidade e o teor de hidróxido de cálcio (CH). Isso se deve ao fato de, na zona de interface, ocorrer uma grande formação de CH, que é o material mais frágil dos produtos de hidratação do cimento (WADA et al., 2000).

Por essas razões, justifica-se o interesse do estudo dos efeitos da adição da cinza de casca de arroz no solo-cimento para a produção de elementos construtivos; por outro lado, a substituição pelo menos parcial do solo por cinzas de casca de arroz pode resultar em um produto final ecologicamente correto, de boas propriedades físico-mecânicas e também a um custo menor, alternativa viável e desejável em países deficientes em termos habitacionais.

3.4. ESTABILIZAÇÃO DO SOLO

Dados relatados em inúmeras pesquisas afirmam que o solo, utilizado como material de construção, apresenta várias vantagens, tais como: resistência ao fogo, disponibilidade de material, boas características termo-acústicas e facilidade de trabalho, não exigindo equipamentos especiais ou mão-de-obra especializada. Obviamente, como todo material, possui suas desvantagens, como sensibilidade à água e altas taxas de contração e expansão, o que leva ao aparecimento de fissuras, além de apresentar baixa resistência à abrasão.

Entretanto, tais desvantagens são contornadas pela utilização de agentes estabilizadores de solo, como aditivos químicos, fibras vegetais, adições minerais e outros. Abiko (1983) relatou que, desde eras remotas, o homem utilizou diversas técnicas para conferir melhor comportamento ao solo, tornando-o mais resistente ao intemperismo. Citou o emprego de cal, asfalto, palha e outras fibras vegetais, urina, excremento de gado, melão, gordura de baleia e resinas diversas.

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. As principais modificações mecânicas ocorridas no processo de estabilização do solo são: mudança na densidade, na resistência mecânica, na compressibilidade, na permeabilidade e na porosidade do solo (BARBOSA e TOLÊDO FILHO, 1997).

Os principais métodos de estabilização do solo, segundo Fang (1991), são:

- Estabilização granular – combinação dos métodos de estabilização física e química, na qual a capacidade de carga do esqueleto do solo é modificada pelo enchimento dos vazios com cimentos naturais ou outros materiais (como argila e outros concretos e argamassas).
- Estabilização química – termo geral utilizado para designar todos os métodos nos quais tanto as interações químicas quanto as físico-químicas e físicas podem ocorrer no processo de estabilização. Este método inclui, também, aqueles nos quais um ou mais compostos são adicionados ao solo com o objetivo de estabilizá-lo.
- Estabilização térmica – método físico de estabilização que utiliza aquecimento (geralmente acima de 300 °C) ou resfriamento, por longos ou curtos períodos de tempo, para a melhoria das propriedades do solo com o qual se está trabalhando.

Conforme relatos de Guimarães (1997), a escolha do processo de estabilização do solo depende de uma série de fatores como viabilidade econômica, finalidade do produto final, características dos materiais empregados e propriedades do solo que se deseja modificar.

3.4.1. ESTABILIZAÇÃO DO SOLO COM CIMENTO PORTLAND

A utilização do cimento como agente estabilizador de solos teve início nos E.U.A. em 1916 e, no Brasil, a partir de 1936 pela ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. No princípio sua aplicação se restringiu à pavimentação rodoviária e aeroportuária, mas hoje é cotado como um material não convencional de grande uso nas construções civis e rurais de baixo custo.

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-lhe resistência inicial; paralelamente, ocorrem reações iônicas que provocam a troca de cátions das estruturas argilo-minerais do solo com os íons de cálcio provenientes da hidratação do cimento adicionado (ABIKO, 1980). Nota-se que a estabilização do solo com cimento ocorre de forma distinta: uma, quando o solo é predominantemente fino e outra; quando é granular.

Nos solos finos, os mecanismos de estabilização levam ao surgimento de matrizes hexagonais, geradas pelas ligações químicas entre as partículas do solo e os grãos de cimento. A matriz envolve fortemente as partículas conglomeradas e impede o deslizamento de umas sobre as outras, gerando resistência ao cisalhamento. Ao mesmo tempo, o conjunto torna-se mais granular, a adesividade é reduzida e a sensibilidade à variação de umidade e a variação volumétrica se tornam menores. Porém, a resistência à compressão é função direta dos elos cimentados, posto que as partículas finas do interior do solo pouco ou nada contribuem para isso (PITTA, 1980). Os solos granulares se estabilizam pela cimentação nos pontos de contato entre os agregados que os compõem (areia e pedregulho). Além da formação da estrutura cimentada, há uma maior resistência à compressão devido às fortes ligações mecânicas que se estabelecem na interface do gel com as partículas do solo.

Além destas modificações iniciais, Abiko (1980) afirmou que, ao longo do tempo, podem ocorrer reações pozolânicas no sistema solo-cimento, visto que a cal livre, em presença

da água e em contato com o silício e o alumínio dos minerais do solo, forma compostos cimentantes que contribuem para o melhoramento de propriedades do material (resistência, durabilidade, estabilidade de volume).

Barbosa e Tolêdo Filho (1997) apontaram que as reações químicas 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. Já a argila do tipo montmorilonita enfraquece a resistência do cimento devido à alta absorção dos íons de cálcio pela ligação interfoliar frágil existente nesta argila. Portanto, de uma forma geral, a ação do cimento traz bons resultados em solos arenosos.

A compreensão da estabilização de solos adicionados de cimento se torna relevante para a condução de pesquisas envolvendo adições complementares ao sistema solo-cimento, como por exemplo, a cinza de casca de arroz.

3.4.2. FATORES QUE INFLUENCIAM A ESTABILIZAÇÃO DO SOLO-CIMENTO COMPACTADO

Segundo a literatura, solo-cimento compactado é o produto endurecido resultante da cura úmida de uma mistura íntima e compactada de solo, cimento Portland e água, em proporções previamente determinadas. As alterações nos sistemas solo-cimento compactados são o aumento do limite de plasticidade, a diminuição do limite de liquidez e o achatamento das curvas de compactação, acarretando em aumento do teor ótimo de umidade e diminuição da massa específica aparente seca máxima.

Os fatores que influenciam a estabilização do solo-cimento compactado são: o tipo de solo (granulometria, fração argila, grau de plasticidade), o tipo e teor do agente estabilizante, e as condições de compactação e cura. Delgado e Guerrero (2007) realizaram uma coletânea sobre as recomendações acerca da seleção do solo para utilização como elemento construtivo solo compactado. Os autores verificaram que, independente da procedência das diretrizes técnicas, as mesmas recomendam à avaliação do solo sob os aspectos de distribuição granulométrica, índice de plasticidade e umidade ótima de compactação para obter um produto final com bom desempenho físico-mecânico e durabilidade.

Os solos com índices de plasticidade e limites de liquidez elevados são mais difíceis de serem estabilizados. Segundo relatos de Pitta (1980), solos muito plásticos podem requerer teores tão altos quanto 15% ou 20% de cimento, em massa. Este fato também foi observado por Milani (2005) durante pesquisas sobre a estabilização de um solo argiloso (A₇₋₅), sendo necessária a adição de 18% de cimento, em massa, para que a mistura de solo-cimento atingisse resistência mínima para fins de utilização como tijolos prensados. Contudo, quando o solo-cimento 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.

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 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 são observados 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 preencherem os vazios, agem de forma integral na ligação entre os grãos. Quando a granulometria do solo não é adequada, pode-se corrigi-la granulometricamente 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 conferindo-lhes coesão para moldagem de tijolos prensados.

O teor ótimo de cimento a ser adicionado ao solo depende dos critérios técnicos (resistência, durabilidade) e econômicos que se pretende alcançar. Em geral, a resistência do solo-cimento cresce com o aumento do teor de cimento, dependendo do tipo de solo empregado; porém há uma tendência deste crescimento ser pequeno além de certo teor do aditivo. Este fenômeno pode ser explicado, segundo Grande (2003), a partir das variações

decorrentes das alterações físico-químicas produzidas pela interação entre as partículas de argila e as do cimento em hidratação.

Abiko (1985), ao analisar sistemas de solo-cimento para componentes de alvenaria, indicou, para solos arenosos, os traços de 1:10, 1:12 e 1:14 (proporção em volume, de cimento para solo seco). Freire (1981) concluiu que a adição de 4% e 6% de cimento Portland, em massa, ao solo areno-argiloso A₆₋₄ estudado, reduziu o teor da fração argila e aumentou o teor da fração silte, aumentando também sua capacidade de suporte e sua resistência à compressão simples, assim como sua resistência ao cisalhamento.

As propriedades físico-mecânicas (resistência à compressão, absorção d'água e durabilidade) do sistema solo-cimento compactado 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 umidades ótimas acarretam a máxima densidade do sistema e, conseqüentemente, maior 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).

Considerando os ensaios de durabilidade e de resistência à compressão, Felt, citado por Freitas (1996), concluiu que, para a máxima eficácia das misturas de solo-cimento empregando solos arenosos, estas devem ser preparadas e compactadas sob o teor de umidade ótima ou ligeiramente abaixo desta. E ainda, misturas de solo-cimento a partir de solos argilosos e siltosos, devem ser compactadas com teores de umidade entre 1% a 2% acima da umidade ótima.

A fim de determinar a influência do teor de umidade das misturas de solo-cimento na resistência final de blocos de solo-cimento compactado, Mellace et al. (2002) investigaram dois tipos de solo, um solo caracterizado como argiloso e outro caracterizado como siltoso, ambos com baixa plasticidade. Estes solos foram estabilizados com cimento Portland na proporção, em volume, de 1:10 (cimento : solo) e utilizados para a fabricação de blocos (5x5x14 cm³) prensados com dois teores de umidade de moldagem (16% e 22%). Após cura, em câmara úmida, durante 28 dias, os blocos foram submetidos a ensaios mecânicos e os referidos autores verificaram que os valores de resistências à compressão simples e à tração na compressão diametral (**Tabela 2**) foram influenciados pelo tipo de solo e pela relação água/solo-cimento empregada para a compactação do mesmo, visto que a utilização de

umidade de moldagem próxima ao teor de umidade ótima da mistura levou aos maiores valores de resistência mecânica.

Tabela 2. Resultados dos ensaios de misturas de solo-cimento (MPa).

Tipo de solo	Teor de umidade	Resistência à compressão simples	Resistência à tração na compressão diametral
Argiloso (Teor de umidade ótimo = 21%)	16%	4,94	0,19
	22%	5,76	0,22
Siltoso (Teor de umidade ótimo = 22%)	16%	2,82	0,43
	22%	3,11	0,49

Fonte: Mellace et al. (2002).

O processo de compactação é outro fator importante no desempenho físico-mecânico do sistema solo-cimento compactado, podendo ser realizada de forma estática, através de prensas manuais ou mecânicas, ou de forma dinâmica, por meio de soquetes manuais ou pneumáticos, ou por amassamento. Bahar et al. (2004), através da aplicação do ensaio de compressão simples em corpos-de-prova de solo estabilizado com diferentes teores de cimento e tipos de compactação (**Figura 2**), afirmaram que a estabilização mecânica do sistema solo-cimento por meio de compactação dinâmica apresentou melhores resultados quando comparados com a compactação estática e vibro-estática.

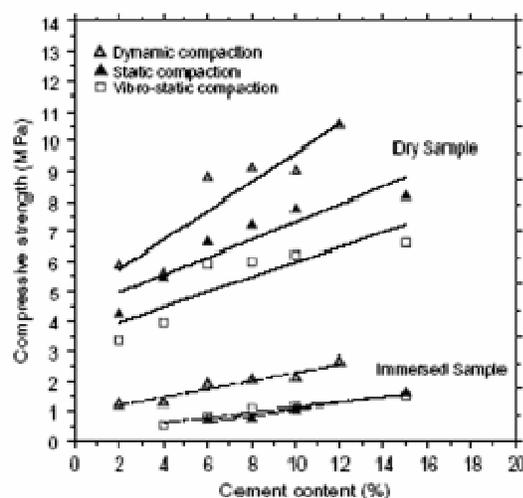


Figura 2. Resistência à compressão simples de corpos-de-prova de solo estabilizados com diferentes teores de cimento e processo de compactação.

Fonte: Bahar et al. (2004).

3.5. SOLO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO

O solo ou terra crua foi um dos primeiros materiais de construção empregados pelo homem. Data-se que há cerca de dez mil anos foram construídas as primeiras edificações para o homem abrigar-se das intempéries com a utilização de terra, pedras, madeiras e palhas. As construções eram feitas completa ou parcialmente de terra, dependendo fundamentalmente da sua localização, do clima, dos recursos disponíveis, do custo e do uso das mesmas (BARBOSA e TOLÊDO FILHO, 1997).

O desenvolvimento científico do uso do solo em habitações ocorreu, segundo Cunha, citado por Grande (2003), a partir de 1806, quando S. W. Johnson escreveu um tratado sobre a construção com terra compactada para construções rurais. Posteriormente, na Inglaterra, no período pós-guerra, a construção com solo compactado foi amplamente divulgada como alternativa frente à escassez dos recursos energéticos. Desde então, diversos órgãos de pesquisa defendem a o uso da terra como material de construção de habitações.

No Brasil, sabe-se que as técnicas construtivas que utilizam terra crua foram trazidas pelos primeiros colonizadores portugueses e escravos africanos. Entretanto, os primeiros artigos sobre o assunto foram publicados somente em meados do século XX. Como exemplo de inúmeros métodos e técnicas construtivas com o solo compactado tem-se:

- Adobe: é uma das muitas técnicas de construção com terra conhecidas pelo homem desde a antiguidade. O solo, com alta plasticidade e na condição úmida (barro), é compactado manualmente no interior do molde. Após secagem ao sol, são empregados como elementos construtivos (blocos ou tijolos).
- Pau-a-pique ou taipa de mão: estrutura portante feita em bambu ou madeira, sendo preenchida manualmente com terra argilosa úmida.
- Parede monolítica, terra apiloada, taipa de pilão: solo compactado na umidade ótima, no próprio local, em camadas sucessivas, verticalmente, com o auxílio de fôrmas e guias.
- Tijolos ou blocos prensados: o solo ou solo estabilizado é submetido a elevadas pressões promovidas por um dispositivo mecânico.

Com o advento dos materiais industrializados, por várias décadas a terra crua foi sendo esquecida ou mesmo rejeitada pelas classes sociais de maior poder aquisitivo, gerando dificuldades ao seu uso generalizado e como tecnologia apropriada.

Porém, problemas ambientais, como o processo de escassez dos recursos energéticos, e problemas sócio-econômicos, como a grande demanda de habitações e falta de materiais de construção tradicionais, levaram à imperiosa necessidade de novos estudos em busca de novas alternativas, especialmente aquelas voltadas para o aproveitamento racional dos recursos naturais locais. Assim, o uso do solo (ou solo estabilizado) como material de construção, foi resgatado, principalmente nos países em desenvolvimento (**Tabela 3**).

Tabela 3. Sistemas construtivos de vedação utilizados em diversos países latino-americanos.

Tipo	País	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Agentes estabilizadores	Dimensões dos moldes (cm)
Taipa	Bolívia	Sd	Sd	Sd	Pedra, areia grossa, 10% palha	60 x 120
	Equador	60	10	30	Tradicional	100 x 150
	Equador	60-70	20-25	10-15	Cimento (1 a 2%)	100 x 150
	Paraguai	50-80	-	20-30	Cimento, aditivos químicos	50 x 180
	Venezuela	65 - 75	-	25 - 35	Cal, palha	90 x 180
	Venezuela	45 - 90	-	20 - 40	Cimento, em volume, 1:15	90 x 180
Adobe	Argentina	60	27	11	Tradicional	11 x 25 x 40
	Bolívia	20	20	60	Tradicional	10 x 20 x 40
	El Salvador	43	-	43	Cimento ou cal	10 x 23 x 25
	Panamá	40	-	50	Tradicional	15 x 20 x 30
	Brasil	70	10	20	Tradicional ou com esterco	7 x 22 x 33
Parede monolítica	Peru	75	-	25	Palha (25% do peso do solo)	60 x 120
	Brasil	45 - 90	-	20	Cimento, em volume, 1:15	100 x 220
	Panamá	40	-	30	Cimento, em volume, 1:10	20 x 85
Tijolo ou bloco prensado	Bolívia	35	-	65	Cimento	10 x 14 x 24
	Brasil	70	-	20	Cimento ou cal	5 x 11 x 23
	El Salvador	60	-	40	Cimento	15 x 19 x 39

Fonte: Rios (2003), Neves (2003) e Figueiredo e Casbur (2006).

Segundo Krüger e Santos (2003), para o desenvolvimento de uma política habitacional consistente em países em desenvolvimento são necessários três elementos básicos: a introdução de tecnologias apropriadas enfatizando a combinação de elementos

construtivos e favorecendo a racionalização da construção; iniciativas que promovam a participação dos futuros moradores no projeto e na execução das moradias; e adequação da edificação às especificidades regionais onde se pretende construir (clima, uso de material local, aspectos socioculturais). Seguindo tais considerações, o uso do solo como material de construção destaca-se como uma relevante tecnologia apropriada para a construção de habitações de interesse social.

Para Teixeira (2006), o enfoque sustentável, a necessidade de preservação ambiental, a preocupação com desenvolvimento social e o desafio de transformação do uso do solo numa tarefa energeticamente eficiente e ambientalmente correta tendem a requalificar o solo como um poderoso agente de sustentabilidade; estes mesmos fatores não de demandar a necessidade de recomendações e diretrizes projetuais para as práticas (tecnologias e materiais) de uma construção sustentável, ressaltando-se a abordagem do solo como material ecológico.

3.5.1. SOLO-CIMENTO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO

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 passou a utilizar o solo-cimento como material alternativo de construção em potencial.

Relatórios técnicos como “Paredes Monolíticas de Solo-Cimento: Hospital Adriano Jorge”, produzido pela ABCP (1979); boletins técnicos como o “Estudo de caso: habitação experimental em solo-cimento”, produzido por Velloso (1981), o “Manual de Construção com Solo-Cimento”, produzido pelo CEPED (1984), o “O Solo-Cimento e suas Aplicações Rurais”, produzido pela ABCP (1989); e cartilhas como “O Solo-Cimento na Fabricação do Tijolo Modular”, produzida pela empresa SAHARA (1998), 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.

Barbosa e Mattone (2002) e Olotuah (2002) discorreram sobre o uso do solo-cimento como tecnologia apropriada, e verificaram o grande potencial desse material para ser explorado na minimização do problema da habitação em todo o mundo, sendo uma alternativa

não poluente e de baixo consumo energético. Destacaram ainda que o solo-cimento é um material resistente à ação da água e aos carregamentos de serviços, e quando utilizado como alvenarias de vedação apresentam um excelente conforto interno devido à sua porosidade que permite as trocas de vapor entre o interior e exterior da construção.

O solo-cimento como material de construção tem-se destacado na forma de tijolos prensados e seu processo de fabricação passa pelas fases de destorroamento, peneiramento e secagem do solo, mistura homogênea do solo com o cimento, adição de água em quantidades adequadas, lançamento e prensagem da mistura em prensas mecânicas ou manuais, desforma, e cura úmida, à sombra ou recobertos, devendo os tijolos ser regados duas a quatro vezes ao dia durante uma semana.

Em publicação da ABCP (1985), cita-se que os tijolos de solo-cimento apresentam as seguintes vantagens:

- podem ser produzidos com o próprio solo local, dependendo das características do mesmo, e no canteiro de obras;
- requerem argamassa de assentamento e de revestimento de espessura mínima e uniforme;
- podem dispensar o uso de revestimento, desde que protegidos da ação direta da água;
- consomem pouca energia, cerca de 0,1 MJ/kg, enquanto os tijolos cerâmicos, com queima em forno, consomem de 8 a 16 vezes mais;
- utilizam, basicamente, mão-de-obra não especializada.

Os solos mais adequados para a fabricação de tijolos de solo-cimento são, segundo a ABCP (1985), os que possuem as seguintes características:

- porcentagem passando na peneira ABNT 4,80 mm (nº 4): 100%;
- porcentagem passando na peneira ABNT 0,075 mm (nº 200): 10% a 50%;
- limite de liquidez: $\leq 45\%$;
- índice de plasticidade: $\leq 18\%$.

Outra relevante aplicação do solo-cimento como material de construção são as paredes monolíticas. Neves (1988) relatou as atividades realizadas pelo CEPED dentro do seu Programa de Tecnologia de Habitação – THABA, relacionadas com a determinação de parâmetros de resistência; durabilidade, impermeabilidade e condutibilidade térmica do sistema solo-cimento compactado; o desempenho do sistema construtivo; a transferência deste processo de construção; o consumo de energia, custos de produção; e as avaliações pós-

ocupação. Os resultados mostraram que o solo-cimento compactado oferece características adequadas para seu emprego na execução de paredes monolíticas.

Neves (1990) salientou que painéis maciços de solo-cimento apresentam resistência mecânica e propriedades térmicas equivalentes ou até melhores que as encontradas para alvenarias convencionais de blocos cerâmicos.

Myrrha (2003) descreveu a técnica construtiva de paredes monolíticas de solo-cimento. Segundo o autor, antes da execução das paredes, é necessário preparar: fôrmas de chapa de madeira (110 x 220 cm²) estruturadas com sarrafos; parafusos trespassantes para fixar as fôrmas no local de compactação; guias de madeira ou de concreto armado pré-moldado, medindo 7,5 x 12 cm² e com altura da parede desejada mais a parte que fica enterrada (50 cm); e soquete medindo 16 x 20 x 9 cm³ com peso entre 1,5 e 2,5 kg. Providenciados tais materiais, as guias devem ser colocadas em furos feitos nas fundações, sendo que as guias de madeira devem ser travadas com cunha ou terra socada para permitir a sua retirada; e as guias de concreto com uma argamassa de cimento para sua fixação. As fôrmas são fixadas de modo que “abraçam” duas guias de madeira ou as extremidades de dois painéis prontos. Já para as guias de concreto, as extremidades das formas “abraçam” duas guias fixas.

A seqüência de execução no sentido horizontal recomendada por Myrrha (2003) depende do tipo de guia a ser utilizada: se as guias forem de madeira os painéis são executados alternadamente, pois os já compactados servirão de guia para os intermediários; se as guias forem de concreto, elas são fixadas nas posições definitivas e a seqüência da execução é contínua. No sentido vertical, as formas apóiam-se no primeiro lance, sempre sobre as fundações e para cima, sempre no conjunto de fôrmas inferior. Assim que o primeiro conjunto de fôrmas estiver na posição, a mistura de solo-cimento, preparada de forma análoga à da mistura para confecção de tijolos, é lançada no seu interior, em camadas sucessivas de não mais de 20 cm de altura, que devem ser compactadas. Esse procedimento é repetido até o preenchimento completo da fôrma. Cada camada estará bem compactada quando o soquete não deixar mais marcas ao bater na sua superfície. Em seguida, é colocado o segundo conjunto de fôrmas, as quais, completados o seu preenchimento, a primeira é retirada e colocada sobre a outra, e assim sucessivamente, até atingir a altura desejada. Os conjuntos de fôrmas devem ser retirados imediatamente após o término do painel inteiriço. Quanto à cura das paredes

maciças, seguem-se os procedimentos utilizados para os tijolos de solo-cimento. As paredes devem ser molhadas pelo menos 3 vezes ao dia, durante 1 semana.

3.5.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DO SOLO-CIMENTO E SEU DESEMPENHO FÍSICO-MECÂNICO COMO COMPONENTE CONSTRUTIVO

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 4**) 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. Quanto às paredes e muros construídos com estes tijolos de solo-cimento, Nascimento (1992) observou uma relação direta entre as fissuras que surgiram nos muros e a argamassa de assentamento utilizada, sendo que a argamassa “fraca e descansada” (1:3:12) minimizou o efeito da fissuração em todos os painéis. Dentre os três tipos de solo utilizados, o que apresentou melhor desempenho frente à resistência à compressão, absorção de umidade e retração, foi o solo areno-argiloso.

Tabela 4. 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).

Assis (1995) descreveu a fabricação de blocos de solo-cimento chamados “tijolitos”, com detalhes especiais, de modo a permitir a eliminação de argamassa de assentamento pelo relacionamento dos mesmos, conseguido com encaixes tipo macho e fêmea. Os tijolitos são peças de 11 x 6 x 22 cm³ (massa específica aparente seca de 16,9 a 18,6 kN/m³) e de 11 x 10 x 22 cm³ (massa específica aparente seca de 17,5 a 19 kN/m³). Sua resistência à compressão simples é $\geq 1,7$ MPa; a absorção de água é $\leq 17\%$; a permeabilidade é de $0,5 \cdot 10^{-5}$ cm/s.

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 com a areia foram entre 100% solo: 0% areia e 15% solo : 85% areia (em volume) e as adições 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 7 primeiros dias. Com os resultados dos ensaios de compressão simples, durabilidade por ciclos de molhamento e secagem, e retração na secagem aplicados aos 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 5**) e 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 5. Quantidade de cimento recomendada (% em volume) para obter determinada resistência à compressão do bloco de solo-cimento (saturado).

Índice de Plasticidade do solo	Quantidade de cimento recomendada (% em volume) para obter a referida resistência à compressão do bloco de solo-cimento		
	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).

Barbosa e Mattone (1996) desenvolveram estudos visando o aproveitamento de solos locais para a fabricação de tijolos prensados. Para tanto, os autores utilizaram dois solos diferentes contendo, respectivamente, 44,0% e 31,6% de silte + argila, e um terceiro obtido pela mistura de dois outros solos (35% de silte + argila). Experimentando a adição aos solos de doses crescentes de cimento, da ordem de 2%, 4% e 6% em relação à massa do solo seco, os autores confeccionaram tijolos moldados com o auxílio de uma prensa manual e, no caso do solo-mistura, com uma prensa mecânica, e concluíram que tal medida permitiu a obtenção de tijolos de resistência muitíssimo superior àquela necessária para pequenas construções.

O trabalho de Timoteo de Souza et al. (1996) apresentou resultados da experimentação realizada em três painéis construídos com tijolos prensados de terra crua assentados com argamassa feita com o próprio material da fabricação do tijolo (**Tabela 6**). Foram realizados ensaios de compressão simples nos tijolos e em painéis com dimensões próximas de 1 m², e verificados os deslocamentos verticais ao longo das paredes por meio de leituras de extensômetros. Como conclusões, os referidos autores perceberam a viabilidade do uso do material terra crua na construção civil, sendo que os painéis confeccionados com tijolos de solo-cimento apresentaram melhor rigidez e resistência, e deformações transversais desprezíveis.

Tabela 6. Características mecânicas das paredes de tijolos de terra crua.

Composição (solos caracterizados como arenosos)	Resistência à compressão simples dos tijolos (MPa)	Carga de ruptura da parede (kN)
Solo João Pessoa natural	1,04*	127,47
Solo João Pessoa + 4% de cimento	1,65*	214,05
Solo de Sapê + 5% de cimento	2,32**	213,02

*tijolos paralelepípedos de 15 cm de largura.

** tijolos tipo macho-fêmea com 14 cm de largura.

Fonte: Timoteo de Sousa et al. (1996).

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 estabilizado com 6% de cimento, em volume, são mais indicados para utilização como tijolos estruturais, e tijolos estabilizado com 1% ou 2% de cimento, em volume, para utilização como material de vedação.

Ferreira (2003) estudou a resistência à compressão simples e a absorção d'água do material solo-cimento através da determinação experimental em corpos-de-prova cilíndricos, tijolos e mini-painéis (0,5 m²). O solo utilizado foi de características arenosas (A₂₋₄), sendo adicionado ao solo os teores de 6% e 10% de cimento Portland. Os resultados encontrados pelo autor para resistência à compressão simples e absorção de água de corpos-de-prova adicionados do teor de 10% de cimento foram em média, respectivamente, 2 MPa, aos 7 dias de idade, e 12%. O referido autor, com base nesses valores, recomendou solos com características semelhantes àquelas do solo arenoso estudado para estabilização com cimento, concluindo ser esse um material promissor para o atendimento às demandas por tecnologias apropriadas.

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 e absorção de água (**Tabela 7**).

Tabela 7. Resistência à compressão simples e 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 o efeito da retração volumétrica devido à secagem fosse minimizado. 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 (10 x 10 x 10 cm³) e lajotas (20 x 20 x 10 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 cerâmico maciço, e 85% menor do que o da casa de tijolo cerâmico furado.

Para comprovar a eficiência do material solo-cimento, Grande (2003) confeccionou paredes com dimensões de 1,20 x 2,40 x 0,10 m³, utilizando tijolos modulares de solo arenoso estabilizados com 14,3% de cimento, em massa, e argamassa de assentamento no traço, em massa, de 1:0,25:3 (cimento : PVA : solo). O autor realizou o ensaio de compressão simples de alvenarias estruturais, seguindo as especificações da norma NBR 8949. O referido autor pôde observar uma boa distribuição dos esforços nas paredes, fato que foi comprovado pela simetria das fissuras nas faces dos painéis, e pequenas deformações que caracterizaram a ruptura da parede como frágil. Quanto aos resultados do ensaio de compressão simples das paredes, os valores revelaram um bom comportamento estrutural, atingindo, em média, 305 kN para a carga de ruptura, 2,5 MPa para a tensão de ruptura e 6,2 GPa para o módulo de elasticidade.

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 (A₂₋₄ e 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 aos 28 dias. A **Tabela 8** 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 8. 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 do 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 que causaram a satisfação do proprietário.

Bahar et al. (2004) pesquisaram o efeito da estabilização do solo argiloso A₆ (proveniente da região do sul da Argélia) com cimento Portland nas características físico-mecânicas de corpos-de-prova moldados com energia normal de Proctor. Os autores verificaram que a resistência à compressão simples aumentou tanto mais quanto maior foi o teor de cimento incorporado às misturas (**Figura 3a**), sendo que os corpos-de-prova ensaiados aos 28 dias na condição seca obtiveram aumentos significativos conforme a elevação gradativa do teor de cimento. Já o ganho de resistência ao longo de 28 dias foi acentuado para solo estabilizado com teores de cimento acima de 12%, em massa (**Figura 3b**). Bahar et al. (2004)

ainda observaram que a capacidade de absorção de água e o coeficiente de permeabilidade à água diminuíram tanto mais quanto maior foi o teor de cimento adicionado ao solo sendo que a absorção de água oscilou entre 13% e 17%, respectivamente, para teores de 15% e 6% de cimento, e o coeficiente de permeabilidade variou de $0,27 \cdot 10^{-6}$ cm/s a $14 \cdot 10^{-6}$ cm/s (**Figura 4**). Os referidos autores também estudaram o coeficiente de retração na secagem e notaram que a elevação da quantidade de cimento no solo diminuiu o valor de retração do material, sendo que para todas misturas de solo-cimento houve um aumento significativo de retração nos 7 primeiros dias de idade e tendência à estabilização ao longo de 28 dias (**Figura 5**).

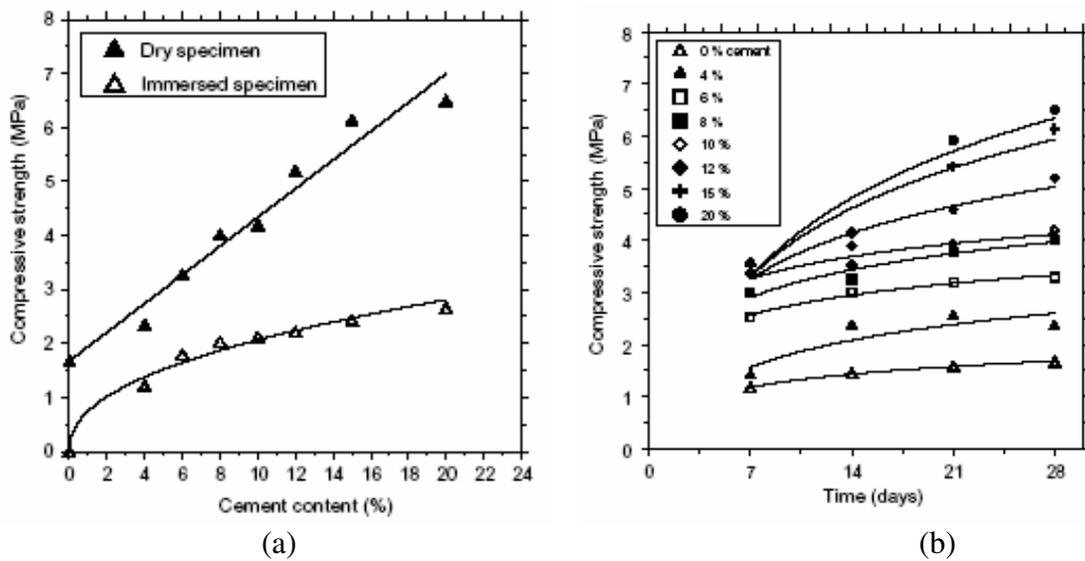


Figura 3. Desempenho mecânico do solo-cimento: (a) teor de cimento, (b) decorrer do tempo. Fonte: Bahar et al. (2004).

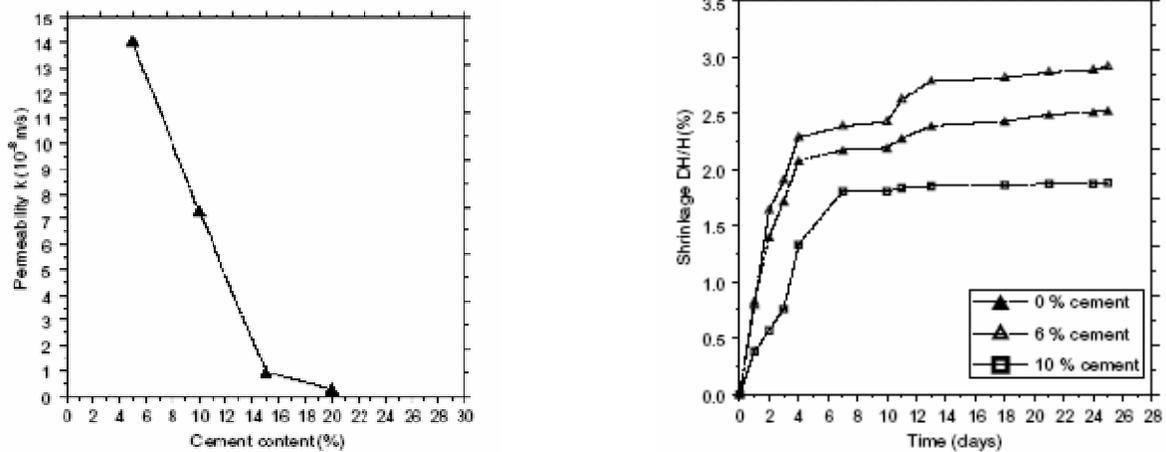


Figura 4. Coeficiente de permeabilidade de misturas de solo-cimento. Fonte: Bahar et al. (2004).

Figura 5. Coeficiente de retração de misturas de solo-cimento. Fonte: Bahar et al. (2004).

Estudos realizados por Milani (2005) relataram que tijolos confeccionados com solo arenoso e adicionados de 8% de cimento resultaram em valores de resistência à compressão simples na ordem de 2,3 MPa aos 7 dias de idade e valores de absorção d'água na ordem de 14%. Esses resultados atenderam às especificações da norma NBR 8491 empregada para tijolos prensados de solo-cimento, que estabelece como valor mínimo, para a média dos valores de resistência, 2,0 MPa, com idade mínima de 7 dias, sendo que nenhum valor individual deve ser inferior a 1,7 MPa; a média dos valores de absorção de água, por outro lado, não deve ser maior que 20%, assim como nenhum valor individual deve ser superior a 22%. Rolim et al. (1999), em suas pesquisas, também encontraram valores semelhantes para um mesmo tipo de solo e teor de cimento.

Reddy e Gupta (2005) estudaram as características físico-mecânicas de blocos maciços prensados de solo arenoso estabilizados com 6%, 8% e 12% de cimento Portland, em massa. Tais blocos apresentaram dimensões de 305 x 143 x 100 mm³ e massa específica aparente seca em torno de 1.800 kg/m³ e foram ensaiados na idade de 30 dias. Os referidos autores verificaram a grande influência dos teores de cimento nas propriedades físico-mecânicas do material formado. Para a resistência à compressão simples, os blocos saturados apresentaram valores de 3,13 a 7,19 MPa, sendo observado um acréscimo de 130% de resistência entre os blocos estabilizados com 6% e 12%. Para o módulo de elasticidade longitudinal houve semelhante comportamento, visto que os valores situaram-se entre 2.332 e 6.061 MPa e notou-se um acréscimo de 153% no módulo entre os blocos estabilizados com 6% e 8%. Quanto à caracterização física, Reddy e Gupta (2005) analisaram a superfície dos blocos pelas imagens de microscopia eletrônica de varredura (**Figura 6**), e verificaram que a porosidade do material diminui consideravelmente conforme o aumento do teor de cimento.

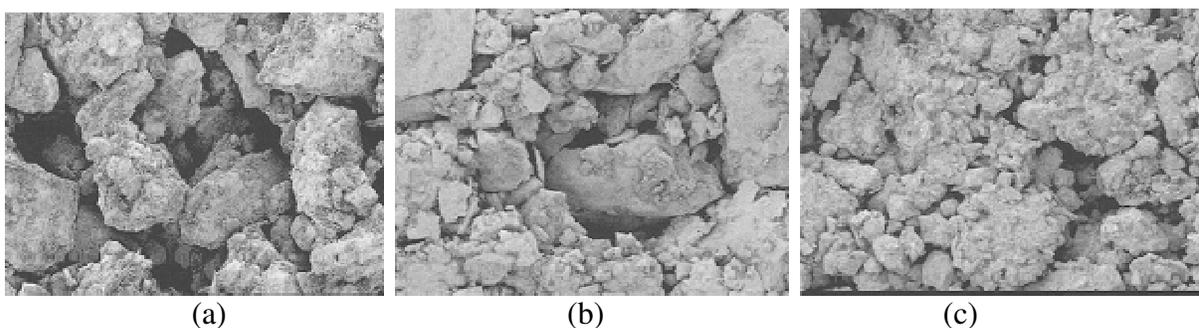


Figura 6. Imagens de amostras de blocos ampliada 50x - 500µm: (a) solo-cimento 6%, (b) solo-cimento 8%, (c) solo-cimento 12%.

Fonte: Reddy e Gupta (2005).

Lima e Alexandre (2006), estudando a produção de blocos modulares (19,5 x 10 x 5 cm³) de solo argiloso estabilizados com 10% de cimento, em volume, verificaram que a resistência à compressão simples e a absorção de água, respectivamente, aumentou e decresceu no decorrer de 30 dias, alcançando-se valores de 3,2 MPa de resistência e 16,1% de capacidade de absorção de água. Outro ponto estudado pelos autores foi a durabilidade do bloco quando submetido a ciclos de molhamento e secagem, o que resultou em perda e ganho de massa não superior a 0,6% e resistência à compressão simples que atenderam às normas referentes a tijolos/blocos de solo-cimento.

Através da aplicação de ensaios mecânicos em mini-painéis de terra estabilizada com cimento (1080 x 160 x 630 mm³), Jayasinghe e Kamaladasa (2007) confirmaram a potencialidade do uso de solo laterítico predominantemente arenoso ou argiloso na confecção de elementos e componentes construtivos (**Tabela 9**), desde que tais solos estejam estabilizados com teores de 6% ou mais de cimento e compactados pelo processo dinâmico.

Tabela 9. Tensões de ruptura (MPa) de paredes de solo-cimento.

solo laterítico	Tensão ruptura – seco (MPa)			Tensão ruptura – saturado (MPa)
	6%	8%	10%	6%
arenoso	2,03	1,97	2,82	1,30
argiloso	1,82	2,06	2,30	0,85

Fonte: Jayasinghe e Kamaladasa (2007).

A caracterização físico-mecânica também pode ser realizada por intermédio de ensaios não-destrutivos. Para o solo estabilizado, o método acústico do ultra-som pode ser útil para o acompanhamento da evolução do processo de hidratação dos compostos cimentantes, bem como para a detecção de patologias e defeitos, e para a determinação da anisotropia e constantes elásticas (matriz de rigidez) do material.

O ensaio de ultra-som consiste na emissão de um impulso vibratório mecânico 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 da onda ultra-sônica caracteriza o material, servindo de parâmetro para avaliação das suas propriedades físico-mecânicas e elásticas (BERALDO, 2000).

A propagação da onda ultra-sônica no sólido pode revelar características dos materiais como homogeneidade, descontinuidades, trincas, defeitos e fissuras internas. Quanto menos homogêneo for o material, maior será o tempo que a onda levará para percorrer sua estrutura interna e, conseqüentemente, menor será a velocidade de propagação da onda ultra-sônica do material (**Equação 1**).

$$V = \frac{d}{t} 1000 \quad (1)$$

onde:

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

d = distância percorrida pela onda (mm);

t = tempo transcorrido no percurso (μ s).

O ensaio de ultra-som também pode ser utilizado para determinar as constantes elásticas de sólidos a partir da relação entre sua velocidade de onda ultra-sônica e sua densidade (**Equação 2**). A constante elástica característica do material, comumente chamada por módulo de elasticidade dinâmico, expressa a relação existente entre a aplicação de uma tensão e a deformação global ocorrida no material, ou seja, a relação entre módulo de elasticidade (Young e Coulomb) e o coeficiente de Poisson (AZEVEDO JR., 2002).

$$C = \rho \cdot V^2 \cdot 10^{-6} \quad (2)$$

onde:

C = constante de rigidez ou constante elástica (MPa);

ρ = massa específica aparente seca do material (kg/m^3);

V = velocidade de onda ultra-sônica (m/s).

O uso do ultra-som tem sido relacionado à avaliação da qualidade técnica de diferentes materiais de construção através da combinação de ensaios destrutivos e não-destrutivos. Bodig e Jayne (1982) indicaram que a técnica comumente utilizada para correlacionar ensaios destrutivos com não destrutivos consiste de uma análise de regressão dos valores de tensão de ruptura encontrados, e da velocidade ultra-sônica obtida em ensaios não destrutivos.

Ferreira (2003) realizou ensaios destrutivos e não destrutivos em corpos-de-prova confeccionados com solo adicionado de aditivos químicos (10 % de cimento em massa e 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, sendo que, no geral, os valores de velocidade de propagação da onda ultra-sônica longitudinal e constante elástica encontrados foram da ordem de 3.000 m/s e 20.000 MPa, respectivamente.

Milani (2005) verificou a adequação do uso do método da impulsão ultra-sônica no estudo do comportamento de misturas de solo-cimento e solo-cimento-casca de arroz apenas nos primeiros dias de idade, visto que quando foi efetuada a cura ao ar livre, não foi possível, segundo a autora, 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, não sendo possível detectar as mudanças ocasionadas pelas reações de estabilização no material.

3.5.3. CARACTERIZAÇÃO TERMOFÍSICA DO SOLO-CIMENTO E SEU DESEMPENHO TÉRMICO COMO COMPONENTE CONSTRUTIVO

As propriedades térmicas dos materiais de construção e o desempenho térmico das edificações são exemplos de parâmetros de suma importância na caracterização térmica de elementos e sistemas construtivos. O conhecimento dessas informações é imprescindível ao planejamento de edificações funcionais do ponto de vista estrutural e ocupacional.

Quanto aos materiais de construção que compõem a edificação, as suas características termofísicas relevantes são: densidade de massa aparente (ρ), condutibilidade térmica (λ) e calor específico (c). De acordo com Rivero (1986), existe uma forte relação entre essas três propriedades e essa dependência é explicável quase sempre pelo conteúdo de ar do material, elemento muito leve e mau condutor de calor, quando não há movimentos convectivos. Esta característica é importante, pois fornece uma indicação aproximada do provável comportamento térmico de um material qualquer quanto à transmissão de calor por condução.

Conforme prescrições da NBR 15220 (ABNT, 2005), em posse das propriedades termofísicas dos materiais de construção, pode-se calcular as principais características térmicas dos componentes construtivos das edificações. São elas: a resistência térmica (R) e a transmitância térmica (U), que está diretamente relacionada com a espessura e a condutividade

térmica dos materiais que compõem o componente construtivo (parede ou cobertura) da edificação; e a capacidade térmica e o atraso térmico, que considera o calor específico e a densidade de cada elemento construtivo.

Segundo a NBR 15220 (ABNT, 2005), como a transmissão do calor no interior dos corpos sólidos se dá por condução, em uma parede constituída por um único material, a resistência térmica à transmissão do calor entre as faces deste componente construtivo é dada pela **Equação 3**.

$$R_t = \frac{e}{\lambda} \quad (3)$$

onde :

R_t = resistência térmica de superfície a superfície do componente ($m^2.K/W$);

e = espessura do componente (m);

λ = condutividade do material ($W/m.K$).

Se a parede for composta por camadas de materiais diferentes paralelas à face da placa e perpendiculares ao fluxo de calor, a resistência térmica do componente construtivo é igual a somatória das resistências de cada material. Se o componente for composto por camadas de materiais diferentes perpendiculares à face do componente e paralelas ao fluxo de calor, a resistência térmica do componente construtivo é igual a razão das resistências de cada material.

Além da resistência térmica à transmissão do calor no interior de uma placa é preciso considerar também a resistência térmica superficial entre o ambiente e a face do componente construtivo (**Tabela 10a**). A resistência térmica superficial interna está relacionada às trocas de calor entre a superfície interna do componente e o ambiente interno. Já a resistência térmica superficial externa está relacionada ao fluxo de calor entre a superfície externa do componente com o ambiente externo. Se o componente construtivo que separa o ambiente exterior do ambiente interior possuir uma câmara de ar interna, esta camada de ar também irá produzir uma resistência térmica. Quando esta camada for estreita, considera-se que o ar se mantém praticamente imóvel e por isso as trocas por convecção podem ser desprezadas. No entanto, se a largura da câmara for muito maior que a espessura, será preciso considerar as correntes convectivas para determinar a resistência térmica da câmara de ar (**Tabela 10b**).

Tabela 10a. Resistência térmica superficial interna e externa.

Rsi (m².K/W)			Rse (m².K/W)		
Direção do fluxo de calor			Direção do fluxo de calor		
Horizontal ⇒	Ascendente ↑	Descendente ↓	Horizontal ⇒	Ascendente ↑	Descendente ↓
0,13	0,10	0,17	0,04	0,04	0,04

Fonte : NBR 15220 (ABNT, 2005).

Tabela 10b. Resistência térmica de câmaras de ar com largura muito maior que a espessura.

Natureza da superfície da câmara de ar	Espessura “e” da câmara de ar (cm)	Resistência térmica Rar (m².K/W)		
		Direção do fluxo de calor		
		Horizontal ⇒	Ascendente ↑	Descendente ↓
Superfície de alta emissividade $\epsilon > 0,8$	$1,0 \leq e \leq 2,0$	0,14	0,13	0,15
	$2,0 < e \leq 5,0$	0,16	0,14	0,18
	$e > 5,0$	0,17	0,14	0,21
Superfície de baixa emissividade $\epsilon < 0,2$	$1,0 \leq e \leq 2,0$	0,29	0,23	0,29
	$2,0 < e \leq 5,0$	0,37	0,25	0,43
	$e > 5,0$	0,34	0,27	0,61

Fonte : NBR 15220 (ABNT, 2005).

A somatória da resistência de todas as camadas é a resistência térmica total de um componente construtivo (R_T) e seu inverso denomina-se transmitância térmica (U). A transmitância térmica é a quantidade de calor que atravessa, em regime estacionário, em uma unidade de tempo, uma superfície de área unitária de um dado componente construtivo quando a diferença de temperatura entre a superfície interna e externa deste componente é de uma unidade (**Equação 4**).

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (4)$$

onde:

U = transmitância térmica do componente construtivo (W/m².K);

R_T = resistência térmica total do componente construtivo (m².K/W).

A capacidade térmica de um componente construtivo é a quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura do componente. De uma forma geral, quando o componente construtivo é composto por uma camada de material homogêneo, a capacidade térmica pode ser determinada pela **Equação 5**.

$$C = e.c.\rho \quad (5)$$

onde:

C = capacidade térmica de componente construtivo (kJ/m².K);

e = espessura do material que compõe o componente construtivo (m);

c = calor específico do material que compõe o componente construtivo (kJ/kg.K);

ρ = densidade do material que compõe o componente construtivo (kg/m³).

Porém, a característica capacidade térmica total (C_T) também dependerá da composição das camadas do componente construtivo, sendo válido aplicar as considerações descritas no cálculo da característica resistência térmica total (R_T).

Através das características de resistência térmica de superfície a superfície do componente (ordem em que as camadas estão dispostas) e de capacidade térmica do componente, pode ser estimado o atraso térmico ou inércia térmica do componente construtivo homogêneo pela **Equação 6** ou do componente construtivo heterogêneo pela **Equação 7**.

$$\varphi = 0,7284.\sqrt{R_t.C_T} \quad (6)$$

onde:

φ = atraso térmico (horas);

R_t = resistência térmica de superfície a superfície do componente (m².K/W);

C_T = capacidade térmica do componente (kJ/m².K).

$$\varphi = 1,382.R_t.\sqrt{B_1 + B_2} \quad (7)$$

onde:

R_t = resistência térmica de superfície a superfície do componente,

B_1 = dado pela **Equação 8**,

B_2 = dado pela **Equação 9**.

$$B_1 = 0,226 \cdot \frac{B_0}{R_t} \quad (8)$$

onde:

B_0 = dado pela **Equação 10**.

$$B_2 = 0,205 \cdot \left(\frac{(\lambda \cdot \rho \cdot c)_{ext}}{R_t} \right) \cdot \left(R_{ext} - \frac{R_t - R_{ext}}{10} \right) \quad (9)$$

$$B_0 = C_T - C_{T_{ext}} \quad (10)$$

onde:

C_T = capacidade térmica total do componente (kJ/m².K);

$C_{T_{ext}}$ = capacidade térmica da camada externa do componente (kJ/m².K).

Notas: Nas equações acima, o índice "ext" se refere à última camada do componente, junto à face externa e considerar B_2 nulo caso seja negativo.

Quanto ao fator de ganho solar de elementos opacos é dado pela **Equação 11**.

$$FS_o = 100 \cdot U \cdot \alpha \cdot R_{se} \quad (11)$$

onde:

FS_o = fator solar de elementos opacos (%);

U = transmitância térmica do componente construtivo (W/m².K);

α = absorptância à radiação solar (função da cor), dada pela **Tabela 10c**;

R_{se} = resistência superficial externa, dada pela **Tabela 10a**.

Tabela 10c. Absortância (α) para radiação solar (ondas curtas).

Tipo de superfície	α
Chapa de alumínio (nova e brilhante)	0,05
Caição nova	0,12 / 0,15
Concreto aparente	0,65 / 0,80
Tijolo aparente	0,65 / 0,80

Fonte : NBR 15220 (ABNT, 2005).

Ao estudar a influência da estabilização nas propriedades termofísicas de blocos de solo-cimento, Adam e Jones (1995) identificaram que quanto maior foi a densidade do material solo-cimento, maior foi a sua condutividade térmica, sendo que o aumento do teor de umidade do material levou a maiores valores de condutividade térmica (**Tabela 11a**). Quanto ao calor específico, os referidos autores notaram o mesmo comportamento para todos os tratamentos de solo-cimento, alcançando-se, em média, o valor de 0,84 kJ/kg.K.

Tabela 11a. Características termofísicas do solo-cimento.

Tipo de solo (5% cimento)	Densidade (kg/m³)	Condutividade (W/m.K) – 0,5% teor de umidade	Condutividade (W/m.K) – 5% teor de umidade	Calor específico (kJ/kg.K)
Areno-siltoso	1820	0,41	0,71	0,84
Arenoso	1920	0,55	0,96	0,84

Fonte Adam e Jones (1995).

Ferreira (2003) estudou as propriedades termofísicas dos tijolos de solo adicionados de aditivos químicos (cimento + silicato de sódio). Para tal, foram realizados ensaios laboratoriais para a medição da condutibilidade térmica e do calor específico; e os valores encontrados foram, respectivamente, 0,49 W/m.K e 0,75 kJ/kg.K. Diante desses resultados, o referido autor seguiu os métodos de cálculo recomendados pela NBR 15220 e realizou uma simulação teórica de paredes de tijolo de solo-aditivos químicos, determinando assim as principais características térmicas deste componente construtivo (**Tabela 11b**). Considerando-se as paredes construídas com tijolos prensados de solo-aditivos químicos como vedações externas leves, Ferreira (2003) concluiu que as propriedades térmicas da mistura solo-aditivo estudada favorecem um bom desempenho térmico de paredes com este tipo de material.

Tabela 11b. Principais propriedades térmicas da parede de tijolos de solo-cimento*.

Resistência térmica total [(m².K)/W]	Capacidade térmica [kJ/(m².K)]	Transmitância térmica [W/(m².K)]	Atraso térmico (h)	Fator de calor solar (%)
0,3612	162,21	2,77	4,00	7,20

*Considerando tijolo com 11 cm de largura e massa específica aparente seca de 1.868 kg/m³ e parede assentada em meio-tijolo (dimensões do tijolo: 23 x 11 x 5 cm³).

Fonte: Ferreira (2003).

Uma das vertentes para que as construções sejam eficientes energeticamente é o conhecimento das características climáticas do local e dos materiais e técnicas construtivas que melhor se adaptem a elas. Para isso, é necessária a adequada utilização dos materiais de construção disponíveis e sua combinação de forma a minimizar a posterior necessidade de meios ativos de aquecimento e/ou resfriamento para adequar a edificação ao conforto térmico e conseqüentemente, o alcance da eficiência energética.

A norma brasileira NBR 15220 (ABNT, 2005) apresenta um método simplificado de avaliação do desempenho térmico de componentes construtivos (**Figura 7**). O método consiste de recomendações de limites para as propriedades térmicas de transmitância térmica, atraso térmico e fator de calor solar, além da proposição de estratégias bioclimáticas, todas variáveis conforme a zona bioclimática em estudo. Para tanto, esta norma adaptou uma carta bioclimática a partir da sugerida por Givoni (1992), dividindo o território brasileiro em 8 zonas bioclimáticas e para cada uma destas zonas formulou-se diretrizes técnico-construtivas objetivando otimizar o desempenho térmico das edificações através de sua melhor adequação climática. As estratégias bioclimáticas consideraram os seguintes parâmetros e condições de contorno: tamanho das aberturas para ventilação, proteção das aberturas, características térmicas das vedações externas, tipo de parede externa e tipo de cobertura e estratégias de condicionamento térmico passivo.

O projeto de norma de desempenho de edificações de até cinco pavimentos 02:136.01.004 (ABNT, 2004) apresenta dois métodos de avaliação do desempenho térmico, um a partir de procedimento simplificado e outro por desempenho a partir de procedimento detalhado. O método simplificado apresenta parâmetros de capacidade térmica e transmitância térmica, com valores diferentes dos estabelecidos pela NBR 15220 (ABNT, 2005). Já o método por desempenho detalhado considera a resposta térmica global de uma edificação com exposição dinâmica a um clima específico. Nesse método, evidencia-se a necessidade de obtenção de dados horários de temperatura interna, ou pelo procedimento de medição ou por simulações. A avaliação consiste na verificação da temperatura máxima obtida para o dia típico de verão e da mínima para o dia típico de inverno, e classifica a edificação com desempenhos mínimo, intermediário ou superior (**Figura 7**).

MÉTODO	TIPO	PARÂMETROS									
		ZONAS BIOCLIMÁTICAS									
		1	2	3	4	5	6	7	8		
Norma de Desempenho Térmico	Método Simplificado	$U \leq 3,00 \text{ W/m}^2\text{.K}$	$U \leq 3,00$	$U \leq 3,60$	$U \leq 2,20$	$U \leq 3,60$	$U \leq 2,20$	$U \leq 2,20$	$U \leq 3,60$		
		$\Phi \leq 4,3 \text{ horas}$	$\Phi \leq 4,3$	$\Phi \leq 4,3$	$\Phi \leq 6,5$	$\Phi \leq 4,3$	$\Phi \leq 6,5$	$\Phi \leq 6,5$	$\Phi \leq 4,3$		
		$FCS \leq 5,0\%$	$FCS \leq 5,0$	$FCS \leq 4,0$	$FCS \leq 3,5$	$FCS \leq 4,0$	$FCS \leq 3,5$	$FCS \leq 3,5$	$FCS \leq 4,0$		
Projeto de Norma de Desempenho de Edifício de até Cinco Pavimentos	Método Simplificado	$U \leq 2,50 \text{ W/m}^2\text{.K}$		$\alpha < 0,6$	$U \leq 3,70$						
				$\alpha \geq 0,6$	$U \leq 2,50$						
		$C_T \geq 130 \text{ kJ/m}^2\text{.K}$						$C_T \geq 45$			
Projeto de Norma de Desempenho de Edifício de até Cinco Pavimentos	Método por desemp	M	Verão	Temp. máxima interna \leq Temp. máxima exterior							
			Inverno	Temp. mínima $> 12 \text{ }^\circ\text{C}$				Sem verificação do critério			
		I	Verão	Temp. máxima interna $\leq 29 \text{ }^\circ\text{C}$					Tem. Máxima interna $< 28 \text{ }^\circ\text{C}$		
			Inverno	Temp. mínima $\geq 15 \text{ }^\circ\text{C}$					Sem verificação do critério		
		S	Verão	Temp. máxima interna $\leq 27 \text{ }^\circ\text{C}$					Temp. máxima interna $\leq 26 \text{ }^\circ\text{C}$		
			Inverno	Temp. mínima $\geq 17 \text{ }^\circ\text{C}$					Sem verificação do critério		
Horas de desconforto	Método por desemp	Verão e inverno	Quantidade anual de horas de temperatura interna fora dos intervalos de $18 \text{ }^\circ\text{C}$ e $29 \text{ }^\circ\text{C}$ devem ser < 1.000 horas								

U = Transmitância térmica
 Φ = Atraso térmico
 FCS = Fator de calor solar
 α = Absorvitividade
 C_T = Capacidade térmica
 M = Desempenho mínimo
 I = Desempenho intermediário
 S = Desempenho superior

Figura 7. Parâmetros de avaliação de desempenho térmico de vedações externas - paredes.
 Fonte: Giglio e Barbosa (2006).

Além dos métodos normativos, diferentes métodos alternativos também podem ser abordados para avaliação térmica de sistemas construtivos. O método das horas de desconforto desenvolvido por Barbosa (1997) para aplicação em habitações de interesse social utiliza a zona de conforto de Givoni (1992) para países em desenvolvimento, com intervalo de temperatura de conforto entre 18°C e 29°C . O método consiste na verificação da quantidade de horas de desconforto obtidas para um ano inteiro, tanto pelo frio como pelo calor, e apresenta parâmetro de 1000 horas de desconforto como limite máximo para que uma habitação de interesse social apresente desempenho térmico mínimo.

A pesquisa de Dumke (2002) consistiu na avaliação de desempenho térmico das moradias habitadas e de diferentes sistemas construtivos na Vila Tecnológica de Curitiba, através da metodologia das horas anuais de desconforto. A partir dos dados de temperatura obtidos pelas medições e os dados estimados de umidade relativa foram gerados arquivos no

formato TRY, os quais foram plotados no Diagrama Bioclimático de Givoni com a utilização do software ANALYSIS BIO para a análise bioclimática de cada sistema construtivo. Assim, foi possível quantificar as horas de desconforto térmico para cada moradia em termos de porcentagem de horas em que as medições de temperatura se situam nas zonas de conforto ou de desconforto. Para tanto, o autor considerou a faixa de conforto fixada por Givoni (1992) como sendo de 18 °C a 29 °C. Os resultados mostraram que, no período de verão, as temperaturas internas das moradias apresentaram alta porcentagem de horas com temperaturas na faixa de conforto, com índices variando entre 61,8% e 95,8% das horas totais de medição. Já para o período de inverno, as moradias apresentaram alta porcentagem de horas com temperaturas na faixa de desconforto por frio, com índices variando entre 83,4% a 93,8%. Analisando tais resultados, Dumke (2002) concluiu que, em relação ao parâmetro porcentagem de horas de desconforto, dentre as dezoito tecnologias estudadas, a mais adequada ao clima de Curitiba foi o sistema construtivo de paredes de tijolos de solo-cimento e cobertura com forro de madeira e telhas cerâmicas, com o melhor desempenho térmico no inverno (16% de horas de conforto) e no verão (87,4% de horas de conforto).

Parra-Saldivar e Batty (2006) avaliaram o desempenho térmico do sistema construtivo de adobe através da simulação computacional. Os autores utilizaram o software TAS e simularam uma residência construída com paredes de adobe, habitada e ventilada, sob as condições climáticas de três regiões distintas do México, sendo variado o tamanho de janela e a espessura e condutividade térmica das paredes. O critério de conforto térmico situou-se no cumprimento de temperaturas entre 19 °C e 24 °C. Os referidos autores concluíram que, nas condições climáticas do México, para período de frio, as propriedades térmicas do sistema construtivo adobe influenciaram significativamente no desempenho térmico da edificação pois, como o material solo compactado tem grande massa térmica (inércia térmica), o sistema evitou as perdas térmicas do interior da edificação.

3.5.4. SOLO-CIMENTO-CINZA COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO

Freitas (1996) estudou as cinzas resultantes da queima do bagaço de cana em mistura com solo-cimento visando a obtenção de tijolos para uso em construção civil. No seu trabalho, a autora propõe que a fração utilizável seja aquela que compreenda:

- cinzas semi-beneficiadas, pelo simples peneiramento, para retirada do material não-queimado, utilizando-se a fração passante na peneira n° 16,
- cinzas beneficiadas, passadas primeiro pelo moinho de bolas, seguido de peneiramento, utilizando-se a fração passante na peneira n° 200.

Os tijolos foram confeccionados com traços 1:0:12, 1:1:11, 1:2:10, 1:3:9 e 1:4:8 (cimento, cinza e solo), em volume, utilizando-se as cinzas semi-beneficiadas e os traços: 1:0:10, 1:0:11, 1:0:12, 1:1:10, 1:1:11, 1:1:12, 1:2:10, 1:2:11 e 1:2:12 (cimento, cinza e solo), também em volume, para as cinzas beneficiadas. Os resultados destes ensaios estão apresentados nas **Tabelas 12 e 13**. A autora chamou a atenção para o fato de que, nos tijolos moldados a partir de misturas de solo-cimento e cinzas de bagaço beneficiadas, a adição de cinza foi satisfatória em todos os traços estudados (isto é, os corpos-de-prova atendem às condições de aceitação das normas brasileiras). Por outro lado, para cada relação solo-cimento, existiu uma razão a partir da qual a adição de cinza no solo passou a ser excessiva, ocorrendo decréscimos de valores nas propriedades mecânicas do material. Como conclusão final, Freitas (1996) destacou que a fabricação de tijolos feitos com a mistura cimento-cinza-solo, utilizando-se de cinzas de bagaço, representa uma redução no consumo de cimento e, conseqüentemente, no custo final do tijolo, tendo em vista que as cinzas utilizadas são um resíduo agroindustrial e o custo do solo é, também, inferior ao custo do cimento.

Tabela 12. Valores médios de resistência à compressão e absorção de água de tijolos de solo-cimento com adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar semi-beneficiada.

Traço (cimento: cinza: solo)	Resistência à compressão simples, aos 28 dias (MPa)	Absorção de água (%)
1:0:12	2,20	20,0
1:1:11	2,60	19,5
1:2:10	3,10	19,2
1:3: 9	3,60	18,6
1:4: 8	1,90	22,3

Fonte: Freitas (1996).

Tabela 13. Ensaios realizados com tijolos de solo-cimento com adição de cinzas beneficiadas.

Traço (cimento: cinza : solo)	Peso específico seco (kg/m ³)	Resistência à compressão simples aos 10 dias (MPa)	Resistência à compressão simples aos 28 dias (MPa)	Absorção mínima de água (%)
1:0:10	1738	2,69	4,73	17,72
1:0:11	1706	2,41	4,40	17,65
1:0:12	1725	1,94	4,23	17,87
1:1:10	1729	2,74	5,51	18,54
1:1:11	1677	2,78	4,81	18,56
1:1:12	1700	2,30	4,61	18,24
1:2:10	1675	2,40	4,25	18,70
1:2:11	1690	2,60	4,57	19,10
1:2:12	1663	2,65	4,02	19,35

Fonte: Freitas, 1996.

Mesa Valenciano (1999) pesquisou os efeitos da adição de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar sobre a resistência à compressão simples e absorção de água de tijolos confeccionados com solo melhorado com cimento. As cinzas utilizadas foram primeiramente moídas em moinho de bolas e, posteriormente, passadas em peneira nº 100 (# 0,15 mm), antes de serem adicionadas a dois tipos de solo: um arenoso (16% de silte + argila) e outro argiloso (49% de silte + argila), em substituição parcial do cimento Portland CP II-E-32, usado na quantidade de 3%, em relação à massa do solo seco, para melhorar as características de resistência do material formado. Foram então confeccionados tijolos com misturas de solo mais 3% de cimento modificado (80% de cimento Portland + 20% de cinza de bagaço de cana-de-açúcar), prensados em máquina manual de fabricação de tijolos de solo-cimento e moldados no teor de umidade ótima de compactação. Os tijolos foram curados em câmara úmida, durante sete dias, e, após, conservados ao ar livre e à sombra até o momento de serem rompidos à compressão simples com as idades de 7, 28 e 60 dias. Alguns exemplares, após 7 dias de cura em câmara úmida, foram submetidos ao ensaio de absorção de água.

Segundo Mesa Valenciano (1999), os resultados mostraram que os tijolos moldados com solos arenoso ou argiloso, adicionados de 3% de cimento modificado (com 20% de substituição por cinza de bagaço de cana-de-açúcar), apresentaram baixíssimos valores de resistência à compressão simples, em qualquer idade considerada, e valores satisfatórios de absorção de água (ao redor de 13%) apenas para o solo arenoso (no caso do solo argiloso, o

valor médio de absorção de água foi de aproximadamente 22%). Tais resultados insatisfatórios foram atribuídos ao baixo teor de cimento empregado (3%), ainda assim o mesmo sendo substituído parcialmente por cinza de bagaço de cana, que, no caso, funcionou como carga mineral, reduzindo mais ainda, proporcionalmente, o teor de cimento na mistura.

Basha et al. (2005) estudaram a estabilização do solo com cimento e cinza de casca de arroz (RHA) através dos ensaios de compactação e de compressão, e análises químicas pela difração de raios-X. O material solo foi caracterizado como areno-siltoso e o material cinza de casca de arroz apresentou 93,1% de sílica e 12,5% de partículas retidas na peneira de 0,045 mm. Os autores observaram que a adição gradativa dos teores de cimento ou de cinza no solo, refletiram significativamente no aumento da umidade ótima e no decréscimo da massa específica aparente seca máxima dos tratamentos (**Figura 8**). Já o ensaio de compressão aos 7 dias de idade revelou que cinza de casca de arroz, quando utilizada individualmente para estabilizar o solo, não possui propriedades cimentantes e necessita de adição de cimento para ocorrência de estabilização. Os autores notaram que a resistência à compressão dos tratamentos de solo + 4% de cimento + teores de cinza e de solo + 8% de cimento + teores de cinza cresceram com o aumento da percentagem de cinza, porém até o limite de 20% para solo estabilizado com 4% de cimento e 30% para solo estabilizado com 8% de cimento (**Figura 9**). Quanto aos resultados da difração de raio-X, os autores confirmaram a ocorrência de estabilização do solo, pois quando comparados os tratamentos solo e solo + 4% de cimento+ 20% de cinza observaram a presença de picos de carbonato e redução dos picos de quartzo e feldspato no tratamento solo + aditivos (**Figura 11**). Basha et al. (2005) ainda concluíram que a adição de 6% a 8% de cimento e 15 % a 20% de cinza de casca de arroz foram ótimos teores para melhorar as propriedades mecânicas do solo e que a cinza mostrou-se um potencial material para reduzir os custos das construções.

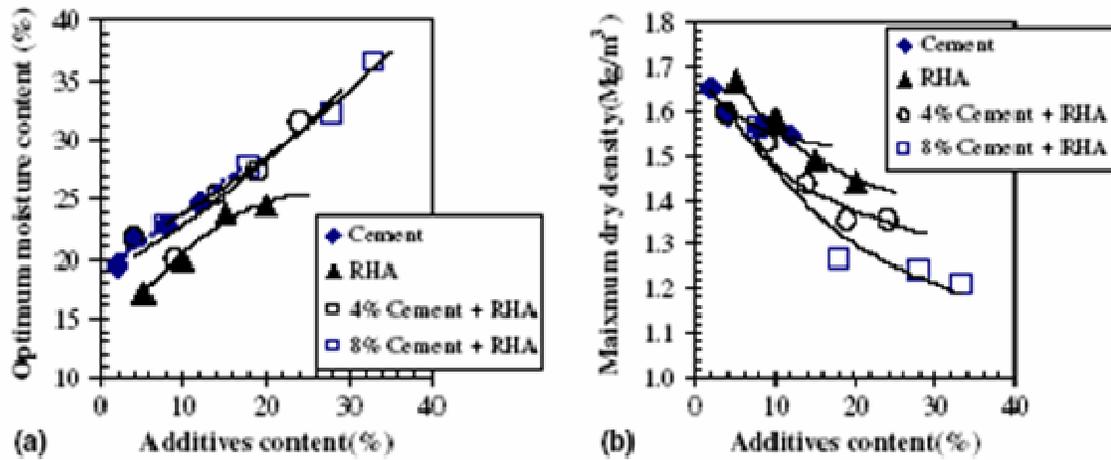


Figura 8. Relação entre umidade ótima, massa específica aparente seca e teores de aditivos adicionados ao solo.

Fonte: Basha et al. (2005).

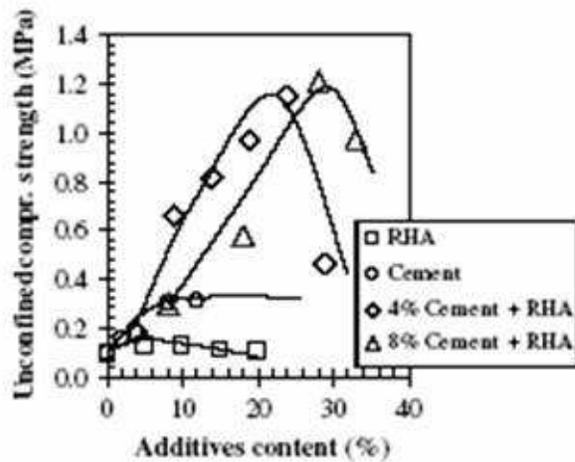


Figura 9. Relação entre resistência e teores de aditivos incorporados ao solo.

Fonte: Basha et al. (2005).

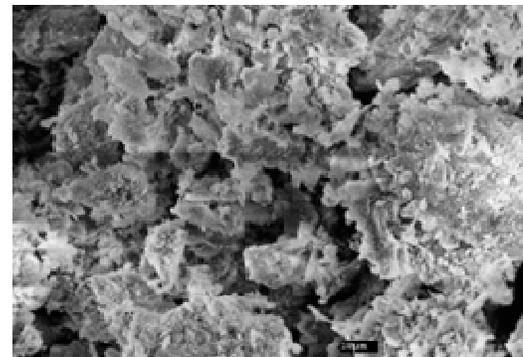


Figura 10. Imagem da amostra de solo+ 4% de cimento + 20% de cinza – 100x - 10μm.

Fonte: Basha et al. (2005).

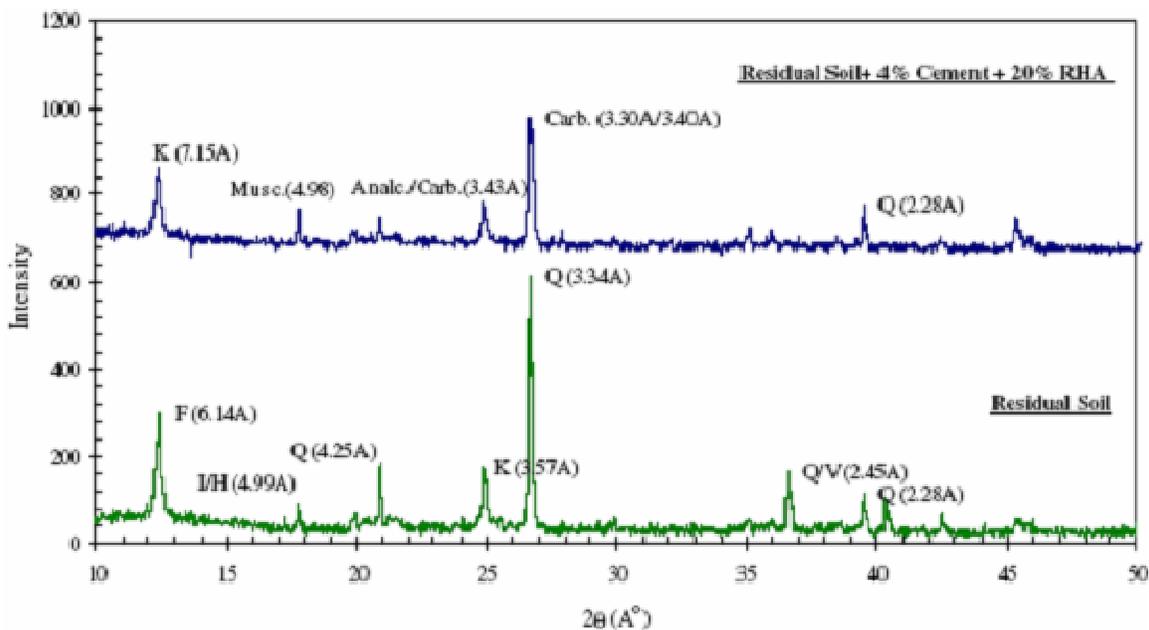


Figura 11. Diagrama de difração de raios-X das amostras de solo e de solo + 4% de cimento+ 20% de cinza.

Fonte: Basha et al. (2005).

3.6. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE EDIFICAÇÕES

A necessidade de desenvolvimento sustentável sob os aspectos sociais, econômicos e ambientais vem incentivando o desenvolvimento de novos materiais, componentes e sistemas construtivos, visando a busca de alternativas aos produtos e processos ineficientes energeticamente em utilização na construção civil e/ou rural. Uma questão relevante que se coloca nesse campo é a de como avaliar estes novos produtos.

Neste âmbito, o projeto de norma de desempenho de edificações de até cinco pavimentos 02:136.01.004 (ABNT, 2004) recomenda que tal avaliação seja baseada em requisitos e critérios de desempenho, expressando as condições qualitativas e quantitativas às quais o edifício e suas partes devem atender para satisfazer às exigências do usuário, quando submetidos a determinadas condições de exposição, e em métodos de avaliação que permitam verificar se as condições estabelecidas são atendidas.

Souza (1988) identificou as exigências do usuário quanto a habitabilidade e uso da edificação, as quais seguem os seguintes parâmetros:

- segurança estrutural – estabilidade e resistências mecânicas,
- segurança ao fogo – risco de início e propagação de incêndio,
- segurança à utilização – segurança às intrusões,
- estanqueidade – aos gases, aos líquidos e aos sólidos,
- conforto higrotérmico – temperatura e umidade do ar interior
- conforto visual – aspectos dos espaços,
- conforto acústico – isolamento acústica,
- conforto tátil – rugosidade, umidade e temperatura da superfície,
- conforto antropodinâmico – acelerações, vibrações e esforços de manobras,
- higiene – abastecimento de água, eliminação de matéria usada,
- adaptação à utilização – número, dimensões, geometria e relações de espaço,
- durabilidade – conservação e desempenho ao longo do tempo,
- economia – custo inicial e custos de manutenção e reposição durante o uso.

Ferreira Neto et al. (2004) avaliaram o desempenho de sistemas e componentes construtivos a partir das exigências mínimas de habitabilidade e uso, sendo utilizado os seguintes critérios e métodos de avaliação de desempenho:

- quanto à segurança contra incêndio: devem ser avaliados os materiais e produtos utilizados como acabamento/revestimento (pisos, forros, revestimentos de parede) quanto à sua reação ao fogo, ou seja, sua capacidade de manter e propagar as chamas, conjuntamente à quantidade de fumaça gerada durante esse processo;
- quanto à segurança estrutural: o estado limite último, sob o ponto de vista da utilização da edificação, deve ser verificado através de deformações, fissurações ou outras falhas dos componentes e/ou do sistema construtivo, assim como o aspecto de ações de impactos, a qual conjuga os ensaios de impactos de corpo mole e de corpo duro, e os ensaios de carregamento com cargas suspensas que são realizados através de peças suspensas propriamente ditas, sustentação de rede de dormir e de interação entre paredes e portas;
- quanto à estanqueidade: a verificação da estanqueidade à água de fachadas e divisórias é possível através de ensaios *in situ* com auxílio de câmara simuladora de chuvas incidentes;
- quanto ao conforto acústico: verificação do isolamento sonoro de partições internas de edificações, do isolamento sonoro de ruído de impacto e do isolamento sonoro de ruído de fachada;

- quanto ao conforto térmico: realização de medições das grandezas in situ (temperatura e umidade), obtendo-se uma reposta global da edificação em questão, ou ainda, em se tratando da avaliação de componentes e de sistemas construtivos, obtenção de propriedades térmicas (condutividade térmica).

Segundo Ferreira Neto et al. (2004), para aplicação de tais procedimentos e metodologia de avaliação faz-se necessária à implementação e/ou atualização de normas e regulamentos que balizam esse segmento, assim como a implantação de centros de pesquisa munidos de infra-estrutura e recursos humanos condizentes.

A aplicação do conceito de desempenho à habitação, além de propiciar o estabelecimento de uma base objetiva e racional para avaliação de desempenho de componentes e sistemas construtivos, contribui também para normatizar os procedimentos de ensaio, execução, fabricação e dimensionamento dos materiais de construção construtivos alternativos (não-convencionais), assim como a possibilidade de implantação de sistema de controle de qualidade dos mesmos. Deve-se levar em consideração, também, a importância da disseminação desta tecnologia apropriada para o meio produtivo, tentando assim melhorar a aceitabilidade e emprego do material pelo usuário.

4. MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi conduzida no Laboratório de Materiais e Estruturas (LME) e em área do Campo Experimental, ambos da Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI/UNICAMP).

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

4.1. MATERIAL

◆ Solo

Procurou-se trabalhar com um tipo de solo que atendesse às condições ideais para confecção de elementos construtivos, ou seja, um solo de características predominantemente arenosas, bem graduado, com teores de silte mais argila variando de 10% a 35%.

O solo pertencente à classe textural arenosa foi coletado em jazida situada no município de Hortolândia – SP, região metropolitana de Campinas. O solo foi submetido aos diversos tratamentos com a finalidade de avaliar os seus efeitos sobre a qualidade dos diferentes materiais formados.

◆ Cimento

Foi utilizado o cimento Portland CP III-RS-32 (cimento de Alto-Forno resistente a sulfatos), da marca VOTORAN, cujas características físicas, químicas e mecânicas atenderam aos requisitos da norma NBR 5735 (ABNT, 1991). A escolha do cimento CP III-RS-32 deveu-se à sua maior disponibilidade no comércio de material de construção, visto que o mesmo está substituindo o cimento CP II-E-32. O cimento CP III-RS-32 foi adquirido em casa idônea do ramo da construção civil e utilizado durante todas as etapas da presente pesquisa.

◆ Água

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

◆ Cinza de casca de arroz (CCA)

A cinza de casca de arroz foi coletada em forno tipo grelha (**Figura 12**) da beneficiadora BROTO LEGAL, localizada no município de Porto Ferreira – SP, sendo esta a fornecedora de cinza mais próxima da cidade de Campinas. Tal queimador não apresentou controle efetivo das temperaturas e tempos de queima da casca de arroz, variando conforme a demanda das atividades em termos de pressão de vapor. Esta cinza residual atuará como carga mineral na mistura solo-cimento e não como um material com propriedades aglomerantes (cimento pozolânico).

A escolha desse tipo de cinza deveu-se a dois fatores primordiais: constatação de grande geração de cinza residual pelas agroindústrias e a falta de processos tecnológicos para o reaproveitamento ou encapsulamento deste resíduo. Mesmo observando na revisão bibliográfica a possível utilização de cinza residual como “filler”, não foi realizado o processo de moagem desta cinza devido aos objetivos que concerne a presente pesquisa, ou seja, procurou-se um material alternativo de construção composto por matéria-prima que apresentasse facilidade e menor consumo energético para sua preparação.

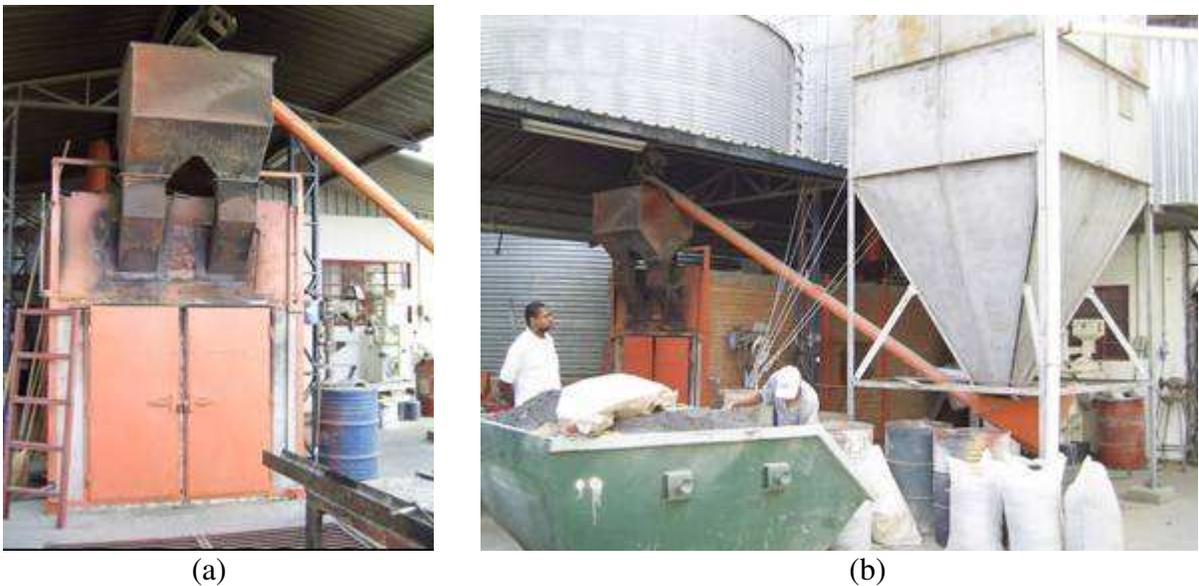


Figura 12. (a) Forno de queima da casca de arroz e (b) estoque da cinza de casca de arroz.

◆ **Material de construção convencional**

Para a etapa de construção da edificação-protótipo foi necessária a utilização de outros materiais, intitulados de materiais de construções convencionais, os quais foram adquiridos em casa idônea do ramo da construção civil. Foram utilizados os seguintes materiais: areia média; pedrisco; barra de aço CA 50 1/4" (\varnothing 6,3 mm); barra de aço CA 50 3/16" (\varnothing 5 mm); chapa de madeira compensada plastificada de 2,20 m x 1,10 m x 17 mm; barra rosqueavel 3/8"; tubo de PVC 3/8"; caibro de madeira de 6 cm x 8 cm; viga de madeira de 6 cm x 16 cm; tábuas de madeira de 30 cm; tijolo cerâmico furado 11,5 cm x 14 cm x 24 cm; tijolo de solo-cimento 5 cm x 10 cm x 20 cm; telha de fibro-cimento de 2,44 m x 0,50 m x 4 mm, da marca FIBROTEC; laje pré-fabricada (espessura 10 cm) com vigotas de isopor e trilhos de concreto armado; filme de alumínio polido (isolante térmico); tinta impermeabilizante para coberturas e paredes expostas, cor branca, da marca VEDAPREN; e materiais em geral como arame recozido, prego, sarrafo de madeira e pontalete de eucalipto.

◆ **Equipamentos**

Para a realização dos ensaios físico-mecânicos e das medições térmicas foram utilizados equipamentos do Laboratório de Materiais e Estruturas da Faculdade de Engenharia Agrícola; do Laboratório de Estruturas, do Laboratório de Solos e do Laboratório de Conforto Ambiental da Faculdade de Engenharia Civil. Tais laboratórios são pertencentes à UNICAMP.

Os equipamentos empregados foram os seguintes:

- molde cilíndrico metálico e soquete para a realização do ensaio de compactação normal de Proctor; e molde cilíndrico metálico e soquete adaptados para moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos de solo-cimento-cinza de casca de arroz (**Figura 13**);
- molde retangular de madeira e soquete de madeira adaptados para moldagem dos mini-painéis monolíticos de solo-cimento-cinza de casca de arroz (**Figura 14 e 15**);
- máquina universal para a realização dos ensaios mecânicos de corpos-de-prova cilíndricos, da marca SOILTEST, com capacidade de 15.000 kgf (**Figura 18a**);
- máquina universal para a realização dos ensaios mecânicos de mini-painéis, da marca DYNATEST, com capacidade de 25.000 kgf (**Figura 18b**);
- dois aparelhos portáteis de ultra-som para a realização dos ensaios não-destrutivos, um da marca STEINKAMP/BP7 e outro da marca PANAMETRICS/EPOCH4 (**Figura 16 e 17**);

- transdutores de frequência de 45 kHz e de 100 kHz, sendo respectivamente, de face exponencial – onda longitudinal, e de face plana – onda longitudinal e onda transversal;
- permeâmetro para realização do ensaio de permeabilidade com carga variável (**Figura 19**);
- extensômetros (sensibilidade 0,0001 mm e 150 mm de comprimento) e sistema de aquisição de dados para verificar a dos mini-painéis quando submetidos a carregamentos;
- sensores tipo data-loggers, da marca TESTO, para medição de temperatura e de umidade; e termopar tipo T, da marca ANSI, para medição de temperatura superficial (**Figura 20**);
- gerais, tais como (pá de pedreiro, espátulas, becker, serra circular, enxadas, latas, peneiras, soquetes, balança analítica, estufa de temperatura regulável, câmara úmida; etc...).

Os ensaios específicos foram realizados por laboratórios terceirizados, os quais emitiram relatórios técnicos com breve descrição dos equipamentos utilizados.

- Para a análise de micro-caracterização realizada pela Central Analítica do Instituto de Química da UNICAMP utilizou-se o Difratorômetro de Raios-X para a caracterização mineralógica das amostras de solo-cimento-cinza, e o Microscópio Eletrônico de Varredura para o estudo das transformações micro-estruturais ocorridas nas amostras de solo-cimento-cinza.
- Para os ensaios térmicos realizados no Laboratório de Conforto Ambiental do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) utilizou-se a Placa Quente Protegida para a determinação de condutividade térmica do material solo-cimento-cinza, e o Termômetro de Beckman para a determinação de seu calor específico.



Figura 13. Molde cilíndrico e compactador



Figura 14. Molde retangular.



Figura 15. Soquete de madeira.



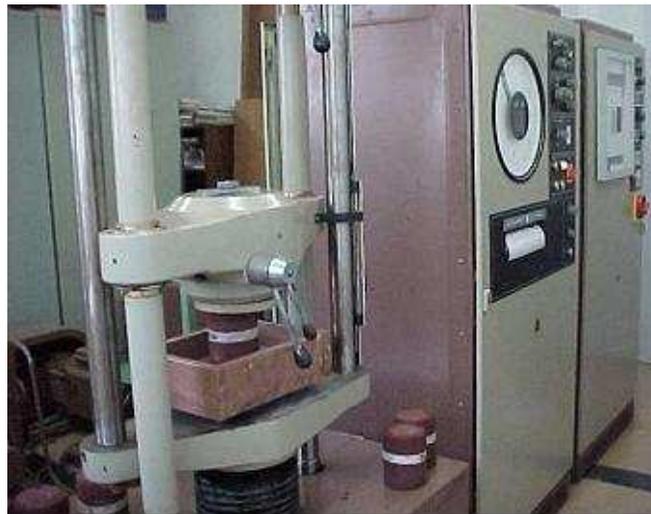
Figura 16. Aparelho de ultra-som Steinkamp/BP7.



Figura 17. Aparelho de ultra-som Panametrics/EPOCH4.



(a)



(b)

Figura 18. Máquina universal de ensaios com capacidade: (a) 15.000 kgf e (b) 25.000 kgf.



Figura 19. Permeômetro com carga variável.



Figura 20. Sensores de medições térmicas.

4.2. MÉTODOS

Adotou-se, para o desenvolvimento da presente pesquisa, um esquema experimental que consiste na execução de seis etapas fundamentais, a saber:

1º ETAPA - PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

◆ Material cinza de casca de arroz

A cinza de casca de arroz, tão logo recebida no Laboratório de Materiais e Estrutura - LME da FEAGRI foi acondicionada em sacos plásticos e estocada em recinto fechado para posterior processo de preparação. Esta condição do material foi intitulada como cinza residual de casca de arroz residual - CCA-R (**Figura 21a**).

Para efetuar o estudo sobre a influência da granulometria (finura) da cinza de casca de arroz no comportamento físico-mecânico das misturas de solo-cimento-cinza, foram adotados dois tipos de cinzas (CCA) a serem adicionadas aos solos:

- **CCA-A:** baseado no trabalho de Freitas (1996), as cinzas de casca de arroz residual passaram pelo processo de peneiramento para retirada do material não-queimado (casca de arroz de queima incompleta, material orgânico não compatível com processos de hidratação do cimento), sendo que a fração utilizável de cinza CCA-A foi o material passante na peneira de 0,60 mm;
- **CCA-B:** baseado no trabalho de Milani (2005), as cinzas de casca de arroz residual passaram pelo processo de peneiramento para retirada do material não-queimado (**Figura 21b**), uniformização do tamanho da fração e eliminação dos finos que, no caso, não são benéficos para as reações de estabilização que ocorrem no sistema solo arenoso-cimento. Sendo assim, a fração utilizável de cinza CCA-B foi o material compreendido entre as peneiras de 0,60 mm e 0,06 mm.

A caracterização físico-mecânica das cinzas de casca de arroz compreendeu os seguintes ensaios:

- determinação da distribuição em tamanho, de forma semelhante à análise granulométrica dos solos - NBR 7181 (ABNT, 1984), sendo realizado somente o peneiramento a seco;

- determinação da massa unitária na condição solta seguindo-se as prescrições da NBR 7251 (ABNT, 1982);
- determinação do índice de atividade pozolânica com cimento através da resistência mecânica, seguindo-se as prescrições da NBR 5752 (ABNT, 1992).
- determinação do teor de umidade, pelo método da estufa a 105 °C, durante 24 h. O teor de umidade foi obtido pela **Equação 12**.

$$h = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100 \quad (12)$$

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).

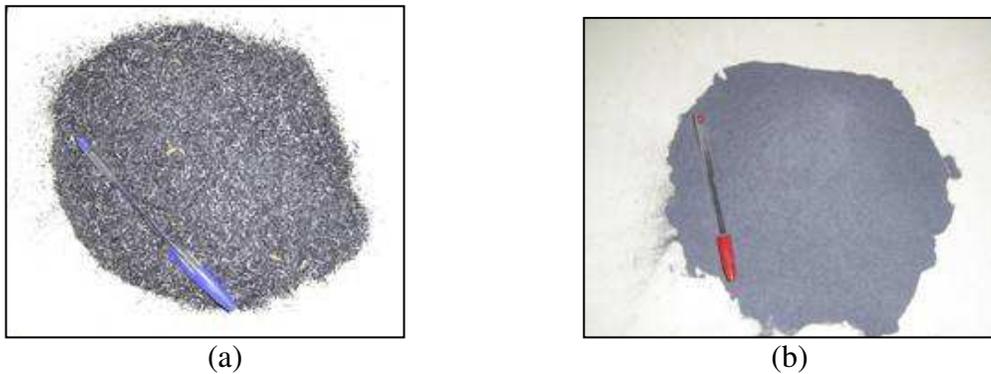


Figura 21. (a) Cinza de casca de arroz residual e (b) cinza de casca de arroz após peneiramento

Já a caracterização físico-química da cinza de casca de arroz foi realizada pelo laboratório terceirizado “Central Analítica do Instituto de Química” da UNICAMP. Foram determinadas as seguintes características:

- massa específica real através do ensaio de picnometria de gás hélio;
- superfície específica ou área superficial através do ensaio de área específica por adsorção de nitrogênio (BET), pois, segundo John et al. (2003), este método é o mais sensível a variações de área devido à porosidade das cinzas vegetais;
- teor de carbono pela calcinação da cinza a temperaturas superiores a 1.000 °C;
- estimativa do material cristalino (teor de vidro) pela análise de difração de raios X (DRX);

- composição química quantitativa através da análise de fluorescência de raios X (FRX) e composição química qualitativa através de microsonda com espectrômetro de energia dispersiva (EDS) acoplada ao microscópio eletrônico de varredura (MEV).

◆ **Material Solo**

Em todo o experimento foi utilizada a fração de solo passante na peneira de 4,80 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, 1986). Os ensaios aplicados ao solo foram os seguintes:

- determinação da massa específica dos sólidos do solo, de acordo com a norma NBR 6508 (ABNT, 1984), e da massa unitária seguindo as prescrições da NBR 7251 (ABNT, 1982);
- análise granulométrica, por sedimentação e peneiramento, de acordo com a norma NBR 7181 (ABNT, 1984);
- determinação dos limites de liquidez e de plasticidade dos solos, de acordo com as normas NBR 6459 (ABNT, 1984) e NBR 7180 (ABNT, 1984), 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, 1986).

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

◆ **Definição da composição das misturas de solo-cimento-cinza**

Tendo em vista que, para a presente pesquisa, a cinza foi utilizada como carga mineral para a substituição parcial do solo e não como um agente aglomerante em substituição parcial do cimento, foram adotadas, para estudo de dosagem, diversas combinações de solo-cinza de casca de arroz, as quais foram estabilizadas com diferentes teores de cimento (% em relação à massa seca da mistura solo-cinza), conforme o esquema da **Figura 22**. Desta forma, visou-se estudar os efeitos da adição da cinza no comportamento do material formado.

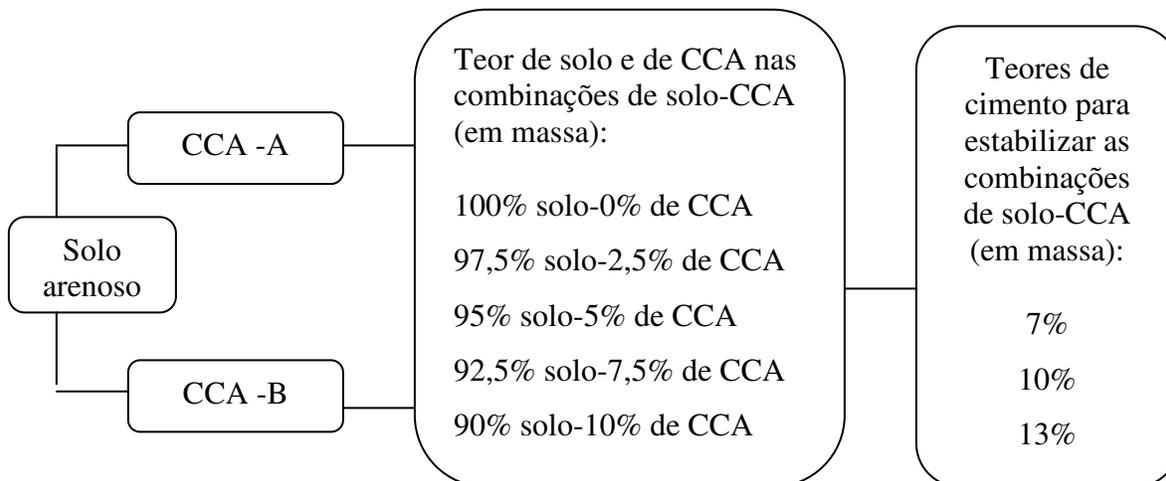


Figura 22. Esquema fatorial de estudo de dosagem.

Os teores de 2,5% a 10% de cinza de casca de arroz para a substituição do solo foram adotados tendo em vista que testes iniciais mostraram que porcentagens maiores que 12% de cinza impossibilitaram a compactação do solo-cimento-cinza na energia normal de Proctor.

Os teores de 7% e 10% de cimento para estabilização das combinações de solo-CCA foram escolhidos em função das recomendações de diversos autores, que indicaram os teores de 4% a 10% de cimento para a estabilização de solos arenosos destinados à confecção de elementos construtivos. Já a adição de 13% de cimento foi adotada a favor da segurança, tendo em vista as recomendações de Milani (2005), que sugeriu o teor de 12% de cimento para estabilização de solos de características similares ao arenoso que foi utilizado.

Para todos os ensaios aplicados às diferentes misturas de solo-cimento-cinza de casca de arroz, as quantidades pré-determinadas dos componentes foram misturadas manualmente, sendo primeiramente misturados a cinza de casca de arroz e o solo arenoso e depois o estabilizador cimento, até se conseguir homogeneidade e igual coloração da mistura, e, por último, foi adicionada a água.

◆ Ensaio de compactação das diferentes misturas de solo-cimento-cinza

Para a determinação do teor ótimo de umidade e da massa específica aparente seca máxima das diferentes misturas de solo-cimento-cinza de casca de arroz foi realizado o ensaio de compactação normal de Proctor segundo a norma NBR 12023 (ABNT, 1992), conduzido com três repetições.

◆ **Ensaio mecânico preliminar aplicado aos corpos-de-prova confeccionados com diferentes misturas de solo-cimento-cinza**

Para definir quais as misturas de solo-cimento-cinza de casca de arroz a serem utilizadas na etapa de caracterização físico-mecânica, foram realizados os ensaios mecânicos destrutivo e não-destrutivo.

Para tal, foram moldados corpos-de-prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura com o auxílio dos seguintes equipamentos adaptados (**Figura 13**): molde cilíndrico metálico com $\phi_{\text{interno}} = 5$ cm, visto que o maior grão da mistura é < 2 mm; e soquete de compactação com massa de 0,7 kg e altura de queda de 17 cm. O molde cilíndrico seguiu a proporção 1:2 (diâmetro : altura), a qual é ideal para a interpretação dos resultados de ensaios mecânicos; e teve por finalidade racionalizar o uso de solo na confecção de corpos-de-prova, visto que o molde do Proctor (10 cm de diâmetro e 12,7 cm de altura) necessita de grandes volumes de solo para seu preenchimento. Já o soquete foi adaptado quanto ao seu diâmetro, altura de queda e massa para facilitar seu manuseio e compactar uniformemente as misturas de solo-cimento-cinza dentro do molde cilíndrico. Entretanto, para se alcançar semelhante energia de compactação normal de Proctor ($5,87 \text{ kg/cm}^2$), os corpos-de-prova de solo-cimento-cinza foram compactados em três camadas com aplicação de 30 golpes em cada camada.

Na moldagem dos corpos-de-prova de solo-cimento-cinza foi utilizada, para a preparação das misturas, a quantidade de água indicada pelos ensaios de compactação normal de Proctor. Foram moldados três corpos-de-prova cilíndricos (5 cm de diâmetro e 10 cm de altura) para cada mistura de solo-cimento-cinza, os quais permaneceram em câmara úmida por um período de 7 dias de cura e, em seguida, foram ensaiados mecanicamente.

Primeiramente foi aplicado o ensaio não-destrutivo para determinar o tempo de propagação da onda ultra-sônica através dos corpos-de-prova, utilizando-se para tal, o aparelho de ultra-som Steimkamp (**Figura 16**). O ensaio de ultra-som visou detectar os possíveis defeitos na estrutura física dos corpos-de-prova, além de permitir o acompanhamento do grau de hidratação dos compostos cimentantes ocorridos ao longo dos 7 dias de cura.

Para a emissão e recepção da onda ultra-sônica foi utilizado o transdutor de contato de onda longitudinal, de frequência de 45 kHz, de face exponencial (**Figura 23**), o qual mostrou-se adequado para as medições em corpos-de-prova cilíndricos de $\phi = 50$ mm e 100

mm de altura. A escolha deste transdutor se baseou no controle efetivo de fatores que afetam os mecanismos de propagação de ondas ultra-sônicas, tais como:

- Impedância acústica e Efeito de parede – para evitar a reflexão e refração da onda ultra-sônica na interface de dois meios de impedâncias diferentes (ar e material solo-cimento-cinza) e para a dimensão transversal do corpo-de-prova ser algumas vezes maior que o diâmetro do transdutor (**Tabela 14**), anulando-se o fenômeno de efeito de parede; optou-se pela utilização do transdutor de seção exponencial.
- Estrutura anatômica e Campo acústico – para evitar a difração e dispersão da onda ultra-sônica devido às dimensões das partículas do material solo-cimento-cinza, e para permitir que pelo menos uma onda completa percorresse longitudinalmente o corpo-de-prova e não ocorresse à superposição entre as ondas ultra-sônicas na região do campo próximo; optou-se pela utilização do transdutor de frequência de 45 kHz (**Tabela 14**).

Tabela 14. Valores de ensaio preliminar para a confirmação do uso do transdutor de onda longitudinal, de frequência de 45 kHz, seção exponencial.

Características do material solo-cimento-cinza	Valores
Maior partícula da composição do material	2,00 mm
Velocidade longitudinal média (Equação 1)	2.500 m/s
* Comprimento da onda (Equação 13)	55,50 mm
* Comprimento do campo próximo (Equação 14)	2,81 mm
Portanto, $\approx 1,7$ ondas longitudinais percorrem o corpo-de-prova na dimensão de 100 mm.	

$$* \lambda = \frac{v}{f} \quad (13)$$

$$* N = \frac{D^2 \cdot f}{4 \cdot v} \quad (14)$$

onde:

λ = comprimento da onda ultra-sônica (mm);

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

f = frequência da onda ultra-sônica (kHz);

N = comprimento do campo próximo (mm);

D = diâmetro do elemento cristal do transdutor (25 mm).

Para a execução do ensaio não-destrutivo, a onda ultra-sônica propagou-se longitudinalmente na direção de compactação da mistura solo-cimento-cinza (**Figura 23**). O cálculo da velocidade de onda ultra-sônica para cada corpo-de-prova seguiu a **Equação 1** e sua evolução em função das idades foi determinada para os corpos-de-prova durante os períodos de 2, 4 e 7 dias após a moldagem e cura dos mesmos.

O ensaio destrutivo de compressão simples (**Figura 24**) foi realizado de forma semelhante à da norma NBR 12025 (ABNT, 1990), sendo, porém, excluída a fase de imersão dos corpos-de-prova em água, antes do rompimento. 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.



Figura 23. Ensaio de ultra-som aplicado aos corpos-de-prova.



Figura 24. Ensaio de compressão simples aplicado aos corpos-de-prova.

◆ Critério de escolha das misturas de solo-cimento-cinza de casca de arroz para a caracterização físico-mecânica

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

A escolha deste critério baseia-se nos estudos de Neves (1988) sobre o uso do sistema solo-cimento em paredes monolíticas, no qual se considerou a parede como um pilar largo e aplicou-se a teoria de flambagem, obtendo-se uma função entre a relação tensão crítica / resistência do solo-cimento e a esbeltez da parede. Com os dados obtidos e considerações como tensão máxima de telhado de 0,1 MPa sobre as paredes, coeficiente de esbeltez em torno de 80 (parede com 2,80 m de pé-direito e 12 cm de espessura) e coeficiente de segurança igual a 2, a referida autora concluiu que a resistência à compressão do solo-cimento deve ser maior ou igual 1 MPa.

3º ETAPA – CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DAS MISTURAS DE SOLO – CIMENTO – CINZA DE CASCA DE ARROZ SELECIONADAS NA ETAPA DO ESTUDO DE DOSAGEM

A caracterização físico-mecânica das misturas de solo-cimento-cinza de casca de arroz foi executada conforme a programação indicada na **Tabela 15**. Justifica-se a escolha destes ensaios por representarem as solicitações usuais de paredes de vedação, assim assegurando a qualidade do material com as características exigidas para utilização em edificações.

Tabela 15. Programação de ensaios e quantidades de corpos-de-prova para cada ensaio em determinadas idades.

Ensaio	Idades dos corpos-de-prova (dias)	Nº de corpos-de-prova para cada idade (total de corpos-de-prova para cada mistura)
Compressão simples	7, 30, 60, 90, 120, 180 e 360	4 (total 28)
Absorção de água	7, 30, 60 e 90	4 (total 16)
Durabilidade	7, 30, 60, 90, 120, 180 e 360	4 (total 28)
Ultra-som	7, 30, 60, 90, 120, 180 e 360	Corpos-de-prova do ensaio de compressão simples

◆ **Moldagem e cura dos corpos-de-prova cilíndricos**

A partir das misturas de solo-cimento-cinza de casca de arroz escolhidas na etapa do estudo de dosagem, foram moldados corpos-de-prova cilíndricos de acordo com os procedimentos indicados na etapa do estudo de dosagem, ou seja, corpos-de-prova cilíndricos de \varnothing 5 cm e 10 cm de altura moldados com o auxílio de molde e soquete de compactação adaptados. A mistura dos componentes foi feita de forma análoga àquela realizada na etapa do estudo de dosagem e a quantidade de água adicionada foi aquela determinada nos ensaios de compactação.

Após a moldagem, os corpos-de-prova foram cobertos com plástico e molhados 3 vezes ao dia durante 7 dias. Depois foram deixados em ambiente de laboratório à espera do momento de serem submetidos aos ensaios de ultra-som, de compressão simples, de absorção de água e de durabilidade. A escolha destes procedimentos teve por finalidade padronizar as condições de cura e de ensaio entre os corpos-de-prova, os mini-painéis monolíticos e edificação-protótipo para posteriormente efetuarem-se correlações entre os mesmos sem a influência destas variáveis.

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, que foram obtidos nos ensaios de compactação normal de Proctor, conforme recomendações de Bueno e Vilar (1999). Os valores do GC (%) foram obtidos pela **Equação 15**.

$$GC (\%) = \left(\frac{\gamma_c}{\gamma_s} \right) \times 100 \quad (15)$$

onde:

GC = grau de compactação;

γ_c = massa específica aparente seca do corpo-de-prova (kg/m^3);

γ_s = massa específica aparente seca máxima da mistura de solo-cimento-cinza obtida pelo ensaio de compactação normal de Proctor (kg/m^3).

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

Antes da execução dos ensaios destrutivos nos corpos-de-prova cilíndricos, efetuou-se o ensaio não-destrutivo para determinar o tempo de propagação da onda ultra-sônica nos corpos-de-prova. O ensaio de ultra-som visou detectar os possíveis defeitos na estrutura física dos corpos-de-prova, além de permitir o acompanhamento do grau de estabilização física das misturas de solo-cimento-cinza ao longo do tempo.

A aplicação do ensaio de ultra-som nos corpos-de-prova procedeu-se de forma análoga àquela realizada na etapa do estudo de dosagem, com a utilização dos mesmos equipamentos e cálculo da velocidade de onda ultra-sônica de acordo com a **Equação 1**.

A evolução da velocidade de onda ultra-sônica em função das idades foi determinada para os corpos-de-prova nos períodos de 7, 30, 60, 90, 120, 180 e 360 dias.

◆ **Ensaio de compressão simples aplicado aos corpos-de-prova cilíndricos**

Os ensaios de compressão simples aplicados aos corpos-de-prova cilíndricos de misturas de solo-cimento-cinza-de-casca de arroz foram realizados nas idades de 7, 30, 60, 90, 120, 180 e 360 dias após a moldagem. Através desta estratégia, foi avaliado o desempenho mecânico das misturas ao longo do tempo e verificado o enquadramento das resistências dentro das especificações da NBR 8492 (ABNT, 1984), empregada para a utilização de solo-cimento como elemento construtivo (incluída imersão dos corpos-de-prova em água por período de 4 horas antes do rompimento).

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

◆ **Ensaio de absorção de água aplicado aos corpos-de-prova cilíndricos**

Os ensaios de absorção de água aplicados aos corpos-de-prova cilíndricos de misturas de solo-cimento-cinza-de-casca de arroz foram realizados nas idades de 7, 30, 60 e 90 dias após a moldagem. A finalidade deste procedimento foi avaliar a relação entre o ganho de resistência e a diminuição de absorção, e verificar o atendimento dos valores de absorção aos

limites especificados pela norma NBR 8492 (ABNT, 1984) para utilização de solo-cimento como elemento construtivo.

A determinação de absorção de água dos corpos-de-prova de misturas de solo-cimento-cinza de casca de arroz foi realizada de acordo com a NBR 13555 (ABNT, 1996). A diferença percentual entre a massa saturada e a massa seca do corpo-de-prova correspondeu ao valor de sua capacidade total de absorção, calculada em base seca. Os valores individuais de absorção de água de cada corpo-de-prova foram obtidos pela **Equação 16**.

$$A = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100 \quad (16)$$

onde:

A = absorção de água (%);

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

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



Figura 25. Procedimentos para os ensaios de absorção de água e durabilidade: (a) secagem dos corpos-de-prova e (b) molhamento dos corpos-de-prova.

◆ Ensaio de durabilidade por molhamento e secagem aplicado aos corpos-de-prova cilíndricos

O ensaio de durabilidade foi realizado de acordo com a norma NBR 13554 (ABNT, 1996), sendo executados 12 ciclos alternados de molhamento e secagem e eliminada a etapa de escovação (**Figura 25**), pois se considerou que as solicitações de abrasão superficial em paredes de alvenaria são menos severas que as previstas em outros usos do solo-cimento

(estradas, por exemplo). Este ensaio permitiu a determinação de perda de massa produzida por ciclos de molhamento e secagem de corpos-de-prova cilíndricos de solo-cimento-cinza.

O ensaio de durabilidade aplicado aos corpos-de-prova cilíndricos de misturas de solo-cimento-cinza-de-casca de arroz foram realizados nas idades de 7, 30, 60, 90, 120, 180 e 360 dias após a moldagem. Através deste procedimento foi avaliada a relação entre o ganho de resistência e a perda de massa, e analisados os limites de perda de massa para a utilização como componentes construtivos impostos pela ABCP (1980). Os valores individuais de perda de massa de cada corpo-de-prova foram obtidos pela **Equação 17**.

$$P = \frac{M_{inicial} - M_{final}}{M_{inicial}} \times 100 \quad (17)$$

onde:

P = perda de massa (%);

$M_{inicial}$ = massa do corpo-de-prova seco em estufa antes da aplicação dos ciclos de molhamento e secagem (g);

M_{final} = massa do corpo-de-prova seco em estufa após aplicação dos ciclos de molhamento e secagem (g).

Para complementar a interpretação dos resultados obtidos no ensaio de durabilidade, ao final dos ciclos de molhamento e secagem, foi aplicado o ensaio mecânico de compressão simples, sendo adotados procedimentos semelhantes aos da etapa de caracterização físico-mecânica. Assim, foram determinados os valores de resistência à compressão simples dos corpos-de-prova após os ciclos, sendo, então, utilizados como critérios de avaliação da durabilidade a satisfação dos seguintes parâmetros: resistência maior ou igual a 1 MPa e perda de massa menor ou igual a 10%, conforme recomendações de Neves (1988).

4º 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 material solo-cimento-cinza.

Para a etapa de estudo de dosagem foi realizada uma análise de variância referente aos efeitos do tipo de cinza, do tipo de combinação solo-cinza e do teor de cimento sobre as variáveis: massa específica aparente seca máxima, umidade ótima e resistência à compressão simples e ultra-som.

Para a etapa de caracterização físico-mecânica dos corpos-de-prova foi realizada uma análise referente aos efeitos do tipo de mistura solo-cimento-cinza e das diferentes idades sobre as variáveis: resistência à compressão simples, capacidade de absorção de água, velocidade de onda ultra-sônica e perda de massa.

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-cimento-cinza foi igual a três. As médias das variáveis foram calculadas com três repetições, sendo descartadas as repetições cujos valores foram discrepantes.

5º ETAPA – CONSTRUÇÃO DE EDIFICAÇÃO-PROTÓTIPO COM O SISTEMA DE PAREDES MONOLÍTICAS DE SOLO-CIMENTO–CINZA DE CASCA DE ARROZ

A partir de análises das características físico-mecânicas das diferentes misturas de solo-cimento-cinza de casca de arroz, foi selecionado e definido, para fins de construção de paredes monolíticas, o tratamento de solo-cimento-cinza de casca de arroz de melhor desempenho frente aos esforços mecânicos, durabilidade e absorção de água. Portanto, definido o melhor tratamento de solo-cimento-cinza, o mesmo foi utilizado para a construção de uma edificação-protótipo através do sistema construtivo de paredes monolíticas.

A escolha desse sistema baseou-se nos diversos relatos, pesquisas e boletins técnicos sobre as construções de moradias populares com diferentes tecnologias apropriadas, sendo destacada a potencialidade da técnica construtiva de paredes monolíticas de solo-cimento por apresentar fácil assimilação do usuário, dispensa do uso de mão-de-obra qualificada, baixo consumo de produtos industrializados e possibilidade de edificar por partes, conforme disponibilidade de recursos e necessidade de crescimento da edificação.

A construção da edificação-protótipo foi realizada em área livre do Campo Experimental da FEAGRI/UNICAMP, na escala 1:1 e sem a influência de sombreamento natural (**Figura 26 e 27**). Justifica-se a construção deste protótipo por representar as condições e solicitações de uma edificação, assim como uma ação prática para verificar a viabilidade técnica e econômica do uso da mistura solo-cimento-cinza como componente construtivo.

O protótipo foi utilizado pelo período de um ano e quatro meses para coleta de dados e realização dos ensaios, com possibilidade de posterior utilização para outros fins (depósito, por exemplo). O projeto do protótipo (**Figura 28 e 29**) foi baseado em estudos de Dumke (2002) sobre as diferentes tipologias e sistemas construtivos de moradias populares.

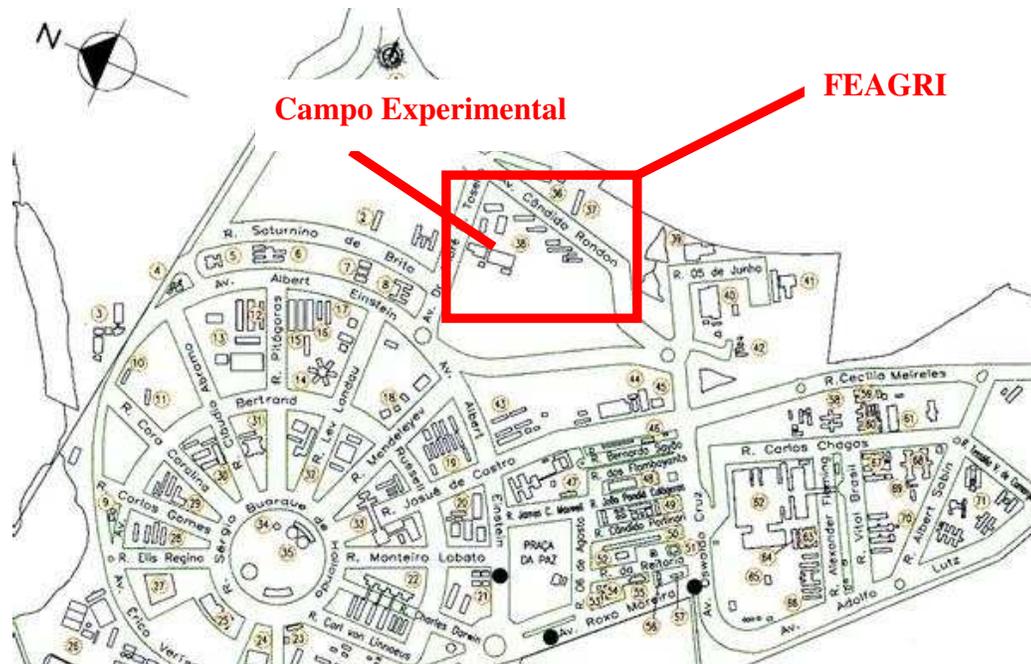


Figura 26. Mapa da UNICAMP – localização da edificação protótipo.



(a)



(b)

Figura 27. (a) Terreno livre do Campo experimental e (b) locação da obra no terreno.

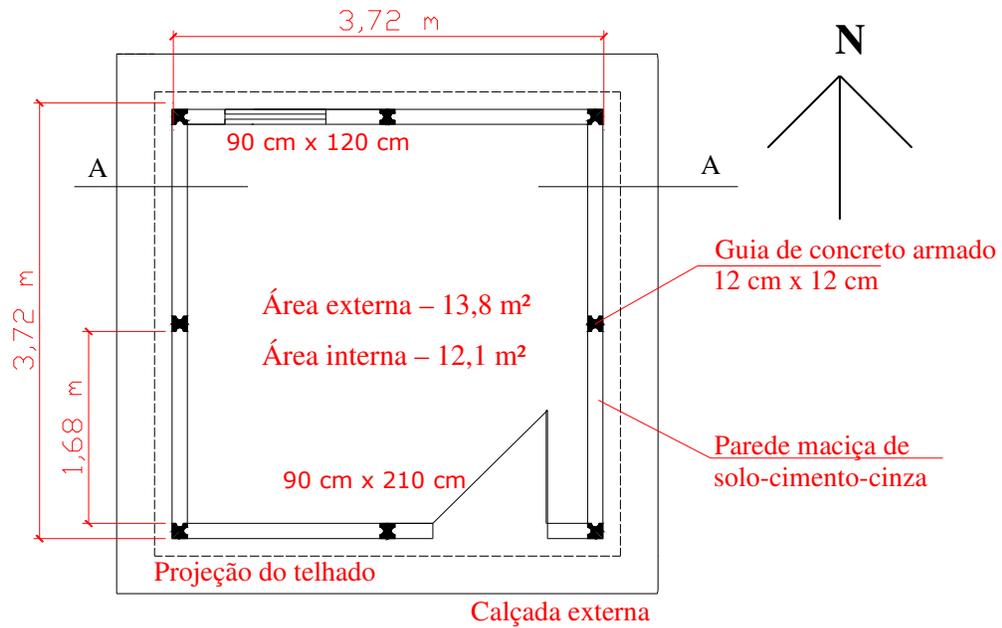


Figura 28. Planta sem escala da edificação-protótipo.

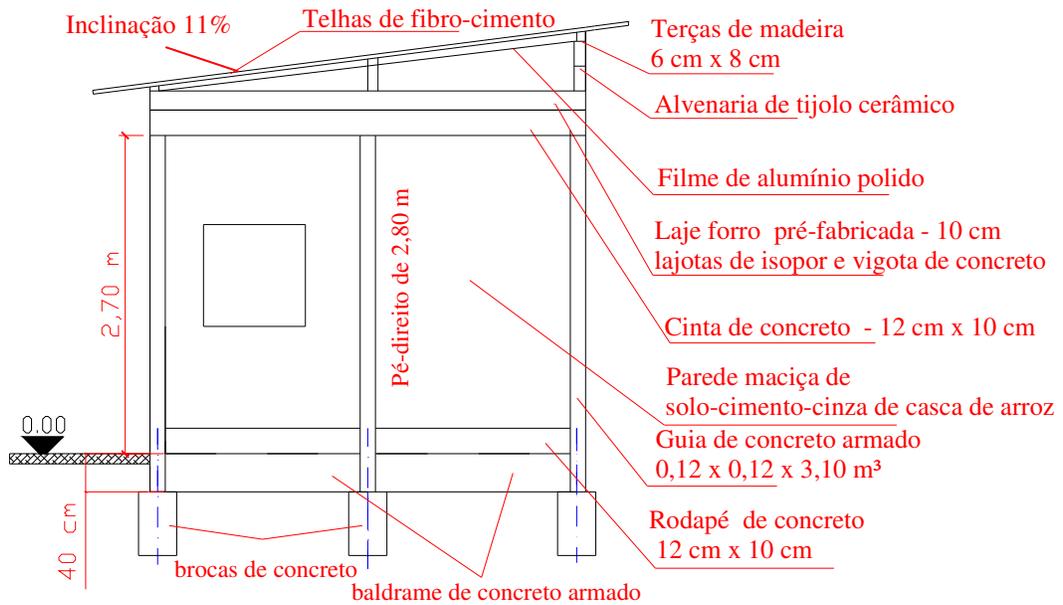


Figura 29. Corte AA sem escala da edificação-protótipo.

O processo construtivo observou as recomendações de Velloso (1981), Neves (1981) e CEPED (1984). Dessa maneira, a construção do protótipo seguiu as seguintes etapas:

- Confeção de fundação com brocas de concreto (ϕ 20 cm e 60 cm de profundidade) e baldrame de travamento de concreto armado (20 cm de largura x 40 cm de altura), sendo fixados nesta base oito pilares pré-fabricados de concreto armado (12 cm x 12 cm x 310 cm com 40 cm embutidos no baldrame), os quais foram utilizados como guias fixas e seus rebaixos como amarração das paredes monolíticas. Para evitar possíveis infiltrações do solo para as paredes monolíticas, foi executada cinta inferior de concreto (rodapé de 12 cm de largura x 10 cm de altura) (**Figura 30**);
- O traço utilizado para confecção do concreto armado para todas as etapas da construção foi de 1:3:2 (cimento : pedrisco : areia média) em volume; relação água / cimento de 0,64; armadura composta por 4 ferros de 6,3 mm de bitola amarrados por estribos de 5 mm de bitola a cada 30 cm, conforme recomendações de boletim técnico para construção rural (ABCP, 1989).
- Levantamento das paredes monolíticas de 12 cm de espessura, confeccionadas de forma análoga às descrições construtivas de Myrrha (2003), ou seja, compactação da mistura de solo-cimento-cinza na umidade ótima dentro de fôrmas deslizantes de madeira compensada plastificada (1,70 x 0,90 m²) estruturadas com sarrafos e parafusos trespassantes. A compactação era finalizada quando o soquete de madeira (2 kg) não deixava mais marcas sobre a superfície compactada e antes do início da execução da camada seguinte, foram feitas ranhuras sobre a superfície superior da camada anterior, visando o aumento da aderência entre as camadas. As paredes possuem juntas verticais (guia de concreto fixa) a cada 1,68 m para evitar a formação de trincas (**Figura 31 e 32**);
- Execução de cura das paredes maciças conforme os procedimentos utilizados nos corpos-de-prova cilíndricos, ou seja, as paredes foram recobertas com plástico e molhadas 3 vezes ao dia, durante uma semana (**Figura 33**). Para controle tecnológico da pesquisa, durante a moldagem dos painéis, procurou-se atingir bom grau de compactação (95% a 105%). Assim, foi determinado, para cada painel, o teor de umidade e a massa aparente seca a partir da retirada, pesagem e secagem de amostra de material compactado in situ e cálculo dos valores do GC (%) pela **Equação 15**;

- Colocação das esquadrias da janela (90 x 120 cm², peitoril 1,00 m) e da porta (90 x 210 cm²) simultaneamente à execução das paredes monolíticas (**Figura 34**);
- Execução de cinta superior em concreto armado (12 cm de largura x 10 cm de altura) para amarração das guias de concreto armado e posterior recebimento da laje pré-moldada (laje + camada de concreto = 13,5 cm). A utilização desta cobertura foi para reduzir a condução de calor para o ambiente interno do protótipo, advindo do telhado (**Figura 35**);
- Construção de ático ventilado por aberturas em trama de tijolos cerâmicos nos oitões das faces norte / sul e caibramento de sustentação de telhado, sendo fixadas telhas de fibrocimento pintadas externamente com tinta impermeabilizante da cor branca (beiral de 20 cm). Junto à estrutura de madeira foi colocado um filme de alumínio polido (isolante térmico) para reduzir a influência da superfície mais exposta à radiação solar (**Figura 36**).

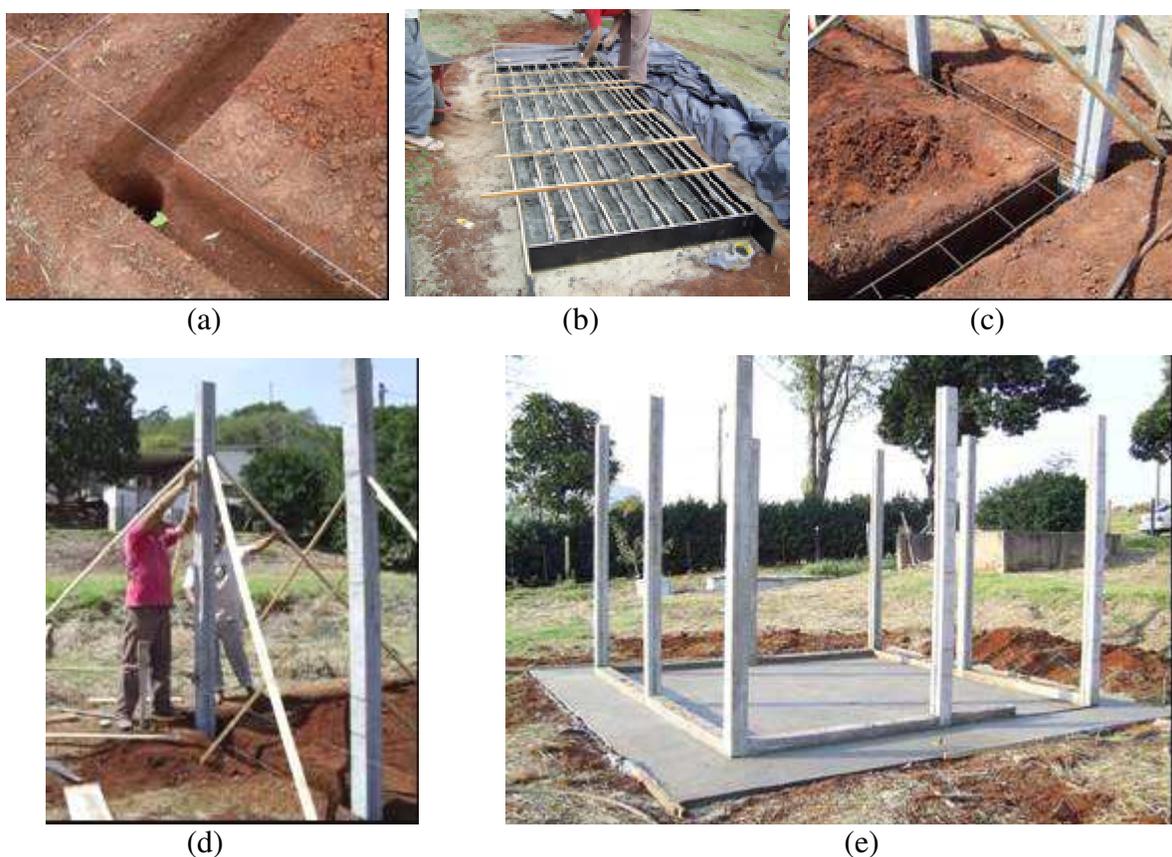


Figura 30. (a) Escavação para fundação, (b) confecção de pilares ou guias de concreto, (c, d) fixação das guias de concreto, (e) estrutura final para levantamento das paredes monolíticas



Figura 31. (a, b, c) Etapas para mistura manual de solo-cimento-cinza-água.

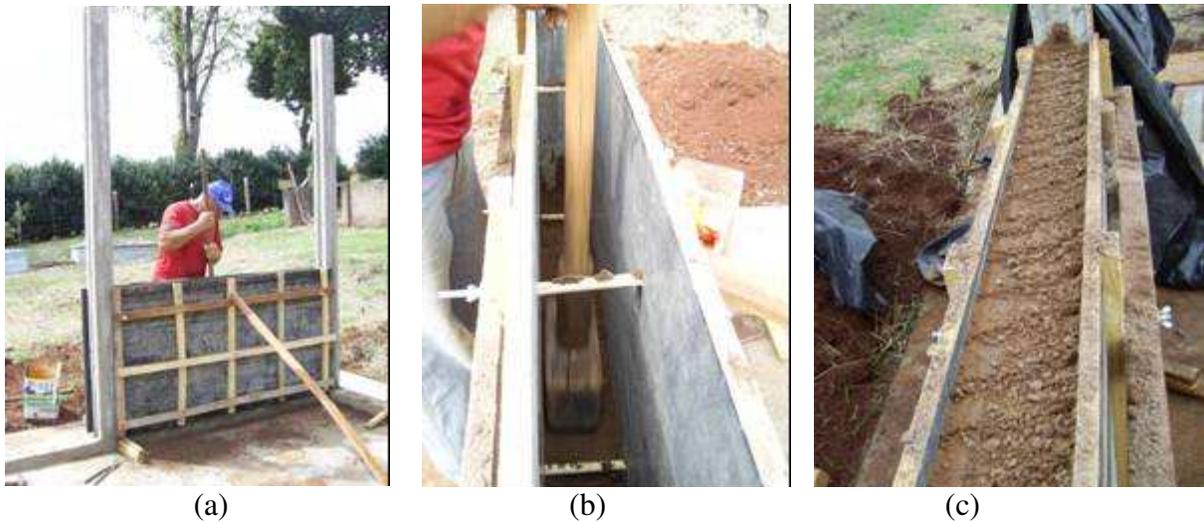


Figura 32. (a) Conjunto de fôrmas, (b) compactação da mistura com soquete, (c) ranhuras executadas ao final da compactação.



Figura 33. (a) Cura das paredes, (b) evolução do levantamento das paredes monolíticas.



(a)



(b)

Figura 34. Colocação das esquadrias: (a) da porta, (b) da janela.



(a)



(b)

Figura 35. (a) Armadura da cinta superior e da laje pré-fabricada, (b) concretagem da laje.



(a)



(b)

Figura 36. (a) Ático ventilado, (b) cobertura com telhas de fibro-cimento.

O acabamento final da edificação-protótipo foi com piso interno em concreto desempenado e paredes monolíticas de solo-cimento-cinza sem pintura interna e externa. Tal procedimento foi adotado para eliminar a influência de revestimentos na avaliação de desempenho do material solo-cimento-cinza.

6º ETAPA – DESEMPENHO DAS PAREDES MONOLÍTICAS DE SOLO-CIMENTO–CINZA DE CASCA DE ARROZ DA EDIFICAÇÃO-PROTÓTIPO

A verificação do desempenho das paredes monolíticas da edificação-protótipo foi realizada a partir de 120 dias do término da sua construção, idade na qual o material solo-cimento-cinza apresentou tendência à estabilização físico-mecânica.

A avaliação do desempenho das paredes monolíticas de solo-cimento-cinza da edificação-protótipo seguiu as disposições do Projeto de Norma 02:136.01.004 (ABNT, 2004) – Desempenho de edifícios habitacionais de até cinco pavimentos, sendo avaliados os seguintes requisitos:

- Desempenho estrutural: resistência à compressão, deformação e módulo de elasticidade;
- Desempenho térmico: transmitância térmica, capacidade térmica e atraso térmico da parede, e temperatura e umidade no interior do protótipo;
- Desempenho físico: micro-caracterização, permeabilidade à água;
- Durabilidade à condição de exposição do protótipo;
- Custo-benefício da construção da parede monolítica de solo-cimento-cinza.

◆ Desempenho estrutural - resistência à compressão e deformabilidade

Para a verificação da estabilidade e resistência mecânica das paredes monolíticas de solo-cimento-cinza da edificação-protótipo foi utilizado o critério do estado limite último, sendo utilizado como método de avaliação o ensaio destrutivo de mini-painéis monolíticos para o traçado do diagrama tensão x deformação, conforme previsto no Projeto de Norma 02:136.01.004 (ABNT, 2004) – Desempenho de edifícios habitacionais de até cinco pavimentos.

Portanto, para a execução da avaliação do desempenho estrutural das paredes monolíticas de solo-cimento-cinza, foram confeccionados mini-painéis monolíticos com dimensões de 30 x 30 x 12 cm³ (largura x comprimento x espessura). Tais dimensões foram adotadas para seguir a proporção 1:2 e, por fim, construir um trecho representativo da parede real. Nas pesquisas de Ferreira (2003) e Grande (2003) foi verificado a eficiência da caracterização mecânica de prismas de tijolos de solo-cimento, os quais apresentaram as dimensões de 23 x 23 x 11 cm³ (largura x altura x espessura).

Os mini-painéis monolíticos de solo-cimento-cinza foram confeccionados juntamente com a construção da edificação-protótipo (**Figuras 14 e 15**), utilizando-se do canteiro e da mistura de solo-cimento-cinza-água da obra, e dos procedimentos executados durante a confecção e cura das paredes monolíticas do protótipo. Depois os mesmos foram deixados em ambiente de laboratório à espera do momento de serem submetidos aos ensaios.

Foram moldados 6 mini-painéis monolíticos de solo-cimento-cinza de casca de arroz e aplicado o ensaio de compressão simples, nas idades de 180 e 360 dias, sendo utilizados, para cada idade, 3 mini-painéis.

O ensaio de compressão simples nos mini-painéis monolíticos foi realizado conforme disposições da norma NBR 8949 (ABNT, 1985) e NBR 8522 (ABNT, 2003), sendo imersos em água por 4 horas antes do rompimento. Este ensaio consistiu, resumidamente, na utilização da máquina universal para aplicação de 3 ciclos de carregamento à tensão de aproximadamente 40% da resistência à compressão do material solo-cimento-cinza e descarregamento até o nível de tensão de 0,5 MPa; simultaneamente executaram-se leituras dos encurtamentos dos mini-painéis através de dois extensômetros instalados nas suas laterais e centralizados longitudinalmente – Eixo 3 (**Figura 37**). Após a realização dos ciclos de carregamento e descarregamento, foram retirados os medidores de deformação e aplicadas cargas até o rompimento dos mini-painéis. Os cálculos do módulo de ruptura e do módulo de elasticidade longitudinal (módulo de deformação tangente inicial) de cada mini-painel monolítico foram realizados de acordo com as prescrições da NBR 8522 (ABNT, 2003).

Os resultados obtidos indicaram parâmetros de resistência e deformabilidade dos mini-painéis, os quais foram verificados quanto ao cumprimento de resistência mínima para paredes de solo-cimento, conforme diretrizes do CEPED (1984) e do Projeto de Norma 02:136.01.004 - Desempenho de edifícios habitacionais de até cinco pavimentos.

Estes resultados foram contrastados com os resultados dos ensaios de corpos-de-prova cilíndricos, e, como complemento da avaliação do desempenho estrutural do material solo-cimento-cinza na construção de paredes monolíticas, foi utilizado o critério de comparação com o uso de painel de solo-cimento e observado o aparecimento de possíveis fissuras e deformações estruturais das paredes monolíticas do protótipo.



Figura 37. Ensaio de compressão simples dos mini-painéis e localização dos extensômetros.

◆ Desempenho estrutural – ultra-som

Antes da aplicação do ensaio destrutivo nos mini-painéis monolíticos, foram realizadas leituras dos tempos de propagação da onda ultra-sônica dos mesmos. Para realização do ensaio não-destrutivo utilizou-se o aparelho de ultra-som Panametrics, e transdutores de contato de onda longitudinal e de onda transversal, de frequência de 100 kHz, de face plana (**Figura 38**), os quais mostraram-se adequados para as medições em mini-painéis de 30 x 30 x 12 cm³. A escolha destes transdutores se baseou no controle efetivo de fatores que afetam os mecanismos de propagação de ondas ultra-sônicas, tais como:

- Impedância acústica e efeito parede – para evitar a reflexão e refração da onda ultra-sônica na interface de dois meios de impedâncias diferentes foi utilizado o acoplante gel. Também foi anulado o fenômeno de efeito de parede devido a menor dimensão do mini-painel ser algumas vezes maior que o diâmetro do transdutor (**Tabela 16**).

- Estrutura anatômica e Campo acústico – para evitar a difração e dispersão da onda ultra-sônica devido às dimensões das partículas do material solo-cimento-cinza, e para permitir que várias ondas completas percorressem o mini-painel e não ocorresse a superposição entre as ondas ultra-sônicas na região do campo próximo, optou-se pela utilização do transdutor de frequência de 100 kHz (**Tabela 16**).

Tabela 16. Valores de ensaio preliminar para a confirmação do uso do transdutor de onda longitudinal, de frequência de 100 kHz, seção plana.

Características do material solo-cimento-cinza	Valores
Maior partícula da composição do material	2,00 mm
Velocidade longitudinal média (Equação 1)	2500 m/s
Comprimento da onda longitudinal (Equação 13)	25,00 mm
Comprimento do campo próximo (Equação 14)	10,24 mm
Portanto, ≈ 11 ondas longitudinais percorrem o mini-painel na dimensão de 300 mm.	

* diâmetro do elemento cristal do transdutor = 32 mm, diâmetro do transdutor = 44 mm.

O painel de solo-cimento-cinza tem por finalidade atender às solicitações usuais de vedações, portanto, pode-se considerá-lo como um material que sofrerá deformações significativas em três planos de simetria (eixos perpendiculares entre si e paralelos às normais àqueles planos). O painel foi considerado ortotrópico, respondendo diferentemente em cada direção (eixo) da **Figura 38**, visto que existe uma forte relação entre o desempenho mecânico e a direção de compactação e de aplicação de carregamentos no material.

Assim, foram realizadas leitura nas idades de 7, 180 e 360 dias, e calculadas para cada painel as referentes velocidades de onda ultra-sônica longitudinal (V_{11} , V_{22} e V_{33}) e de onda ultra-sônica transversal (V_{12} , V_{21} , V_{13} , V_{31} , V_{23} e V_{32}), de acordo com a **Equação 1**. A **Figura 38** mostra os diferentes eixos de leitura da onda ultra-sônica nos mini-painéis.

A teoria de propagação de ondas ultra-sônicas em sólido ortogonalmente anisotrópico (ortotrópico) relaciona tensão à deformação por meio da matriz das componentes elásticas do material, conhecida como matriz de rigidez [C] (**Figura 39**). Ao inverter tal matriz tem-se a matriz de flexibilidade dos materiais [S] (**Figura 40**), que é função dos parâmetros de engenharia conhecidos como módulo de elasticidade longitudinal (E), módulo de elasticidade transversal (G) e coeficiente de Poisson (ν) (BUCUR, 2006).



(a)



(b)



(c)

Figura 38. Leituras do tempo de propagação da onda nos mini-painéis: (a) Eixo 1 – largura, (b) Eixo 2 – espessura, (c) Eixo 3 – comprimento (direção de compactação).

A partir dos dados de velocidade de onda ultra-sônica e massa específica aparente seca do material solo-cimento-cinza foram calculadas as respectivas constantes de rigidez através da **Equação 2** e estruturada a matriz de rigidez (**Figura 39**). Segundo Azevedo Jr. (2002), as constantes de rigidez C_{11} , C_{22} e C_{33} estão relacionadas, respectivamente, com as velocidades longitudinais V_{11} , V_{22} e V_{33} . As constantes C_{44} , C_{55} e C_{66} estão relacionadas, respectivamente, com as velocidades transversais $V_{23} = V_{32}$, $V_{13} = V_{31}$, $V_{12} = V_{21}$. Já as constantes C_{12} , C_{21} , C_{23} , C_{32} , C_{31} e C_{13} estão relacionados com as velocidades transversais angulares (cortes 15° , 30° ou 60° no corpo-de-prova para aplicação do ensaio de ultra-som).

Pela inversão matemática da matriz de rigidez $[C]$, determinou-se a matriz de flexibilidade $[S]$, que permitiu identificar os parâmetros de engenharia módulo de elasticidade longitudinal e coeficiente de Poisson. Estes resultados foram contrastados com os resultados dos ensaios destrutivos dos mini-painéis.

$$[C]_{\text{Ortotrópico}} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix}$$

Figura 39. Matriz de rigidez de um sólido ortotrópico.

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_2} & -\frac{\nu_{13}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{31}}{E_1} & -\frac{\nu_{32}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix}$$

Figura 40. Matriz de flexibilidade de um sólido ortotrópico.

◆ Desempenho térmico – método simplificado

O desempenho térmico das paredes monolíticas de solo-cimento-cinza foi avaliado pelo método simplificado através dos parâmetros de resistência térmica total, transmitância térmica, capacidade térmica, atraso térmico e fator de calor solar. Estes parâmetros foram determinados conforme as especificações da NBR 15220 (ABNT, 2005), sendo utilizados como base desses cálculos os valores da condutividade térmica e do calor específico da mistura solo-cimento-cinza e as **Equações 3 a 11** descritas na revisão bibliográfica.

Para a determinação da condutividade térmica foram utilizados corpos-de-prova (placas) com espessura de 50 mm. Já a largura e o comprimento foram escolhidos em função das dimensões das placas quente e fria do equipamento experimental do IPT. Tais placas foram confeccionadas no LME/FEAGRI com a utilização de equipamento de moldagem de mini-painéis monolíticos e posterior corte e acabamento superficial para a obtenção das placas (**Figura 41**) com as referidas dimensões exigidas pelo Laboratório Conforto Ambiental/ IPT.

Foram confeccionadas duas placas para o ensaio de condutividade térmica, uma para a placa quente e outra para a placa fria, com a mesma mistura de solo-cimento-cinza utilizada na construção do protótipo, e compactadas e curadas de forma análoga aos mini-painéis de solo-cimento-cinza. As referidas placas foram ensaiadas pelo IPT, na idade de 180 dias (**Figura 42**), sendo a condutividade térmica calculada conforme prescrições da “*ASTM C177/2004 – Standard test method for steady state heat flux measurements and thermal transmission properties by means of the guarded-hot-plate apparatus*”.



Figura 41. Placas solo-cimento-cinza.



Figura 42. Equipamento para ensaio de condutividade.

Para a determinação do calor específico foram utilizados corpos-de-prova de solo-cimento-cinza, na idade de 180 dias, com as seguintes características geométricas: 24 mm de diâmetro x 49 mm de altura com um furo central de 4,5 mm de diâmetro e 20 mm de profundidade. Para tal, três corpos-de-prova cilíndricos com as referidas dimensões foram retirados das placas utilizadas no ensaio de condutividade térmica. O ensaio para determinação do calor específico foi realizado pelo IPT e de acordo com as diretrizes da norma “*ASTM 351/92b – Standard test method for mean specific heat of thermal insulation*”, sendo utilizado o termômetro Beckman – TER 15”.

O critério de avaliação de desempenho térmico das paredes monolíticas de solo-cimento-cinza foi o enquadramento das suas características térmicas dentro dos limites admissíveis recomendados pela norma NBR 15220 (ABNT, 2005) – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para adequação da edificação ao clima local, assim como a verificação dentro dos limites recomendados pelo Projeto de Norma 02:136.01.004 - Desempenho de edifícios habitacionais de até cinco pavimentos.

◆ Desempenho térmico – método de desempenho (detalhado)

O desempenho térmico das paredes monolíticas de solo-cimento-cinza também foi avaliado utilizando-se o método de desempenho através de medições térmicas na edificação-protótipo. Para realizar tais medições foi utilizado um sistema de aquisição de dados composto por duas unidades básicas que fizeram a coleta automática e o armazenamento dos dados meteorológicos e das temperaturas e umidades do interior da edificação-protótipo.

As variáveis ambientais (temperatura do ar externa, umidade relativa externa, direção dos ventos, velocidade do vento, radiação solar e índice pluviométrico) foram fornecidas pelo Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura - CEPAGRI, o qual mantém uma estação meteorológica localizada ao lado (50 m de distância) da edificação-protótipo (**Figura 43**). A monitoração do microclima local é de grande importância para se estabelecer relações comparativas com as leituras dos sensores instalados nos protótipos.

As variáveis térmicas relativas ao protótipo foram coletadas através de dois sensores - registradores automáticos (data logger CR 10X - measurement and control system), os quais ficaram presos a um tripé localizado no centro do protótipo, a 1,30 m de altura e previamente programados para efetuar medições com intervalos de 10 em 10 minutos. Um sensor mediu a temperatura do ar e a umidade relativa do interior do protótipo (TBS); o outro foi conectado a um termopar tipo T que coletou a temperatura superficial interna da parede na fachada oeste (**Figura 44**). A orientação norte e oeste são as mais expostas à radiação solar incidente, dentre as superfícies verticais. A primeira recebe o maior número de horas de insolação, e a segunda embora seja simétrica à exposição leste, recebe o sol da tarde quando as temperaturas do ar externo estão mais elevadas do que as registradas nos horários da manhã.

Durante tais medições foram desconsideradas as variáveis ventilação e ganhos internos. Quanto à ventilação, a abertura da porta encontrou-se vedada por compensado de madeira e a abertura da janela vedada por painel removível de tijolos de solo-cimento (semelhante resistência térmica ao valor encontrado para o componente solo-cimento-cinza) (**Figura 45 e 46**).



Figura 43. Estação meteorológica CEPAGRI.



Figura 44. Medições térmicas no protótipo.



Figura 45. Abertura da janela vedada.



Figura 46. Abertura da porta vedada.

Quanto à definição do período de realização das medições foram adotados os meses de janeiro e fevereiro para corresponder ao período de maior desconforto por calor, e o mês de julho por corresponder ao período de maior desconforto por frio, em conformidade com as séries históricas dos dados climáticos para a região de Campinas (período de 1998 a 2005, do Instituto Agrônomo de Campinas – IAC – **Anexo 1**).

Ressalta-se, segundo Gutierrez et al. (2005), que existe a predominância do calor sobre o frio, sendo que os meses mais quentes são janeiro e fevereiro com médias máximas

entre 29,7 a 29,9 °C, e os mais frios são junho e julho com médias mínimas entre 12,4 a 12,5 °C. A umidade relativa média do ar é de 76% nos meses de dezembro a junho, e de 67% de julho a novembro. A época das chuvas ocorre nos meses de dezembro a março, sendo janeiro o mais chuvoso (252,4 mm). Os ventos predominantes são de sudeste, e as velocidades na maioria dos meses próximas a 2,0 m/s, exceto em setembro e outubro, com médias de 3,3 m/s.

Portanto, os períodos de medições foram de 19 dias (456 horas) do mês de janeiro e fevereiro de 2007 devido à finalização da construção do protótipo se dar no mês de setembro de 2006, e de 20 dias (480 horas) do mês de julho e agosto de 2007, sendo coletados dados climáticos e variáveis térmicas do protótipo no período de 19 de janeiro a 06 de fevereiro, e de 17 de julho a 05 de agosto.

Na configuração do sistema de aquisição de dados, não foi considerado o horário de verão, mantendo o horário legal como padrão durante todo o período de medição. Segundo Gutierrez et al. (2005), para Campinas, a variação é pequena entre o tempo solar verdadeiro (TSV) e o horário do tempo legal, o que não altera significativamente as observações realizadas no horário legal.

O critério de avaliação de desempenho térmico das paredes monolíticas de solo-cimento-cinza foi a relação entre o comportamento térmico do protótipo e as estações do ano e, por fim, a verificação do enquadramento das temperaturas interiores dentro dos limites admissíveis recomendados pelo Projeto de Norma 02:136.01.002 (ABNT, 2004) - Desempenho de edifícios habitacionais de até cinco pavimentos, o qual estabelece valores máximos diários da temperatura do ar para verão e valores mínimos diários da temperatura do ar para inverno para os respectivos dias típicos (**Figura 7**).

◆ **Desempenho físico-químico - análises de micro-caracterização**

A fim de se obter informações para um estudo mais aprofundado da estrutura físico-química do material formado solo-cimento-cinza de casca de arroz, foram utilizadas técnicas analíticas de caracterização de materiais em complemento aos testes físico-mecânicos.

Para tal, foram coletadas amostras dos corpos-de-prova dos mini-painéis monolíticos logo após sua ruptura (aos 180 dias de idade) e levados para o laboratório da Central Analítica do Instituto de Química da UNICAMP para realização dos seguintes ensaios:

- Difração de raios-X (DRX): foi utilizado para identificação mineralógica dos compostos formados no material solo-cimento-cinza de casca de arroz e no solo-cimento;
- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV): permitiu evidenciar a morfologia dos compostos hidratados (estrutura física) no material solo-cimento-cinza e no solo-cimento.

◆ Desempenho físico - estanqueidade à água

Para a verificação da estanqueidade à água das paredes monolíticas de solo-cimento-cinza da edificação-protótipo foi utilizado o parâmetro de permeabilidade à água, sendo o critério de avaliação do desempenho físico da parede monolítica de solo-cimento-cinza a comparação com os coeficientes de permeabilidades de solos considerados impermeáveis.

Para a determinação da permeabilidade à água utilizou-se corpo-de-prova cilíndrico de solo-cimento-cinza, na idade de 180 dias, com as seguintes características geométricas: 50 mm de diâmetro x 120 mm de altura. Tal corpo-de-prova foi retirado das placas utilizadas no ensaio de condutividade térmica, e seguidos os procedimentos de execução do ensaio e de cálculos do coeficiente de permeabilidade dispostos na norma NBR 13292 (ABNT, 1995) (Figura 47).



(a)



(b)

Figura 47. Corpo-de-prova de solo-cimento-cinza no ensaio de permeabilidade à água.

◆ **Durabilidade às condições de exposição**

Para a avaliação da capacidade funcional e das características estéticas das paredes monolíticas de solo-cimento-cinza da edificação-protótipo foi utilizado o requisito durabilidade das paredes às condições de exposição (envelhecimento natural), a qual procedeu-se por verificação de possíveis deformações não-estruturais, fissurações, falhas, manchas, descolorações nas paredes, em função da exposição às ações climáticas e ações de cargas permanentes ou variáveis que ocorreram durante o período de 1 ano e 4 meses de observação da edificação-protótipo.

Como critério de avaliação da durabilidade foram utilizados os limites de deformações e de áreas de manchas de umidade estabelecidos pelo Projeto de Norma 02:136.01.004 (ABNT, 2004) - Desempenho de edifícios habitacionais de até cinco pavimentos.

◆ **Custo-benefício da construção de parede monolítica de solo-cimento-cinza**

Para avaliar o custo-benefício da utilização do sistema construtivo de paredes monolíticas de solo-cimento-cinza de casca de arroz na construção de vedações não-portantes foi analisado o desempenho do processo produtivo das paredes monolíticas. Para tal, foi realizado acompanhamento diário da construção da edificação-protótipo verificando montagem das fôrmas; dosagem da mistura; compactação; os ensaios de controle tecnológico; desfôrma; acabamento, materiais e equipamentos utilizados; bem como a mão-de-obra (não especializada) necessária e o tempo para execução da obra. Desta forma permitiu-se o levantamento e análise dos custos referentes à confecção das paredes monolíticas considerando as condições construtivas e regionais encontradas durante o desenvolvimento da pesquisa, bem como o custo-benefício em relação ao componente construtivo alvenaria cerâmica utilizados em vedações de habitações populares.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

5.1.1. MATERIAL CINZA DE CASCA DE ARROZ

Nas **Tabelas 17 e 18** estão apresentados os resultados referentes à massa unitária (condição solta), ao teor de umidade e à distribuição em tamanho do material cinza de casca de arroz nas diferentes condições: cinza residual coletada no queimador (CCA-R), cinza após processo de peneiramento (CCA-A) e cinza após peneiramento e retirada dos finos (CCA-B).

Tabela 17. Características físicas da cinza de casca de arroz. *

Condição da cinza	Teor de umidade (%)	Massa unitária (g/cm ³)
CCA-R (cinza direto do queimador)	1,36	0,14
CCA-A (cinza passante # 0,60 mm)	1,00	0,26
CCA-B (cinza entre # 0,60 e # 0,06 mm)	1,00	0,20

* Resultados referentes à média de três repetições.

Tabela 18. Distribuição em tamanho das cinzas a partir de 100,00 g do material. *

Distribuição em tamanho (%)	CCA-R	CCA-A	CCA-B
Areia grossa (0,60 – 2,00 mm)	31,30	0,00	0,00
Areia média (0,20 – 0,60 mm)	47,91	49,72	67,52
Areia fina (0,06 – 0,20 mm)	17,50	39,45	32,48
Fundo (< 0,06 mm)	3,29	10,83	0,00
Finura - porcentagem que passa na peneira n ° 200 (0,075 mm) – finos	3,87	12,29	0,00

* Resultados referentes à média de três repetições.

A queima da casca de arroz nos fornos da beneficiadora e a forma de armazenamento da cinza de casca de arroz no laboratório da FEAGRI/UNICAMP resultaram no controle efetivo do teor de umidade do material, visto que independentemente da condição, as cinzas mantiveram baixo teor de umidade. Quanto à massa unitária na condição solta, a cinza CCA-R

caracterizou-se como um material leve, volumoso, de coloração desuniforme devido à composição por partículas das cores preta e branca; e com presença de casca de arroz, não calcinada durante o processo da queima. A partir da passagem da cinza CCA-R na peneira (processo de peneiramento), a mesma tornou-se um material pulverulento (**Figura 21b**), de coloração uniforme (acinzentada) e menos volumosa, e conseqüentemente apresentou-se com maior massa unitária. A retirada da casca de arroz não-queimada e o processo de peneiramento tornaram o material cinza de casca de arroz adequado para uma melhor homogeneização aos materiais solo e cimento.

Com relação à distribuição em tamanho da cinza de casca de arroz, a cinza CCA-R apresentou-se uniforme, estando 79% da sua massa retidos entre as peneiras de 2,00 mm e 0,60 mm, além da pouca presença de finos. Entretanto, após processo de peneiramento (a cinza tornou-se pulverulenta), a cinza CCA-A apresentou-se com aproximadamente 88% da sua massa retida entre as peneiras de 0,60 mm e 0,06 mm de abertura de malha e com presença de finos. Já a cinza CCA-B, da qual foram eliminados os finos, apresentou-se com 100% da sua massa compreendida entre as peneiras de 0,60 mm e 0,06 mm (**Tabela 18**). Independentemente da condição das cinzas estudadas, os valores de finura situaram-se abaixo de 13%, motivo pelo qual tais cinzas não se enquadraram como cinzas com atividade pozolânica, visto que, para considerar que uma cinza vegetal tenha pozolanicidade, recomenda-se que a totalidade das suas partículas tenha tamanho inferior a 0,035 mm (John et al, 2003).

A análise química quantitativa da cinza de casca de arroz (**Tabela 19**) revelou um percentual de SiO₂ de 96,10%, tendo teores de impurezas em quantidades inferiores a 2%. Segundo Gava (1999), a composição química da cinza de casca de arroz varia em função do solo em que o arroz é plantado, dos tipos e teores de fertilizantes utilizados, bem como da variedade de arroz propriamente dito e é independente do tipo e do tempo de queima das cascas de arroz. Sendo assim, a cinza estudada apresentou composição química semelhante às das cinzas de diferentes procedências, diferindo apenas, ainda que não significativamente, dos percentuais de impurezas (K₂O, CaO, Fe₂O₃, MnO).

Em função do tipo e do tempo de queima das cascas de arroz, a massa específica da cinza estudada apresentou valor médio em torno de 2,18 g/cm³, resultado equivalente ao valor de 2,20 g/cm³ encontrado por Reed, citado por Della et al. (2001), para cinzas com presença de

sílica cristalina. A superfície específica (**Tabela 19**) aproximou-se de valores que, segundo Nakata, citado por Della et al. (2001), são considerados característicos de cascas de arroz calcinadas a temperaturas entre 700 °C e 800 °C. Tais afirmações podem ser enfatizadas pelo fato da cinza apresentar, visualmente, grande quantidade de partículas brancas e baixo teor de carbono (**Tabela 19**), o que leva a considerar que as cascas de arroz foram calcinadas a elevadas temperaturas e, por conseqüência, resultaram em cinzas com sílica quimicamente inativas.

Tabela 19. Características físico-químicas da cinza de casca de arroz. *

Parâmetros	Cinza após peneiramento
Massa específica (densidade real)	2,18 g/cm ³
Superfície específica (área superficial)	12,68 m ² /g
Teor de carbono	3,00%
SiO ₂	96,10%
K ₂ O	2,24%
CaO	0,89%
Fe ₂ O ₃	0,37%
MnO	0,33%

*Resultados fornecidos pela Central Analítica do Instituto de Química da UNICAMP.

A análise química qualitativa apresentou os principais elementos químicos da cinza e corroborou a composição química quantitativa da cinza (**Figura 48b**). Apesar da cinza apresentar distribuição em tamanho semelhante à das areias média e fina, sua imagem do Microscopia Eletrônica de Varredura (**Figura 48a**) mostrou uma microestrutura física característica de cinzas vegetais (**Figura 1a**).

A análise de difração de raios-X revelou que a sílica presente na cinza de casca de arroz encontra-se na forma cristalina, muito embora tal cinza apresentasse alto teor de SiO₂. Na **Figura 49**, o halo centrado em torno de 22° 2θ é característico de materiais silicosos. A esse halo encontrou-se sobreposto grande pico que representa a fase cristalina cristobalita da sílica (21,9° 2θ).

Quanto à atividade pozolânica determinada através do ensaio mecânico, a cinza apresentou índice pozolânico de 25%, o que não chega a conferir pozolanicidade ao material,

pois segundo a norma NBR 5752 (ABNT, 1992), para validar a eficiência da pozolana a resistência da argamassa de cimento-cinza-areia deve ser superior a 75% da resistência da argamassa de cimento-areia, ou seja, a cinza deve apresentar índice pozolânico maior que 75%. Ressalta-se que os baixos valores de índice de pozolanicidade, de superfície específica, de finura e de teor de carbono revelaram que a cinza de casca de arroz não apresentou o efeito “filler” (preenchimento de vazios da zona de interface), mas atuou como carga mineral na argamassa, porém inferior ao desempenho mecânico da areia.

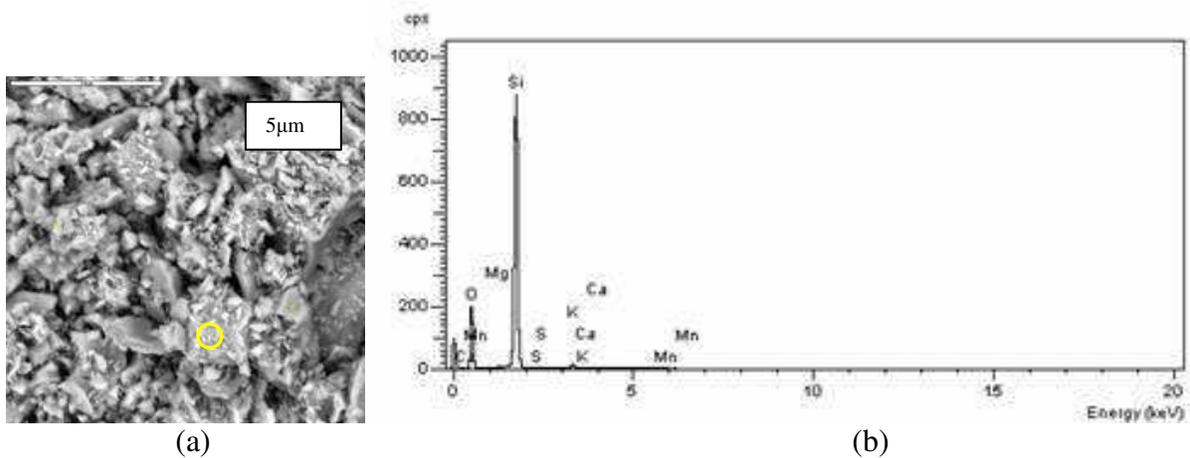


Figura 48. Imagem de Microscopia Eletrônica de Varredura da cinza de casca de arroz: (a) imagem ampliada em 2.000x com pontos para análise química; (b) análise química qualitativa do ponto - Espectrômetro de Energia Dispersiva.

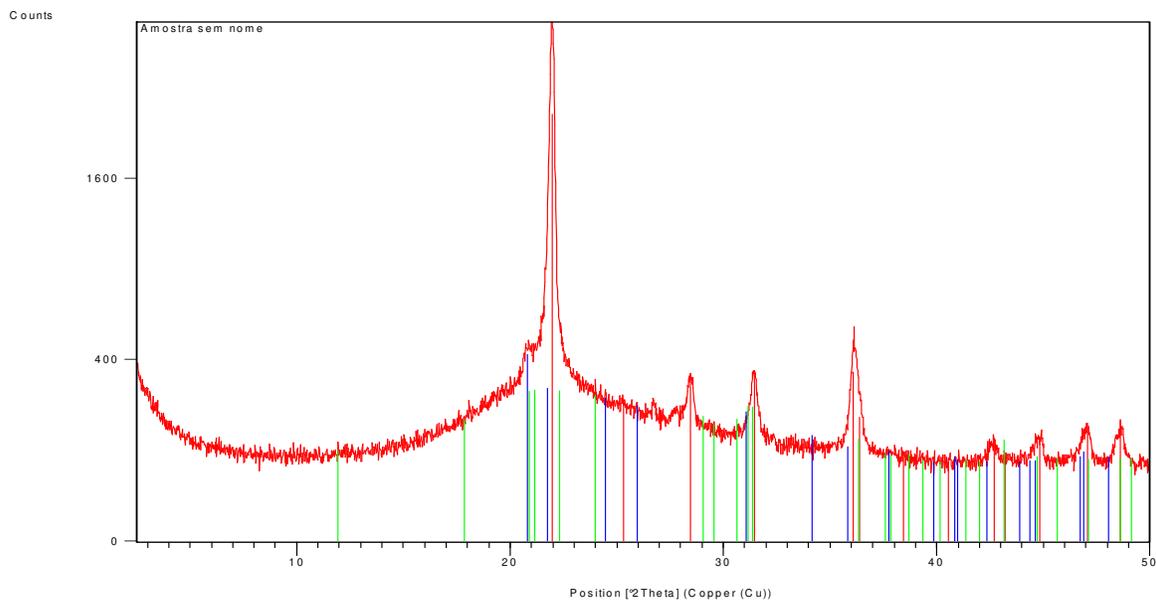


Figura 49. Diagrama de difração de raio-x da cinza de casca de arroz estudada.

Analisando-se os resultados das características físico-química e mecânica da cinza, pode-se afirmar que a cinza de casca de arroz coletada em fornos sem controle efetivo de temperatura não possui atividade pozolânica.

5.1.2. MATERIAL SOLO

A **Tabela 20** sumariza os resultados dos ensaios de caracterização física aplicados ao solo arenoso utilizado em toda pesquisa.

Tabela 20. Características físicas do solo estudado.

	Parâmetros	Solo
Distribuição Granulométrica	Areia grossa (0,60 – 2,00 mm)	1,20%
	Areia média (0,20 – 0,60 mm)	25,90%
	Areia fina (0,06 – 0,20 mm)	41,25%
	Silte (0,002 – 0,06 mm)	20,25%
	Argila (< 0,002 mm)	11,49%
	Porcentagem que passa na peneira 0,075 mm	33,30%
Índices físicos	Massa específica dos grãos	2,655 g/cm ³
	Limite de Liquidez (LL)	NP
	Limite de Plasticidade (LP)	NP
	Índice de Plasticidade (IP)	NP
Classificação	Descrição visual do solo	Areia siltosa
	Bureau of Public Roads	Arenoso
	Classificação AASHTO	A ₂₋₄
Ensaio de compactação normal de Proctor	Massa específica aparente seca máxima (g/cm ³)	1,925
	Umidade ótima (%)	11,37

NP = Não Plástico

AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials)

De acordo com os índices físicos dos solos estudados (**Tabela 20**) pode-se afirmar que o solo arenoso caracterizou-se como um solo Não Plástico, porém com uma quantidade suficiente de finos (argila + silte) para conferir à mistura a plasticidade e coesão necessárias no momento de confecção de elementos construtivos. Quanto à distribuição granulométrica, o solo arenoso apresentou-se desuniforme, facilitando sua interação com o cimento e a cinza.

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 20**) mostraram que o solo arenoso está de acordo com os pré-requisitos relatados pelo autor.

A partir dos resultados da granulometria e dos índices físicos, o solo foi classificado como A₂₋₄, de acordo com o sistema da AASHTO. Os valores de massa específica aparente e umidade ótima foram 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-CIMENTO-CINZA DE 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 diferentes misturas de solo-cimento-cinza obtidos do ensaio de compactação normal de Proctor estão mostrados nas **Tabelas 23 e 24**. Tais valores foram analisados estatisticamente e suas respectivas análises de variância estão apresentadas nas **Tabelas 21 e 22**.

Tipo de combinação (solo + cinza CCA-A ou cinza CCA-B) estabilizado com cimento

Test. – Testemunha solo arenoso	C8 – (95% solo + 5% cinza) 10% cimento
C1 – (100% solo + 0% cinza) 7% cimento	C9 – (92,5% solo + 7,5% cinza) 10% cimento
C2 – (97,5% solo + 2,5% cinza) 7% cimento	C10 – (90% solo + 10% cinza) 10% cimento
C3 – (95% solo + 5% cinza) 7% cimento	C11 – (100% solo + 0% cinza) 13% cimento
C4 – (92,5% solo + 7,5% cinza) 7 % cimento	C12 – (97,5% solo + 2,5%cinza) 13% cimento
C5 – (90% de solo + 10% cinza) 7% cimento	C13 – (95% solo + 5% cinza) 13% cimento
C6 – (100% solo + 0% cinza) 10% cimento	C14 – (92,5% solo + 7,5%cinza) 13% cimento
C7 – (97,5% solo + 2,5% cinza) 10%cimento	C15 – (90% solo +10% cinza) 13% cimento

Tabela 21. Análise de variância referente aos efeitos das adições no solo sobre a variável massa específica aparente seca máxima (g/cm³).

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
Tipo de cinza	1	0,0020008	0,0020008	59,3282	0,00018
Teor de cimento	2	0,0032995	0,0016497	48,9176	0,00014
Tipo de combinação solo-cinza	4	0,5500945	0,1375236	4077,8164	0,00001
Interação cinza x cimento	2	0,0001459	0,0000729	2,1626	0,17688
Interação cimento x combinação	8	0,0020035	0,0002504	7,4260	0,00584
Interação cinza x combinação	4	0,0005490	0,0001373	4,0697	0,04344
Resíduo	8	0,0002698	0,0000337		
Total	29	0,5583630			
Média geral = 1,780 g/cm³		Coefficiente de variação = 0,326%			

Tabela 22. Análise de variância referente aos efeitos das adições no solo sobre a variável umidade ótima (%).

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
Tipo de cinza	1	1,3440835	1,3440835	15,6111	0,00450
Teor de cimento	2	0,2365800	0,1182900	1,3739	0,30716
Tipo de combinação solo-cinza	4	163,1875216	40,7968804	473,8440	0,00001
Interação cinza x cimento	2	0,1232872	0,0616436	0,7160	0,52071
Interação cimento x combinação	8	1,1070200	0,1383775	1,6072	0,25803
Interação cinza x combinação	4	2,0256000	0,5064000	5,8817	0,01685
Resíduo	8	0,6887816	0,0860977		
Total	29	168,7128740			
Média geral = 14,59%		Coefficiente de variação = 2,011%			

Tabela 23. Valores de massa específica aparente seca máxima do ensaio de compactação normal de Proctor aplicado à combinação solo-cinza estabilizada com cimento.

Massa específica aparente seca máxima (g/cm ³) - M _{max}									
Tipo de cinza	Test.	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	
	Média	1,925 a	1,956 a A	1,890 b A	1,785 c A	1,686 d A	1,566 e A	1,967 a A	1,895 b A
CCA - A	DPM *	0,005	0,004	0,010	0,005	0,006	0,004	0,010	0,009
	CV (%)*	0,260	0,184	0,505	0,280	0,362	0,230	0,490	0,490
	Média	1,925 a	1,956 a A	1,860 b B	1,772 c A	1,648 ef B	1,538 h B	1,967 a A	1,882 b A
CCA - B	DPM	0,005	0,004	0,003	0,003	0,002	0,003	0,010	0,002
	CV (%)	0,260	0,184	0,135	0,181	0,093	0,164	0,490	0,111

* 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).

Continua...

Continuação.....

Massa específica aparente seca máxima (g/cm ³) - M _{max}									
Tipo de cinza		C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅
	Média	1,793 c A	1,700 d A	1,605 e A	1,974 a A	1,889 b A	1,796 c A	1,714 d A	1,607 e A
CCA - A	DPM *	0,006	0,000	0,005	0,010	0,007	0,004	0,005	0,021
	CV (%)*	0,322	0,000	0,312	0,527	0,347	0,201	0,309	1,296
	Média	1,764 c B	1,680 de B	1,586 g A	1,974 a A	1,871 b B	1,781 c A	1,697 d A	1,602 fg A
CCA - B	DPM	0,004	0,002	0,002	0,010	0,004	0,002	0,011	0,003
	CV (%)	0,204	0,119	0,096	0,527	0,193	0,097	0,649	0,157

* 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 24. Valores de umidade ótima do ensaio de compactação normal de Proctor aplicado à combinação solo-cinza estabilizada com cimento.

		Umidade ótima (%) - H _{ot}							
Tipo de cinza	Test.	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	
	Média	11,37 a	11,57 f A	12,23 def B	14,80 bcd A	15,77 abc A	17,90 a A	11,50 f A	12,17 ef A
CCA - A	DPM *	0,32	0,21	0,15	0,20	0,25	0,36	0,10	0,15
	CV (%)	2,83	1,80	1,25	1,35	1,60	2,01	0,87	1,26
	Média	11,37 a	11,57 g A	13,93 defg A	14,77 def A	15,97 bcd A	18,13 abc A	11,50 g A	13,30 efg A
CCA - B	DPM	0,32	0,21	0,21	0,21	0,65	0,42	0,10	0,20
	CV (%)	2,83	1,80	1,49	1,41	4,07	2,30	0,87	1,50

* 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).

Continua...

Continuação.....

		Umidade ótima (%) - H _{ot}							
Tipo de cinza		C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅
	Média	14,53 cde A	16,43 abc A	17,13 ab B	11,40 f A	11,60 ef A	14,53 cde A	16,03 abc A	18,10 a A
CCA - A	DPM *	0,25	0,15	0,15	0,00	0,10	0,15	0,06	0,46
	CV (%)	1,73	0,93	0,89	0,00	0,86	1,05	0,36	2,53
	Média	15,00 def A	16,27 abcd A	18,60 a A	11,40 g A	12,73 fg A	14,97 def A	15,60 cde A	18,30 ab A
CCA - B	DPM	0,20	0,25	0,36	0,00	0,25	0,25	0,53	0,30
	CV (%)	1,33	1,55	1,94	0,00	1,98	1,68	3,39	1,64

* 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 21 e 22**) mostrou que o fator tipo de combinação solo-cinza promoveu efeitos significativos nas variáveis: massa específica aparente seca máxima (M_{max}) e umidade ótima (H_{ot}) das diferentes misturas de solo-cimento-cinza.

A aplicação do teste de Tukey aos dados das **Tabelas 23 e 24** revelou que os maiores valores de M_{max} foram apresentados pela testemunha e pelas combinações solo-cinza com teor de 0% de cinza (C_1 , C_6 e C_{11}), sendo que tais combinações apresentaram aumento não-significativo dos seus valores M_{max} e de H_{ot} em relação aos valores da testemunha.

Todas as combinações que levaram teores de cinza de casca de arroz em sua composição apresentaram valores de M_{max} inferiores aos valores da testemunha e das misturas compostas por combinações de 0% de cinza. Destaca-se que, quanto maior foi o teor de cinza incorporado à combinação solo-cinza, menores e maiores, respectivamente, foram os valores de M_{max} e de H_{ot} , sendo estas variações estatisticamente significativas. Também se observou que as misturas de solo-cimento-cinza CCA-A apresentaram valores de M_{max} maiores, ainda que não significativos, que os valores encontrados para as suas correspondentes misturas de solo-cimento-cinza CCA-B, o que leva a considerar que a quantidade de partículas finas (material passante na peneira 0,075 mm) presentes na cinza CCA – A não foi significativa a ponto de interferir no processo de compactação da mistura solo-cimento-cinza-água.

Independentemente do tipo de cinza e do teor de cimento, conforme se aumentava a quantidade de cinza de casca de arroz nas misturas, maior era o volume da pré-mistura e, conseqüentemente, maiores as dificuldades no momento de compactação da mistura; resultando, assim, na elevação do volume de vazios e do teor de umidade ótima do sistema compactado. Portanto, as curvas de compactação foram mais pronunciadas no caso das misturas que continham combinações com 100% de solo + 0% de cinza, enquanto que as misturas contendo combinações com alto teor de cinza apresentaram as curvas mais achatadas, demonstrando o provável efeito de incompressibilidade da cinza adicionada ao solo compactado (**Figuras 50 a 55**).

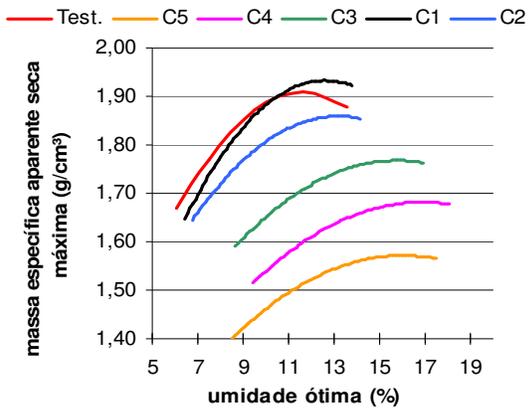


Figura 50. Curvas de compactação (Solo + CCA-A) 7% de cimento.

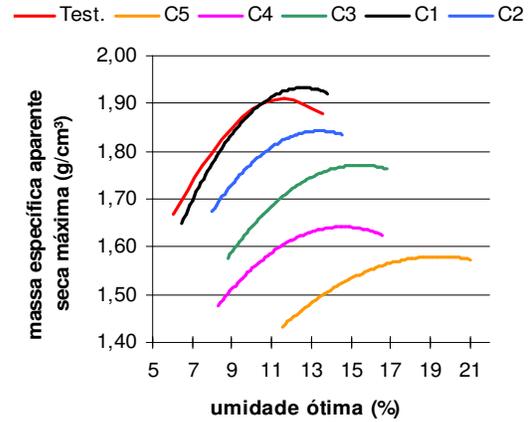


Figura 51. Curvas de compactação (Solo + CCA-B) 7% de cimento.

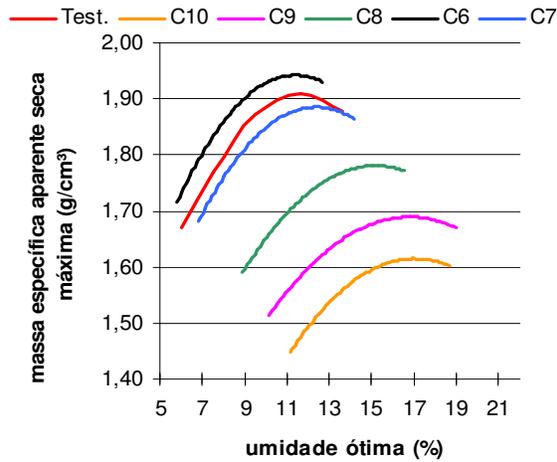


Figura 52. Curvas de compactação (Solo + CCA-A) 10% de cimento.

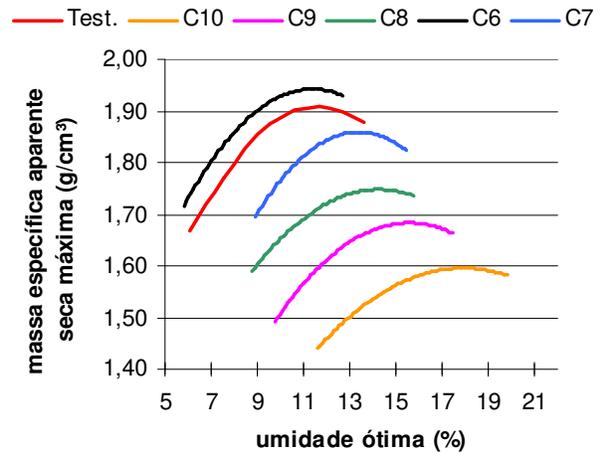


Figura 53. Curvas de compactação (Solo + CCA-B) 10% de cimento.

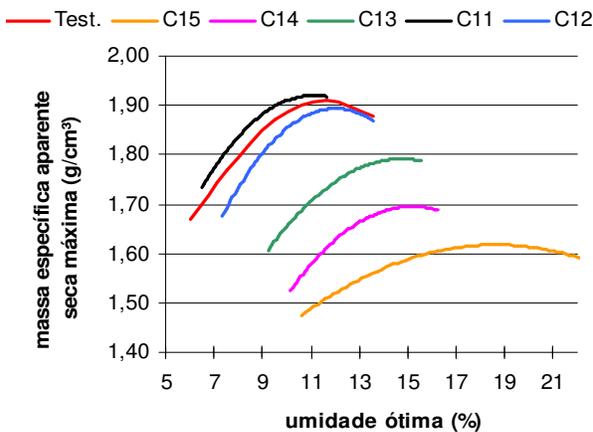


Figura 54. Curvas de compactação (Solo + CCA-A) 13% de cimento.

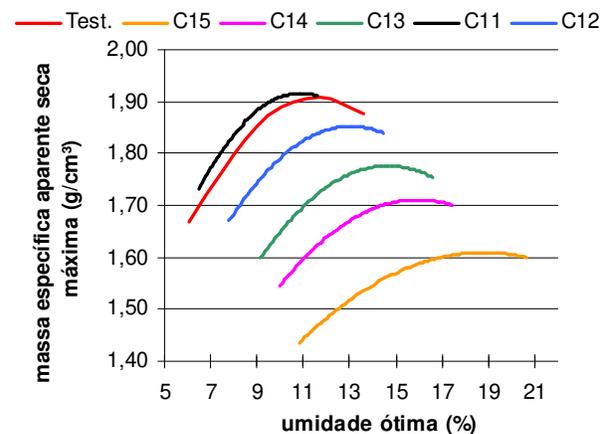


Figura 55. Curvas de compactação (Solo + CCA-B) 13% de cimento.

5.2.2. ENSAIOS MECÂNICOS PRELIMINARES

A evolução da velocidade de onda ultra-sônica ao longo de 7 dias de cura dos corpos-de-prova de solo-cimento-cinza está apresentada nas **Figuras 56 e 57**.

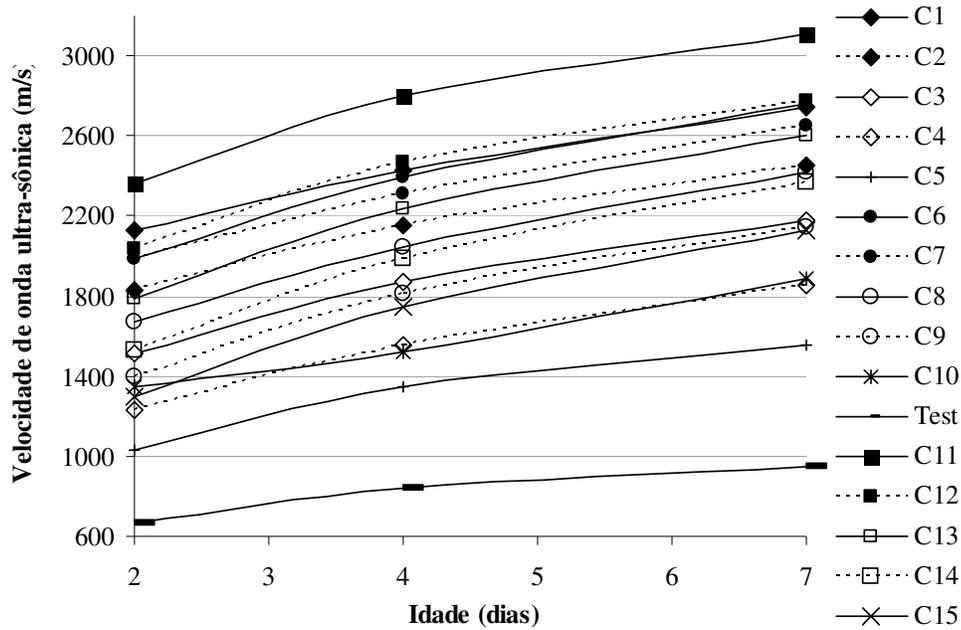


Figura 56. Valores médios de velocidade de onda ultra-sônica das diferentes misturas de solo-cimento-cinza CCA-A.

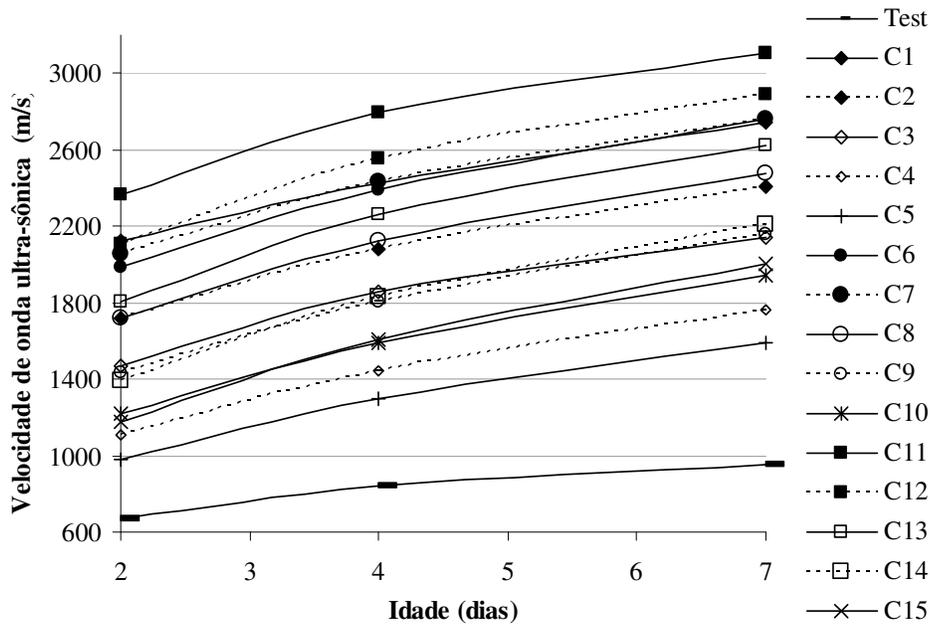


Figura 57. Valores médios de velocidade de onda ultra-sônica das diferentes misturas de solo-cimento-cinza CCA-B.

Tabela 25. Análise de variância referente aos efeitos das adições no solo sobre a variável velocidade de onda ultra-sônica preliminar de corpos-de-prova (m/s) – aos 7 dias de idade.

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
Tipo de cinza	1	2539,2000000	2539,2000000	0,3633	0,56848
Teor de cimento	2	993626,6666667	496813,3333333	71,0748	0,00007
Tipo de combinação solo-cinza	4	3935023,2000000	983755,8000000	140,7374	0,00002
Interação cinza x cimento	2	30665,6000000	15332,8000000	2,1935	0,17336
Interação cimento x combinação	8	129923,0000000	16240,3750000	2,3234	0,12727
Interação cinza x combinação	4	4776,1333333	1194,0333333	0,1708	0,94531
Resíduo	8	55920,0666667	6990,0083333		
Total	29	5152473,8666667			
Média geral = 2383,06 m/s		Coefficiente de variação = 3,508%			

Tabela 26. Análise de variância referente aos efeitos das adições no solo sobre a variável resistência à compressão simples preliminar de corpos-de-prova (MPa) – aos 7 dias de idade.

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
Tipo de cinza	1	0,2881200	0,2881200	4,6758	0,06064
Teor de cimento	2	28,5463284	14,2731642	231,6319	0,00001
Tipo de combinação solo-cinza	4	30,1971871	7,5492968	122,5137	0,00002
Interação cinza x cimento	2	0,7225401	0,3612701	5,8629	0,02687
Interação cimento x combinação	8	6,1639743	0,7704968	12,5040	0,00137
Interação cinza x combinação	4	0,3504800	0,0876200	1,4219	0,31035
Resíduo	8	0,4929602	0,0616200		
Total	29	66,7615902			
Média geral = 3,03 MPa		Coefficiente de variação = 8,194%			

Tabela 27. Valores de velocidade de onda ultra-sônica, aos 7 dias, de corpos-de-prova confeccionados com diferentes combinações de solo-cinza estabilizados com cimento (sem imersão em água).

Velocidade de onda ultra-sônica aos 7 dias									
Tipo de cinza	Test.	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	
	Média	954	2740 b A	2453 bcd A	2174 def A	1851 gh A	1556 h A	2758 b A	2648 bc A
CCA - A	DPM *	26,97	37,54	27,17	32,82	37,76	23,05	31,81	8,08
	CV (%)	2,84	1,37	1,11	1,51	2,04	1,48	1,15	0,31
	Média	954	2740 bc A	2412 def A	2141 fg A	1765 hi A	1592 h A	2758 bc A	2760 bc A
CCA - B	DPM	26,97	37,54	18,77	4,59	49,38	21,53	31,81	30,59
	CV (%)	2,84	1,37	0,78	0,21	2,80	1,35	1,15	1,11

* DPM – desvio padrão médio

CV (%) – coeficiente de variação

Continua....

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).

Continuação.....

Velocidade de onda ultra-sônica aos 7 dias									
Tipo de cinza		C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅
	Média	2416 cde A	2142 defg A	1886 fg A	3109 a A	2773 b A	2600 bc A	2372 cde A	2130 efg A
CCA - A	DPM *	45,10	74,07	29,00	40,47	23,43	30,52	18,15	56,79
	CV (%)	1,87	3,46	1,54	1,30	0,84	1,17	0,77	2,67
	Média	2473 cde A	2156 efg A	1947 gh A	3109 a A	2893 b A	2627 bcd A	2207 efg A	2004 gh A
CCA - B	DPM	14,08	32,78	28,82	40,47	4,84	19,84	28,25	32,14
	CV (%)	0,57	1,52	1,48	1,30	0,17	0,76	1,28	1,60

* 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 28. Valores de resistência à compressão simples, aos 7 dias, de corpos-de-prova confeccionados com diferentes combinações de solo-cinza estabilizados com cimento (sem imersão em água).

		Resistência à compressão simples aos 7 dias							
Tipo de cinza	Test.	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	
CCA - A	Média	0,51	2,83 cdefg A	2,41 defg A	1,86 efgh A	1,32 gh A	0,88 h A	3,79 bcd A	3,61 bcdef A
	DPM *	0,00	0,14	0,10	0,04	0,07	0,02	0,13	0,13
	CV (%)	0,00	5,10	4,28	2,37	5,59	2,05	3,33	3,50
CCA - B	Média	0,51	2,83 cd A	2,34 cd A	1,91 cd A	1,22 d B	0,99 d A	3,79 bc A	3,79 bc A
	DPM	0,00	0,14	0,07	0,00	0,04	0,04	0,13	0,02
	CV (%)	0,00	5,10	3,15	0,00	3,61	3,63	3,33	0,48

* DPM – desvio padrão médio

CV (%) – coeficiente de variação

Continua....

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).

Continuação.....

		Resistência à compressão simples aos 7 dias							
Tipo de cinza		C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅
CCA - A	Média	3,04 cdefg A	2,55 defgh A	1,80 fgh A	6,86 a A	5,15 b A	4,63 bc A	3,73 bcde A	2,45 defgh A
	DPM *	0,04	0,00	0,02	0,14	0,16	0,13	0,08	0,14
	CV (%)	1,19	0,00	1,00	2,10	3,01	2,73	2,20	5,89
CCA - B	Média	3,19 bc A	2,26 cd A	2,00 cd A	6,86 a A	5,03 b A	3,28 bc B	2,55 cd B	1,93 cd A
	DPM	0,00	0,13	0,09	0,14	0,28	0,13	0,18	0,02
	CV (%)	0,00	5,59	4,50	2,10	5,58	3,85	7,07	0,94

* 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 25 e 26**) dos ensaios preliminares de ultra-som e de compressão simples mostrou que os fatores tipo de combinação solo-cinza e teor de cimento promoveram efeitos significativos nas variáveis: velocidade de onda ultra-sônica e resistência à compressão simples dos corpos-de-prova de solo-cimento-cinza.

A aplicação do teste de Tukey aos dados das **Tabela 27 e 28** revelou que as misturas de solo-cimento-CCA-A apresentaram valores de velocidade de onda ultra-sônica e de resistência à compressão simples significativamente iguais aos valores encontrados para as suas correspondentes misturas de solo-cimento-CCA-B. Portanto, a quantidade de finos (material passante na peneira 0,075 mm) presente na cinza CCA-A foi insuficiente para afetar de modo significativo o processo de estabilização do solo, assim como a distribuição de tamanho destas partículas não proporcionou a atuação como “filler” na mistura solo-cimento-cinza. Ressalta-se que a testemunha (solo arenoso compactado) apresentou desempenho mecânico inferior a todas as demais misturas, o que indicou o melhoramento das propriedades do solo pela ação do agente estabilizador cimento, independentemente da quantidade de cinza presente nas referidas misturas.

Para todas as misturas de solo-cimento-cinza, as curvas de acompanhamento de velocidade de propagação da onda ultra-sônica (**Figuras 56 e 57**) mostraram um aumento significativo da velocidade ao longo dos 7 dias de cura, revelando a ocorrência gradativa das reações de hidratação do cimento no sistema solo-cimento-cinza. Independentemente da idade e do tipo de cinza, as maiores velocidades foram alcançadas pelas combinações de solo-cimento (C1, C6 e C11), seguidas das combinações de solo-cimento-cinza, estatisticamente diferentes entre si. A testemunha apresentou um pequeno aumento de velocidade durante os 7 dias devido ao processo de secagem para entrar em equilíbrio com a umidade do ambiente, pois a mesma não passou pelo processo de cura.

Para o ensaio de ultra-som (**Tabela 27**), tanto para as misturas de solo-cimento-CCA-A como para as misturas de solo-cimento-CCA-B, quanto maiores foram os teores de cinza adicionados às misturas, menores foram os valores de velocidade da onda ultra-sônica, sendo tais variações estatisticamente significativas.

Quanto ao ensaio de compressão simples (**Tabela 28**), tanto para as misturas de solo-cimento-CCA-A como para as misturas de solo-cimento-CCA-B, quanto maior foi o teor de cimento incorporado à mistura, maiores foram os valores de resistência; sendo tais variações

estatisticamente significativas. Tais valores também diminuiram tanto mais quanto maior foi o teor de cinza incorporada à mistura (**Tabela 29**).

Tabela 29. Ganho de resistência proporcionado pelo aumento do teor de cimento.

Tipo combinação Solo + Cinza	*Resistência à compressão simples (MPa) referentes aos teores de cimento			Ganho de resistência (7% para 10%)	Ganho de resistência (10% para 13%)
	7%	10%	13%		
100% solo + 0% cinza	2,83	3,79	6,86	33,9%	81,0%
97,5% solo + 2,5 % cinza	2,41	3,61	5,15	49,8%	42,6%
95% solo + 5% cinza	1,86	3,04	4,63	63,4%	52,3%
92,5% solo + 7,5% cinza	1,32	2,55	3,73	93,2%	46,3%
90% solo + 10% cinza	0,88	1,80	2,45	104,0%	36,1%

*Valores referentes à utilização da cinza CCA-A na mistura solo-cimento-cinza.

Pelos ensaios de ultra-som e de compressão simples (**Tabelas 27 e 28**), independentemente do tipo de cinza, foram notadas que as combinações C11, C12 e C13 destacaram-se significativamente das demais combinações, ou seja, a estabilização do solo e do solo-cinza com o teor de 13% de cimento maximizou o desempenho mecânico dos mesmos, o que era esperado pelo fato deste teor ser utilizado como fator de segurança. Entretanto os menores valores foram alcançados pelas combinações C4 e C5, sendo que o teor de 7% de cimento foi insuficiente para estabilizar as combinações com teores acima de 5% cinza.

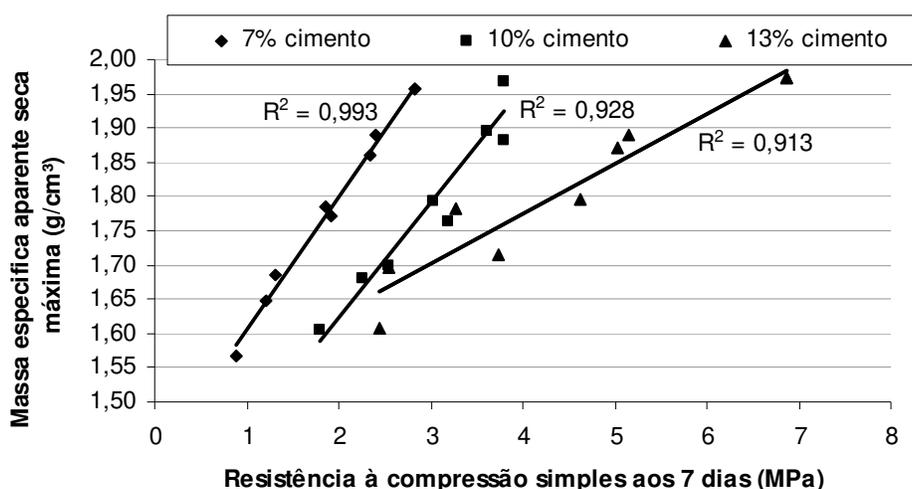


Figura 58. Relação entre a resistência e a densidade das combinações solo-cinza dentro do mesmo teor de cimento.

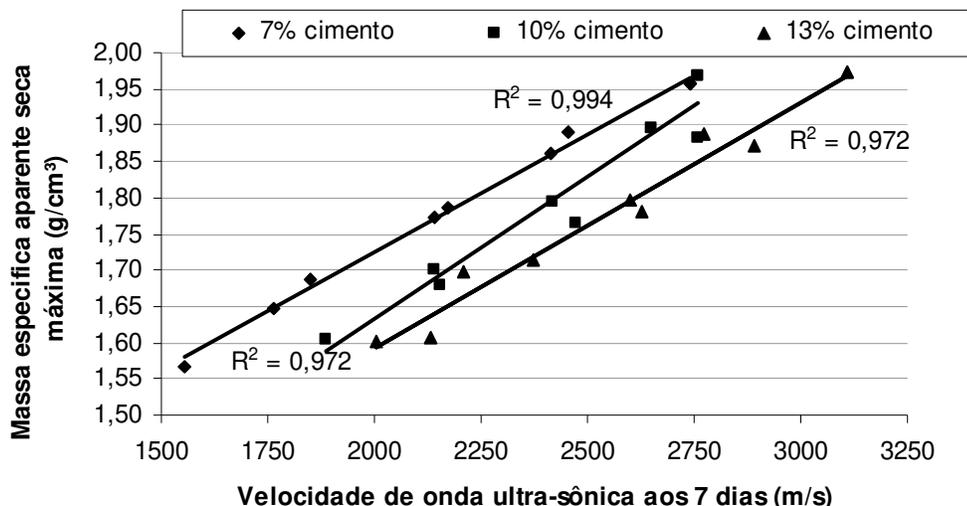


Figura 59. Relação entre a velocidade e a densidade das combinações solo-cinza dentro do mesmo teor de cimento.

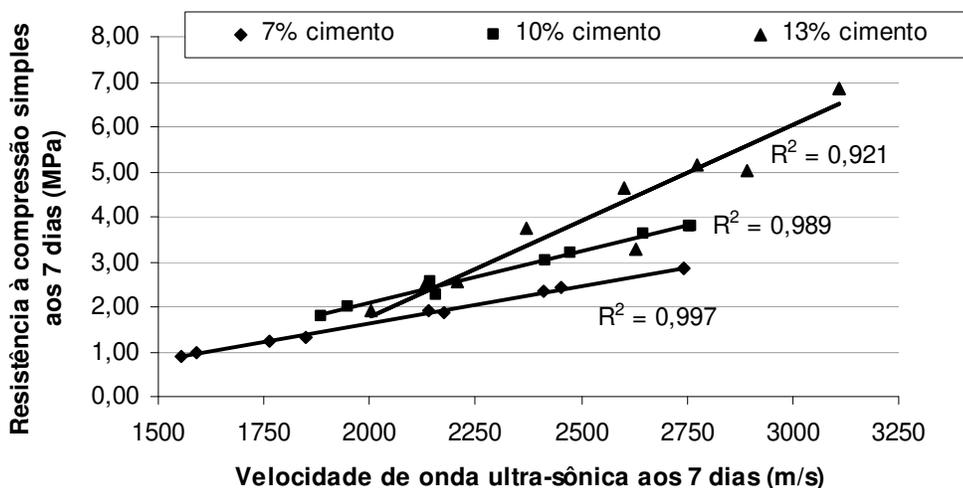


Figura 60. Relação entre a velocidade e a resistência das combinações solo-cinza dentro do mesmo teor de cimento.

Pelas **Figuras 58 a 60**, a resistência à compressão simples, a velocidade de onda ultra-sônica e a massa específica aparente seca máxima dos corpos-de-prova de solo-cimento-cinza apresentaram uma correlação linear positiva devido à relação existente entre as propriedades mecânicas do sistema solo-cimento-cinza compactado com a densidade, pois quanto menos cinzas no sistema, melhor foi o processo da compactação e da interação entre o solo e o cimento e, conseqüentemente, maiores foram as resistências e velocidades alcançadas.

Os valores de R^2 , que em sua maioria foram próximos de um, indicaram que não houve dispersão de valores, ou seja, houve uma boa uniformidade durante a execução dos ensaios.

Tanto os valores de resistência como os valores de velocidade alcançados pelas misturas de solo-cimento (C1, C6 e C11) foram da mesma ordem de grandeza dos valores encontrados na revisão bibliográfica do presente trabalho, mostrando coerência nos estudos.

Apesar da cinza estudada apresentar similar distribuição granulométrica à da faixa arenosa do material solo, a mesma não conseguiu desenvolver o papel físico-mecânico do solo, evidentemente, devido à sua estrutura morfológica e composição mineralógica. Assim, como esperado, a cinza atuou como carga mineral no sistema solo-cimento, diminuindo o seu desempenho físico-mecânico; porém, os teores de cimento foram suficientes para promover uma estabilização mínima das misturas solo-cinza, resultando em valores de resistências mínimos para a utilização como material de construção.

5.2.3. ESCOLHA DAS MISTURAS DE SOLO-CIMENTO-CINZA PARA CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA

Segundo estudos de NEVES (1988), o valor de resistência à compressão simples de 1 MPa é o mínimo necessário para que as misturas de solo-cimento posteriormente possam ser utilizadas como componentes construtivos. Dessa forma, apenas a mistura de (90% solo + 10% cinza) estabilizada com 7% de cimento não atendeu a esta recomendação.

Conforme os resultados obtidos, não houve diferença significativa entre a utilização da cinza CCA-A e cinza CCA-B, portanto, para a etapa de escolha das melhores misturas de solo-cimento-cinza, foram analisadas somente as misturas adicionadas de cinza CCA-A, pois a obtenção deste tipo de cinza requer procedimento de peneiramento simplificado, ou seja, apenas passagem da cinza pela peneira # 0,60 mm para retirada de cascas de arroz não-calcinadas.

Dessa forma, analisando o teste de Tukey aplicado aos dados da **Tabela 28** e seguindo o critério de maior teor de cinza aliado ao valor mínimo de resistência à compressão simples, foram descartadas as combinações C2, C3, C7, C8, C12 e C13, pois apresentaram menores quantidades de cinza e valores de resistência estatisticamente iguais entre si.

Portanto, as misturas de solo-cimento-cinza indicadas para um maior aprofundamento nos estudos de caracterização física-mecânica do material formado foram:

T1 - (100% de solo + 0% de cinza CCA-A) estabilizado com 7% de cimento

T2 - (100% de solo + 0% de cinza CCA-A) estabilizado com 10% de cimento

T3 - (100% de solo + 0% de cinza CCA-A) estabilizado com 13% de cimento

T4 - (92,5% de solo + 7,5% de cinza CCA-A) estabilizado com 7% de cimento

T5 - (92,5% de solo + 7,5% de cinza CCA-A) estabilizado com 10% de cimento

T6 - (92,5% de solo + 7,5% de cinza CCA-A) estabilizado com 13% de cimento

T7 - (90% de solo + 10% de cinza CCA-A) estabilizado com 10% de cimento

T8 - (90% de solo + 10% de cinza CCA-A) estabilizado com 13% de cimento

5.3. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DOS CORPOS-DE-PROVA CONFECCIONADOS COM MISTURAS DE SOLO-CIMENTO-CINZA

5.3.1. MASSA APARENTE SECA E GRAU DE COMPACTAÇÃO

A **Tabela 30** apresenta os valores médios de controle da massa específica aparente seca e do grau de compactação alcançados pelos corpos-de-prova de solo-cimento-cinza durante a sua confecção. 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% ou superior a 105%. Sendo assim, houve um controle adequado das condições de moldagem.

Tabela 30. Valores médios de controle da massa específica aparente seca e grau de compactação dos corpos-de-prova cilíndricos.

Tratamentos	Massa específica aparente seca (g/cm ³)	Grau de compactação (%)
T ₁	1,913 (0,15%) *	97,82
T ₂	1,923 (0,18%)	97,77
T ₃	1,930 (0,33%)	97,78
T ₄	1,630 (0,03%)	96,66
T ₅	1,655 (0,16%)	97,38
T ₆	1,645 (0,56%)	95,98
T ₇	1,526 (0,84%)	95,07
T ₈	1,528 (0,53%)	95,06

* Valores médios (coeficiente de variação)

Para cada tratamento, os valores foram referentes à média aritmética da massa específica aparente seca de 72 corpos-de-prova. Total de 576 corpos-de-prova produzidos para aplicação dos ensaios físico-mecânicos – conforme planejamento Tabela 15.

Tanto as condições ambientais (temperatura, umidade) de exposição dos corpos-de-prova de solo-cimento-cinza como as reações de estabilização do sistema solo-cimento-cinza no decorrer de 360 dias não foram relevantes em termos de acarretar modificações expressivas na densidade final do material. Ainda que ocorressem pequenas oscilações na massa específica aparente seca ao longo do tempo (**Tabela 31**), as mesmas não foram significativas, tendo em vista que todos os tratamentos, independentemente da idade, conservaram o bom grau de compactação. Ressalta-se que os valores de densidades para os tratamentos de solo-cimento e de solo-cimento-cinza ficaram em torno de, respectivamente, 1,960 g/cm³ e 1,650 g/cm³.

Tabela 31. Valores médios da massa específica aparente seca (Mesp) e do grau de compactação (GC) dos corpos-de-prova cilíndricos para cada idade.

		T₁	T₂	T₃	T₄	T₅	T₆	T₇	T₈
	M_{max} (g/cm³)	1,956	1,967	1,974	1,686	1,700	1,714	1,605	1,607
	Mesp	1,929	1,935	1,977	1,668	1,671	1,633	1,526	1,538
7 dias	CV	0,38	0,35	0,37	0,96	0,43	0,81	0,64	0,70
	GC	98,63	98,37	100,13	98,96	98,31	95,25	95,05	95,73
	Mesp	1,929	1,934	1,960	1,649	1,685	1,633	1,526	1,556
30 dias	CV	0,19	0,39	0,30	0,32	0,18	0,18	0,88	0,59
	GC	98,64	98,32	99,29	97,83	99,12	95,25	95,05	96,83
	Mesp	1,930	1,935	1,956	1,664	1,696	1,638	1,531	1,529
60 dias	CV	0,31	0,43	0,19	0,41	0,25	0,14	0,30	0,32
	GC	98,67	98,37	99,07	98,70	99,78	95,55	95,37	95,17
	Mesp	1,958	1,968	1,987	1,637	1,625	1,685	1,557	1,599
90 dias	CV	0,24	0,25	0,21	0,49	0,36	0,59	0,52	0,26
	GC	100,08	100,04	100,66	97,09	95,57	98,30	97,01	99,52
	Mesp	1,965	1,972	1,980	1,619	1,639	1,704	1,571	1,580
120 dias	CV	0,25	0,34	0,42	0,69	0,36	0,46	0,35	0,59
	GC	100,44	100,27	100,29	96,02	96,40	99,39	97,89	98,29
	Mesp	1,977	1,978	1,993	1,607	1,640	1,710	1,525	1,599
180 dias	CV	0,34	0,21	0,40	0,64	0,88	0,21	0,34	0,39
	GC	101,06	100,56	100,98	95,32	96,47	99,77	95,04	99,53
	Mesp	1,974	1,981	1,997	1,607	1,660	1,692	1,562	1,635
360 dias	CV	0,81	0,44	0,20	0,45	1,40	0,36	0,16	0,22
	GC	100,94	100,69	101,18	95,32	97,66	98,74	97,34	101,77

Mmax – massa específica aparente seca máxima (g/cm³)

Mesp - massa específica aparente seca (g/cm³)

CV – coeficiente de variação da Mesp (%)

GC – grau de compactação (%)

Para cada tratamento e idade de 7, 30, 60 e 90 dias, os valores foram referentes à média aritmética da massa específica aparente seca de 12 corpos-de-prova; e para cada tratamento e idade de 120, 180 e 360 dias utilizou-se a média aritmética de 8 corpos-de-prova. Total de 576 corpos-de-prova produzidos para aplicação dos ensaios físico-mecânicos – conforme Tabela 15

5.3.2. RESULTADOS DO ENSAIO DE ULTRA-SOM E COMPRESSÃO SIMPLES

Os valores médios de velocidade de propagação da onda ultra-sônica e de resistência à compressão simples foram analisados estatisticamente (**Tabelas 34 e 35**) e suas respectivas análises de variância estão apresentadas nas **Tabelas 32 e 33**.

Tabela 32. Análise de variância referente aos efeitos dos tratamentos sobre a variável velocidade de onda ultra-sônica (m/s).

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
Tipo de tratamento	7	25736874	3676696	677,7544	0,00001
Idade	6	5288679	881446	162,4840	0,00001
Interação idade x trat.	42	3010812	71686	13,2144	0,00001
Resíduo	112	607580	5424		
Total	167	34643946			
Média geral = 2327 m/s			Coefficiente de variação = 3,16%		

Tabela 33. Análise de variância referente aos efeitos dos tratamentos sobre a variável resistência à compressão simples (MPa).

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
Tipo de tratamento	7	1339	191	1309	0,00001
Idade	6	288	48	328	0,00001
Interação idade x trat.	42	215	5,13	35	0,00001
Resíduo	112	16	0,146		
Total	167	1860			
Média geral = 5,28 MPa			Coefficiente de variação = 7,24%		

Pelas **Tabelas 32 e 33**, pode-se afirmar que o fator tipo de tratamento, bem como suas interações, promoveram efeitos significativos nas variáveis: velocidade de onda ultra-sônica e resistência à compressão simples dos corpos-de-prova cilíndricos confeccionados com os tratamentos de solo-cimento-cinza. A análise do efeito da interação entre os fatores tipo de tratamento e idade revelou que, independentemente da idade, os tratamentos de melhor desempenho mecânico foram T2 e T3, seguidos dos tratamentos T6, T5, T7, T8 e T1; confirmando o efeito negativo da cinza nas misturas de solo-cimento.

Tabela 34. Velocidade de onda ultra-sônica (m/s), aos 7, 30, 60, 90, 120, 180 e 360 dias, de corpos-de-prova confeccionados sob diferentes tratamentos.

Velocidade (m/s)	TRATAMENTOS								
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	
Média	2148 c C	2551 b C	2899 a B	1715 d C	2052 c C	2207 c C	2079 c B	2089 c C	
7 dias	DPM	47,67	39,94	30,42	16,42	29,64	69,71	128,58	9,07
	CV	2,22	1,57	1,05	0,96	1,44	3,16	6,19	0,43
Média	2334 c B	2581 b C	3031 a B	1911 e B	2352 c A	2451 b A	2029 e B	2126 d B	
30 dias	DPM	65,97	86,48	32,01	11,18	126,04	26,04	212,04	29,27
	CV	2,83	3,35	1,06	0,58	5,36	1,06	10,45	1,38
Média	2502 b A	2896 a B	3071 a B	2176 d A	2310 c A	2403 b A	2173 d A	2302 c A	
60 dias	DPM	87,63	109,20	51,46	80,19	26,67	129,90	53,17	104,47
	CV	3,50	3,77	1,68	3,69	1,15	5,41	2,45	4,54
Média	2644 c A	2977 b B	3254 a A	1909 f B	2319 d A	2419 d A	2258 e A	2476 d A	
90 dias	DPM	60,55	55,78	58,91	76,05	46,63	83,97	115,95	92,48
	CV	2,29	1,87	1,81	3,98	2,01	3,47	5,37	3,74
Média	2640 b A	3223 a A	3376 a A	1958 d B	2282 c A	2344 c B	1959 d B	2286 c B	
120 dias	DPM	62,57	52,44	68,90	67,39	88,06	134,55	109,05	53,15
	CV	2,37	1,63	2,04	3,44	3,86	5,74	5,57	2,33
Média	1938 e D	2494 b C	2939 a B	1362 f D	2101 d C	2375 b B	2137 d B	2271 c B	
180 dias	DPM	53,31	40,64	64,01	5,37	38,87	65,73	41,11	36,32
	CV	2,75	1,63	2,18	0,39	1,85	2,77	1,92	1,60
Média	2053 c D	2641 b C	3020 a B	1365 f D	1845 e C	2010 c C	1482 f C	1679 e D	
360 dias	DPM	18,47	46,16	88,25	12,47	31,37	34,65	21,04	81,87
	CV	0,90	1,75	2,92	0,91	1,70	1,72	1,42	4,88

* 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 35. Resistência à compressão simples (MPa), aos 7, 30, 60, 90, 120, 180 e 360 dias, de corpos-de-prova confeccionados sob diferentes tratamentos.

Resistência (MPa)	TRATAMENTOS								
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	
Média	1,33 d E	2,95 b E	5,37 a E	1,05 d B	1,96 c D	2,91 b C	2,36 c C	2,69 b D	
7 dias	DPM	0,04	0,07	0,13	0,04	0,04	0,03	0,10	0,01
	CV	3,33	2,50	2,44	4,22	1,99	0,88	4,38	0,55
Média	2,40 e D	6,02 b D	9,63 a D	1,87 e A	4,59 c B	4,99 c B	3,55 d B	3,63 d C	
30 dias	DPM	0,18	0,04	0,42	0,15	0,26	0,16	0,11	0,24
	CV	7,37	0,73	4,41	7,87	5,56	3,12	2,99	6,53
Média	3,33 e C	7,12 b C	12,14 a C	2,79 e A	4,52 c B	5,33 c B	3,67 e B	4,36 d B	
60 dias	DPM	0,13	0,44	0,55	0,21	0,34	0,29	0,13	0,31
	CV	3,93	6,22	4,52	7,62	7,47	5,52	3,67	7,09
Média	4,57 d B	10,03 b B	12,46 a C	2,59 f A	4,05 d B	5,59 c B	3,12 e B	4,97 d B	
90 dias	DPM	0,35	0,29	1,23	0,19	0,06	0,42	0,16	0,22
	CV	7,56	2,94	9,84	7,51	1,46	7,54	5,26	4,44
Média	6,39 c A	12,51 b A	15,41 a A	2,73 e A	5,99 c A	5,77 c B	3,44 e B	4,17 d B	
120 dias	DPM	0,56	0,28	0,47	0,07	0,34	0,47	0,24	0,27
	CV	8,85	2,25	3,07	2,47	5,63	8,19	7,07	6,37
Média	3,76 e C	6,87 b D	12,80 a C	2,04 f A	4,55 d B	7,74 b A	5,07 d A	5,82 c A	
180 dias	DPM	0,24	0,69	0,97	0,22	0,15	0,39	0,31	0,52
	CV	6,31	10,11	7,55	10,83	3,24	5,04	6,07	8,85
Média	3,83 d C	7,59 b C	13,66 a B	2,07 f A	3,66 d C	5,14 c B	3,02 e C	3,49 d C	
360 dias	DPM	0,00	0,22	1,24	0,04	0,18	0,25	0,19	0,19
	CV	0,00	2,94	9,08	2,14	5,05	4,89	6,45	5,59

* 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).

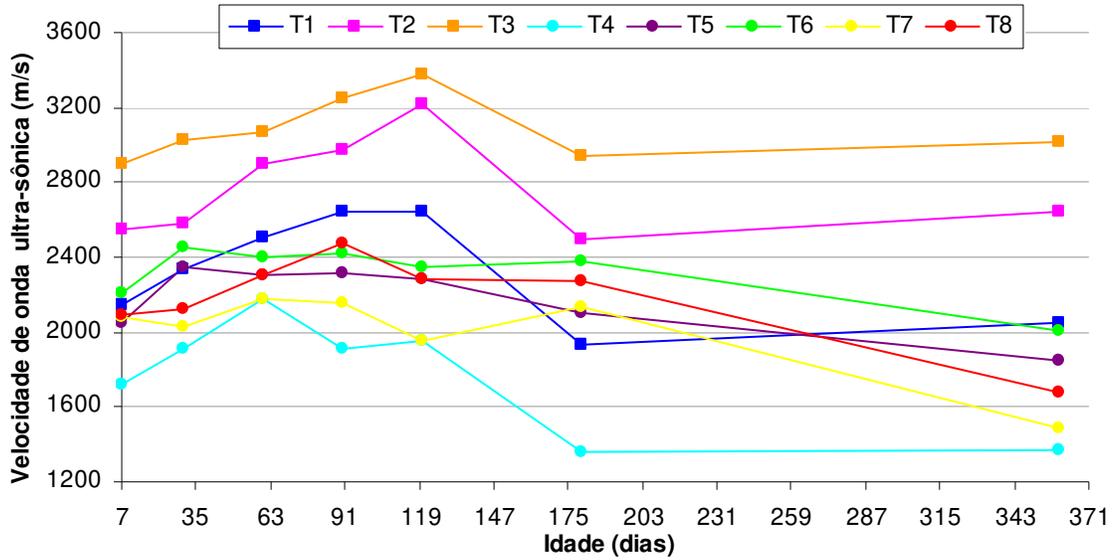


Figura 61a. Evolução da velocidade de propagação da onda ultra-sônica ao longo do tempo.

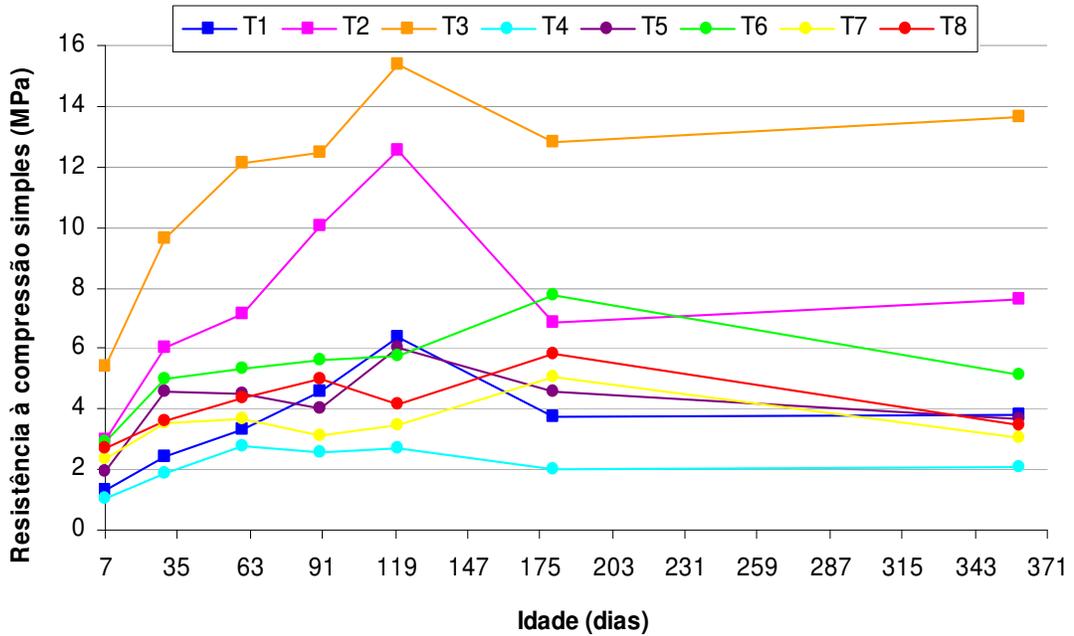


Figura 61b. Evolução da resistência à compressão simples ao longo do tempo.

Quando analisados os tratamentos dentro de cada idade (**Tabelas 34 e 35**), tanto para o ensaio de ultra-som como para o ensaio de compressão simples, o teste de Tukey mostrou que, independentemente da idade, os tratamentos T3 e T2 alcançaram valores de velocidade de onda ultra-sônica e resistência à compressão simples significativamente maiores que os

demais tratamentos, evidenciando um acentuado processo de estabilização do solo a partir da utilização dos teores de 10% e 13% de cimento. Já o tratamento T1 (solo-cimento) apresentou desempenho mecânico estatisticamente igual aos tratamentos de solo-cimento-cinza. Ressalta-se também que os tratamentos de solo-cimento-cinza, quando comparados com suas respectivas testemunhas de solo-cimento, ou seja, T4 com T1, T5 e T7 com T2, e T6 e T8 com T3, apresentaram valores de resistência e de velocidade sempre menores quanto maiores foram às quantidades de cinza incorporadas às misturas, sendo tais variações estatisticamente significativas.

Ainda analisando os tratamentos dentro de cada idade (**Tabelas 34 e 35**), para todos os períodos, quando comparados os valores de velocidade ou de resistência entre os tratamentos T7 e T8; e entre os tratamentos T4, T5 e T6, houve diferenças significativas entre os mesmos, mostrando que o aumento gradativo do teor de estabilizante na mesma composição de solo-cinza resultou na elevação significativa da sua velocidade de onda ultra-sônica e da resistência à compressão simples.

Notou-se nas **Figuras 61a e 61b** um comportamento semelhante entre a velocidade e a resistência quando analisados os tratamentos dentro da mesma idade, o que foi confirmado pela existência de correlação linear positiva entre tais variáveis (**Figura 62a**).

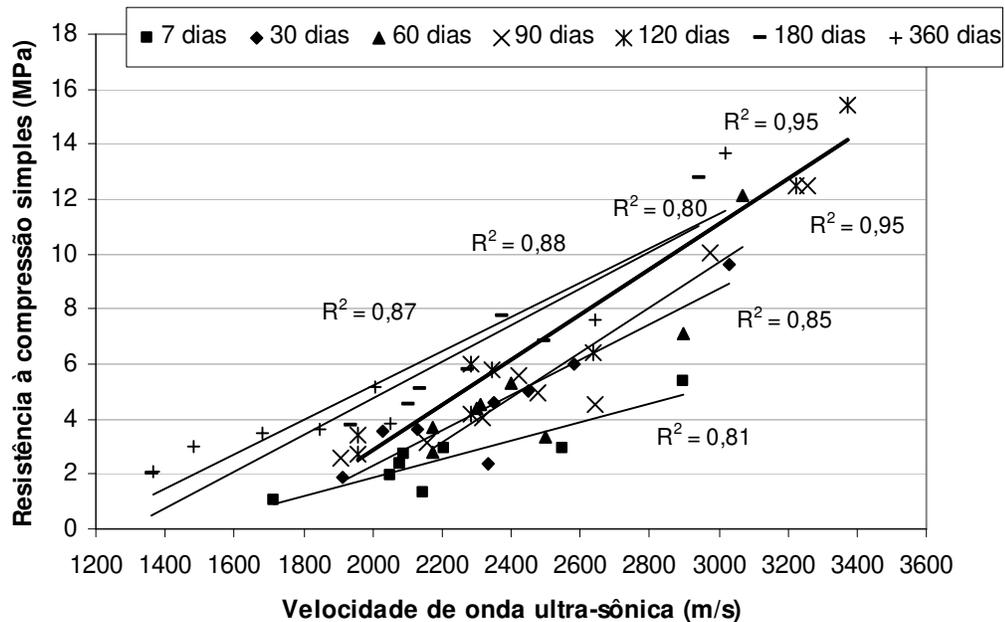


Figura 62a. Relação entre velocidade e resistência dos tratamentos de solo-cimento-cinza dentro da mesma idade.

Quando analisadas as idades dentro de cada tratamento (**Figura 61a**), o ensaio de compressão simples revelou, para todos os tratamentos, o aumento significativo dos valores de resistência nos primeiros 30 dias, assim demonstrando o acelerado processo de hidratação de produtos à base de cimento nas primeiras idades (formação de gel cimentante). Após este primeiro mês, os tratamentos de solo-cimento (T1, T2 e T3) sofreram acréscimos significativos nos valores de resistência (ganhos de até 40%) alcançando seus valores máximos aos 120 dias. Como tais tratamentos não continham cinza, o processo de estabilização do solo pelo cimento foi contínuo (reações pozolânicas).

No entanto, decorrido o período de 30 dias, para os tratamentos adicionados de cinza houve aumentos e decréscimos, ou seja, oscilações não-significativas das resistências à compressão simples, sendo que os tratamentos T4 e T5 alcançaram valores máximos de resistência na idade de 120 dias e os tratamentos T6, T7 e T8 na idade de 180 dias. Tais observações confirmaram o efeito negativo da cinza nos tratamentos, pois a mesma dificultou a continuação do processo de estabilização do solo pelo cimento ao longo do tempo. A cinza, por não apresentar atividade pozolânica, não participou das reações de hidratação e sua presença significou um menor teor real de partículas de solo e de cimento disponível para a reação pozolânica, assim como estabeleceu uma fraca ligação mecânica com a interface do gel cimentante, visto que a cinza não possui a estrutura morfológica das partículas de solo.

Ainda analisando-se as idades dentro de cada tratamento (**Figura 61a**), após atingir valores máximos de resistência à compressão simples, independentemente da presença ou não de cinza nas misturas, todos os tratamentos sofreram diminuição significativa no desempenho mecânico, tendendo à estabilização ao final de 360 dias. O fenômeno de perda de resistência em idades avançadas (após seis meses) pode ser explicado a partir do comportamento da estrutura cristalina desses materiais, ou seja, quando o solo compactado fica exposto ao ambiente ocorrem ciclos de absorção de umidade e secagem, os quais geram pressões de expansão ou contrações internas em partículas frágeis, resultando em processos de perda de resistência mecânica do material final. Silva (1992) verificou tal comportamento em estudos de resistência de misturas de solo-cimento ao longo do tempo. O autor associou a queda de resistência mecânica do material solo-cimento ao fato de ocorrer alterações das concreções lateríticas (partículas presentes no solo), as quais, com o tempo, saturam-se e perdem resistência.

Os valores de resistência à compressão simples alcançados pelos corpos-de-prova, quando comparados com os resultados encontrados na etapa preliminar, sofreram decréscimos, mas mantiveram a mesma tendência frente à adição de teores de cimento nas combinações de solo-cinza. 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.

Foi observado durante a execução do ensaio de compressão simples que o rompimento dos corpos-de-prova apresentou rupturas características de argamassas (rompimento cisalhado e/ou cisalhado cônico - **Figura 63**); sendo fator característico de materiais frágeis e confirmação da atuação da cinza como carga mineral no sistema.

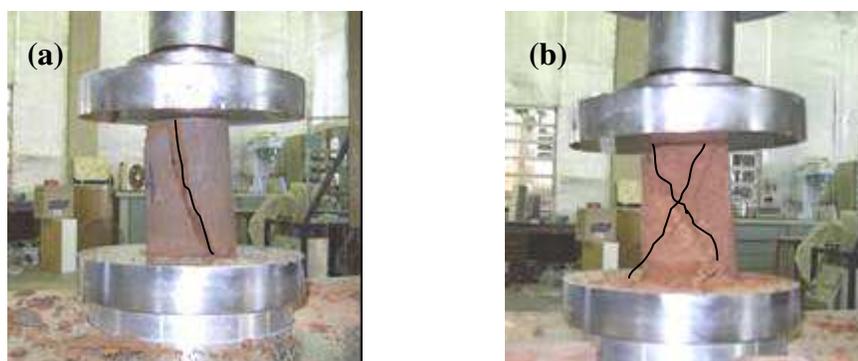


Figura 63. Corpo-de-prova de solo-cimento-cinza após ensaio de compressão simples.

Para o ensaio de ultra-som, quando analisadas as idades dentro de cada tratamento, as velocidades de onda ultra-sônica apresentaram semelhante configuração encontrada para a evolução das resistências à compressão ao longo do tempo (**Figuras 61a e 61b**). No entanto, se encontrou correlação exponencial positiva entre as variáveis estudadas até a idade de 120 dias (**Figura 62b**), pois apesar de existir semelhança do comportamento entre os ensaios destrutivo e não-destrutivo, as variações dos valores de velocidade e de resistência de cada tratamento, nas idades de 180 e 360 dias, não foram da mesma ordem de grandeza. Este fato pode ser observado nas **Figuras 61a e 61b**, nas quais as variáveis de cada tratamento sofreram decréscimos em idades avançadas; os valores de velocidades aos 360 dias de idade, no entanto, situaram-se próximos ou abaixo das velocidades na idade de 7 dias, o que não ocorreu no ensaio de compressão, visto que todos os tratamentos na idade 360 dias apresentaram valores de resistências estatisticamente iguais ou superiores às suas respectivas resistências na idade de 30 dias.

A inexistência de correlação entre a velocidade e resistência em idades avançadas pode ser explicada a partir do processo de microfissuração interna do material solo-cimento-cinza ao longo do tempo e a relação de significância deste processo nos resultados dos ensaios não-destrutivos. Segundo Gonçalves (2007), as modificações microestruturais que ocorrem nos materiais devido a sua permanência em condições de temperatura e umidade não-controladas são captadas durante a aplicação do ensaio de ultra-som e como tal ensaio esta fundamentado nas propriedades elásticas do material, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson sofrem consideráveis mudanças. Dessa maneira, o processo de microfissuração interna dos tratamentos de solo-cimento-cinza ao longo do tempo foi facilmente captado pelo ensaio de ultra-som, e conseqüentemente, acarretou na queda significativa dos valores de velocidade de onda ultra-sônica em idades avançadas. Entende-se que o ensaio destrutivo de compressão simples mostrou apenas as modificações ocorridas na estrutura cristalina do material ao longo do tempo, e não conseguiu captar as microfissurações, levando a quedas de resistência inferiores aos decréscimos ocorridos nos valores de velocidade de onda ultra-sônica.

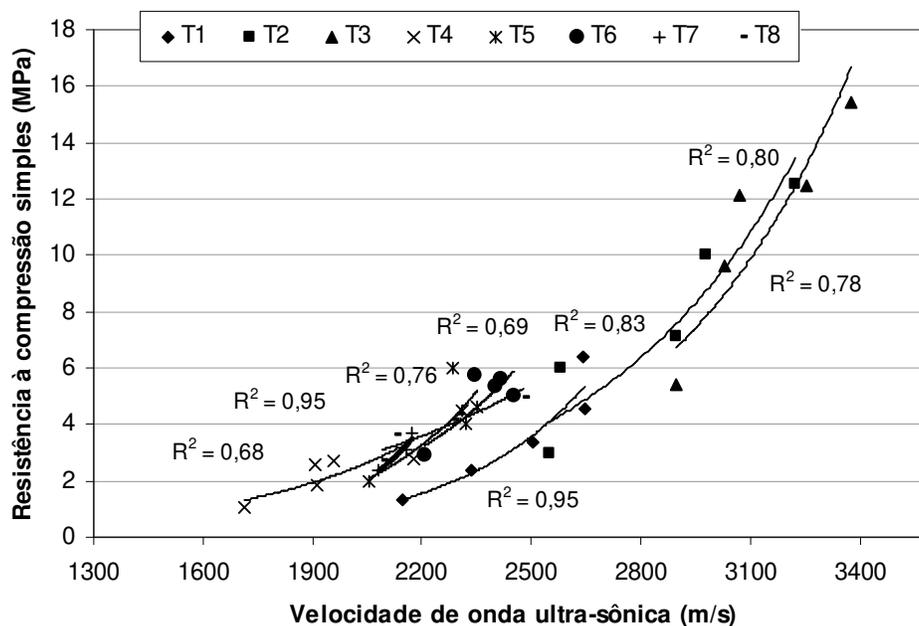


Figura 62b. Relação entre velocidade e resistência dos tratamentos de solo-cimento-cinza dentro do mesmo tratamento – retirado idade de 180 e 360 dias.

5.3.3. RESULTADOS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

Os valores médios de capacidade de absorção de água foram analisados estatisticamente (**Tabela 37**) e sua respectiva análise de variância está apresentada na **Tabela 36**. A evolução da capacidade de absorção de água dos corpos-de-prova de solo-cimento-cinza em função das idades está representada na **Figura 64**.

Tabela 36. Análise de variância referente aos efeitos dos tratamentos sobre a variável capacidade de absorção de água (%).

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
Idade	3	175	58	589	0,00001
Tipo de tratamento	7	1773	253	2559	0,00001
Interação idade x tratam.	21	53	2	25	0,00001
Total	127	2011			
Média geral = 16,56%			Coefficiente de variação = 1,89%		

Tabela 37. Capacidade de absorção de água (%), aos 7, 30, 60 e 90 dias, de corpos-de-prova confeccionados sob diferentes tratamentos.

Absorção (%)	Tratamentos								
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	
7 dias	Média	14,08 e A	13,16 f A	12,69 f A	20,78 c A	19,68 d A	20,42 c A	24,05 a A	22,92 b A
	DPM	0,11	0,04	0,17	0,27	0,05	0,57	0,78	0,22
	CV	0,08	0,03	0,13	0,13	0,02	0,28	0,32	0,10
30 dias	Média	12,69 e B	11,86 f B	11,64 f B	18,02 d B	17,64 d B	18,69 c B	20,97 a B	20,27 b B
	DPM	0,04	0,14	0,06	0,18	0,26	0,45	0,42	0,36
	CV	0,03	0,12	0,05	0,10	0,15	0,24	0,20	0,18
60 dias	Média	11,46 d C	11,18 d D	10,91 d C	17,98 b B	17,17 c B	16,85 c C	19,04 a C	19,09 a C
	DPM	0,20	0,17	0,07	0,51	0,19	0,52	0,36	0,55
	CV (%)	0,17	0,16	0,06	0,28	0,11	0,31	0,19	0,29
90 dias	Média	11,38 e C	11,29 e C	10,51 f C	18,18 b B	17,61 d B	16,97 d C	20,41 a C	18,65 c C
	DPM	0,17	0,13	0,28	0,31	0,30	0,25	0,48	0,14
	CV	0,15	0,11	0,26	0,15	0,17	0,15	0,23	0,08

* 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).

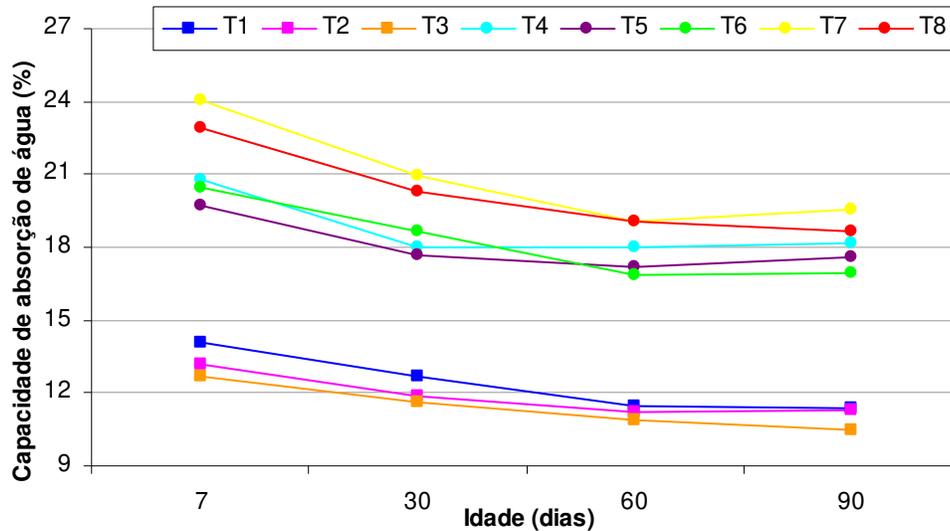


Figura 64. Evolução da capacidade de absorção de água ao longo do tempo.

Assim como ocorrido nos ensaios mecânicos, pode-se afirmar, pela **Tabela 36**, que o fator tipo de tratamento, bem como suas interações, promoveram efeitos significativos na variável capacidade de absorção de água.

Os valores de capacidade de absorção de água alcançados pelas misturas de solo-cimento (T1, T2 e T3) foram da mesma ordem de grandeza dos valores encontrados na revisão bibliográfica do presente trabalho, mostrando coerência nos estudos.

Quando analisados os tratamentos dentro de cada idade, os menores valores de capacidade de absorção de água, independentemente da idade, foram alcançados pelos tratamentos T1, T2 e T3, os quais não diferiram entre si (**Tabela 37**). Já os tratamentos de solo-cimento-cinza (T4 ao T8) apresentaram os maiores valores de absorção de água, sendo tais absorções tanto mais elevadas quanto maiores foram as quantidades de cinzas incorporadas às misturas. O tratamento T7 destacou-se pelo pior desempenho frente à capacidade de absorção de água. Tal tratamento também apresentou a menor massa específica aparente, refletindo a importância da densidade no desempenho físico final do material. Para todos os tratamentos, quanto menor foi a massa específica aparente seca, maior foi a capacidade de absorção de água, visto que o aumento de teor de cinza gerou maiores volumes de vazios (dificuldades de compactação) e, conseqüentemente, menores condições de estabilização do sistema solo-cimento-cinza.

Quando analisadas as idades dentro de cada tratamento, todos os tratamentos sofreram decréscimos significativos nos valores da capacidade de absorção de água durante os primeiros 60 dias. Após 60 dias de idade, todos os tratamentos tenderam à estabilização, visto que não houve diferenças significativas de capacidade de absorção de água entre as idades de 60 e 90 dias.

Para todos os tratamentos, a diminuição da capacidade de absorção de água acompanhou a evolução do ganho de resistência ao longo do tempo (**Figura 65**), ou seja, houve uma correlação negativa entre tais variáveis. O processo de estabilização dos tratamentos no decorrer de 90 dias tornou o material formado mais estável, e, portanto, menos susceptível a alta capacidade de absorção de água. As maiores quedas de capacidade de absorção de água em função do ganho de resistência foram expressas pelos tratamentos com adição de cinza.

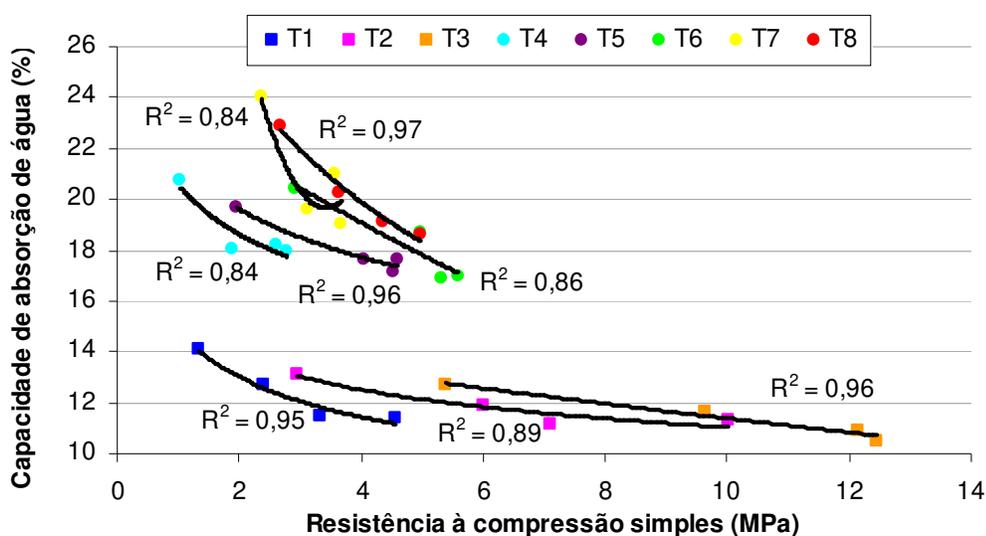


Figura 65. Relação entre ganho de resistência e capacidade de absorção de água para cada tratamento.

5.3.4. RESULTADOS DO ENSAIO DE DURABILIDADE

Após a aplicação do ensaio de durabilidade nos tratamentos, ou seja, aplicação de ciclos de molhamento e secagem nos corpos-de-prova, obteve-se os resultados referentes à perda e ganho de massa, e os valores de resistência à compressão simples, os quais estão apresentados **Tabela 38** e **Figura 66**.

Tabela 38. Resultados do ensaio de durabilidade de corpos-de-prova confeccionados sob diferentes tratamentos.

Tratamentos		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈
7 dias	Pm*	-0,92	-0,25	-0,87	-0,11	-0,48	-0,80	-0,11	-0,30
	Rd*	2,16	5,04	8,32	1,71	3,31	4,52	2,38	3,45
	CV*	5,33	1,92	3,83	2,59	6,91	8,85	6,19	2,26
	Rc*	1,33	2,95	5,37	1,05	1,96	2,91	2,36	2,69
30 dias	Pm	+0,16	+0,15	+0,03	+0,27	+0,18	+0,27	+0,37	+0,21
	Rd	3,61	6,74	10,65	2,61	5,28	4,74	3,10	3,74
	CV	2,67	3,97	6,85	3,43	2,94	2,97	7,01	6,73
	Rc	2,40	6,02	9,63	1,87	4,59	4,99	3,55	3,63
60 dias	Pm	+0,16	+0,15	+0,03	+0,27	+0,18	+0,27	+0,37	+0,21
	Rd	6,63	11,56	16,37	3,37	4,44	4,52	2,08	3,35
	CV	3,85	2,55	2,25	8,02	7,98	7,70	1,87	5,91
	Rc	3,33	7,12	12,14	2,79	4,52	5,33	3,67	4,36
90 dias	Pm	+0,15	+0,13	+0,10	+0,20	+0,19	+0,20	+0,11	+0,18
	Rd	7,67	13,72	17,01	3,44	4,97	6,90	3,54	4,50
	CV	3,09	7,68	1,79	3,70	6,78	6,62	3,41	4,40
	Rc	4,57	10,03	12,46	2,59	4,05	5,59	3,12	4,97
120 dias	Pm	+0,17	+0,16	+0,20	+0,24	+0,27	+0,25	+0,27	+0,31
	Rd	6,56	12,75	14,29	2,72	4,71	8,89	4,53	4,36
	CV	0,98	1,10	7,81	9,76	5,42	7,91	4,22	8,12
	Rc	6,39	12,51	15,41	2,73	5,99	5,77	3,44	4,17
180 dias	Pm	+0,08	+0,07	+0,05	+0,06	+0,09	+0,22	+0,03	+0,02
	Rd	6,89	12,31	20,42	2,55	4,06	8,52	3,10	3,24
	CV	9,80	6,15	3,06	8,66	3,16	6,75	10,14	8,52
	Rc	3,76	6,87	12,80	2,04	4,55	7,74	5,07	5,82
360 dias	Pm	-0,23	-0,32	-0,38	-0,33	-0,33	-0,43	-0,34	-0,40
	Rd	3,17	7,36	13,04	1,79	3,59	5,31	2,61	3,77
	CV	4,13	5,20	0,34	0,00	9,17	3,67	3,95	9,24
	Rc	3,83	7,59	13,66	2,07	3,66	5,14	3,02	3,49

* Pm - (-) Perda de Massa (%); (+) Ganho de Massa (%)

Rd – Resistência à compressão simples após ciclos de molhamento e secagem (MPa)

CV – Coeficiente de variação da resistência Rd (%)

Rc - Resistência à compressão simples de controle (MPa) –resultados da Tabela 35.

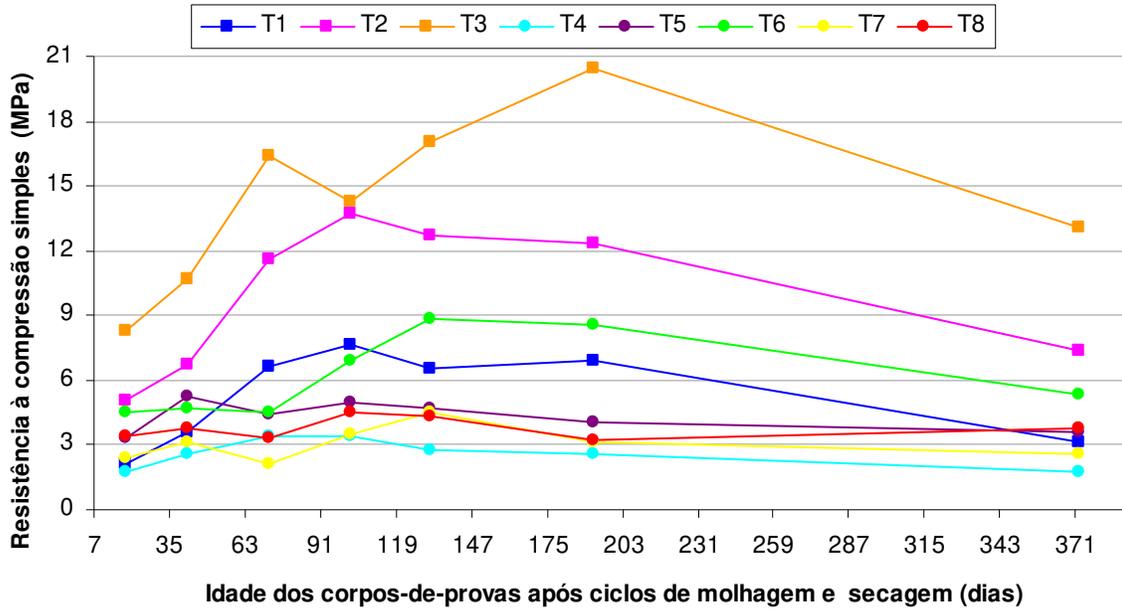


Figura 66. Evolução da resistência à compressão simples, ao longo do tempo, dos corpos-de-prova após ciclos de molhamento e secagem.

Quanto ao acompanhamento do comportamento do material perante os ciclos de molhamento e secagem, não se verificou nenhuma desintegração dos corpos-de-prova, até mesmo nas arestas dos cilindros. Um ou outro grão despreendeu-se ao longo de todo ensaio, mas não foi observada qualquer trinca na sua superfície, qualquer que fosse o tratamento.

Todos os tratamentos submetidos aos ciclos de molhamento e secagem, na idade de 7 dias, apresentaram perda de massa variando entre 0,11% a 0,92 % (**Tabela 38**), valores estes estatisticamente iguais entre si e aceitáveis para a utilização como componentes construtivos. Tal comportamento expressou o grau de estabilização desses tratamentos, visto que aos 7 dias de idade os mesmos acabaram de sair da cura úmida, apresentando mínima estabilidade volumétrica e, conseqüentemente, perda de massa.

Independentemente da idade, a perda ou ganho de massa ocorridos em todos os tratamentos foram da mesma ordem de grandeza, sendo que a percentagem máxima, tanto para a perda como para o ganho de massa, foi de 1%. Tais valores foram próximos aos encontrados por Marangon et al. (2000) e Grande (2003), os quais aplicaram os mesmos ciclos de molhamento e secagem, respectivamente, em corpos-de-prova e tijolos de solo arenoso estabilizado com cimento e obtiveram perda e/ou ganho de massa inferior a 1,7%.

A evolução da resistência dos corpos-de-prova submetidos aos ciclos de molhamento e secagem (**Figura 66**) foi equivalente à evolução da resistência dos corpos-de-prova controle (**Figura 62**). Notou-se que, entre as idades de 30 a 180 dias, todos os tratamentos, após o ensaio de durabilidade, apresentaram ganhos de massa não-significativos e as correspondentes resistências (Rd) foram estatisticamente maiores que seus respectivos valores de resistência de controle (Rc) (**Tabela 38**). Acredita-se que esses efeitos ocorreram devido à aplicação dos procedimentos de imersão e secagem dos corpos-de-prova (cura térmica), que resultou na modificação e melhoria da hidratação dos compostos cimentantes, e, conseqüentemente, no aumento da resistência e da estabilidade volumétrica do material após aplicação dos ciclos de molhamento e secagem.

Observou-se também que, chegando um ano de idade, os tratamentos tornaram-se estáveis, ou seja, as suas resistências se estabilizaram, pois a aplicação de ciclos de molhamento e secagem aos corpos-de-prova com 360 dias de idade pouco afetou o comportamento físico-mecânico dos mesmos, visto que seus valores de resistências (Rd) foram estatisticamente iguais aos respectivos valores de resistência de controle (Rc) e os valores de perda de massa não foram significativos, encontrando-se na faixa de 0,20 a 0,40%.

Para todos os tratamentos, independentemente da idade, os valores de massa específica aparente seca dos corpos-de-prova após o término dos ciclos de molhamento e secagem situaram-se próximos aos seus respectivos valores de massa específica aparente seca máxima, corroborando a pouca significância das perdas e ganhos de massa nas densidades dos tratamentos.

5.3.5. ESCOLHA DO TRATAMENTO SOLO-CIMENTO-CINZA PARA CONSTRUÇÃO DA EDIFICAÇÃO-PROTÓTIPO

Em termos de resistência à compressão simples, somente os tratamentos T1 e T4 não atenderam às especificações da NBR 8491 (ABNT, 1984) empregada para tijolos prensados de solo-cimento; essa norma estabelece, como mínimo, o valor médio de 2,00 MPa e nenhum valor inferior a 1,70 MPa, aos 7 dias de idade. Em termos de absorção de água, somente os tratamentos T7 e T8 não atenderam às diretrizes da NBR 8491 (ABNT, 1984) que

estabelecem, como máximo, o valor médio de 20% e nenhum superior a 22%, aos 7 dias de idade.

Com exceção do tratamento T4, ressalta-se que, independentemente da idade, todos os tratamentos apresentaram resistências à compressão simples superiores a 2,00 MPa. Em relação à capacidade de absorção de água, todos os tratamentos apresentaram valores inferiores a 18% após 30 dias de idade, exceto os tratamentos T7 e T8.

Quanto ao ensaio de durabilidade, após a execução dos ciclos de molhamento e secagem, todos os tratamentos, independentemente da idade, apresentaram perda de massa inferior a 0,95% e valores de resistência igual ou superior a 2,00 MPa. Estes resultados foram satisfatórios em relação à recomendação de Neves (1988) segundo a qual o sistema solo-cimento não deve apresentar perda de massa maior ou igual a 10% e resistência mínima de 1,00 MPa.

Analisando-se tais características físico-mecânicas dos diferentes tratamentos de solo-cimento-cinza, a mistura T5 foi o tratamento com adição de cinza que apresentou menor teor de agente estabilizador e ao mesmo tempo atendeu aos requisitos mínimos de resistência à compressão e máximos de absorção de água especificados pela norma NBR 8491 (ABNT, 1984), também apresentando bom desempenho frente aos ensaios de durabilidade e de ultrassom. Portanto, dentro dos critérios analisados, o tratamento T5 – (92,5% de solo + 7,5% de cinza) estabilizado com 10% de cimento foi definido como o material (tratamento) mais adequado para a construção das paredes monolíticas da edificação-protótipo, pois o mesmo alcançou os primeiros objetivos da presente pesquisa: incorporou resíduo agroindustrial e apresentou desempenho físico-mecânico desejável para utilização como elemento construtivo de paredes não estruturais.

5.4. DESEMPENHO DAS PAREDES MONOLÍTICAS DE SOLO-CIMENTO-CINZA DE CASCA DE ARROZ

5.4.1. DESEMPENHO DO PROCESSO PRODUTIVO DAS PAREDES MONOLÍTICAS DE SOLO-CIMENTO-CINZA

Durante a construção da edificação-protótipo foram observados alguns aspectos relevantes.

Os dois operários que executaram a obra são qualificados no mercado como pedreiro e ajudante, e não possuíam nenhum conhecimento relacionado ao sistema construtivo de paredes maciças de solo-cimento-cinza. As maiores dificuldades relatadas pelos operários foram relacionadas à manipulação e alinhamento das fôrmas para compactação do material. Para solucionar tal problema, os operários propuseram a utilização de fôrmas de menores dimensões, as quais ficariam mais leves e fáceis de execução de alinhamento e nivelamento. Os pilares pré-fabricados de concreto armado funcionaram perfeitamente como guias fixas para as fôrmas e aumentaram a rigidez das paredes, recebendo as cargas permanentes referentes à cobertura para que as paredes de solo-cimento-cinza se comportassem como vedações não-portantes.

Quanto à quantidade dos materiais e homogeneização dos mesmos, a partir da transformação do traço em massa para traço em volume (**Tabela 39**), não houve dificuldades durante a preparação do produto solo-cimento-cinza (mistura T5), sendo eliminada a utilização de argamassadeira elétrica e acarretando, em consequência disso, redução no consumo de energia. O solo coletado em jazida foi deixado em área próxima à obra sob a proteção de um plástico preto; a cinza de casca de arroz foi coletada na beneficiadora em sacos de rafia e colocada juntamente com os sacos de cimento em local protegido das intempéries, ao lado do canteiro de obra. Os operários não encontraram nenhuma dificuldade na preparação dos materiais, que se resumiu apenas à necessidade de peneiramento do solo e da cinza através das peneiras de malha de 4 mm e 0,6 mm, respectivamente.

Tabela 39. Transformação do traço em massa para traço em volume – Tratamento T5.

Materiais	Cimento	Solo	Cinza	Água
Densidade (condição solta)	1420 kg/m ³	1180 kg/m ³	260 kg/m ³	1000 kg/m ³
Traço (em massa)	10%	92,5%	7,5%	H _{ot} = 16,43%
		Solo + Cinza = 100 %		
Massa	25 kg	231,25 kg	18,75 kg	45 kg
Volume = massa/densidade	0,0176 m ³	0,1959 m ³	0,0721 m ³	0,045 m ³
Traço (em volume)	1	11	4	2,5

A assimilação da técnica construtiva foi rápida devido ao caráter repetitivo das operações e o controle tecnológico realizado pelos operários foi fácil, sendo empregado o “teste do bolo”*, de acordo com o CEPED (1984), para verificação da umidade ótima de compactação e visualização da existência de marcas sobre a superfície compactada antes do início da execução da camada seguinte, assim verificando o grau de compactação. Ressalta-se que a quantidade de água colocada durante o processo de mistura dos materiais foi sendo adicionada aos poucos e, simultaneamente, foram realizados vários “testes do bolo”, pois assim conseguiu-se compensar a umidade higroscópica do solo no teor de umidade ótimo da mistura final. Estes procedimentos confirmaram que não há necessidade de mão-de-obra especializada para tal fim, facilitando programas organizados de autoconstrução.

Conforme resultados dos ensaios laboratoriais das amostras coletadas durante a execução da obra, os valores médios de teor de umidade ótima e de massa específica aparente seca encontrados para as paredes monolíticas de solo-cimento-cinza situaram-se, respectivamente, em torno de 17,5% e 1,650 g/cm³. Tais valores resultaram em um bom grau de compactação (GC = 97%), demonstrando que o teste do bolo e o processo manual de compactação foram procedimentos adequados para o controle tecnológico in situ e o alcance de energia similar ao do ensaio normal de Proctor.

*Teste do bolo: enche-se a mão com a mistura, apertando-se com força. Em seguida verifica-se se apresenta marca de dedos com nitidez (se não apresentar há falta de água na mistura). Deixa-se cair no chão de uma altura de 1 m, se o bolo se desmanchar em poucos pedaços a quantidade de água está no ponto correto, se não desmanchar há excesso de água e deve-se deixar o excesso de água evaporar-se.

Não houve problemas na retirada imediata dos conjuntos de fôrmas após o término do painel de solo-cimento-cinza, pois os mesmos apresentaram boa coesão. As fôrmas, por serem de compensado plastificado, também ajudaram no momento da desfôrma, pois as paredes não sofreram deslocamentos e permaneceram com textura interna e externamente lisas, prontas para recebimento direto de massa corrida ou pintura. As paredes de solo-cimento-cinza apresentaram bom alinhamento e devido à utilização de espaçadores de PVC dentro das fôrmas (**Figura 32b**), não havendo “embarrigamento” das mesmas. A cor final das paredes de solo-cimento-cinza ficou no tom de marrom claro (**Figura 67**), bem próximo da cor de tijolos maciços de barro cozido, sendo que não se consegue visualmente notar a presença da cinza de casca de arroz.

Para os cálculos de consumo dos materiais para confecção de 1 m³ de parede monolítica foram utilizadas as seguintes equações:

$$\frac{Pc}{V} = \frac{Cc}{1 + Cc} \times \gamma_{s \max} \quad (18)$$

$$\frac{Vm}{V} = \frac{1}{1 + Cc} \times \frac{Cm}{\gamma_m} \times \gamma_{s \max} \quad (19)$$

onde:

Pc = consumo de cimento (kg);

V = volume do material compactado ou volume da parede monolítica (m³);

Cc = teor de cimento em massa (%)/100;

$\gamma_{s \max}$ = massa específica aparente seca máxima do material compactado (kg/m³);

Vm = consumo de solo ou de cinza na condição solta (m³);

Cm = teor de solo ou de cinza em massa (%)/100;

γ_m = densidade do solo ou da cinza na condição solta (kg/m³).

Tabela 40. Comparação entre os tratamentos solo-cimento e solo-cimento-cinza enfocando o consumo de materiais para execução de 1 m³ de parede monolítica.

Traços	Valores aproximados de consumo de materiais para execução de 1 m ³ de parede monolítica		
	Solo (m ³)	Cimento	Cinza (m ³)
T5 - (92,5% de solo + 7,5% de cinza) estabilizado com 10% de cimento	1,20	154 kg ≈ 3 sacos	0,45
T2 - (100% de solo + 0% de cinza) estabilizado com 10% de cimento	1,50	178 kg ≈ 3½ sacos	-

*saco de cimento de 50 kg.

Comparando-se os valores de consumo de materiais (**Tabela 40**), tem-se que a utilização racional dos recursos naturais e o aproveitamento de resíduos foram relativamente alcançados, visto que houve a incorporação significativa de cinza de casca de arroz no produto final, e o consumo de cimento e de solo foi minimizado. Na condição solta, a mistura de solo-cimento-cinza-água apresentou-se muito mais volumosa que a mistura de solo-cimento-água (característica notada nos ensaios preliminares), o que acarretou na necessidade de menos mistura para o preenchimento de um mesmo volume e menor capacidade de recebimento de energia de compactação.

Em relação ao tempo gasto para a execução dos painéis monolíticos de solo-cimento-cinza, observou-se que 8 horas de trabalho de 2 operários (pedreiro e servente) resultaram na elevação de 5,20 m² de parede maciça. Neste consumo de tempo de mão-de-obra foi contabilizado o tempo gasto na preparação da mistura de solo-cimento-cinza, na montagem e alinhamento do conjunto de fôrmas, no escoramento das guias para evitar desalinhamentos da mesma devido à pressão lateral da compactação da mistura, na compactação da mistura, e por fim na desfôrma do painel recém-compactado.

Portanto, o consumo de mão-de-obra para a produção de 1 m² de painel maciço de solo-cimento-cinza foi de 1,5 horas, demonstrando ser este um processo construtivo rápido, visto que, para a execução de 1 m² de alvenaria convencional (alvenaria cerâmica de 10 cm espessura com tijolo cerâmico furado de 10 x 20 x 20 cm³ assente com argamassa), utilizando-se as mesmas condições de confecção da parede maciça, se gasta em média 3,5 horas de mão-de-obra (Revista Construção Mercado, 2007). O menor consumo de mão-de-obra na construção de paredes monolíticas foi resultante da eliminação de argamassa de assentamento e da redução do tempo gasto no alinhamento das paredes.



(a)



(b)

Figura 67. Edificação-protótipo: (a) vista sul e oeste, (b) vista norte e leste.

5.4.2. DESEMPENHO ESTRUTURAL DAS PAREDES MONOLÍTICAS DE SOLO-CIMENTO-CINZA

Quanto à avaliação de resistência à compressão simples x deformação dos mini-painéis de solo-cimento-cinza observou-se que antes da ruptura não houve ocorrência de fissuras ou destacamentos. O sistema de aplicação de carga e as placas metálicas de capeamento se mostraram eficientes na transmissão dos esforços. Os mini-painéis apresentaram baixa deformabilidade e ruptura frágil (**Figura 68**).



(a)



(b)

Figura 68. Ruptura dos mini-painéis monolíticos de solo-cimento-cinza – aplicação da carga na direção de compactação – Eixo 3.

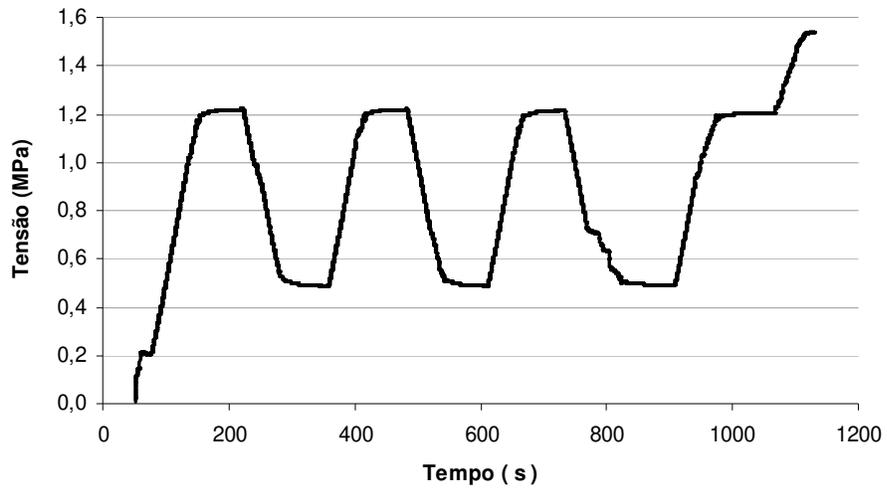


Figura 69. Sequência do carregamento aplicado aos mini-painéis de solo-cimento-cinza.

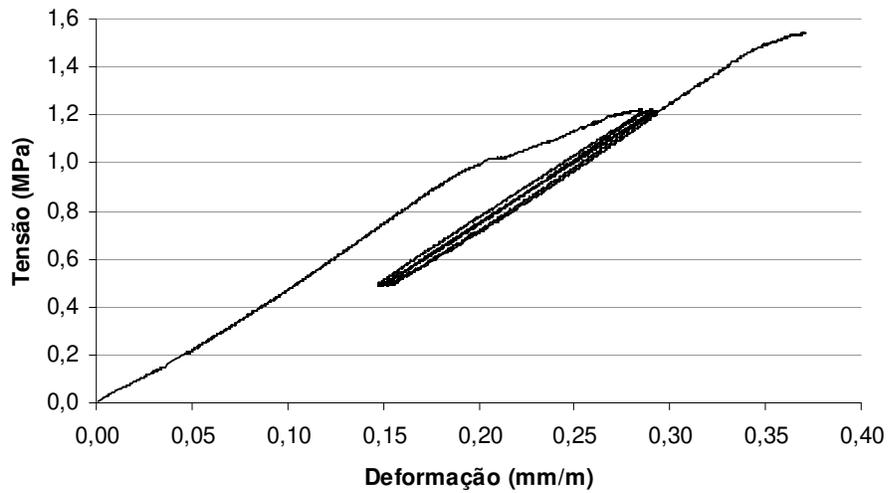


Figura 70. Diagrama tensão x deformação do mini-painel de solo-cimento-cinza nº1.

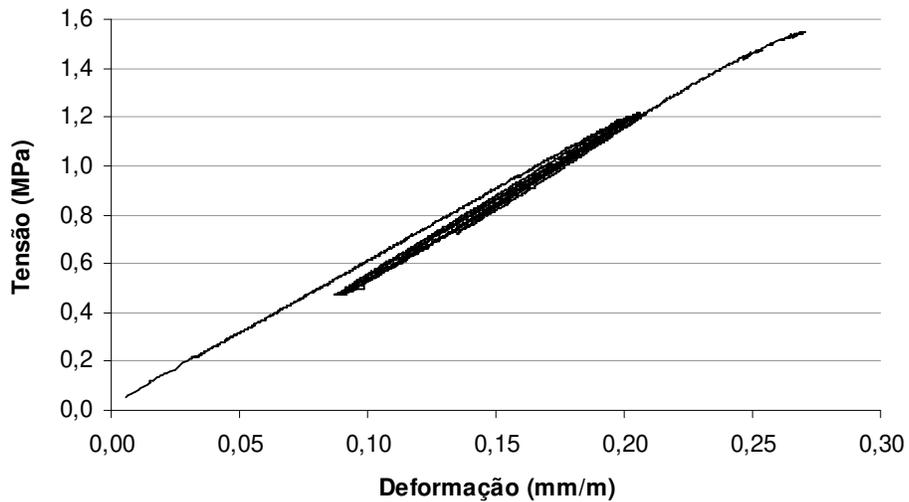


Figura 71. Diagrama tensão x deformação do mini-painel de solo-cimento-cinza nº2.

Tabela 41. Desempenho estrutural dos mini-painéis de solo-cimento-cinza aos 180 dias.

Mini painel	Carga de ruptura (kgf)	Tensão ruptura (MPa)	Deformação (mm/m) à $\sigma = 0,5$ MPa (média extensômetro)	Deformação (mm/m) à $\sigma = 0,4.F_c = 1,2$ MPa (média extensômetro)	Módulo de elasticidade longitudinal (MPa)
1	12700	3,53	0,156	0,291	5198
2	10800	3,00	0,091	0,207	6034
3*	18400	5,11	0,078	0,126	14583
Média		3,25	-	-	5616

*Mini-painel 3 não foi considerado no cálculo da média da Tensão e do Módulo de Elasticidade, pois o mesmo atingiu grau de compactação de 125%, e conseqüentemente sua densidade e carga de ruptura foi discrepante dos demais painéis.

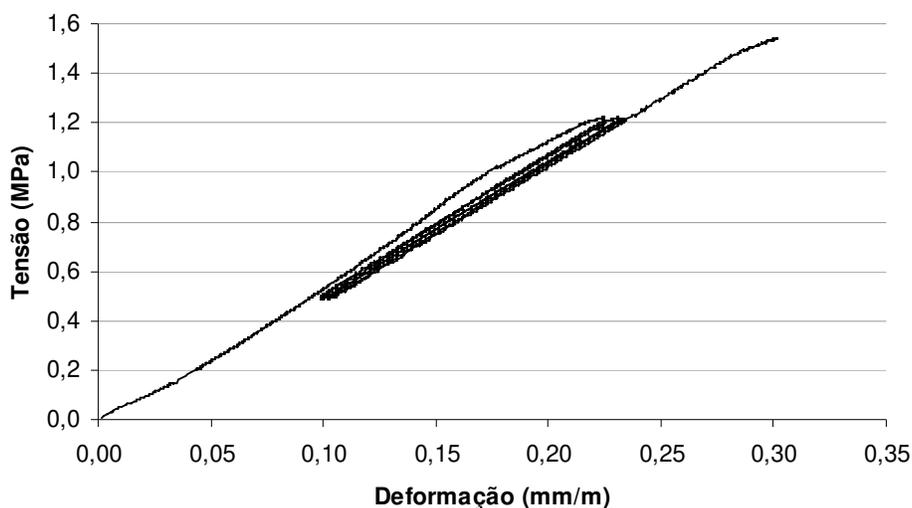


Figura 72. Diagrama tensão x deformação do mini-painel de solo-cimento-cinza n°4.

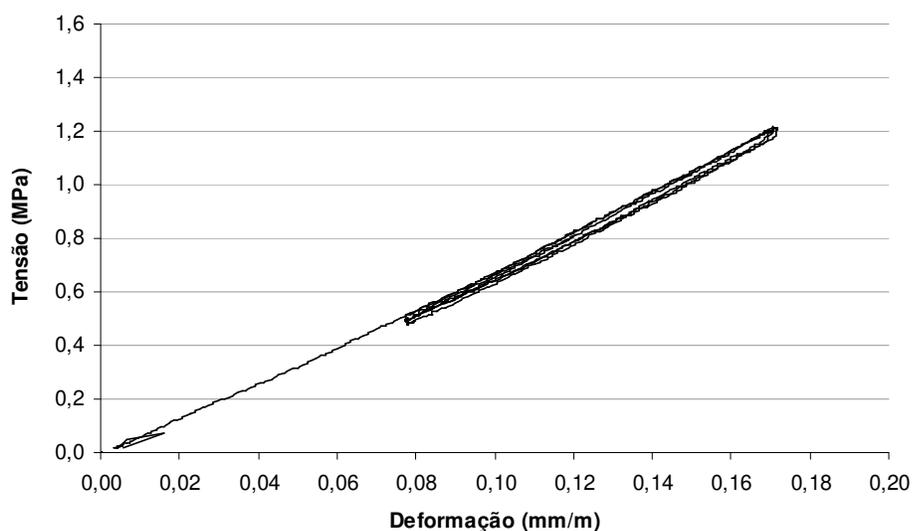


Figura 73. Diagrama tensão x deformação do mini-painel de solo-cimento-cinza n°5.

Tabela 42. Desempenho estrutural dos mini-painéis de solo-cimento-cinza aos 360 dias.

Mini painel	Carga de ruptura (kgf)	Tensão ruptura (MPa)	Deformação (mm/m) à $\sigma = 0,5$ MPa (média extensômetro)	Deformação (mm/m) à $\sigma = 0,4.Fc = 1,2$ MPa (média extensômetro)	Módulo de elasticidade longitudinal (MPa)
4	11700	3,25	0,104	0,235	5343
5	12500	3,47	0,072	0,181	6420
6*	15500	4,30	0,021	0,075	12963
Média		3,36	-	-	5881

*Mini-painel 6 não foi considerado no cálculo da média da Tensão e do Módulo de Elasticidade, pois o mesmo atingiu grau de compactação de 117%, e conseqüentemente sua densidade e carga de ruptura foi discrepante dos demais painéis.

Do ponto de vista estrutural, os mini-painéis de solo-cimento-cinza obtiveram um bom desempenho e apresentaram eficiência em torno de 0,72 e 0,92 em relação à resistência de corpos-de-prova do tratamento T5 na idade de 180 dias e 360 dias, respectivamente. A relação tensão mini-painel / tensão corpo-de-prova (T_{mp}/T_{cp}) e o módulo de elasticidade longitudinal (MOE) assemelham-se aos valores encontrados pelo CEPED (1984) e Houben e Guillaud (1994), cujos valores para painéis monolíticos de solo-cimento foram, respectivamente, os seguintes: $T_{mp}/T_{cp} = 0,70$ e MOE entre 2.000 a 7.000 MPa. Quanto ao desempenho estrutural utilizando-se o ensaio de ultra-som, a **Tabela 43** apresenta os valores médios de velocidades de onda ultra-sônica longitudinal e transversal dos mini-painéis de solo-cimento-cinza.

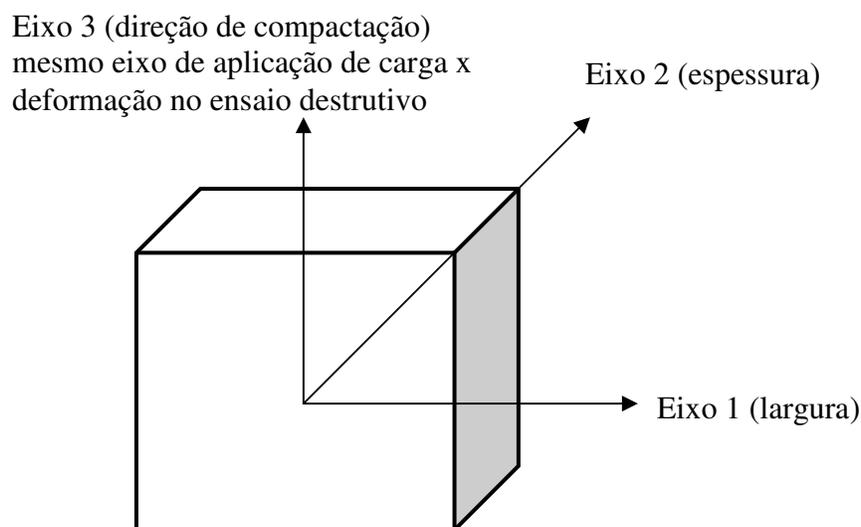


Figura 74. Eixos de leitura do tempo de propagação da onda nos mini-painéis.

Tabela 43. Valores médios de velocidade de onda ultra-sônica longitudinal e transversal dos mini-painéis de solo-cimento-cinza, aos 7 dias de idade.

Mini-Painéis	Velocidade longitudinal (m/s)			Velocidade transversal (m/)					
	V ₁₁	V ₂₂	V ₃₃	V ₁₂	V ₂₁	V ₁₃	V ₃₁	V ₂₃	V ₃₂
1	2637	2548	1875	1308	1298	800	872	863	884
2	2626	2640	1935	1320	1304	810	854	820	896
4	2643	2609	1954	1295	1326	822	833	842	840
5	2564	2526	1756	1307	1341	808	861	874	873
Média	2618	2581	1880	1307	1317	810	855	850	873
DPM*	36	53	89	10	20	9	16	24	24
CV	1,39	2,05	4,75	0,78	1,51	1,12	1,92	2,81	2,76

* DPM – desvio padrão médio

CV (%) – coeficiente de variação

Pelo exame da **Tabela 43** notou-se que o material solo-cimento-cinza compactado apresentou proximidade entre os valores de velocidade V₁₁ e V₂₂, caracterizando o sólido solo-cimento-cinza como de isotropia transversal, ou seja, trata-se de um material chamado transversalmente isotrópico, pois um de seus planos principais é um plano de isotropia (a cada elemento infinitesimal há um plano em que as propriedades mecânicas são idênticas em todas as direções). Portanto, as relações tensão-deformação para um material transversalmente isotrópico são simplificadas, sendo que os índices 1 e 2 (para 1-2 o plano de isotropia) nas constantes do material são intercambiáveis. Assim, utilizando-se o valor médio de massa específica aparente seca do solo-cimento-cinza $\rho = 1.620 \text{ kg/m}^3$, a **Equação 2** e a **Figura 39**, tem-se:

$$C_{22} = C_{11} = \rho \cdot \left(\frac{V_{11} + V_{22}}{2} \right)^2 \cdot 10^{-6};$$

$$C_{33} = \rho \cdot V_{33}^2 \cdot 10^{-6};$$

$$C_{55} = C_{44} = \rho \cdot \left(\frac{V_{13} + V_{31} + V_{23} + V_{32}}{4} \right)^2 \cdot 10^{-6};$$

$$C_{66} = \rho \cdot \left(\frac{V_{12} + V_{21}}{2} \right)^2 \cdot 10^{-6};$$

$$C_{12} = C_{21} = 2 \cdot C_{66} - C_{11};$$

C₂₃=C₃₂=C₁₃=C₃₁ existe, porém podendo ser desprezada pela isotropia de 1-2.

Estas relações mostram que um sólido com isotropia transversal é caracterizado por cinco constantes elásticas independentes. Portanto, a matriz de rigidez é igual a:

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} = 10946 & C_{12} = 5370 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} = 5370 & C_{11} = 10946 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{33} = 5726 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} = 1162 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} = 1162 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} = 2788 \end{bmatrix}$$

O inverso da matriz de rigidez é igual à matriz flexibilidade:

$$[C^{-1}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} = 1,2 \cdot 10^{-4} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} = -5,9 \cdot 10^{-5} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} = -5,9 \cdot 10^{-5} & \frac{1}{E_1} = 1,2 \cdot 10^{-4} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{E_3} = 1,75 \cdot 10^{-4} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} = 8,61 \cdot 10^{-4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} = 8,61 \cdot 10^{-4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} = 3,59 \cdot 10^{-4} \end{bmatrix}$$

Para o caso em estudo, a matriz flexibilidade foi dada por:

$$[S] = \begin{bmatrix} E_1 = 8312 & \nu_{12} = 0,49 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \nu_{12} = 0,49 & E_1 = 8312 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E_3 = 5726 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{23} = 1162 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{13} = 1162 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{12} = 5370 \end{bmatrix}$$

Portanto, pelos resultados do ensaio de ultra-som, o módulo de elasticidade longitudinal do material solo-cimento-cinza no Eixo 3 (eixo de compactação) foi igual a 5.726 MPa, valor este próximo ao encontrado pelo ensaio mecânico destrutivo (**Tabelas 41 e 42**), mostrando que o ensaio não-destrutivo foi adequado para a determinação das constantes elásticas do material solo-cimento-cinza. Ressalta-se que os mini-painéis na idade de 7 dias não sofreram influência das variações ambientais sendo, portanto, possível encontrar boa correlação entre tais ensaios.

Quanto ao coeficiente de Poisson, a matriz de flexibilidade do material solo-cimento-cinza revelou o valor de coeficiente igual 0,49; o que encontra-se dentro da faixa apresentada por Teixeira e Godoy citado por Cintra et al. (2003), cujos valores de coeficiente de Poisson para solos arenosos e/ou siltosos compactados situaram-se entre 0,4 e 0,5.

Destaca-se a importância da utilização do ensaio não destrutivo de ultra-som, pois o mesmo, além de apresentar simplicidade na sua execução, eliminando interferências operacionais dos ensaios destrutivos, revelou que o material apresenta propriedades elásticas (módulo de elasticidade transversal (G) e coeficiente de Poisson (ν)) que não são fáceis de obter pelos métodos destrutivos e tampouco são encontradas na literatura.

5.4.3. DESEMPENHO TÉRMICO DAS PAREDES MONOLÍTICAS DE SOLO-CIMENTO-CINZA

Quanto ao desempenho térmico das paredes monolíticas pelo método simplificado, os resultados dos ensaios laboratoriais referentes à determinação das propriedades térmicas do material solo-cimento-cinza de casca de arroz indicaram os seguintes valores: massa específica aparente seca de 1.620 kg/m³, condutividade térmica de 0,65 W/(m.K) e calor específico de 0,96 kJ/(kg.K).

Os valores de densidade, condutividade térmica e de calor específico do material solo-cimento-cinza são semelhantes aos valores relatados por Meukam et al. (2004) para o material similar solo-cimento-pozolana natural, os quais variaram entre 1.350 a 1.700 kg/m³ para densidade; entre 0,60 a 0,70 W/(m.K) para condutividade térmica, e 0,90 a 0,97 (kJ/kg.K) para calor específico. Entretanto, segundo os referidos autores, os valores encontrados para o material solo-cimento situaram-se entre 1.500 a 2.000 kg/m³ para densidade; 0,75 a 1,15 W/(m.K) para condutividade térmica, e 0,89 a 1,00 (kJ/kg.K) para calor específico, resultados superiores aos encontrados para o material solo-cimento-pozolana natural e também para o material solo-cimento-cinza. Estas constatações podem ser explicadas devido à relação existente entre a densidade e as propriedades térmicas do material. A partícula de cinza de casca de arroz é um material muito mais poroso que o grão de solo, e tais poros, por conterem ar, não conduz calor com a mesma intensidade do solo, assim tornando o material solo-cimento-cinza menos condutor térmico que o material solo-cimento. Diante disso, seria razoável afirmar que a cinza promoveu efeitos significativos na variável condutividade térmica, e a diminuição da condutividade seria tanto maior quanto maiores forem as quantidades de cinza incorporadas ao sistema. Quanto ao valor do calor específico, esta propriedade foi menos susceptível a mudanças bruscas, pois seus valores foram bem próximos dos valores comumente encontrados para solo-cimento.

Utilizando-se tais propriedades térmicas e os métodos de cálculo das características térmicas de componentes de edificações descritas na revisão bibliográfica (**Equações 3 a 11**), os valores encontrados para a transmitância térmica, a capacidade térmica, o atraso térmico e o fator solar da parede monolítica de solo-cimento-cinza encontram-se na **Tabela 44**.

Tabela 44. Principais características térmicas da parede monolítica de solo-cimento-cinza.

Capacidade térmica [kJ/(m ² .K)]	Transmitância térmica [W/(m ² .K)]	Atraso térmico (h)	Fator de calor solar (%)
187,65	2,82	4,20	7,30

*Considerando espessura da parede de 12 cm, valor de absorvância igual a 0,65, emissividade alta e direção de fluxo de calor horizontal.

Os valores de transmitância térmica, de capacidade térmica e de atraso térmico da parede monolítica de solo-cimento-cimento foram próximos aos encontrados para paredes construídas com blocos cerâmicos de 3 furos (13 x 28 x 18,5 cm³) ou 2 furos (14 x 29,5 x 19 cm³) com espessura de argamassa de assentamento de 1,0 cm e espessura de argamassa de emboço de 2,5 cm, os quais, segundo NBR 15220 (ABNT, 2005), caracterizam-se, respectivamente, pelos valores de 2,43 W/(m².K) e 2,45 W/(m².K) de transmitância; 192 kJ/(m².K) e 203 kJ/(m².K) de capacidade térmica; e 3,8 horas e 4,0 horas de inércia térmica. Vale ressaltar que, para atingir tal similaridade entre o comportamento térmico dos referidos materiais, atenção deve ser dada ao dimensionamento da espessura e composição da vedação (espessura da parede maciça, tipo e espessura de revestimento), pois a resistência térmica e a transmitância térmica estão diretamente relacionadas com a espessura e a condutividade térmica dos materiais, e a capacidade térmica e o atraso térmico levam em conta o calor específico e a densidade de cada elemento construtivo.

As paredes construídas com elementos construtivos maciços, como o tijolo maciço cerâmico e tijolo maciço de solo-cimento de dimensões de 10 x 6 x 22 cm³ (assentados em meio tijolo, com espessura de argamassa de 1,0 cm, sem revestimento), segundo NBR 15220 (ABNT, 2005) e Ferreira (2003), caracterizam-se, respectivamente, pelos valores de 3,70 W/(m².K) e 2,80 W/(m².K) de transmitância; 149 kJ/(m².K) e 162 kJ/(m².K) de capacidade térmica, e 2,4 horas e 4,0 horas de atraso térmico. Tais dados mostraram que a parede maciça de solo-cimento-cinza tendeu ao mesmo comportamento térmico da envoltória confeccionada com tijolos maciços de solo-cimento, pois mesmo que as propriedades térmicas dos materiais solo-cimento e solo-cimento-cinza tenham sido diferentes, o tipo de composição da envoltória (argamassa de assentamento dos tijolos) compensou os valores de resistência e atraso térmico.

Quando comparados com a vedação de tijolos maciços cerâmicos, a parede maciça de solo-cimento-cinza favoreceu o melhor desempenho, pois diminuiu a quantidade de calor que atravessa a superfície do componente construtivo, assim como aumentou a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura da parede. O valor de atraso térmico da parede maciça de solo-cimento-cinza corroborou as afirmações acerca do material terra, possibilitando alcançar altos valores de inércia térmica a partir de menores quantidades ou espessuras na composição da envoltória.

Avaliando-se o desempenho térmico da parede monolítica de solo-cimento-cinza através do critério de verificação do enquadramento de características térmicas dentro dos limites admissíveis recomendados pela NBR 15220 (ABNT, 2005), a parede monolítica de solo-cimento-cinza apresentou conformidade com os valores estabelecidos pela norma, sendo indicada como um material promissor em relação ao desempenho térmico. Esta norma recomenda que, para a edificação encontrar-se adequada ao clima de Campinas, as vedações externas com paredes devem apresentar transmitância térmica $\leq 3,6 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ e atraso térmico $\leq 4,3$ horas.

Ressalta-se que o uso do componente construtivo parede maciça de solo-cimento-cinza na construção de edificação pode apresentar adequação aos diferentes climas do Brasil. Se a parede maciça de solo-cimento-cinza for utilizada com espessura entre 10 a 15 cm, tal componente construtivo apresenta transmitância térmica $\leq 3,6 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ e atraso térmico $\leq 4,3$ horas, o que, segundo a NBR 15220 (ABNT, 2005), são vedações recomendadas para construções nas regiões sul, sudeste, norte e litoral brasileiros. Porém, se a parede maciça de solo-cimento-cinza for construída com espessura acima de 18 cm, tal componente construtivo apresenta transmitância térmica $\leq 2,2 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ e atraso térmico $\geq 6,5$ horas, o que, segundo a mesma norma, é ideal para uso em edificações nas regiões centro-oeste e sertão nordestino. Tais simulações mostraram a versatilidade do material solo-cimento-cinza compactado, pois, com pequenas alterações na espessura do componente construtivo, pode-se favorecer o material a desenvolver bom desempenho térmico frente a diferentes climas.

Vale salientar que para cálculos do fator solar foi considerado o valor de 0,65 de absorvância devido ao fato de as vedações da edificação-protótipo ficarem aparentes e a cor predominante aproximar-se da do tijolo maciço cerâmico aparente. Assim, as paredes maciças de solo-cimento-cinza não atenderam ao requisito da NBR 15220 (ABNT, 2005), que

recomenda fator solar $\leq 4,0\%$ para a região de Campinas. Como o fator solar depende da absorvância do material, a mistura solo-cimento-cinza pode enquadrar-se aos valores recomendados pela norma a partir da aplicação de algum revestimento ou pintura na parede, assim diminuindo o valor de absorvância à radiação solar.

Entretanto, pelos critérios estabelecidos pelo Projeto de Norma 02:136.01-004 (ABNT, 2004) - Desempenho de edifícios habitacionais de até cinco pavimentos, a parede monolítica de solo-cimento-cinza não apresentou conformidade com os valores estabelecidos pelo projeto de norma, a qual recomenda que, para a edificação encontrar-se adequada ao clima de Campinas, as vedações externas com paredes devem apresentar transmitância térmica $\leq 2,5 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ e capacidade térmica $\geq 130 \text{ kJ/(m}^2\cdot\text{k)}$. A parede de solo-cimento-cinza adequou-se ao limite de capacidade térmica e situou-se um pouco acima do valor limite de transmitância térmica. Porém, se for executado algum tipo de pintura de forma que diminua a absorvância da parede, o componente construtivo de solo-cimento-cinza torna-se adequado para qualquer zona bioclimática, segundo prescrições do projeto desta norma.

Dentro dos materiais e técnicas de construção utilizados nas paredes da edificação-protótipo, os mesmos não apresentam divergência quanto às recomendações das normas; no entanto, fatores como materiais e técnicas de construção da cobertura, implantação, espaçamento, ventilação, área, posição e proteção das aberturas necessitam de maior aprofundamento nos estudos de projetos, pois estes fatores influenciam tanto quanto as vedações externas (paredes) na adequação das edificações ao clima local.

Quanto ao desempenho térmico das paredes monolíticas por meio de medições “in loco” (método de desempenho detalhado), as **Figuras 75 a 78** apresentam as médias das variáveis ambientais (umidade relativa do ar, temperatura do ar e índice pluviométrico) e as médias das variáveis térmicas do interior da edificação-protótipo (umidade relativa do ar, temperaturas do ar e temperatura superficial) referentes aos períodos de medições de 19/01 a 06/02; e 17/07 a 05/08 do ano de 2007. Configuram-se as situações de queda brusca de temperatura externa por alteração das condições climáticas sendo estes dias considerados atípicos (dias chuvosos 🌧️). Para a definição do dia típico de verão e de inverno foi realizado a média de todos os dados coletados para cada período de 10 minutos, sendo descartados da análise dos dados os dias atípicos.

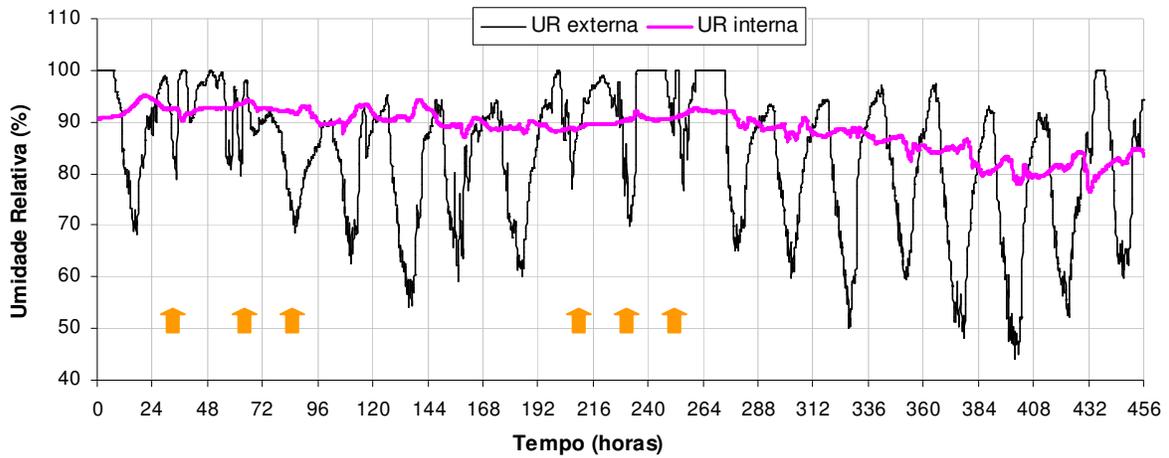


Figura 75. Umidade relativa do ar no período de 19/01 a 06/02/2007 – verão.

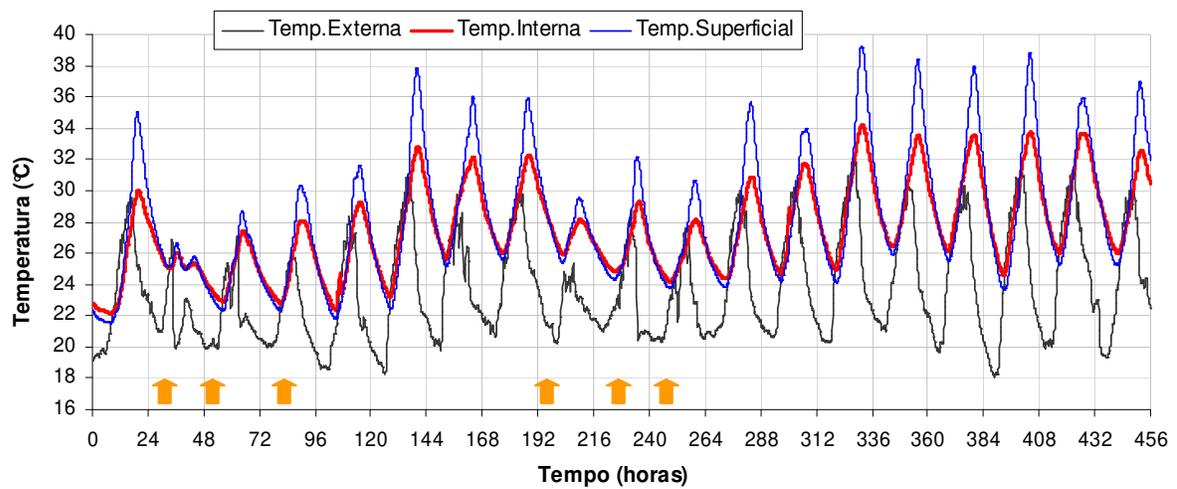


Figura 76. Temperatura do ar e temperatura superficial - verão.

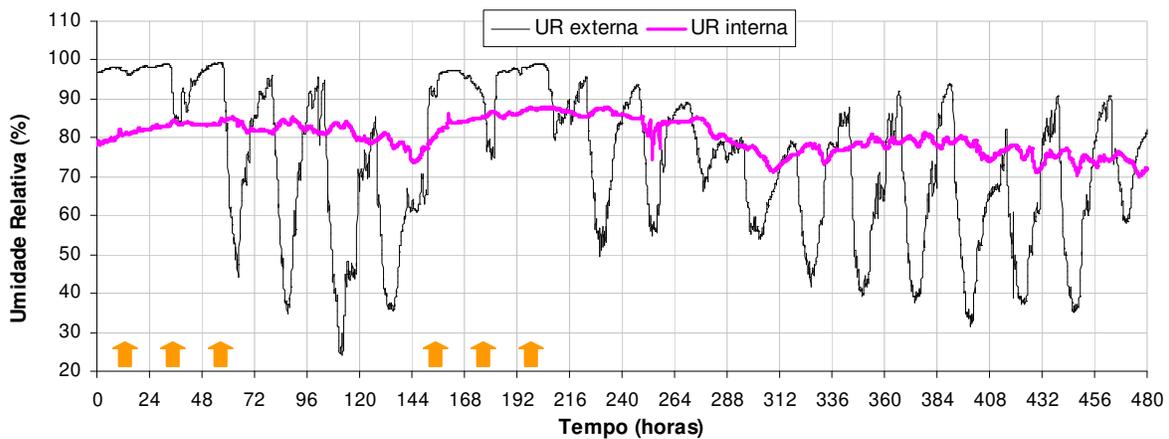


Figura 77. Umidade relativa do ar no período de 17/07 a 05/08/2007 – inverno.

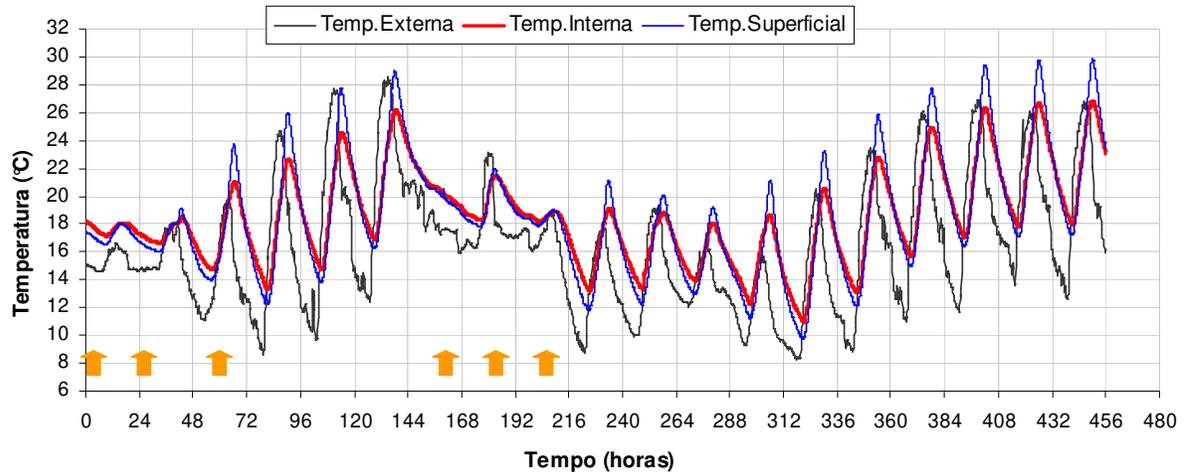


Figura 78. Temperatura do ar e temperatura superficial – inverno.

As **Figuras 75 e 76** mostram, para o mês de janeiro de 2007, média máxima e mínima de temperatura do ar de 30,1 °C e 21,2 °C, respectivamente, com 80,6 % de umidade relativa média do ar, 275,5 mm de chuva total para o período e 9 °C de amplitude térmica média. Já para o mês de julho de 2007, as **Figuras 77 e 78** mostram média máxima e mínima de temperatura do ar de 24,1 °C e 12,3 °C, respectivamente, umidade relativa média do ar de 74%, 227,4 mm de chuva total para o período e 13,5 °C de amplitude térmica média. Estes dados foram contrastados com os dados climáticos da região de Campinas no período de 1998 a 2005 (**Anexo 1**) observando-se ligeiras modificações para temperaturas médias máxima e mínima, e aumento significativo no índice pluviométrico para o mês de julho de 2007. Apesar de não ter sido comparado com o ano climático de referência, acredita-se que o período monitorado apresentou medições representativas das estações climáticas de Campinas.

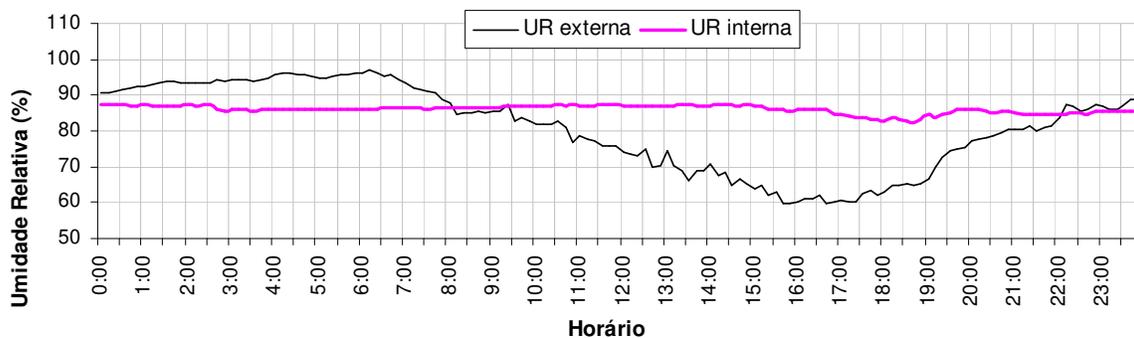


Figura 79. Umidades médias ao longo do dia 02/02/2007 – dia típico verão.

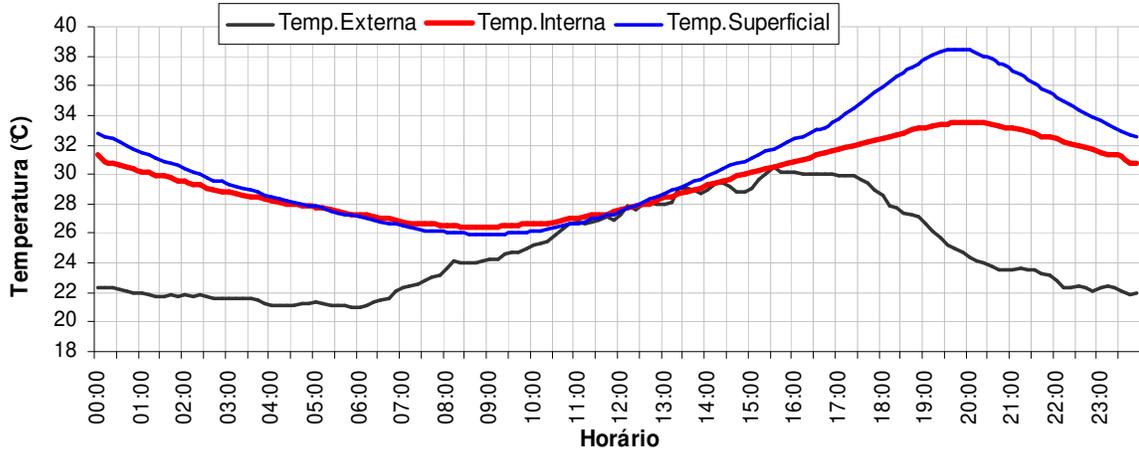


Figura 80. Temperaturas médias ao longo do dia 02/02/2007 – dia típico verão.

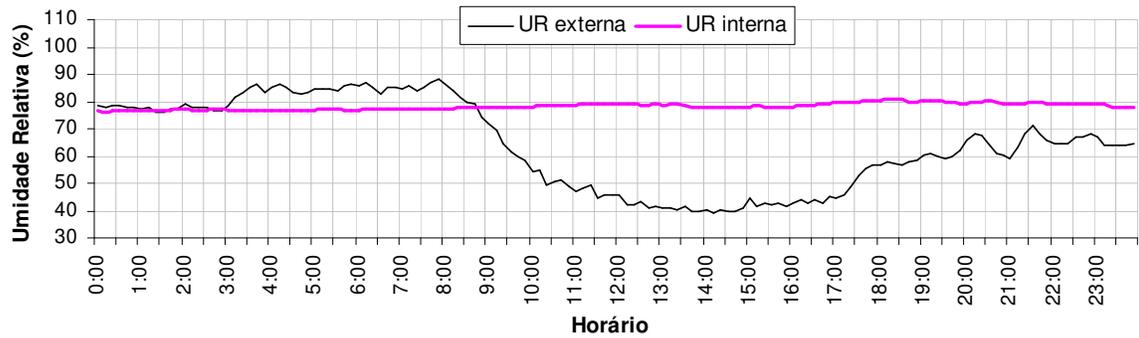


Figura 81. Umidades médias ao longo do dia 31/07/2007 – dia típico inverno.

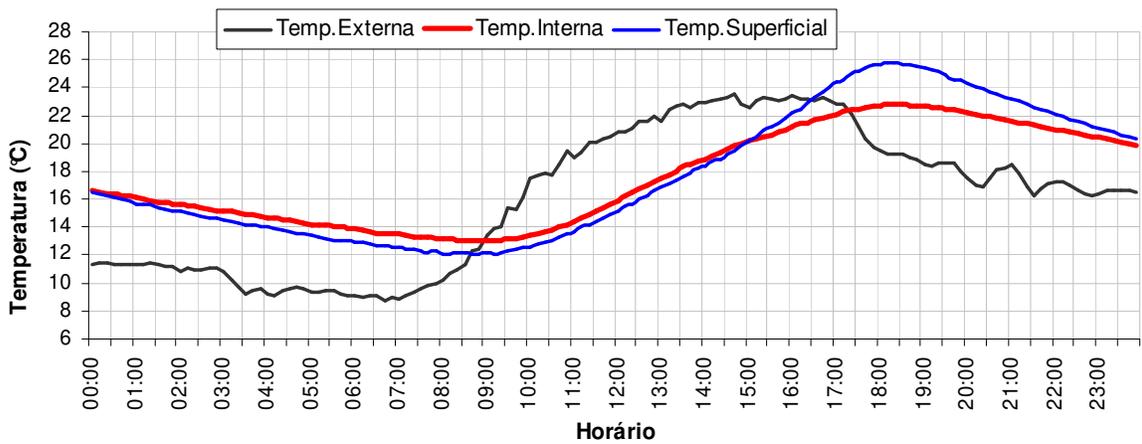


Figura 82. Temperaturas médias ao longo do dia 31/07/2007 – dia típico inverno.

Para o dia típico de verão e de inverno (**Figuras 79 e 81**), por não haver renovação de ar (ventilação) no interior da edificação, a umidade relativa do ar interno permaneceu constante, alcançando valores de 88% e 78%, respectivamente.

Em relação à temperatura para o dia típico de verão (**Figura 80**), no intervalo das 10:30 as 14:30 h os valores da temperatura do ar externo mantiveram-se semelhantes aos valores de temperatura do ar interno, sendo que, para os demais períodos, as temperaturas do ar interno foram superiores às temperaturas externas. Externamente, a temperatura máxima de 30,2 °C foi alcançada as 16:00 h e a temperatura mínima de 21 °C, às 5:00 h. Internamente, a temperatura máxima de 33,7 °C foi alcançada as 20:00 h e a temperatura mínima de 26 °C, às 9:00 h, o que revelou atraso térmico próximo de 4 horas, tanto para as temperaturas mínimas como para as temperaturas máximas. Quanto às amplitudes térmicas, ou seja, as diferenças entre as temperaturas máximas e mínimas, externamente alcançou o valor de 9,2 °C e internamente chegou a 7,7 °C. Assim, para o amortecimento térmico da edificação-protótipo, ou seja, a capacidade das vedações (paredes e cobertura) de diminuir a amplitude das variações térmicas (**Equação 20**), o índice encontrado ficou em torno de 0,83.

$$\mu = \frac{AT_{interna}}{AT_{externa}} \quad (20)$$

onde:

μ = amortecimento térmico;

$AT_{interna}$ = amplitude térmica do interior do protótipo;

$AT_{externa}$ = amplitude térmica do ambiente externo.

Em relação à temperatura para o dia típico de inverno (**Figura 82**), no intervalo das 9:00 às 17:00 h os valores da temperatura do ar externo mantiveram-se superiores aos valores de temperatura do ar interno, sendo que, para os demais períodos, as temperaturas do ar interno foram superiores às temperaturas externas. Externamente, a temperatura máxima de 23,7 °C foi alcançada as 14:40 h e a temperatura mínima de 9,2 °C, às 6:30 h. Internamente, a temperatura máxima de 23° C foi alcançada as 18:20 h e a temperatura mínima de 13,3 °C, às 9:20 h, o que revelou atraso térmico próximo de 4 horas para as temperaturas máximas e em torno de 3 horas para as temperaturas mínimas. Quanto às amplitudes térmicas, externamente alcançou o valor de 14,5 °C e internamente chegou a 9,7 °C. Assim, o índice encontrado para o amortecimento térmico foi de 0,66.

Tanto para o dia típico de verão como para o de inverno (**Figura 80 e 82**), pode-se observar que a temperatura superficial da parede ao longo do dia apresentou o mesmo comportamento da temperatura interna do protótipo, confirmando o atraso térmico máximo de 4 horas. Apesar desta semelhança, para o dia típico de verão, entre 13:00 e 1:00 h, as temperaturas superficiais foram sempre maiores que as temperaturas internas, chegando a uma diferença máxima de 4,8 °C para o horário de 19:40 h. Já para o dia típico de inverno, as temperaturas superficiais foram maiores que as temperaturas internas no período de 15:00 à 24:00 h, alcançando diferença máxima de 3,1 °C.

Tais observações, além de indicarem a proximidade entre o valor de atraso térmico e o valor calculado a partir das propriedades térmicas do material, revelaram que, devido ao atraso e amortecimento térmico, os ganhos térmicos da edificação-protótipo ocorreram no período da tarde e as perdas térmicas ocorreram no período da manhã. É provável que a parede monolítica de solo-cimento-cinza caracteriza-se por baixa transmitância térmica, e possui considerável capacidade de absorção de calor (efusividade) e de retenção de calor (calor específico). Estas características evidenciaram a presença de boa inércia térmica na parede de solo-cimento-cinza.

Avaliando-se o desempenho térmico da parede monolítica de solo-cimento-cinza através do critério de verificação do enquadramento das temperaturas interiores dentro dos limites admissíveis recomendados pelo Projeto de Norma 02:136.01.004 (ABNT, 2004), para as condições de verão na Zona Bioclimática 3 (Campinas), o projeto de norma especifica que, para a obtenção do nível de desempenho térmico mínimo, a temperatura máxima no interior da edificação deve ser menor do que a máxima exterior, neste caso, de 30,2 °C. A edificação-protótipo ficou dentro do limite de desempenho térmico mínimo no período de 24:00 à 16:00 h. Já para a obtenção do nível de desempenho intermediário, a temperatura interna não deve ser superior a 29 °C. A edificação-protótipo ficou dentro do limite de desempenho intermediário no período de 2:30 às 13:30 h. Já para a obtenção do nível de desempenho superior, a temperatura interior não deve exceder 27 °C. Nessa condição, a edificação-protótipo não se adequou em nenhum horário. Evidentemente, o monitoramento da edificação-protótipo não expressou as condições de habitabilidade (taxa de ventilação, ocupação e uso de equipamentos), portanto a análise de desempenho térmico para as condições de verão pelos critérios de projeto de norma ficou prejudicada.

Para as condições de inverno na Zona Bioclimática 3 (Campinas), o Projeto de Norma 02:136.01.004 (ABNT, 2004) especifica que, para a obtenção do nível de desempenho térmico mínimo, a temperatura mínima no interior do protótipo deve ser maior do que 12 °C. A edificação-protótipo ficou dentro do limite estabelecido para desempenho térmico mínimo. Já para a obtenção do nível de desempenho intermediário, a temperatura interna não deve ser inferior a 15 °C. A edificação-protótipo ficou dentro do limite de desempenho intermediário no período de 12:00 às 2:00 h. Já para a obtenção do nível de desempenho superior, a temperatura interior deve ser maior que 17 °C. Nessa condição, a edificação-protótipo adequou-se no período de 13:30 às 24:00 h. Notou-se que foi possível alcançar o bom desempenho térmico em nível mínimo, mas os demais níveis poderiam ser atingidos se a edificação-protótipo fosse dotada de fontes internas de calor mínimas como iluminação e ocupação, pois como a parede de solo-cimento-cinza possui considerável massa térmica, o calor gerado internamente seria retido e liberado mais lentamente para o exterior.

Através destas análises, notou-se que a edificação-protótipo apresentou bom desempenho térmico frente às condições de inverno, e o período crítico para seu desempenho foi influenciado pelas condições de verão. Apesar das paredes de solo-cimento-cinza serem vedações promissoras para o bom desempenho térmico, a edificação-protótipo necessita do uso de recursos projetuais como aberturas para ventilação, sombreamento e orientação para alcançar melhor desempenho frente às variações térmicas do verão. Acredita-se que a influência das propriedades térmicas da vedação parede monolítica de solo-cimento-cinza seja mais significativa para o desempenho térmico da edificação no período de frio e os efeitos das propriedades térmicas da vedação de cobertura sejam relevantes para o período de calor.

5.4.4. DESEMPENHO FÍSICO-QUÍMICO DAS PAREDES MONOLÍTICAS DE SOLO-CIMENTO-CINZA

De um modo geral, os difratogramas realizados para a mistura de solo-cimento (T2) e solo-cimento-cinza (T5), **Figuras 83 e 84**, se assemelham, apresentando picos de difração característicos para a fração C-S-H (silicatos de cálcio hidratados) e aluminatos de cálcio hidratados, produtos característicos da hidratação do cimento Portland. Todavia, notou-se uma ligeira diferença entre os difratogramas no que se refere à intensidade e quantidade dos picos de refração. Para a mistura de solo-cimento percebeu-se uma maior quantidade e intensidade dos picos de silicatos de cálcio hidratados proporcionada pela não-adição de cinza de casca de arroz.

As **Figuras 85 e 86** apresentam as imagens obtidas por Microscopias Eletrônica de Varredura (MEV) para as misturas de solo-cimento (T2) e solo-cimento-cinza (T5). Percebeu-se pelas imagens o efeito da presença da cinza na mistura solo-cimento no que diz respeito ao aspecto geral da estrutura cristalina das amostras analisadas. Como já relatado, as cinzas prejudicaram o processo de estabilização do solo-cimento, aumentando os vazios e diminuindo, conseqüentemente, as reações pozolânicas entre as partículas de solo e de cimento.

Com ampliação de 100 vezes (**Figura 85**), foi possível observar, para o tratamento de solo-cimento, uma superfície homogênea e com menos porosidade, e, para o solo-cimento-cinza, uma superfície granular e com grande presença de concavidades. A ampliação de 10.000 vezes (**Figura 86**) permitiu a visualização dos cristais de C-S-H ou gel cimentante, os quais tendem à aglomeração devido às suas dimensões coloidais da ordem de 1 μm . Assim, para o tratamento solo-cimento notou-se uma menor quantidade de espaços vazios, evidenciando uma maior formação de silicatos de cálcio hidratados e, resultando, portanto, em uma estrutura cristalina de melhor qualidade.

Os principais elementos detectados pelas análises por Espectrômetro de Energia Dispersiva (EDS) foram o Al, Si, Ca e Fe para ambas as misturas (**Figura 87**).

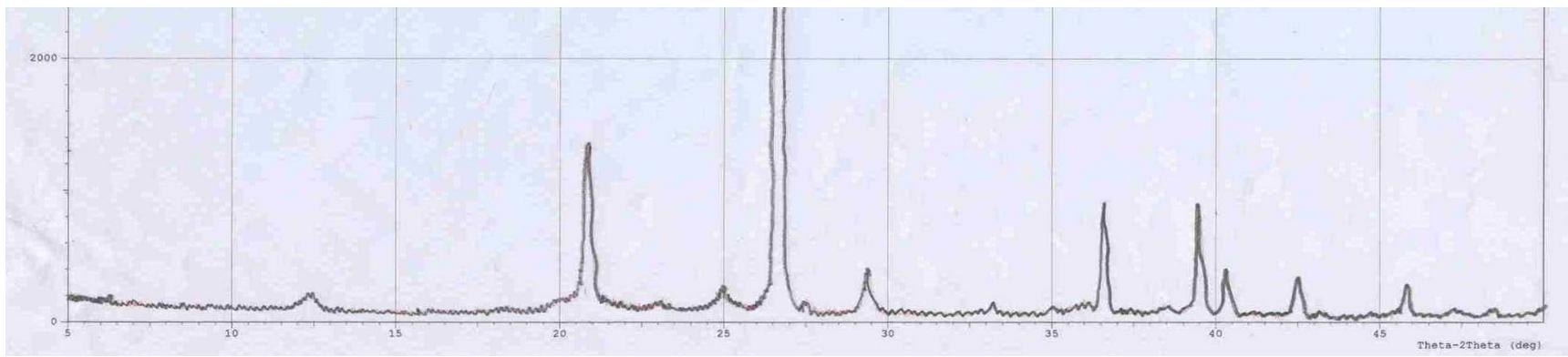


Figura 83. Difratoograma de raios-X da amostra de solo-cimento.

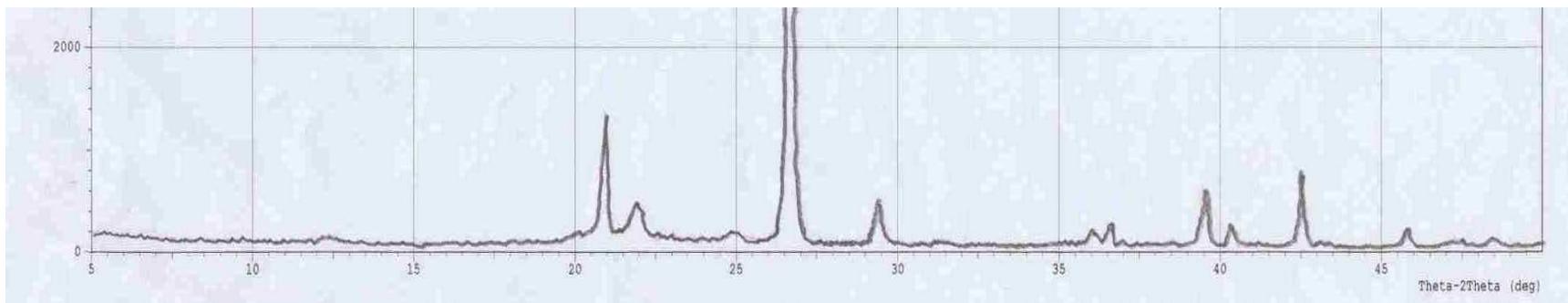


Figura 84. Difratoograma de raios-X da amostra de solo-cimento-cinza.

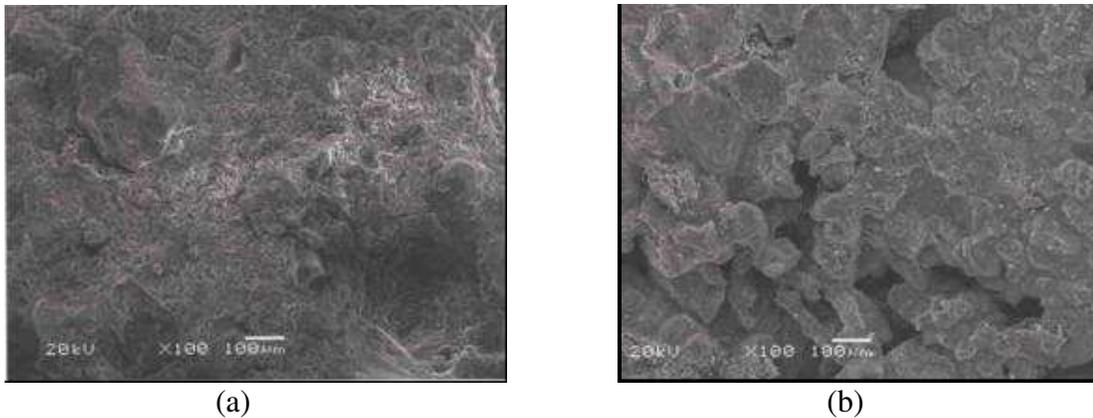


Figura 85. Análise de MEV dos tratamentos: (a) imagem do solo-cimento (T2) ampliada em 100x; (b) imagem do solo-cimento-cinza (T5) ampliada em 100x.

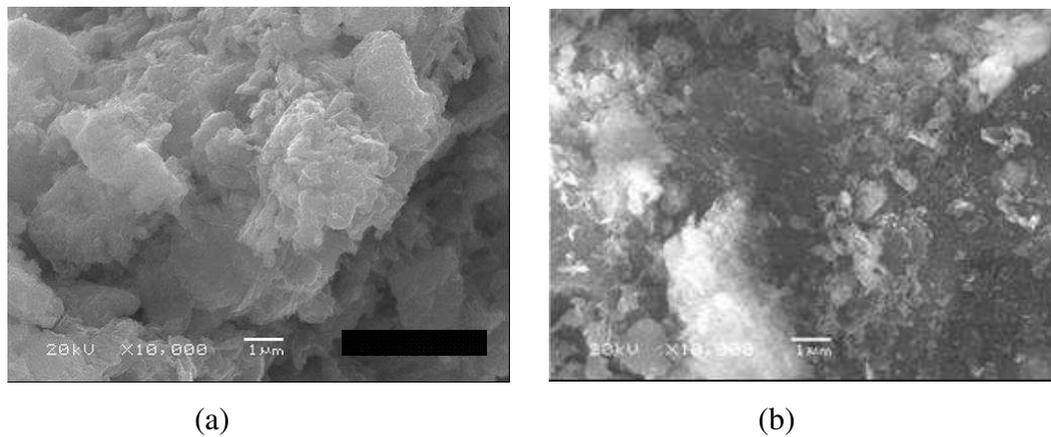


Figura 86. Análise de MEV dos tratamentos: (a) imagem do solo-cimento (T2) ampliada em 10.000x; (b) imagem do solo-cimento-cinza (T5) ampliada em 10.000x.

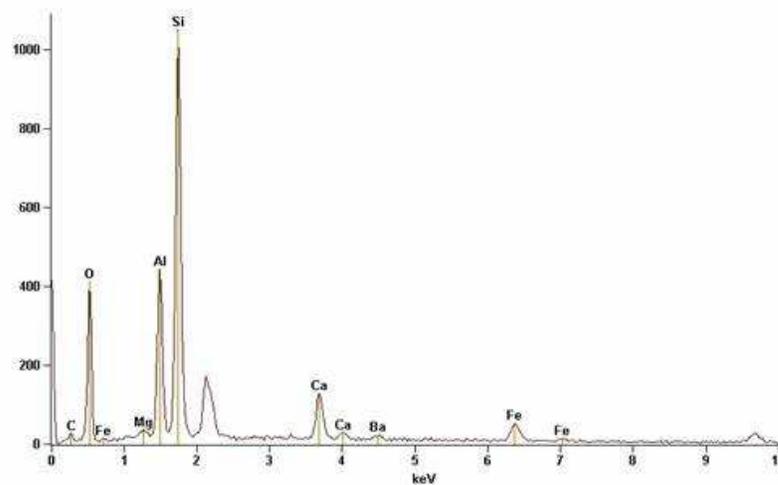


Figura 87. Análise química qualitativa EDS dos tratamentos solo-cimento e solo-cimento-cinza.

5.4.5. DESEMPENHO FÍSICO E DURABILIDADE DAS PAREDES MONOLÍTICAS DE SOLO-CIMENTO-CINZA

Durante um ano de observação das paredes de solo-cimento-cinza da edificação-protótipo notou-se o surgimento de algumas fissuras longitudinais e diagonais em partes das vedações localizadas acima das esquadrias (porta e janela), fato este devido à falta de colocação de vergas (**Figura 88**). Nas juntas verticais dos encontros dos painéis (pilar e parede) não foi constatada retração do material solo-cimento-cinza.

Nas demais paredes não houve aparecimento de fissuras estruturais ou estéticas, apenas manchas de bolor na parte inferior da parede na fachada oeste (**Figura 89**), a qual, devido à pequena extensão do beiral do telhado (20 cm), acarretou a constante absorção de água durante períodos de chuvas. No entanto, o material solo-cimento-cinza apresentou baixa permeabilidade, sendo o coeficiente de permeabilidade de $0,66 \cdot 10^{-6}$ cm/s, valor este da mesma ordem de grandeza do coeficiente encontrado pelos pesquisadores Bahar et al. (2004) para o material solo argiloso estabilizado com cimento (**Figura 4**).

Ainda que o material solo-cimento-cinza tenha se caracterizado pela capacidade de absorção de água em torno de 17%, observou-se que, durante períodos de chuva, as paredes externas encontravam-se molhadas enquanto que, internamente, não havia infiltração da água, fato este que pode ser explicado pela baixa permeabilidade do material. É evidente que, para um relatório técnico consistente sobre a estanqueidade à água das paredes de solo-cimento-cinza, seria necessário a aplicação de ensaios com câmaras simuladoras de chuva ou mesmo com câmaras simuladoras de áreas molháveis, conforme descrições do Projeto de Norma 02:136.01.004 (ABNT, 2004) – Desempenho de edifícios habitacionais de até cinco pavimentos.

De modo geral, a edificação-protótipo está em bom estado de conservação, sendo necessário um acompanhamento sistemático por mais alguns anos para confirmar a durabilidade do material solo-cimento-cinza/protótipo, assim como a necessidade de elaboração de recomendações para uso e manutenção da edificação.



(a)



(b)

Figura 88. Fissuras ocorridas na edificação-protótipo: (a) porta – fachada sul, (b) janela – fachada norte.



Figura 89. Manchas de bolor na edificação-protótipo –fachada oeste.

5.4.6. CUSTO-BENEFÍCIO DAS PAREDES MONOLÍTICAS DE SOLO-CIMENTO-CINZA

A **Tabela 45** mostra a relação custo-benefício do uso de paredes monolíticas de solo-cimento-cinza para construção de vedações não-portantes, considerando as condições construtivas e regionais encontradas durante o desenvolvimento da pesquisa.

Para os cálculos da **Tabela 45** não foram considerados estruturas e andaimes para os dois sistemas construtivos. No que se refere às informações sobre o sistema construtivo em alvenaria cerâmica (tijolo cerâmico furado 10 x 20 x 20 cm³ assente com argamassa mista de cimento: cal : areia - 1:2:8, espessura da parede sem revestimento - 10 cm), os dados apresentados foram fornecidos pela Revista Construção Mercado (2007). As informações sobre a produção dos painéis monolíticos de solo-cimento-cinza foram obtidas a partir do acompanhamento da execução da edificação-protótipo, sendo contabilizado na composição do custo de material o gasto com conjunto de fôrmas, transporte do solo e da cinza de casca de arroz (transporte entre as cidades Hortolândia – Campinas para retirada de solo e entre Porto Ferreira – Campinas para retirada de cinza), e matérias-primas solo e cimento Portland.

Tabela 45. Comparação entre dois sistemas construtivos enfocando o custo de material por metro quadrado e o consumo de tempo da mão-de-obra por metro quadrado.

Sistema construtivo	Custo de consumo de material / m ²	Consumo de tempo da mão-de-obra/ m ²
Painel monolítico solo-cimento-cinza	R\$ 12,05*	1,5 horas
Alvenaria cerâmica – 10 cm espessura	R\$ 8,12**	3,5 horas

*Cálculos do custo de consumo de material / m² encontra-se no Anexo II.

**Dados coletados da Revista Construção Mercado (2007).

Pode-se observar na **Tabela 45** que o processo construtivo de painéis de solo-cimento-cinza apresentou um custo de material maior em relação à alvenaria cerâmica; no entanto, deve-se ressaltar que, para compor este custo, foram contabilizados gastos significativos referentes ao transporte das matérias-primas. É provável que a coleta do solo e da cinza de casca de arroz em fontes próximas aos locais do canteiro de obra, resulta em autonomia local, com reflexos na diminuição dos custos com transporte, maquinário e energia.

Dessa maneira, o custo de consumo de material sofrerá redução de até 40%, tornando o painel monolítico de solo-cimento-cinza um material de baixo custo.

E, ao se analisar o consumo de tempo da mão-de-obra utilizada para a construção dos painéis de solo-cimento-cinza (um pedreiro e um ajudante), pode-se dizer que este sistema apresentou um resultado muito superior ao do sistema de tijolos cerâmicos. Dessa forma, o sistema apresentou excelente produtividade e exigiu pouca qualificação da mão-de-obra, o que potencializa o sistema para uso em mutirões e propicia a redução do custo final da construção.

Vale salientar que o processo construtivo de paredes monolíticas de solo-cimento-cinza resultou em vedações de superfícies lisas, sem a necessidade de revestimentos grosseiros (chapisco, emboço ou reboco) para posterior aplicação de massa corrida e/ou de pinturas. Outro ponto a ressaltar refere-se ao tipo da construção, que foi praticamente artesanal, considerada a pequena metragem da edificação-protótipo. Assim, em grande escala, pode-se conseguir um melhor custo-benefício em relação à compra de cimento, ao uso do transporte de matéria-prima e da mão-de-obra.

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. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

- a cinza de casca de arroz atuou no sistema solo-cimento-cinza como carga mineral (enchimento), pois a mesma, além de não possuir atividade pozolânica, também não se mostrou adequada para atuar como “filler” (preenchimento);
- o solo arenoso foi considerado adequado para processos de estabilização com cimento Portland.

6.2. ESTUDO DE DOSAGEM DAS MISTURAS DE SOLO-CIMENTO-CINZA DE CASCA DE ARROZ

- a incorporação da cinza de casca de arroz resultou em diminuição da massa específica aparente seca máxima e aumento da umidade ótima do sistema solo-cimento-cinza, tanto maior quanto maiores foram as quantidades de cinzas adicionadas;
- o tipo cinza de casca de arroz (CCA-A e CCA-B), adicionado às misturas de solo-cimento-cinza de casca de arroz, não afetou significativamente as características físico-mecânicas do sistema;
- o aumento gradativo do teor de cimento melhorou significativamente o desempenho mecânico das misturas de solo-cinza, sendo que as combinações com 100% de solo levaram aos maiores valores de resistência à compressão simples e velocidade de onda ultra-sônica, enquanto que o aumento gradativo da quantidade de cinza nas misturas solo-cimento-cinza proporcionou a diminuição dos valores de resistência e de velocidade;
- constatou-se uma correlação linear positiva entre a resistência à compressão simples, a velocidade de onda ultra-sônica e a massa específica aparente seca máxima nas primeiras idades, pois quanto menos cinzas no sistema, melhor foi o processo da compactação e da interação entre o solo e o cimento e, conseqüentemente, maiores foram as resistências de compressão simples e velocidades de onda ultra-sônica alcançadas;

6.3. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DOS CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS CONFECCIONADOS COM MISTURAS DE SOLO-CIMENTO-CINZA DE CASCA DE ARROZ

- para todos os tratamentos de solo-cimento-cinza houve o acelerado processo de hidratação de produtos à base de cimento nas primeiras idades e o alcance de valores máximos de resistência à compressão simples e velocidade de onda ultra-sônica durante os primeiros seis meses de idade; entretanto, devido ao processo de microfissuração interna, estes parâmetros sofreram diminuição significativa, tendendo à estabilização ao final de 360 dias de idade;
- constatou-se uma correlação exponencial positiva entre a resistência à compressão simples e a velocidade de onda ultra-sônica ao longo dos primeiros seis meses, sendo que o ensaio não-destrutivo foi adequado para o acompanhamento do processo de estabilização do material e o estudo das suas propriedades elásticas;
- todos os tratamentos de solo-cimento-cinza atenderam às especificações e recomendações acerca dos valores mínimos de resistência à compressão simples e máximos de capacidade de absorção de água e de perda de massa;
- os tratamentos T5 [(92,5% de solo + 7,5% de cinza) estabilizado com 10% de cimento] e T6 [(92,5% de solo + 7,5% de cinza) estabilizado com 13% de cimento] destacaram-se por apresentar melhores desempenhos físico-mecânicos no que se refere à misturas com incorporação de cinza de casca de arroz;
- a mistura T5 foi o tratamento com adição de cinza que apresentou menor teor de agente estabilizador e ao mesmo tempo atendeu aos requisitos especificados pela norma NBR 8491 (ABNT, 1984).

6.4. DESEMPENHO DAS PAREDES MONOLÍTICAS DE SOLO-CIMENTO-CINZA DE CASCA DE ARROZ

- a parede monolítica de solo-cimento-cinza de casca de arroz pode ser considerada como uma tecnologia apropriada, pois apresentou simplicidade na preparação e manipulação dos materiais, adaptabilidade e acessibilidade para assimilação da técnica construtiva,

necessitou de ferramentas simples e de pouca energia elétrica, baixo custo quando utilizado matérias-primas e energias locais, e exerceu menor impacto ambiental a partir da redução do uso de recurso natural (solo) e reaproveitamento de resíduos (cinza);

- dentro das condições e período analisado (1 ano e 4 meses), as paredes monolíticas de solo-cimento-cinza de casca de arroz apresentaram bom desempenho físico e estrutural, bom estado de conservação e promissor desempenho térmico nas diversas zonas bioclimáticas brasileiras (NBR 15220 – ABNT, 2005).

6.5. CONCLUSÕES GERAIS

- a cinza atuou como carga mineral no sistema solo-cimento, diminuindo o seu desempenho físico-mecânico; porém, os teores de cimento foram suficientes para promover uma estabilização mínima das misturas solo-cinza, resultando em valores de resistência, absorção e durabilidade adequados para sua utilização como material de construção;
- a utilização conjunta de ensaios físicos e mecânicos resultou em valores expressivos para a caracterização dos tratamentos de solo-cimento-cinza. Os resultados promissores para a confecção de componentes construtivos foram expressos pelos tratamentos com solo arenoso substituído pelo teor de 7,5% de cinza (em massa) e estabilizado com 10% e 13% de cimento (em massa).
- a construção da edificação-protótipo foi uma ação prática, que possibilitou comprovar a viabilidade técnica e econômica do uso da mistura solo-cimento-cinza nas paredes monolíticas não-portantes para a construção de moradias urbanas e/ou rurais;
- o solo-cimento-cinza de casca de arroz é um material de construção de boa qualidade, de baixo custo, integrado à sustentabilidade ambiental e apropriado para utilização no sistema construtivo de paredes monolíticas. Evidentemente, o desempenho físico-mecânico, térmico e durabilidade deste componente construtivo devem ser estudados em idades mais avançadas para corroborar as conclusões atuais e apresentar maior confiabilidade do uso deste material não-convencional.

6.6. FUTURAS PESQUISAS

- estudos aprofundados sobre a durabilidade do material solo-cimento-cinza e sua aplicação como outros elementos construtivos e/ou componentes construtivos tais como tijolos maciços, tijolos modulares, blocos e placas pré-moldadas;
- estudos sobre o uso da cinza residual de casca de arroz como “filler” na mistura solo-cimento e suas características físico-mecânicas-térmicas e durabilidade do material final solo-cimento-cinza;
- estudos sobre a eficiência energética do produto final solo-cimento-cinza residual de casca de arroz, de modo a verificar o custo-benefício da aplicação de processos de moagem da cinza residual e da adição de cimento Portland, assim como a significância da quantidade de cinza residual inserida neste elemento e/ou sistema construtivo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

_____. Solo-cimento: tijolos, blocos e paredes monolíticas. **Revista a Construção.** São Paulo: Pini, 1983.

_____. 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. p. 113-20.

ADAM, E. A.; JONES, P. J. Thermophysical properties stabilized soil building blocks. **Building and Environment.** v.30, n.2, p. 245-53, 1995.

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. n. 95-2-158.

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

ASSIS, J. B. S. Bloco intertravado de solo-cimento “Tijolito”. In: WORKSHOP ARQUITETURA DE TERRA, 1995, São Paulo, SP. **Anais...** São Paulo: [s.n.]. p. 149-62.

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

_____. **NBR 5752** – Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro, 1992. 3p.

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

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

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

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

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

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

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

_____. **NBR 8522** – Concreto. Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e deformação e da curva de tensão-deformação. Rio de Janeiro, 2003. 9p.

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

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

_____. **NBR 8949** – Paredes de alvenaria estrutural – ensaio à compressão simples. Rio de Janeiro, 1985. 7p.

_____. **NBR 12023** - Solo-Cimento - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1992. 6p.

_____. **NBR 12025** - Solo-Cimento - Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1990. 2p.

_____. **NBR 13292** – Solo. Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro, 1995. 8p.

_____. **NBR 13554** - Solo-Cimento - Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem. Rio de Janeiro, 1996. 3p.

_____. **NBR 13555** - Solo-Cimento – Determinação da absorção d'água. Rio de Janeiro, 1996. 1p.

_____. **NBR 15220** - Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005. 30p.

_____. **Projeto de Norma 02:136.01.004**. Desempenho de edifícios habitacionais de até cinco pavimentos. Sistemas de vedações verticais externas e internas. 2004. <http://www.cobracon.org.br/desempenho/>> acesso em 15/09/2005.

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

_____. **Dosagem das misturas de solo-cimento: normas de dosagem e métodos de ensaio.** São Paulo: ABCP, 1980. 5p. Boletim Técnico.

_____. **Fabricação de Tijolos de Solo-Cimento com a Utilização de Prensas Manuais.** São Paulo: ABCP, 1985. 4p. Boletim Técnico.

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

AZEVEDO JR., A. P. **Avaliação não-destrutiva das propriedades mecânicas de madeira através da técnica do ultra-som.** Dissertação (Mestrado em Estruturas). Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, 2002.

BAHAR, R.; BENZAOUZ M.; KENAI, S. Performance of compacted cement-stabilised soil. **Cement & Concrete Composites.** n. 26, p. 811-20, 2004.

BARBOSA, M. J. **Uma metodologia para especificar e avaliar o desempenho térmico de edificações residências unifamiliares.** 275 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 1997.

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.

BARBOSA, N. P.; MATTONE, R. Estudos sobre tijolos de terra crua desenvolvidos na Universidade Federal da Paraíba e no Politécnico de Torino. In: CONGRESSO DE ENGENHARIA CIVIL, II. 1996, Juiz de Fora. **Anais...** Juiz de Fora : [s.n], v.1, p.21-30.

_____. Construção com terra crua. In: SEMINÁRIO IBERO AMERICANO DE CONSTRUÇÃO COM TERRA, 1.,2002, Salvador. **Anais...**Salvador: Projeto PROTERRA, CD-ROM.

BASHA E.A.; HASHIM, R.; MAHMUD, H.B.; MUNTOHAR, A.S. Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement. **Construction and Building Materials.** n.19, p.448-53, 2005.

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

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

BUCUR, V. **Acoustics of Wood**. Boca Raton. USA: CRC Press, 2006. 215p.

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.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Rio de Janeiro: [s.n.], 1980. 219p.

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

CINCOTTO, M. A. Utilização de subprodutos na indústria da construção civil. In: SIMPÓSIO DE DESEMPENHO DE MATERIAIS E COMPONENTES DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 2., 1989, Florianópolis. **Anais...**Florianópolis: [s. n.]. p.171-77.

CINTRA, J. C.; AOKI, N.; ALBIERO, J.H. **Tensão admissível em fundações diretas**. São Carlos: Rima, 2003. 142p.

DAFICO, D. A.; PRUDÊNCIO JR., L. R. Um estudo visando a identificação das condições de queima da casca de arroz para produção de pozolana branca. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ENTAC, 9, 2002, Foz do Iguaçu, PR. **Anais...** São Paulo: Epusp/Antac. p.1671-80.

DA FONSECA, M. G. Tijolos de cinzas. Cinza de carvão mineral e cinza de casca de arroz. Alternativas tecnológicas na fabricação de novos elementos construtivos para alvenarias. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO – ENTAC 1993, São Paulo, SP. **Anais...** São Paulo: Epusp/Antac. v.1, p.153-60.

DELGADO, M. C. J.; GUERRERO, I. C. The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review. **Construction and Building Materials**. n.21. p.237-51. 2007.

DELLA, V. P.; KUHN, I.; HOTZA, D. Caracterização de cinza de casca de arroz para uso como matéria-prima na fabricação de refratários de sílica. **Química Nova**. v.24, n.6, p.778-82, 2001.

DORNELLES, K. A. **Estudo de casos sobre a inércia térmica de edificações na cidade de São Carlos, SP**. 148p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.

DUMKE, E. M. S. **Avaliação do desempenho térmico em sistemas construtivos da vila tecnológica de Curitiba como subsídio para a escolha de tecnologias apropriadas em habitação de interesse social**. 227p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, 2002.

FANG, H.S. Foundation **Engineering Handbook**. 2ª ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991. 923p.

FERREIRA, A. A.; SILVEIRA, A. A.; DAL MOLIN, D. C. C. A cinza da casca de arroz : possibilidades de utilização como insumo na produção de materiais de construção. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 1, 1997, Canela, RS. **Anais...** São Paulo: [s.n.]. CD-ROM.

FERREIRA, R. C. **Desempenho físico-mecânico e propriedades termofísicas de tijolos e mini-painéis de terra crua tratada com aditivos químicos.** 204p. Tese (Doutorado em Construções Rurais e Ambiente) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de 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, SP. **Anais...** São Paulo: [s.n.]. CD-ROM.

FERREIRA NETO, M. F.; MITIDIARI, M. L.; ZIMBRES, L. S. Desenvolvimento e avaliação de sistemas e componentes construtivos. In: CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL - CLACS e ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ENTAC, I, X, 2004, São Paulo, SP. **Anais...**São Paulo: ANTAC. CD-ROM.

FIGUEIREDO, D. A. de S.; CASBUR, M. T. F. Projeto piloto construção de casa de terra crua. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE MATERIAIS E TECNOLOGIAS NÃO-CONVENCIONAIS NA CONSTRUÇÃO ECOLÓGICA E SUSTENTÁVEL - NOCMAT, 2006, Salvador, BA. **Anais...**Salvador: ABMTENC. CD-ROM.

FREIRE, W.J. **Aditivos químicos e seus efeitos sobre a estabilidade de taludes e qualidade do material formado.** 113p. Tese de Livre-Docência. Faculdade de Ciências Agrônômica, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, SP, 1981.

_____. 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.

_____. Cimento produzido a partir da cinza da casca de arroz. In: TOLÊDO FILHO, R. D.; NASCIMENTO, J. W. B.; GHAVAMI, K. **Materiais não convencionais para construções rurais**. Campina Grande: UFPB/SBEA, 1997. cap. 3, p.83-111.

FREITAS, E. D. G. A. **Obtenção de tijolos de solo-cimento com adição de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar para uso na construção civil**. 120p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal Fluminense, Niterói. 1996.

GAVA, G. P. **Estudo comparativo de diferentes metodologias para avaliação da atividade pozolânica**. 118p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

GIGLIO, T. G. F.; BARBOSA, M. J. Aplicação de métodos de avaliação do desempenho térmico para analisar painéis de vedação em madeira. **Ambiente Construído**. Porto Alegre, v.6, n.3, p.91-103, 2006.

GIVONI, B. Comfort Climate Analysis and Building Design Guidelines. **Energy and Buildings**, v.18, n.1, p.11-23, 1992.

GONÇALVES, R. **Propagação de ondas ultra-sônicas**. Manuscrito da disciplina Ultra-som aplicado aos materiais de construção. Edições internas. FEAGRI/UNICAMP, 2007.

GRANDE, F. M. **Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa**. 165p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade São Paulo, SP. 2003.

GUEDERT, L. O.; DAMO, N. B.; PRUDÊNCIO JR., L. R. Utilização da cinza de casca de arroz como material pozolânico para a obtenção de aglomerantes alternativos. In: SIMPÓSIO DE DESEMPENHO DE MATERIAIS E COMPONENTES DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 2., 1989, Florianópolis, SC. **Anais...** Florianópolis: [s. n.]. p.152-70.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal: Fundamentos e aplicações na Engenharia Civil**. São Paulo: Pini, 1997. 285p.

GUTIERREZ, G. C. R.; LABAKI, L. C. Avaliação de desempenho térmico de três tipologias de brise-soleil fixo. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, ENCAC, 2005. **Anais...**Alagoas: ANTAC. CD-ROM.

HASPARYK, N. P.; FARIAS, L. A.; ANDRADE, M. A. S. DE; BITTENCOURT, R. M.; ANDRADE, W. P. Estudo da influência da cinza de casca de arroz amorfa nas propriedades do concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 45, 2003. Vitória - ES. **Anais...**Vitória: IBRACON. CD-ROM.

HOUBEN, H.; GUILLAUD, H. **Earth Construction – A comprehensive guide**. London: Intermediante Technology Publications, 1994. 362p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Levantamento sistemático da produção agrícola - 2006**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agricola>. Acesso em : 10/07/2007.

ISAIA, G. C. **Efeito de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo da durabilidade com vistas à corrosão da armadura**. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

JAUBERTHIE, R.; RENDELL, F.; TAMBA, S.; CISSE, I. Origin of the pozzolanic effect of rice husks. **Construction and Building Materials**. n.14, p.419 -23, 2000.

JAYASINGHE, C.; KAMALADASA, N. Compressive strength characteristics of cement stabilized rammed earth walls. **Construction and Building Materials**. n.21, p.1971-76, 2007.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. G. Cinza e aglomerantes alternativos. In: FREIRE, W. J.; BERALDO, A. L. **Tecnologia e materiais alternativos de construção**. Campinas: UNICAMP, 2003. cap.6, p.145-90.

KRISHNARAO, R.V.; SUBRAHMANYAM, J. e KUMAR, T.J. Studies on the formation of black particles in rice husk silica ash. **Journal of the European Ceramic Society**. n.21, p.99-104, 2001.

KRÜGER, E. L.; SANTOS, M. D. dos. The use of earth as an appropriate building material in brazilian low-cost housing. In: INTER AMERICAN CONFERENCE ON NON-CONVENTIONAL MATERIALS AND TECHNOLOGIES IN THE ECO-CONSTRUCTION AND INFRASTRUCTURE, 1., 2003, Rio de Janeiro, RJ. **Anais...Rio de Janeiro: ABMTENC. CD-ROM**.

LIMA, T.V.; ALEXANDRE, J. Influência do tipo de solo na produção de blocos ecológicos (solo-cimento). In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE MATERIAIS E TECNOLOGIAS NÃO-CONVENCIONAIS NA CONSTRUÇÃO ECOLÓGICA E SUSTENTÁVEL - NOCMAT, 2006, Salvador, BA. **Anais...Salvador: ABMTENC. CD-ROM**.

MARANGON, M. ; MARQUES, G. L. O. ; CAMPOS, T. M. P. Comportamento mecânico à durabilidade de dois solos estabilizados com cimento. In: CONGRESSO DE ENGENHARIA CIVIL, 4, 2000, RJ. **Anais...Rio de Janeiro : Interciência**. v.2. p.691-702.

MELLACE, R. F., ALDERETE, C. F.; ARIAS, L. E. Centro regional de investigaciones de tierra cruda.. In: SEMINÁRIO IBERO AMERICANO DE CONSTRUÇÃO COM TERRA, 1.,2002, Salvador. **Anais...Salvador: Projeto PROTERRA. Cd-rom**.

MESA VALENCIANO, M. del C. **Incorporação de resíduos agroindustriais e seus efeitos sobre as características físico-mecânicas de tijolos melhorados com cimento.** 102p. Dissertação (Mestrado em Construções Rurais e Ambiente) –Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 1999.

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

METHA, P. K.. Properties of Blended Cements Made from Rice Husk Ash. **ACI Journal**.. p.440-42, 1977

MEUKAM, P.; JANNOT, Y.; NOUMOWE, A.; KOFANE T.C. Thermo physical characteristics of economical building materials. **Construction and Building Materials**. n.18, 437–43, 2004.

MILANI, A. P. S. **Avaliação físico–mecânica de tijolos de solo-cimento e de solo-cal adicionados de casca de arroz.** 113p. Dissertação (Mestrado em Construções Rurais e Ambiente) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2005.

MYRRHA, M. A. L. Solo-cimento para fins construtivos. In: FREIRE, W. J.; BERALDO, A. L. **Tecnologia e materiais alternativos de construção.** Campinas: 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.** 148p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

NEVES, C. M. M. Desempenho de paredes – Procedimento adotado para paredes monolíticas de solo-cimento. In: SIMPÓSIO DE DESEMPENHO DE MATERIAIS E COMPONENTES DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 1., 1988, Florianópolis. **Anais...**Florianópolis: [s.n.]. p. 58-64.

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

_____. Novos materiais para a melhoria da habitação popular. In: SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO DE RACIONALIZAÇÃO DA CONSTRUÇÃO E SUA APLICAÇÃO ÀS HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL, 1981, São Paulo. **Anais...** São Paulo: [s.n.]. p.103-112.

_____.Alvenaria de terra. In: NEVES, C. M. M.; FLORES, M. O.; RIOS, L. S. **Arquitecturas de tierra en Iberoamérica**. Brasil: 2ª edição Proyecto XIV.6 PROTERRA, 2003. p.48-53.

OLOTUAH, A. O. Recourse to earthfor low-cost housing in Nigeria. **Building and Environment**. n.37, p.123-29, 2002.

PARRA-SALDIVAR, M. L.; BATTY, W. Thermal behaviour of adobe constructions. **Building and Environment**. n. 41, 1892–904, 2006.

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.

PITTA, M. R. **Características tecnológicas dos solos estabilizados com cimento**. São Paulo: ABCP, 1980. 16p.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico**. 275p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. 2006.

PRUDÊNCIO JR., L. R.; SANTOS, S.; DAFICO, D. A. Cinza da casca de arroz. In: ROCHA, J. C.; JOHN, V. M. **Utilização de resíduos na construção habitacional**. Porto Alegre: Coletânea Habitare/ Antac, 2003. v.4, cap.8, p.240-61.

REDDY, B. V. V.; A. GUPTA. Characteristics of soil-cement blocks using highly sandy soils. **Materials and Structures**. Rilem. n.38, 651-58, 2005.

Revista Construção Mercado. São Paulo: Pini. n.69, Ano 60, Abril 2007.

RIOS, L. S. Paredes monolíticas. In: NEVES, C. M. M.; FLORES, M. O.; RIOS, L. S. **Arquitecturas de tierra en Iberoamérica**. Brasil: 2ª edição Proyecto XIV.6 PROTERRA, 2003. p.13-20.

RIVERO, R. **Arquitetura e clima: acondicionamento térmico natural**. Porto Alegre: Luzzatto, 1986.

ROLIM, M.M., FREIRE, W.J., BERALDO, A.L. Análise comparativa da resistência à compressão simples de corpos de prova, tijolos e painéis de solo cimento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.3, n.1, p.93-8, 1999.

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.

SANTOS, S. **Estudo da viabilidade de utilização de cinza de casca de arroz residual em argamassas e concretos**. 113p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia Civil - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

SILVA, P. R. **Estudo da interação solo-estrutura de fundação em solo-cimento**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Distrito Federal, 1992.

SHAVIV, E.; YEZIORO, A.; CAPELUTO, I. G. Thermal mass and night ventilation as passive cooling design strategy. **Renewable Energy**, n.24, p.445-52, 2001.

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

SOUZA, R. Avaliação de desempenho aplicada a novos componentes e sistemas construtivos para habitação. **Tecnologia de edificação / Projeto de Divulgação**. Tecnologia Lix da Cunha. SP: Pini - IPT, p.529-32, 1988.

STROEVEN, P.; DAI BUI, D.; SABUNI, E. Ash of vegetable waste used for economic production of low to high strength hydraulic binders. **The Science and Technology of Fuel and Energy**. n.78, p.153 – 59, 1999.

TAYLOR, H.F.W. **Cement Chemistry**. London: Academic Press, 1992. 475p.

TEIXEIRA, M. da P. O solo como material ecológico: uma interface com a construção sustentável. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE MATERIAIS E TECNOLOGIAS NÃO-CONVENCIONAIS NA CONSTRUÇÃO ECOLÓGICA E SUSTENTÁVEL - NOCMAT, 2006, Salvador, BA. **Anais...** Salvador: ABMTENC. CD-ROM.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B. **Mecânica dos solos na prática da engenharia**. Rio de Janeiro: Livro Técnico, 1962.

TIMOTEO DE SOUSA, S.M.; MAGALHÃES, M.S.; BARBOSA, N.P. Experimentação de painéis de tijolos prensados de terra crua. In: CONGRESSO DE ENGENHARIA CIVIL, II., 1996, Juiz de Fora, MG. **Anais...** Juiz de Fora : [s.n.]. v.1, p.11-20.

VARGAS, M. **Identificação e classificação dos solos**. São Paulo: ABCP, 1981. 28p.

VELLOSO, C. H. V. Estudo de caso: habitação experimental em solo-cimento. In: SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO DE RACIONALIZAÇÃO DA CONSTRUÇÃO E SUA APLICAÇÃO ÀS HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL, 1981, São Paulo. **Anais...**São Paulo: [s.n.]. p.179-188.

WADA, I.; KAWANO, T.; KAWAKAMI, M.; MAEDA, N. Effect of highly reactive rice husk ash on durability of concrete and mortar. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DURABILITY OF CONCRETE, 5, 2000, Barcelona. **Anais...**Proceedings: Farmington Hills, American Concrete Institute. p.205-22.

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

Anexo I

Dados climáticos da região de Campinas

Latitude: 22°53'S

Longitude: 47°04'W

Altitude: 694 m

Período: 1998 a 2005

mês	temp. média máxima (°C)	temp. média mínima (°C)	amplitude média (°C)	Umidade relativa (%)	chuva total (mm)	nebulosidad e média	direção ventos	velocidade ventos (m/s)	insolação diária média (h)
JAN	29,4	19,9	9,5	84,1	287,0	6,5	SE	2,4	5,3
FEV	29,5	19,6	9,9	85,0	202,6	5,8	C	2,6	6,4
MAR	29,7	19,2	10,5	83,0	138,7	4,9	SE	2,8	6,6
ABR	28,7	17,6	11,1	82,0	65,3	3,7	SE	3,0	7,4
MAI	25,6	14,1	11,5	81,7	86,6	4,2	C	3,1	5,8
JUN	25,3	13,3	12,0	81,4	28,8	3,1	SE	2,9	5,8
JUL	24,8	12,7	12,1	78,8	28,7	3,1	SE	3,1	5,5
AGO	27,1	13,9	13,2	72,5	29,2	3,2	SE	3,2	6,2
SET	28,9	15,7	13,2	73,5	57,0	3,5	SE	4,1	5,9
OUT	31,9	17,3	14,6	77,9	112,8	4,6	SE	4,2	6,3
NOV	29,0	17,8	11,2	78,0	154,9	5,2	SE	3,8	6,5
DEZ	29,2	19,1	10,1	81,0	221,5	6,1	SE	3,1	5,7

FONTE: - Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Ecofisiologia e Biofísica -
Instituto Agrônomo de Campinas, 2006.

Anexo II

Cálculos do custo do consumo de material para a confecção de 1 m² de painel monolítico de solo-cimento-cinza de casca de arroz

Espessura da parede = 12 cm → 0,12 x metragem² = 1m³ → 8,33 m² de parede de espessura de 12 cm equivale a 1m³ de parede monolítica

1 m³ de parede necessita 150 kg de cimento, 1,2 m³ de solo e 0,45 m³ de cinza residual

Cálculo do consumo de cimento – Preço pago pelo saco de cimento Portland 50 kg – R\$ 12,00, logo 1 kg de cimento = R\$ 0,24 e 18 kg de cimento faz 1 m² de parede, então: **R\$ 4,32**

Cálculo do consumo de solo – Para 1 m² de parede necessita de 0,14 m³ de solo e o preço do m³ do solo R\$ 10,00, então: **R\$ 1,44**

Cálculo do transporte do solo – para transportar 1 m³ de solo da jazida até a obra foi R\$ 30,00 e para execução de 1 m² de parede utiliza 0,14 m³ de solo, então: **R\$ 4,20**

Cálculo do transporte da cinza – para transportar 1 m³ de cinza da beneficafora até a obra foi R\$ 30,00 e para execução de 1 m² de parede utiliza 0,054 m³ de cinza, então: **R\$ 1,62**

Cálculo da fôrma – 1 chapa de compensado faz 0,00814 m² de parede (dado TCPO-PINI) e o preço do m² do compensado R\$ 28,98 e como utiliza-se 2 chapas para a composição da forma, tem-se : **R\$ 0,47**

Logo → **Custo total = R\$ 4,32 + R\$ 1,44 + R\$ 4,20 + R\$ 1,62 + R\$ 0,47 = R\$ 12,05**