



ESTUDOS PARA VIABILIZAR O USO DO MATERIAL SOLO-CIMENTO-CINZA DE CASCA DE ARROZ NA CONSTRUÇÃO DE PAREDES MONOLÍTICAS

Ana Paula da Silva Milani (1); Sandra Regina Bertocini (2)

CCET/DEC – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - UFMS
Cidade Universitária, Campo Grande – MS, CEP 79070-900; (55 67) 3345 7478
(1) anamilani@dec.ufms.br; (2) bertocini@nin.ufms.br

Palavras-chave: material alternativo de construção, resíduo agroindustrial, eficiência energética

RESUMO

Buscando um material alternativo de construção que minimize a degradação ambiental e reduza os custos energéticos do produto final, o presente trabalho pesquisou a viabilidade técnica do uso do material solo-cimento-cinza de casca de arroz na construção de paredes de vedação para habitação de interesse social.

Para tal, foi estudado as características físico-mecânicas e térmicas da mistura solo-cimento-cinza através de ensaios de compactação, de compressão simples, de absorção de água, de permeabilidade, de condutividade térmica, de calor específico e de durabilidade por secagem e molhamento. Posteriormente foi construída uma edificação-protótipo utilizando-se o sistema construtivo de paredes monolíticas de solo-cimento-cinza de casca de arroz, a qual foi avaliada o desempenho do processo construtivo, o desempenho estrutural e o desempenho térmico dessas vedações.

Após análise dos resultados, pôde-se concluir que o solo arenoso, quando substituído por 7,5% de cinza de casca de arroz (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 técnica para construção de componentes construtivos em habitações quer sejam civis e/ou rurais.

1. INTRODUÇÃO

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 construção civil, por usar materiais em larga escala e pela quantidade de mão-de-obra e de energia que ocupa, contribui significativamente para o esgotamento desses recursos. Outro problema freqüente em países emergentes, como o Brasil, é a grande demanda de habitações que, por sua vez, tem-se deparado com o alto custo de materiais e de tecnologias tradicionais de construção e com soluções construtivas inadequadas às condições do local ou às necessidades do morador.

Visando soluções que minimizem esta degradação ambiental e ao mesmo tempo contribuam para a diminuição do déficit habitacional brasileiro, procura-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.

Partindo-se dessas premissas, o objetivo deste trabalho foi estudar as características físico-mecânicas e térmicas de diferentes misturas de solo-cimento-cinza de casca de arroz e verificar a viabilidade técnica do uso da mistura de solo-cimento-cinza como componente construtivo (paredes monolíticas) para construção de habitação de interesse social.

1.1 Solo-cimento-cinza de casca de arroz

Em face da necessidade de utilização racional dos recursos naturais, o resgate do uso do solo compactado como material de construção tem se intensificado ultimamente, tendo sido seu comportamento físico-mecânico melhorado através da estabilização com aglomerantes minerais. Os solos mais adequados para a fabricação de elementos construtivos de solo-cimento são, segundo a ABCP (1985), os que possuem as seguintes características: 100% passando na peneira ABNT 4,8 mm; 10 a 50% passando na peneira ABNT 0,075 mm; limite de liquidez $\leq 45\%$ e índice de plasticidade $\leq 18\%$; ou seja, solos considerados da classe textural arenosa. Diversas pesquisas sobre o uso de sistemas de solo-cimento para componentes de alvenaria, indicam, para solos arenosos, o traço de 1:10, 1:12 e 1:14 (proporção em volume, de cimento para solo seco).

Visando a obtenção de um material de menor impacto ambiental e de baixo consumo energético, a utilização conjunta de solo estabilizado + cinzas vegetais tem alcançado um certo destaque, sendo que a maior parte das pesquisas concentra-se nas cinzas advindas da queima de casca de arroz. Justifica-se assim o desenvolvimento de um sistema de reaproveitamento do resíduo agroindustrial cinza de casca de arroz devido à sua composição físico-química apresentar potencialidade para produção de material aglomerante e pela grande disponibilidade da casca de arroz no Brasil. A produção anual de arroz em casca é da ordem de 10 milhões de toneladas e de seu beneficiamento resultam aproximadamente 400 mil toneladas de cinzas, IBGE (2005).

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 e 700 °C) são consideradas adequadas para produção de cimentos pozolânicos, (John et al., 2003). Evidentemente, nem toda casca é queimada sob temperaturas controladas, e esse tipo de processo acaba gerando cinzas com presença de sílica cristalina, quimicamente inativa. 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 ou nenhuma atividade pozolânica.

Portanto, nesta pesquisa, incorporou-se cinza de casca de arroz de baixa pozolanicidade a misturas de solo-cimento como carga mineral, possibilitando destinação final a este resíduo, assim como sua possível utilização como material de construção.

1.2 Sistema construtivo de paredes monolíticas de solo-cimento

Para o desenvolvimento de uma política habitacional consistente para o Brasil, segundo Krüger (2000), 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, a técnica construtiva de paredes monolíticas de solo-cimento destaca-se como uma relevante tecnologia apropriada para a construção de habitações de interesse social. Segundo Myrrha (2003), a técnica de paredes monolíticas consiste na compactação do material solo-aditivo na umidade ótima, em camadas sucessivas, no sentido vertical, com o auxílio de fôrmas e guias, sendo necessário ao término da confecção da parede a aplicação da cura úmida.

Barbosa e Mattone (2002) discorreram sobre o uso do material solo-cimento como tecnologia apropriada, e verificaram o grande potencial desse material para ser explorado na minimização do problema do déficit habitacional, 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 serviço, e, quando utilizado como alvenaria de

vedação, apresenta um excelente conforto interno devido à sua porosidade que permite as trocas de vapor entre o interior e o exterior da construção.

A partir da construção e avaliação de uma casa de solo-cimento na cidade de Santa Maria-RS, Soares et al (2004) relataram que a técnica de construção de habitações com paredes monolíticas pode ser adotada facilmente, necessitando o uso de ferramentas simples e proporcionando geração de trabalho e renda para a mão-de-obra pouco qualificada. Os autores afirmaram que a habitação, após um ano de uso, apresenta-se em bom estado de conservação, 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 às características que causaram a satisfação do usuário.

2. MATERIAIS E PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para a execução da presente pesquisa foram utilizados os seguintes materiais: cinza de casca de arroz, coletada em fomalha da beneficiadora Broto Legal – cidade Porto Ferreira - SP; solo, pertencente à classe textural arenosa, coletado em jazida da cidade de Hortolândia - SP; cimento Portland CP-III-32 – RS ensacado, da marca Votoran. Após a coleta da cinza de casca de arroz, a mesma passou por um processo de peneiramento para a retirada do material não-queimado (matéria orgânica), sendo que a fração utilizável de cinza foi o material passante na peneira de 0,6 mm. Já o material solo passou pelo processo de secagem ao ar e de peneiramento, sendo a fração de solo utilizável aquela passante na peneira de 4,8 mm. A metodologia aplicada à pesquisa observou o disposto nas normas técnicas pertinentes, sendo executados os seguintes procedimentos:

2.1 Caracterização físico-mecânica e térmica das misturas de solo-cimento-cinza

Foram confeccionados corpos-de-prova (ϕ 5 cm x 10 cm de altura) com as diferentes misturas de solo-cimento-cinza recomendadas no estudo de dosagem de Milani e Freire (2006), os quais foram curados durante 7 dias em câmara úmida e conservados em ambiente de laboratório até a idade de rompimento.

Chegadas as idades de 7, 30, 60, 90, 120, 180 e 360 dias foram realizados os ensaios de compressão simples e de absorção d'água, conforme, respectivamente, as especificações da NBR 12025 (1990) e NBR 13555 (1996). Os corpos-de-prova foram também submetidos ao ensaio de durabilidade por molhamento e secagem nas mesmas idades. Este ensaio consistiu na execução de seis ciclos alternados de molhamento e secagem (cada ciclo de 48 h) de acordo com a norma NBR 13554 (1996) sendo eliminada a etapa de escovação, pois se considerou que as solicitações de abrasão superficial em paredes de vedação são menos severas que as previstas em outro uso do solo-cimento. Ao final dos ciclos de molhamento e secagem estes corpos-de-prova foram submetidos ao ensaio de compressão simples.

Para a realização dos ensaios térmicos foi escolhida a mistura de solo-cimento-cinza de melhor desempenho frente aos esforços mecânicos, durabilidade e absorção de água. A caracterização térmica baseou-se nos resultados de ensaios laboratoriais realizados pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT com corpos-de-prova de solo-cimento-cinza moldados no laboratório da Faculdade Engenharia Agrícola. Foram executados os seguintes ensaios: condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida; na qual seguiram os procedimentos da ASTM C177-04; e para o ensaio de calor específico foi utilizado o equipamento calorímetro mediante os procedimentos da ASTM C-351-92.

2.2 Descrição da construção da edificação-protótipo com sistema de paredes monolíticas de solo-cimento-cinza de casca de arroz

A construção da edificação-protótipo foi realizada em área livre do campo da Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas, sem a influência de sombreamento natural e com dimensões externas de 3,72 m x 3,72 m e internas de 3,48 m x 3,48 m; e pé-direito de 2,70 m.

A edificação-protótipo foi construída sobre fundação de brocas de concreto (ϕ 20 cm e 60 cm de profundidade) e baldrames de concreto armado (20 cm x 20 cm), sendo fixados nesta base oito pilares pré-fabricados de concreto armado (12 cm x 12 cm x 310 cm), os quais foram utilizados como guias fixas e travamento das paredes monolíticas. Para evitar possíveis infiltrações do solo para as paredes monolíticas, foi executada cinta inferior de concreto (rodapé de 12 cm x 12 cm). O traço utilizado para confecção do concreto armado foi de 1:3:2 (cimento: pedrisco: areia média) em volume; relação água/cimento de 0,64; ferragem de 6,3 mm de bitola e amarração por estribos de 5 mm de bitola.

Possui paredes monolíticas (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 resinada. A compactação era finalizada quando o soquete não deixava mais marcas sobre a superfície compactada e antes do início da execução da camada seguinte, eram 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.

A composição da mistura de solo-cimento-cinza adotado para confecção dessas paredes foi o tratamento de melhor desempenho frente à caracterização físico-mecânica (traço descrito na etapa análise de resultados). A cura dos painéis seguiu recomendações para garantir a qualidade prevista na dosagem, sendo umedecidas 3 vezes por dia, durante 7 dias após sua execução. A colocação das esquadrias da janela (90 cm x 120 cm, peitoril 1,00 m) e da porta (80 cm x 210 cm) foi simultânea à execução das paredes monolíticas e dispostas nas fachadas norte e sul, respectivamente, sendo que as mesmas foram vedadas por um painel de madeira.

Na face superior, uma cinta superior em concreto armado (12 cm x 12 cm) para recebimento da laje pré-moldada (isopor e concreto) e ático ventilado por aberturas em trama de tijolos de barro nos oitões das faces norte/sul. A cobertura é de telhas de fibrocimento pintadas externamente de branco com beiral de 20 cm, e, junto ao caibramento de sustentação, um filme de alumínio polido (isolante térmico) para reduzir a influência da superfície mais exposta à radiação solar. Acabamento final com execução de pintura externa das paredes com impermeabilizante incolor (K154 - marca Viapol) e piso interno em concreto com revestimento em argamassa de cimento desempenada.

2.3 Avaliação do desempenho das paredes monolíticas de solo-cimento-cinza de casca de arroz

Em relação ao desempenho do processo produtivo das paredes monolíticas de solo-cimento-cinza foi realizado acompanhamento diário da construção da edificação-protótipo verificando montagem das formas; 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 e seu custo-benefício em relação a outros materiais de construção tradicionais utilizados em vedações de habitações populares.

Para a verificação do desempenho estrutural das paredes monolíticas de solo-cimento-cinza da edificação-protótipo foi utilizado o critério da resistência mecânica, na qual realizou-se o ensaio destrutivo de mini-painéis com dimensões de 30 cm x 30 cm x 12 cm (largura x comprimento x espessura). Tais painéis foram confeccionados juntamente com a construção das paredes monolíticas, sendo compactados e curados de forma análoga à execução das vedações da edificação. O ensaio de compressão simples x deformação dos mini-painéis de solo-cimento-cinza foi realizado na idade de 150 dias, conforme disposições das normas NBR 8949 (1985) e NBR 8522 (2003) com a utilização de dois extensômetros de 15 cm cada, posicionados longitudinalmente nas laterais dos mini-painéis.

O desempenho térmico das paredes monolíticas de solo-cimento-cinza foi avaliado através dos parâmetros de resistência térmica total, transmitância térmica, capacidade térmica e atraso térmico. Estes parâmetros foram determinados conforme as especificações da NBR 15220 (2005) – Parte 2: Método de cálculo de características térmicas de elementos e componentes de edificações, sendo utilizados como base dos cálculos os valores da condutividade térmica e do calor específico da mistura solo-cimento-cinza.

Para avaliação do desempenho físico das paredes monolíticas de solo-cimento-cinza foi utilizado o critério de permeabilidade à água, sendo executado ensaio de permeabilidade em corpo-de-prova de solo-cimento-cinza conforme prescrições da NBR 13292 (1995); e o critério de durabilidade, sendo verificado possíveis deformações, fissurações, falhas, manchas e descolorações em função da exposição às ações climáticas e ações de cargas permanentes ou variáveis que ocorreram durante o período de um ano de observação da edificação-protótipo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A caracterização dos materiais utilizados na presente pesquisa foi apresentada nas tabelas 1, 2 e 3. Tais materiais foram utilizados para todas as etapas da pesquisa, sendo que a caracterização do cimento baseou-se nas informações fornecidas pelo fabricante Votoran, as quais atenderam aos requisitos da norma NBR 5735 (1991). O solo, conforme recomendações da ABCP (1985), é adequado para fabricação de elementos construtivos de solo-cimento. Já a cinza de casca de arroz coletada em fornalha sem controle efetivo de temperatura não possui atividade pozolânica, visto que a literatura recomenda que a totalidade das partículas das pozolanas deve estar abaixo da peneira de 0,035 mm. Apesar desta cinza apresentar alto teor de sílica e baixo teor de carbono, a análise de difração de raios-X da cinza em estudo revelou um halo centrado em torno de $23^\circ 2\theta$. A esse halo encontraram-se sobrepostos grandes picos que representam diferentes formas cristalinas da sílica, o que confirma baixa pozolanicidade do material que, provavelmente, foi calcinada a temperatura superior a 700°C .

Tabela 1 - Caracterização física, mecânica e química do cimento Portland CP III 32 RS ensacado

Perda ao Fogo	Resíduo Insolúvel	MgO	SO ₃	Finura # 200	Superfície Específica (Blaine)	Resistência à compressão aos 28 dias	Início de Pega - Fim de Pega
2,3	0,49	5,33%	1,62%	0,7%	3618 cm ² /g	40,7 MPa	4,5 h – 5,5 h

Tabela 2 - Caracterização física do solo arenoso

Composição granulométrica			Plasticidade	Massa específica dos grãos	Massa unitária (g/cm ³)	Classificação AASHTO
areia	silte	argila				
72%	19%	9%	não-plástico	2,673 g/cm ³	1,17	A2-4

Tabela 3 - Caracterização física e química da cinza de casca de arroz

Distribuição de tamanho		Massa específica	Superfície específica (BET)	SiO ₂	CO ₂	Massa unitária (g/cm ³)
Entre as peneiras 0,15 mm e 0,60 mm	Passante na peneira 0,15 mm					
74,4%	25,6%	2,18 g/cm ³	12,68 m ² /g	96%	3%	0,25

3.1 Caracterização física, mecânica e térmica das misturas de solo-cimento-cinza

Seguindo as recomendações de Milani e Freire (2006), os quais utilizaram o critério de maior teor de cinza aliado ao valor mínimo de resistência à compressão simples (≥ 1 MPa), as misturas de solo-cimento-cinza (tratamentos) indicadas para um maior aprofundamento nos estudos de caracterização física e mecânica do material formado foram (tabela 4):

Tabela 4 - Misturas de solo-cimento-cinza de casca de arroz (porcentagens em massa) e seus respectivos valores de massa específica aparente seca máxima (Mesp) e umidade ótima (Uot)

Treatments (applied energy of compaction of Proctor Normal)	Mesp (g/cm ³)	Uot (%)
T1 - (100% of soil + 0% of ash) stabilized with 7% of cement	1,956	11,57
T2 - (100% of soil + 0% of ash) stabilized with 10% of cement	1,967	11,50
T3 - (100% of soil + 0% of ash) stabilized with 13% of cement	1,974	11,40
T4 - (92,5% of soil + 7,5% of ash) stabilized with 7% of	1,686	15,77
T5 - (92,5% of soil + 7,5% of ash) stabilized with 10% of	1,700	16,43
T6 - (92,5% of soil + 7,5% of ash) stabilized with 13% of	1,714	16,03
T7 - (90% of soil + 10% of ash) stabilized with 10% of cement	1,605	17,13
T8 - (90% of soil + 10% of ash) stabilized with 13% of cement	1,607	18,10

A análise de variância dos ensaios de compressão simples mostrou que o fator tipo de tratamento promoveu efeitos significativos na variável resistência à compressão simples (RCS) dos corpos-de-prova de solo-cimento-cinza de casca de arroz.

Para os dados da figura 1, o teste de Tukey mostrou que, independente da idade, os tratamentos T3 e T2 alcançaram os maiores valores de RCS, seguidos dos tratamentos T1, T5, T6, T7 e T8, os quais não apresentaram diferenças significativas entre si. Durante os primeiros seis meses, observou-se que, para todos os tratamentos, houve aumento significativo de RCS nos primeiros 30 dias; ao longo dos 180 dias, foram notados também acréscimos e decréscimos, porém, não-significativos, assim demonstrando o acelerado processo de hidratação de produtos à base de cimento nas primeiras idades e o alcance de valores máximos de RCS nas idades de 120 ou de 180 dias. Entretanto, após atingir os valores máximos de RCS, os mesmos sofreram diminuição significativa, 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 tais materiais ficam expostos ao ambiente ocorrem ciclos de absorção de umidade e secagem, os quais geram pressões de expansão ou de 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 do material solo-cimento ao fato de ocorrer alterações das concreções lateríticas presentes no solo, as quais, com o tempo, saturam-se e perdem resistência.

Já para o ensaio de absorção de água (figura 2), o teste de Tukey mostrou que, independente da idade, o menor valor de capacidade de absorção de água foi alcançado pelo tratamento T3 seguido dos tratamentos T2, T1, T6, T5, T4, T8 e T7; os quais diferiram estatisticamente entre si.

Quanto ao ensaio de durabilidade, após a execução dos ciclos de molhamento e secagem, todos os tratamentos apresentaram perda de massa inferior a 0,95% e valores de resistência igual ou superior a 2 MPa. Estes resultados foram satisfatórios em relação à recomendação de Neves (1988) que indica que o sistema solo-cimento deve apresentar perda de massa $\leq 10\%$ e resistência mínima de 1 MPa. Observou-se para todos os tratamentos (figura 3) que, independente da idade, houve mínima perda de massa e ganho de resistência mecânica, podendo-se concluir que a execução dos ciclos de molhamento e

secagem proporcionou as misturas de solo-cimento-cinza o processo de cura térmica, acarretando aumento na hidratação dos elementos à base de cimento e a estabilidade volumétrica dos corpos-de-prova. Notou-se também que a figura 3 apresentou comportamento semelhante à figura 1, corroborando a diminuição da resistência mecânica após 6 meses e a estabilização ao final de 372 dias.

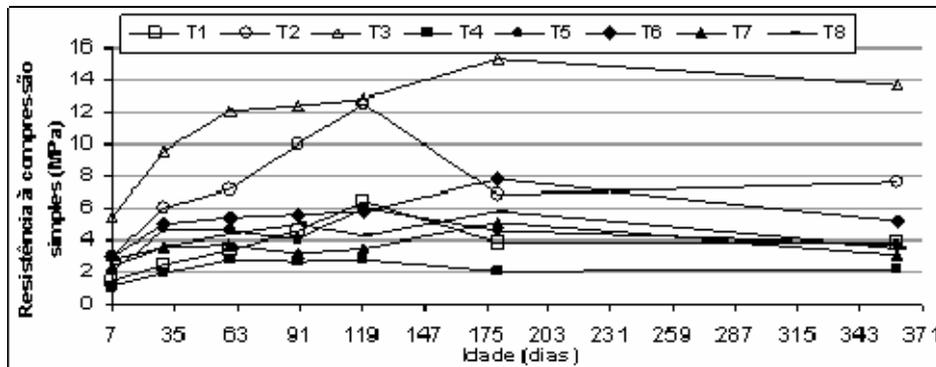


Figura 1 – Resultados do ensaio de compressão simples

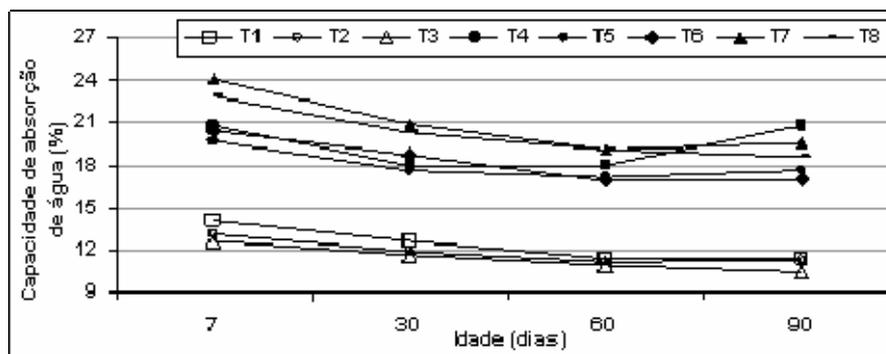


Figura 2 – Resultados do ensaio de absorção de água

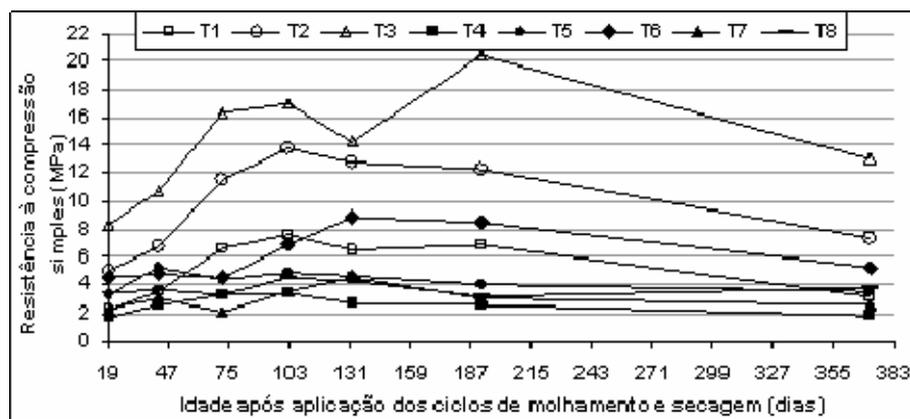


Figura 3 - Resultados do ensaio de compressão simples após ciclos de molhamento e secagem

Em termos de resistência à compressão simples, somente os tratamentos T1 e T4 não atenderam às especificações da NBR 8491 (1984) empregada para tijolos prensados de solo-cimento; essa norma estabelece, como mínimo, o valor médio de 2,0 MPa e nenhum valor inferior a 1,7 MPa, aos 7 dias. Em termos de absorção de água, somente os tratamentos T7 e T8 não atenderam às diretrizes da Norma que estabelece, como máximo, o valor médio de 20% e nenhum superior a 22%, aos 7 dias.

Analisando-se as características físico-mecânicas dos diferentes tratamentos de solo-cimento-cinza, a mistura T5 foi o tratamento com adição de cinza que atendeu aos requisitos mínimos de resistência à compressão e máximos de absorção de água especificados pela norma NBR 8491 (1984) e também apresentou bom desempenho frente aos ensaios de durabilidade e de ultra-som. Portanto, dentro dos critérios analisados, o tratamento T5 - (92,5% de solo + 7,5% de cinza) estabilizado com 10% de cimento (em massa) foi definido como o material (tratamento) mais adequado para a construção das paredes monolíticas da edificação-protótipo.

Os resultados dos ensaios laboratoriais referentes à determinação das propriedades térmicas do tratamento T5 indicaram os seguintes valores: massa específica aparente seca de $1,655 \text{ g/cm}^3$, condutividade térmica de $0,65 \text{ W/(m.K)}$ e calor específico de $0,96 \text{ kJ/(kg.K)}$. Tais propriedades foram semelhantes aos valores encontrados em pesquisa de Ferreira (2003) com misturas de solo-cimento.

3.2 Avaliação do desempenho das paredes monolíticas de solo-cimento-cinza de casca de arroz

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 formas para compactação do material, mas propuseram a utilização de fôrmas menores as quais ficariam mais leves. Quanto à quantidade dos materiais e homogeneização dos mesmos, a partir da transformação do traço em massa para traço em volume, não houve dificuldades durante a preparação do produto solo-cimento-cinza (mistura T5), sendo eliminada a utilização de argamassadeira elétrica acarretando, em consequência disso, redução no consumo de energia. O traço, em volume, correspondente a mistura T5 foi de 1:11:4 (cimento: solo: cinza) e relação água/cimento igual a 2.

A assimilação da técnica construtiva foi rápida devido ao caráter repetitório das operações e o controle tecnológico foi fácil, sendo utilizado o “teste do bolo”, CEPED (1984), para verificação de umidade ótima de compactação e extração e pesagem de material recém-compactado para verificação do grau de compactação. Estes procedimentos confirmaram que não há necessidade de mão-de-obra especializada, facilitando programas organizados de autoconstrução.

As figuras 4 e 5 mostram a edificação-protótipo durante a construção e sua finalização (vedações com sistema de paredes monolíticas de solo-cimento-cinza – mistura T5). A relação custo-benefício do material solo-cimento-cinza foi demonstrado nas tabelas 5 e 6.

Comparando-se os valores de consumo de materiais (tabela 5), 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.

Pode-se observar na tabela 6 que o processo construtivo de painéis de solo-cimento-cinza apresentou um custo 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. Evidentemente, se o solo e a cinza de casca de arroz forem retirados de fontes próximas aos locais da obra, este custo sofrerá redução de até 40%. 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. 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.



Figura 4 - Pilares e cinta de concreto (a) e compactação solo-cimento-cinza e cura das paredes (b).



Figura 5 - Vista sul/oeste da edificação-protótipo (a) e vista norte/leste da edificação-protótipo (b).

Tabela 5 - Comparação entre os tratamentos de solo-cimento e solo-cimento-cinza enfocando o consumo¹ de materiais para execução de 1 m³ de material compactado

Traços	Consumo de materiais para execução de 1 m³ de solo-cimento-cinza compactado		
	Solo (m³)	Cimento (kg)	Cinza (m³)
T5 - (92,5% de solo + 7,5% de cinza) estabilizado com 10% de cimento	1,2	150	0,45
T2 - (100% de solo + 0% de cinza) estabilizado com 10% de cimento	1,5	175	0

Tabela 6 - Comparação entre dois sistemas construtivos enfocando o custo² de volume de matéria-prima por metro quadrado e o consumo de tempo da mão-de-obra por metro quadrado

Sistema construtivo	Custo de consumo de matéria-prima em volume / m²	Consumo de tempo da mão-de-obra/ m²
Painel monolítico solo-cimento-cinza	R\$ 12,15	1,5 horas
Alvenaria cerâmica – 10 cm espessura (tijolo cerâmico furado 10 x20 x 20 cm³ assente c/ argamassa)	R\$ 8,12	3,6 horas

Quanto à avaliação de resistência à compressão simples x deformação dos mini-painéis de solo-cimento-cinza (mistura T5), observou-se que antes da ruptura não houve ocorrência de fissuras ou destacamentos. Os mini-painéis apresentaram deformabilidade baixa (tabela 7) e

ruptura frágil. Do ponto de vista estrutural, os mini-painéis obtiveram um bom comportamento e apresentaram eficiência em torno de 0,72 em relação à resistência de corpos-de-prova (mistura T5 na idade de 175 dias). 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 por CEPED (1984), e Houben e Guillaud (1994), na qual encontraram, respectivamente, os seguintes resultados para painéis monolíticos de solo-cimento: $T_{mp}/T_{cp} = 0,70$ e MOE entre 2000 a 7000 MPa.

Tabela 7 - Desempenho estrutural dos mini-painéis de solo-cimento-cinza

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

Utilizando-se as propriedades térmicas encontradas para a mistura T5 e os métodos de cálculo das características térmicas de componentes de edificações descritas na norma NBR 15220 (2005), os valores encontrados para transmitância térmica, capacidade térmica e atraso térmico das paredes foram, respectivamente: 2,82 W/(m².K); 190 kJ/(m².K); e 4,3 h.

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 (2005), a parede monolítica confeccionada com a mistura T5 apresentou conformidade com os valores estabelecidos pela norma, sendo esta mistura indicada como um material promissor em relação ao desempenho térmico. Esta norma recomenda que, para a edificação encontrar-se adequada ao clima de Campinas (Zona 3), as vedações externas devem ser leves refletoras, ou seja, devem apresentar transmitância térmica $\leq 3,6$ W/(m².K) e atraso térmico $\leq 4,3$ h.

Durante um ano de observação das paredes de solo-cimento-cinza da edificação-protótipo notou-se o surgimento de algumas fissuras longitudinais e diagonais nas vedações localizadas acima das esquadrias (porta e janela), fato este devido à falta de colocação de vergas. Nas demais paredes não houve aparecimento de fissuras estruturais ou estéticas, apenas manchas de bolor na parte inferior da parede na fachada oeste, na qual devido à pequena extensão do beiral do telhado acarretou a constante absorção de água durante períodos de chuvas, no entanto, o material solo-cimento-cinza apresenta baixa permeabilidade (coeficiente de permeabilidade de $0,66 \cdot 10^{-7}$ cm/s). De modo geral, a edificação-protótipo possui bom estado de conservação, sendo necessário um acompanhamento sistemático por mais alguns anos para confirmar a durabilidade do material solo-cimento-cinza/protótipo.

4 CONCLUSÃO

A utilização conjunta de ensaios físicos, mecânicos e térmicos 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 estabilizados 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 para construção de habitação de interesse social.

Sob os aspectos analisados no presente trabalho, pode-se concluir que solo-cimento-cinza é um material de construção de boa qualidade, de baixo custo e apropriado para utilização no sistema construtivo de paredes monolíticas. Evidentemente, o desempenho físico-mecânico, térmico e durabilidade da edificação-protótipo devem ser estudados em idades mais avançadas para corroborar as conclusões atuais e apresentar maior confiabilidade do uso deste material não-convencional de construção.

BIBLIOGRAFIA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP (1985). Fabricação de Tijolos de Solo-Cimento com a Utilização de Prensas Manuais. São Paulo: ABCP, Boletim Técnico 111, 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 12025 (1990). Solo-Cimento. Ensaio compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro. 3p.

_____. NBR 5735 (1991). Cimento Portland de alto forno. Rio de Janeiro. 10p.

_____. NBR 8491 (1984). Tijolo maciço de solo-cimento. Rio de Janeiro. 4p.

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

_____. NBR 8949 (1985). Paredes de alvenaria estrutural. Ensaio à compressão simples. Rio de Janeiro. 7p.

_____. NBR 13292 (1995). Solo. Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro. 5p.

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

_____. NBR 13555 (1996). Solo-Cimento. Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 3 p.

_____. NBR 15220 (2005). Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE (2005). Levantamento sistemático da produção agrícola – 20005. Levantamento sistemático da produção agrícola - 2005. Disponível em: www.ibge.gov.br/Producao_Agricola. Acesso em: 10/ jun/ 2005.

BARBOSA, N. P.; MATTONE, R. (2002). Construção com terra crua. In: Seminário Ibero Americano de Construção com Terra, 1.,2002. Anais...Salvador: Projeto PROTERRA. Cd-rom.

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

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

HOUBEN, H.; GUILLAUD, H. (1994) Earth Construction – A comprehensive guide. London: Intermediante Technology Publications,. 362 p.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. G. (2003). Cinza e aglomerantes alternativos. In: Freire, W. J.; Beraldo, A. L. Tecnologia e materiais alternativos de construção. Campinas: Editora da UNICAMP. cap.6, p. 145-90.

KRUGER, E. L. (2000). Tecnologias apropriadas e habitação social no Brasil. In: Kruger, E. L. Coletânea Tecnologias Apropriadas. Curitiba: CEFET-PR, p. 43-53.

MILANI, A. P. S.; FREIRE, W. J. (2006). Ensaio destrutivos e não-destrutivos aplicados a caracterização físico-mecânica de misturas de solo-cimento-cinza de casca de arroz. In: Conferência Brasileira de Materiais e Tecnologias Não-Convencionais, 2006. Anais...Salvador: ABMTENC. Cd-rom.

MYRRHA, M. A. L. (2003). Solo-cimento para fins construtivos. In: Freire, W. J.; Beraldo, A. L. Tecnologia e materiais alternativos de construção. Campinas: UNICAMP. cap.4, p. 95-120.

NEVES, C. M. M. (1988). Desempenho de paredes – Procedimento adotado para paredes monolíticas de solo-cimento. In: Simpósio de Desempenho de Materiais e Componentes de Construção Civil, 1., Anais...Florianópolis: p. 58-64.

REVISTA CONSTRUÇÃO MERCADO (2007). n.69, ano 60. São Paulo: Pini,.

SILVA, P. R. (1992). Estudo da interação solo-estrutura de fundação em solo-cimento. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília.

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

NOTAS

- 1 – Consumo determinado a partir dos dados coletados durante a construção da edificação-protótipo.
- 2 – Na tabela 6 não foram considerados estruturas e andaimes. No que se refere às informações sobre os sistemas construtivos em alvenaria cerâmica, os dados apresentados foram fornecidos pela Revista Construção Mercado (2007).
- 3 - Mini-painel 3 não foi considerado no cálculo da média da Tensão e do Módulo de Elasticidade.

AUTORES

Ana Paula da Silva Milani, graduação em Engenharia Civil - UNESP (2001), mestrado e doutorado em Engenharia Agrícola - UNICAMP (2005 e 2008). Atualmente é Prof. Adjunto do Departamento de Estruturas e Construção Civil - UFMS, desenvolvendo pesquisas nas áreas de materiais alternativos de construção e desempenho térmico de elementos e componentes construtivos.

Sandra Regina Bertocini, graduação em Tecnologia da Construção Civil – CESUP (1983), mestrado em Engenharia Civil – UFSC (2002). Atualmente é Prof. Colaboradora do Departamento de Estruturas e Construção Civil – UFMS e técnica do Laboratório de Materiais de Construção, desenvolvendo pesquisas nas áreas de materiais e tecnologia da construção.