

INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS VEGETAIS E SEUS EFEITOS SOBRE AS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-MECÂNICAS DE MISTURAS DE SOLO-CIMENTO PARA FINS DE CONSTRUÇÃO RURAL¹

Regis de Castro Ferreira², Marcos Fernandes Oliveira²

ABSTRACT

PLANT RESIDUES INCORPORATION EFFECTS ON PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF SOIL-CEMENT MIXTURES FOR AGRICULTURAL BUILDINGS PURPOSES

The aim of this research was to evaluate the effect of rice and *Brachiaria brizantha* husks on physical and mechanical properties of soil-cement mixtures and, consequently, to analyse their technical feasibility to manufacture alternative building materials for agricultural purposes. Husks were ground, sieved, and treated in lime solution and soil submitted to characterisation tests according to Brazilian standards. The plant residues were added in substitution to the cement. The cement content and residues ranged from 100% of cement and 0% of waste, to 60% of cement and 40% of waste. Following, cylindrical specimens were molded and submitted to compression test at 7, 28, and 56 days, and water absorption test seven days from molding. The results showed that the mixtures obtained from the partial substitution of cement by 10% waste are technically feasible as raw materials for constructive elements manufacturing without structural function, such as bricks and blocks, for agricultural buildings.

KEY WORDS: soil-cement, plant residues, agricultural buildings.

INTRODUÇÃO

A forma indiscriminada de extração dos recursos naturais e a poluição gerada pelos resíduos promovem impactos sobre o meio ambiente e é motivo de grande preocupação. Da mesma forma, a busca por processos manufatureiros que impliquem em menor consumo energético se faz presente em todos

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da adição da casca de arroz e da casca da semente do capim braquiária, sobre as propriedades físico-mecânicas de misturas de solo-cimento e conseqüente análise de sua viabilidade técnica com vistas à fabricação de materiais de construção alternativos para fins rurais. Para tal, os resíduos foram triturados, peneirados e tratados em solução de cal e o solo submetido aos ensaios de caracterização segundo normas brasileiras. Os resíduos foram adicionados em substituição ao cimento, variando os teores de cimento e de resíduo vegetal desde 100% de cimento e 0% de resíduo, até 60% de cimento e 40% de resíduo. Posteriormente foram moldados corpos-de-prova cilíndricos que foram submetidos aos ensaios de compressão simples, aos sete, 28 e 56 dias, e de capacidade de absorção de água, aos sete dias da moldagem. Após análise dos resultados, pôde-se concluir que as misturas obtidas a partir da substituição parcial do cimento por 10% de resíduos mostram-se viáveis como matéria-prima na fabricação de elementos construtivos não estruturais, tais como, blocos e tijolos prensados, destinados às construções e instalações rurais.

PALAVRAS-CHAVE: solo-cimento, resíduos vegetais, construções rurais.

os setores da economia. Em se tratando de construções rurais, o solo, por ser um material de grande disponibilidade e baixo custo, vem se mostrando como excelente alternativa técnica e econômica, principalmente sob a forma de tijolos ou blocos prensados e não queimados de baixo aporte energético. Porém, independente de seu uso, os solos devem apresentar certas propriedades físicas e mecânicas relacionadas

1. Trabalho recebido em out./2006 e aceito para publicação em out./2007 (registro nº 716).

2. Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Goiás (EA-UFG), Setor de Engenharia Rural. Caixa Postal 131, CEP 74001-970 Goiânia, GO. E-mails: rcastro@agro.ufg.br

3. Programa de Pós-Graduação em Agronomia, EA-UFG. E-mail: marcoseherika@yahoo.com.br

à estabilidade volumétrica, resistência e durabilidade. Para fins de construção, essas propriedades são atingidas por meio dos processos de estabilização.

O termo "estabilização do solo" corresponde a qualquer processo, natural ou artificial, pelo qual um solo, sob o efeito de cargas aplicadas, se torna mais resistente à deformação e ao deslocamento, do que o solo primitivo. Tais processos consistem em modificar as características do sistema solo-água-ar com a finalidade de se obter propriedades de longa duração compatíveis com uma aplicação particular (Houben & Guillaud 1994).

Dentre os inúmeros métodos de estabilização de solos para fins construtivos, o que tem sido identificado como mais prático e eficiente é o da estabilização química. De acordo com Fang (1991), esse método se refere àqueles em que, tanto as interações químicas quanto as físico-químicas e físicas, podem ocorrer no processo de estabilização. Dentre as técnicas de estabilização química citam-se a do solo-cimento, a do solo-cal, a do solo-betume, a do solo-resina, a estabilização com cinzas volantes ("fly ash") e escórias de alto forno ("blast furnace slag"), a estabilização com o emprego de sais (cloretos), ácidos (ácido fosfórico), lignina, silicatos de sódio ("water glass"), aluminatos de cálcio, sulfatos de potássio, óxidos de ferro, cinzas pozolânicas de turfas e restos de atividade agrícola (palha de arroz, casca de amendoim, bagaço de cana-de-açúcar etc.), materiais vegetais (partículas de madeira, sobras de papel, polpa de celulose etc.).

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP, o solo é um elemento que contribui em maior proporção na mistura solo-cimento, devendo ser selecionado de modo que permita o uso da menor quantidade possível de cimento. De maneira geral os solos mais adequados para a mistura solo-cimento são os que possuem as seguintes características: porcentagem passando na peneira ABNT 4,8 mm (nº 4) igual a 100%; porcentagem passando na peneira ABNT 0,075 mm (nº 200) entre 10% e 50%; limite de liquidez inferior a 45%, e índice de plasticidade menor que 18% (ABCP 1985).

A estabilização química em alguns solos é conseguida com a aplicação de teores de cimento que variam de 6% a 12% dependendo da composição granulométrica do solo. Para teores abaixo de 3% ocorre apenas uma melhoria das características estruturais do solo, não havendo a sua estabilização (Houben & Guillaud 1994).

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 íons de oxigênio expostos, crescendo por polimerização dos grupos SiO_4 e incorporando íons de cálcio livre à superestrutura formada pelos grupamentos de SiO_4 (Taylor 1992).

Ferreira & Freire (2003) estudaram a resistência à compressão simples e a absorção d'água do material solo-cimento por meio da determinação experimental em corpos-de-prova cilíndricos. O solo utilizado foi de características arenosas (A_{2-4}), sendo adicionado ao solo o teor de 10% de cimento Portland. Os resultados encontrados pelos autores para resistência à compressão simples e absorção de água de corpos-de-prova foram, em média, respectivamente, 2,0 MPa e 12%, aos sete dias de idade.

Por outro lado, no meio rural, ou nas agroindústrias, é notória a geração de uma grande quantidade de resíduos na forma de biomassa vegetal, para os quais na maioria das vezes ainda não se encontrou uma adequada destinação. Normalmente, tais resíduos são dispostos na natureza, poluindo-a ou, então, são queimados sem controle algum. Uma alternativa de solução desse problema é o aproveitamento da biomassa vegetal para a obtenção de materiais de construção, denominados de materiais compósitos.

Sarmiento (1996) definiu o termo biomassa vegetal como sendo as inúmeras variedades de matéria-prima resultantes das atividades agrícolas, florestais e agroindustriais, dentro das quais estariam compreendidas as partículas e fibras vegetais. Tal biomassa pode exercer a função de enchimento ou reforço da matriz cimentícia. A utilização de materiais lignocelulósicos para reforçar essas matrizes data de longo tempo. Tais compósitos apresentam características interessantes, tais como, baixo custo, boa trabalhabilidade, boa capacidade de isolamento termo-

acústico, excelente resistência ao ataque de agentes deterioradores, dentre outras (Khedari *et al.* 2005).

Dentre os materiais lignocelulósicos largamente empregados como reforço em matrizes cimentícias, destacam-se a casca de arroz, as fibras de sisal, de coco, de folha de bananeira (polpa *kraft*) e do bagaço da cana-de-açúcar, as partículas de bambu, de *Eucaliptus* e de *Pinus*, dentre outros. A escolha do tipo de material é condicionada, principalmente, à sua disponibilidade e desempenho técnico desejável. Dessa forma, em se tratando de matrizes rígidas, tem-se dado preferência à casca de arroz e aos particulados lignocelulósicos tais como os de bambu e os de *Pinus* e *Eucaliptus* (Savastano Jr. *et al.* 2000).

A casca de arroz tem sido objeto de diversas pesquisas com o intuito de melhorar as características físico-mecânicas de argamassas e/ou de materiais de construção baseados em solo (Akasaki & Silva 2001, Beraldo & Roque 2003, Jauberthie *et al.* 2003, Milani & Freire 2006).

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. Sob o aspecto econômico e tecnológico, a casca de arroz viabiliza a confecção de materiais de baixo custo, pois atua como material de enchimento ou até mesmo de substituição parcial da matéria-prima (agregado miúdo) utilizada em materiais de construção convencionais. Já sob o aspecto ambiental, a utilização da casca de arroz permite o controle e a minimização do descarte, do lançamento ou da queima indiscriminada.

Da mesma forma, Beraldo & Tojal (2001) ressaltam que a grande vantagem do uso da casca de arroz como um agregado alternativo reside no fato de sua geração ser concentrada em poucos locais, o que facilita a sua comercialização. Além disso, a granulometria do material é relativamente uniforme, o que facilita a dosagem do compósito.

Zucco (1999) submeteu diferentes frações de casca de arroz a alguns tratamentos para minimizar a incompatibilidade química entre a matriz cimentante e a biomassa vegetal, visando à fabricação de placas de compósito à base de cimento Portland e casca de arroz. Após prensagem e cura das placas, essas foram submetidas a ensaios de compressão paralela, tendo os dados obtidos mostrado que os melhores resultados foram alcançados pelos compósitos fabricados com partículas de casca de arroz lavadas em solução de

cal. Esse tratamento permitiu a remoção de extrativos que se solubilizam na água e inibem a hidratação do cimento.

Mais recentemente, Milani & Freire (2006) estudaram os efeitos da adição da casca de arroz nas propriedades físico-mecânicas da mistura de solo-cimento visando obter composições de solo-cimento-casca de arroz com potencialidade para fabricação de materiais alternativos de construção. As composições solo-cimento-casca de arroz foram submetidas aos ensaios de compressão simples, aos sete, 28 e 56 dias, e de absorção de água. Após a determinação das principais características físicas e mecânicas, os autores concluíram que misturas de solo associado ao teor de 12% de combinações de cimento e casca de arroz mostraram-se promissoras como materiais para posterior utilização na fabricação de elementos construtivos em construções e instalações rurais.

Assim como a casca de arroz, outros resíduos oriundos das usinas de beneficiamento de sementes, resultantes das etapas de pré-limpeza, secagem, limpeza e peneiramento, como a casca do capim braquiária, podem ser utilizados e aproveitados. O capim braquiária é uma gramínea perene originária da África, propagada por sementes, com hábito de crescimento cespitoso. São plantas que se adaptam a uma grande diversidade de solos e climas (Rocha 1996). Possui aproximadamente 88% de matéria seca, 7% de proteína bruta, 22% de fibra em detergente neutro, 26% de açúcares, 1% de amido e 33% de fibra solúvel em detergente neutro (Hall 2001). A casca que envolve a semente, removida no processo de beneficiamento, na maioria das vezes, é descartada, contribuindo para o agravamento da degradação ambiental. O volume desses resíduos do beneficiamento de sementes varia de acordo com o grau de pureza que a semente possui ao vir do campo, e, também, com o grau de pureza que se quer dar à semente comercial. Não há relatos na literatura sobre o aproveitamento da casca de braquiária em matrizes cimentícias para a obtenção de materiais alternativos de construção.

Buscando-se oferecer alternativas para a destinação de resíduos agrícolas, a presente pesquisa teve como objetivo avaliar o efeito da adição da casca de arroz e da casca da semente do capim braquiária (*Brachiaria brizantha*) sobre as propriedades físico-mecânicas de misturas de solo-cimento e conseqüente análise de sua viabilidade técnica com

vistas à fabricação de materiais de construção alternativos para fins rurais.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido nos Laboratórios de Mecânica dos Solos e de Materiais de Construção, da Escola de Engenharia Civil (EEC), bem como no Laboratório de Engenharia Rural da Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos (EA), Universidade Federal de Goiás (UFG).

Foi estudado um solo de classe textural argilosa predominante do município de Goiânia. As amostras de solo foram coletadas à profundidade de 1,0 m de modo a evitar-se a camada superficial, geralmente imprópria para esse tipo de uso, devido à presença de matéria orgânica em excesso e alteração na quantidade de finos por lixiviação.

Os resíduos vegetais (cascas de arroz e de brachiaria) foram obtidos em usinas de beneficiamento de arroz e sementes de forrageiras do município de Goiânia, Goiás. Como produtos químicos foram usados: a) cimento Portland CP III-F-32 (NBR 11578, conforme ABNT 1991), para a estabilização do solo e composição dos tratamentos; e b) cal cálcica hidratada CH-III, de acordo com a NBR 7175 (ABNT 1992a), para o tratamento dos resíduos visando-se evitar a incompatibilidade química entre o cimento e a biomassa vegetal. Para os ensaios de compressão simples dos corpos-de-prova cilíndricos foi utilizada uma máquina universal de ensaios da marca Dynatest, com dispositivo de controle de velocidade de carregamento e capacidade de 2.500 kN.

Procedimentos aplicados aos solos

Após a coleta, amostras deformadas de solo foram encaminhadas ao Laboratório Mecânica dos Solos (EA-UFG), onde foi passado em peneira nº 4 (abertura de malha igual a 4,76 mm), e acondicionado em caixas especiais até o momento de ser utilizado. Essas amostras foram submetidas aos seguintes ensaios de caracterização:

- análise granulométrica, por sedimentação e peneiramento, para se determinar a distribuição em tamanho das partículas do solo, de acordo com a norma NBR 07181 (ABNT 1984a);
- determinação da massa específica dos sólidos do solo, de acordo com a norma NBR 07251 (ABNT 1982);

- determinação dos limites de liquidez e de plasticidade do solo, de acordo com as normas NBR 06459 (ABNT 1984b) e NBR 07180 (ABNT 1984c), respectivamente;
- ensaio de compactação Proctor Normal, utilizando-se energia de 6 kg cm⁻², para determinar a massa específica aparente seca máxima e umidade ótima correspondente ao solo natural e para as diferentes misturas de solo-cimento-resíduos vegetais, de acordo com as recomendações da NBR 07182 (ABNT 1986).

Definição dos tratamentos

Para a definição dos tratamentos adotou-se o teor de 10% de cimento baseado nas recomendações de Sherwood (1993). Os teores de resíduos foram definidos em função daqueles estudados por Milani & Freire (2006).

Os resíduos foram adicionados em substituição ao cimento. Dessa forma, foram variados os teores de cimento e de resíduo desde 100% de cimento e 0% de resíduo, até 60% de cimento e 40% de resíduo (em relação ao teor de 10% de cimento), utilizando-se nove tratamentos, conforme se segue: T₁ - solo + 10% de adições (0% de resíduo + 100% de cimento); T₂ - solo + 10% de adições (10% de casca de arroz + 90% de cimento); T₃ - solo + 10% de adições (20% de casca de arroz + 80% de cimento); T₄ - solo + 10% de adições (30% de casca de arroz + 70% de cimento); T₅ - solo + 10% de adições (40% de casca de arroz + 60% de cimento); T₆ - solo + 10% de adições (10% de casca de braquiária + 90% de cimento); T₇ - solo + 10% de adições (20% de casca de braquiária + 80% de cimento); T₈ - solo + 10% de adições (30% de casca de braquiária + 70% de cimento); e T₉ - solo + 10% de adições (40% de casca de braquiária + 60% de cimento). O tratamento T₁ foi utilizado como testemunha.

Procedimentos aplicados aos resíduos vegetais

Os resíduos vegetais foram triturados em moinho de martelo e peneirados (utilizando a fração das cascas compreendida entre 4,8 mm e 0,42 mm de aberturas de malha) eliminando-se a fração fina, promovendo-se a uniformização e melhoria da adesão das cascas ao sistema solo-cimento.

Após a trituração e o peneiramento, os resíduos foram imersos em solução de cal concentrada a 5% por um período de 24 horas e secados em estufa por um período de 48 horas, a uma temperatura de 80°C,

de acordo com as recomendações de Akasaki & Silva (2001). Tal procedimento foi necessário para se evitar a incompatibilidade química entre a biomassa vegetal e o aglomerante mineral.

As determinações da distribuição granulométrica e da massa específica unitária das cascas, de acordo com as normas NBR 07181 (ABNT 1984a) e (NBR 07251), respectivamente, foram realizadas antes e depois de seu tritramento e tratamento com cal.

Aplicação dos tratamentos

O teor de 10% de cimento foi tomado em relação ao peso do solo seco que compreendeu a fração menor que 4,76 mm (100% passando em peneira nº 4), no seu teor de umidade natural, e a ele adicionado e misturados até perfeita homogeneização. O mesmo procedimento foi repetido para os teores de resíduos vegetais (0%, 10%, 20%, 30% e 40%).

Em seguida, foram moldados corpos-de-prova cilíndricos com as diferentes misturas de solo-cimento e solo-cimento-resíduo, de acordo com os procedimentos da NBR 12024 (ABNT 1990a). Para tal, a mistura dos componentes foi feita manualmente e, com esta, foram confeccionados corpos-de-prova de 100 mm de diâmetro e 127 mm de altura, em moldes cilíndricos apropriados. Foi mantido um grau de compactação (GC) não inferior a 95% e não superior a 105 %, em relação aos valores máximos da massa específica aparente seca obtidos nos ensaios de compactação Proctor Normal. Os valores do GC

foram obtidos por: $GC(\%) = \left(\frac{\gamma_c}{\gamma_s} \right) 100$, em que γ_c é a

massa específica aparente seca do corpo-de-prova cilíndrico, em $g\ cm^{-3}$; e γ_s é a massa específica aparente seca máxima do solo, obtida pelo ensaio de compactação normal de Proctor, também em $g\ cm^{-3}$.

Após a moldagem, os corpos-de-prova foram curados em câmara úmida sob temperatura de $23^{\circ}C \pm 2^{\circ}C$ e umidade relativa de $90\% \pm 2\%$, durante períodos de 7, 28 e 56 dias, após os quais foram rompidos à compressão simples, conforme as recomendações descritas em NBR 12025 (ABNT 1990b).

Ensaio de compressão simples e absorção de água

A determinação da resistência à compressão simples foi feita de acordo com a norma NBR 12025

(ABNT 1990b), que descreve a maneira como os corpos-de-prova de solo-cimento são ensaiados à compressão simples. A resistência média foi determinada pela média aritmética de três repetições.

Para o ensaio de absorção de água, os corpos-de-prova foram imersos totalmente em água, durante 24 horas, após um período de cura, em câmara úmida, de sete dias completos. Os corpos-de-prova foram pesados antes e depois da imersão em água, anotando-se suas massas úmida e saturada. Posteriormente, foram secos em estufa a $105^{\circ}C$, até constância de massa, para a determinação de suas massas secas. A diferença percentual entre a massa saturada e a massa úmida do corpo-de-prova correspondeu ao valor de sua capacidade parcial de absorção de água; já a diferença percentual entre a massa saturada e a massa seca correspondeu ao valor de sua capacidade total de absorção de água.

Planejamento experimental

O trabalho foi conduzido em esquema fatorial ($2 \times 5 \times 3$), inteiramente casualizado, com três repetições, correspondentes aos seguintes fatores de variação: dois tipos de resíduos vegetais (casca de arroz e casca de braquiária), cinco teores de resíduos vegetais (0%, 10%, 20%, 30% e 40%) e três períodos de cura (7, 28 e 56 dias), totalizando quinze tratamentos. As médias foram comparadas pelo teste Tukey a 1% de probabilidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da caracterização do solo são apresentados na Tabela 1. A partir dos resultados da análise granulométrica e de limites de consistência do solo, com base no parâmetros de AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), citados por Caputo (2003), este foi classificado como argiloso da classe A_7 . Portanto, esse solo mostrou-se impróprio para uso em misturas de solo-cimento, devido ao seu teor máximo de argila estar em desacordo com a recomendação da ABCP (1985). Dessa maneira, foi realizada uma correção granulométrica do solo mediante a adição de areia fina (50%) à massa do solo natural. Assim, passou-se de uma condição de 68% de fração fina (% passante na peneira nº 200) para 44%. Após essa correção, o solo foi classificado como A_4 , tratando-se, portanto, de um solo siltoso

Tabela 1. Características físicas do solo utilizado na fabricação dos corpos-de-prova cilíndricos.

Solo	Distribuição granulométrica			Índices físicos ¹				Classificação AASHTO ²
	areia	silte	argila	Mesp	LL	LP	IP	
Natural	31,94	5,87	62,19	3,38	41,7	28,0	13,7	A ₇
Corrigido	55,82	21,21	22,97	2,72	21,1	16,3	4,8	A ₄

¹- Mesp: Massa específica aparente seca (g cm⁻³); LL: Limite de Liquidez; LP: Limite de Plasticidade e IP: Índice de Plasticidade.

²-American Association of State Highway and Transportation Officials, citada por Caputo (2003).

com pequena quantidade de material grosso e de argila.

Os valores da massa específica aparente seca máxima e da umidade ótima de compactação, determinados durante os ensaios de compactação normal de Proctor, encontram-se na Tabela 2. Observa-se que tanto nos tratamentos que receberam casca de arroz quanto nos que receberam casca de braquiária em sua composição, à medida que se aumentou a quantidade dos resíduos vegetais, maior foi a dificuldade de compactar a mistura, o que elevou o volume de vazios no sistema com conseqüente diminuição da massa específica aparente máxima.

Dessa forma, as misturas apresentaram menor massa específica aparente nos tratamentos com maiores teores de resíduos (Figuras 1 e 2), ocorrendo o inverso no caso da mistura que não continha resíduo vegetal. Isso evidenciou o efeito prejudicial da adição de resíduo vegetal ao solo-cimento compactado. A adição do resíduo promoveu uma maior dissipação de energia durante o ensaio de compactação, provocando a diminuição dos valores de massa específica aparente seca máxima das misturas e conseqüente aumento da umidade ótima de compactação.

Tabela 2. Massa específica aparente seca máxima (g cm⁻³) e umidade ótima de compactação (%) das misturas, obtidas pelo ensaio de compactação de Proctor Normal.

Mssa específica (g cm ³)									
T ₁ ¹	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	T ₉	
1,82	1,77	1,73	1,73	1,68	1,79	1,73	1,72	1,70	
Umidade ótima (%)									
T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	T ₉	
16,72	17,72	18,64	18,25	19,31	16,94	18,56	19,05	19,91	

¹- T₁: solo + 10% de adições (0% de resíduo + 100% de cimento); T₂: solo + 10% de adições (10% de casca de arroz + 90% de cimento); T₃: solo + 10% de adições (20% de casca de arroz + 80% de cimento); T₄: solo + 10% de adições (30% de casca de arroz + 70% de cimento); T₅: solo + 10% de adições (40% de casca de arroz + 60% de cimento); T₆: solo + 10% de adições (10% de casca de braquiária + 90% de cimento); T₇: solo + 10% de adições (20% de casca de braquiária + 80% de cimento); T₈: solo + 10% de adições (30% de casca de braquiária + 70% de cimento); e T₉: solo + 10% de adições (40% de casca de braquiária + 60% de cimento).

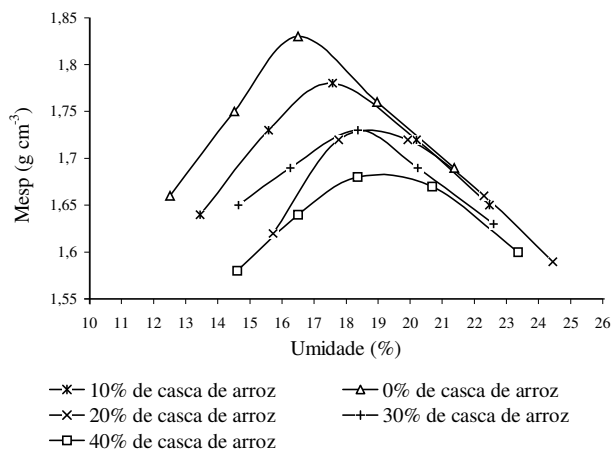


Figura 1. Curvas de compactação das misturas de solo-cimento para os diferentes teores de casca de arroz, como função entre a massa específica aparente seca (Mesp), em g cm⁻³, e o teor de umidade (%).

A casca de arroz, em sua condição natural, caracterizou-se como sendo um material leve, com massa unitária de 0,086 g cm⁻³. Observa-se que a casca de arroz apresentou granulometria uniforme, com 89% do resíduo compreendido entre as peneiras de 2,00 mm e 1,19 mm (Tabela 3). Por outro lado, depois de passar pelos processos de fracionamento, peneiramento e pré-tratamento, a massa unitária da casca de arroz aumentou para 0,152 g cm⁻³ e cerca de 90% da sua massa apresentou-se com diâmetro variando de 1,19 mm a 0,42 mm (Tabela 3).

Por sua vez, a casca da semente de braquiária em sua condição natural caracterizou-se como sendo um material leve com massa unitária de 0,059 g cm⁻³, e de granulometria uniforme (91% compreendido

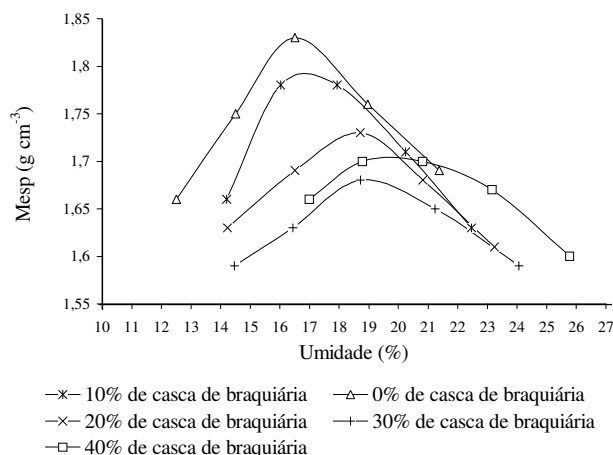


Figura 2. Curvas de compactação das misturas de solo-cimento para os diferentes teores de casca de braquiária, como função entre a massa específica aparente seca (Mesp), em g cm⁻³, e o teor de umidade (%).

Tabela 3. Distribuição granulométrica dos resíduos vegetais utilizados na fabricação dos corpos-de-prova cilíndricos.

Casca de arroz					
Abertura da malha (mm)	Natural		Triturada e tratada		
	% Retida	% Acumulada	Abertura da malha (mm)	% Retida	% Acumulada
4,76 (# 4) ¹	0,11	0,11	4,76 (# 4)	0,00	0,00
2,00 (# 10)	41,17	41,28	2,00 (# 10)	0,51	0,51
1,19 (# 16)	48,70	89,98	1,19 (# 16)	17,28	17,79
0,59 (# 30)	8,74	98,72	0,59 (# 30)	62,17	79,96
0,42 (# 40)	0,57	99,29	0,42 (# 40)	11,14	91,10
Fundo	0,71	100,00	Fundo	8,90	100,00

Casca de braquiária					
Abertura da malha (mm)	Natural		Triturada e tratada		
	% Retida	% Acumulada	Abertura da malha (mm)	% Retida	% Acumulada
4,76 (# 4) ¹	0,05	0,05	4,76 (# 4)	0,00	0,00
2,00 (# 10)	76,09	76,14	2,38 (# 8)	27,31	27,31
1,19 (# 16)	15,35	91,49	1,19 (# 16)	32,34	59,65
0,59 (# 30)	6,76	98,25	0,59 (# 30)	23,41	83,06
0,42 (# 40)	0,95	99,20	0,42 (# 40)	8,42	91,48
Fundo	0,80	100,00	Fundo	8,52	100,00

¹. Os valores em parênteses se referem à numeração das peneiras de acordo com a NBR 07181 (ABNT 1984a).

entre as peneiras de 2,00 mm e 1,19 mm). Por outro lado, depois de passar pelos processos de fracionamento, peneiramento e pré-tratamento, a massa unitária aumentou para 0,096 g cm⁻³ e 83% da sua massa apresentou-se com diâmetro variando de 2,00 mm a 0,105 mm.

A capacidade de absorção de água pelos corpos-de-prova afeta diretamente a sua capacidade de resistir à aplicação de cargas e indiretamente sua durabilidade a longo prazo. Quanto maior a capacidade de absorção de água, menor será a sua resistência quando submetido a uma carga. De acordo com Walker (1995), essa redução de resistência é devida, principalmente, ao desenvolvimento de pressões de água nos poros e à liquefação dos minerais de argila não estabilizados na matriz compactada.

A Tabela 4 apresenta os resultados de absorção parcial e total de água para os corpos-de-prova avaliados aos sete dias de idade. A Figura 3 ilustra o desempenho dos corpos-de-prova submetidos aos ensaios de absorção de água em função da massa específica aparente seca máxima das diferentes misturas.

Conforme a Tabela 4 e a Figura 3, o menor valor de absorção total de água foi observado no tratamento T₁ com o valor de 15,48%, o que já era de se esperar, devido a maior quantidade de cimento e ausência de resíduos vegetais (que conferem menor massa específica aparente ao solo e maior volume de poros). Os valores mais elevados da absorção ocorreram nos tratamentos T₅ e T₉ devido à presença de maior quantidade de resíduo vegetal (40% de substituição do cimento, pelo resíduo vegetal)

Tabela 4. Capacidade de absorção de água (%) dos corpos-de-prova cilíndricos aos sete dias para os diferentes tratamentos estudados.

Tratamentos	Absorção de água (%)	
	Parcial	Total
T ₁	0,67 a ¹	15,48 a
T ₂	0,94 a	17,68 b
T ₃	0,78 ab	18,52 bc
T ₄	1,33 abc	19,19 c
T ₅	1,07 abc	20,43 e
T ₆	1,84 abc	17,56 b
T ₇	0,70 bc	18,84 c
T ₈	1,43 cd	19,54 cd
T ₉	1,18 d	21,65 f

¹. T₁: solo + 10% de adições (0% de resíduo + 100% de cimento); T₂: solo + 10% de adições (10% de casca de arroz + 90% de cimento); T₃: solo + 10% de adições (20% de casca de arroz + 80% de cimento); T₄: solo + 10% de adições (30% de casca de arroz + 70% de cimento); T₅: solo + 10% de adições (40% de casca de arroz + 60% de cimento); T₆: solo + 10% de adições (10% de casca de braquiária + 90% de cimento); T₇: solo + 10% de adições (20% de casca de braquiária + 80% de cimento); T₈: solo + 10% de adições (30% de casca de braquiária + 70% de cimento); e T₉: solo + 10% de adições (40% de casca de braquiária + 60% de cimento).

². Em cada linha, médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste Tukey a 1% de probabilidade.

apresentando os valores de 20,43% e 21,65%, respectivamente.

A Tabela 5 apresenta os resultados de resistência à compressão simples dos corpos-de-prova estudados. Verifica-se que independente da idade, os melhores resultados em termos de desempenho mecânico foram alcançados pelos tratamentos T₁ e T₂, ou seja pelo solo sem resíduo vegetal e pelo solo com adição de 10% de casca de arroz. A Figura 4 ilustra o desempenho dos corpos-de-prova submetidos aos ensaios de compressão simples na idade de sete

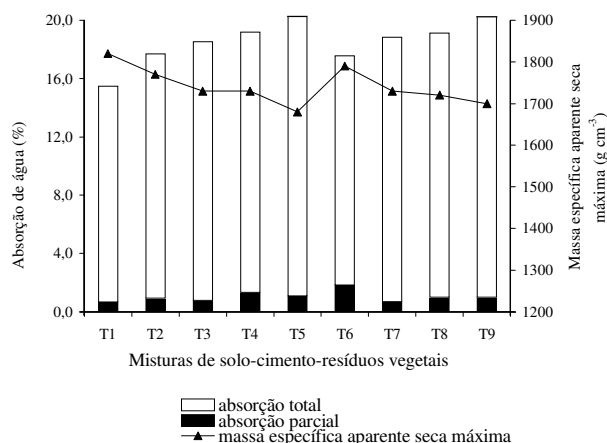


Figura 3. Capacidade de absorção de água e massa específica aparente seca máxima dos corpos-de-prova de solo-cimento-resíduo, em comparação com a testemunha T₁ (sem resíduo)

Tabela 5. Resistência à compressão simples (MPa) dos corpos-de-prova para os três períodos de cura estudados.

Tratamentos	Idade (dias)		
	7	28	56
T ₁ ¹	3,15 a ² B ³	3,30 a A	3,42 a A
T ₂	2,11 b B	2,48 b A	2,44 b A
T ₃	1,33 d C	2,21 c A	1,80 d B
T ₄	1,14 e C	1,95 d A	1,41 e B
T ₅	1,04 e C	1,55 f A	1,22 f B
T ₆	1,56 c C	1,78 e B	1,97 c A
T ₇	0,79 f C	1,60 f A	1,01 g B
T ₈	0,66 f B	0,96 g A	0,62 h B
T ₉	0,36 g AB	0,59 h A	0,47 i A

¹- T₁: solo + 10% de adições (0% de resíduo + 100% de cimento); T₂: solo + 10% de adições (10% de casca de arroz + 90% de cimento); T₃: solo + 10% de adições (20% de casca de arroz + 80% de cimento); T₄: solo + 10% de adições (30% de casca de arroz + 70% de cimento); T₅: solo + 10% de adições (40% de casca de arroz + 60% de cimento); T₆: solo + 10% de adições (10% de casca de braquiária + 90% de cimento); T₇: solo + 10% de adições (20% de casca de braquiária + 80% de cimento); T₈: solo + 10% de adições (30% de casca de braquiária + 70% de cimento); e T₉: solo + 10% de adições (40% de casca de braquiária + 60% de cimento).

²- Em cada linha, médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey a 1% de probabilidade.

³- Em cada coluna, médias seguidas de mesma letra maiúscula minúscula não diferem entre si pelo teste Tukey a 1% de probabilidade.

dias em função da massa específica aparente seca máxima das diferentes misturas.

Com relação aos valores de resistência à compressão simples aos sete dias de idade, o teste Tukey mostrou que o maior valor médio de resistência foi de 3,15 MPa obtido pelo tratamento T₁, seguido pelo valor de 2,11 do tratamento T₂. Por outro lado, os piores desempenhos foram alcançados pelos tratamentos T₈ e T₉, (com os valores de 0,66 MPa e 0,36 MPa, respectivamente) os quais não apresentaram diferenças significativas entre si (Tabela 4).

Aos 28 dias todos os tratamentos com casca de arroz e de braquiária diferiram entre si, e a resistência diminuiu à medida que se elevou o teor de casca nos tratamentos. Entretanto, os valores de

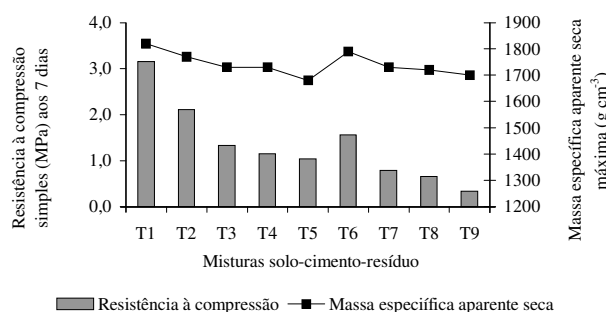


Figura 4. Resistência à compressão simples e massa específica aparente seca máxima dos corpos-de-prova de solo-cimento-resíduo em comparação com a testemunha T₁ (sem resíduo)

resistência dos tratamentos com casca de braquiária, foram menores e diferentes estatisticamente dos valores apresentados pelos tratamentos com casca de arroz, nos teores correspondentes (Tabela 5).

Aos 56 dias o comportamento dos tratamentos se manteve como aquele observado aos 28 dias, contudo, a resistência alcançada pelos tratamentos foi menor do que aquelas aos 28 dias. As exceções ficaram por conta dos tratamentos T₁ e T₆. No tratamento T₁ a resistência aumentou em termos absolutos (3,42 MPa) mas não diferindo estatisticamente do valor alcançado aos 28 dias (3,30 MPa). Já no tratamento T₆ houve um aumento de 1,78 MPa, aos 28 dias, para 1,97 MPa, aos 56 dias, nesse caso o aumento foi estatisticamente significativo.

A norma NBR 08491 (ABNT 1992b) estabelece que os corpos-de-prova confeccionados com material solo-cimento apresentem um valor médio de resistência mínima de 2,0 MPa, e nenhum valor inferior a 1,7 MPa aos sete dias de idade, nesse caso, apenas os corpos-de-prova dos tratamentos T₁ e T₂, em todas as idades, e o tratamento T₃ na idade de 28 dias estão de acordo com essas recomendações. Entretanto, para tijolos não normalizados, a NBR 08491, a estabelece o valor mínimo de 1,5 MPa para a resistência à compressão simples aos sete dias. Adotando-se o valor de 1,5 MPa como resistência mínima, aos sete dias, a substituição do cimento por 10% de resíduos (T₂ e T₆) pode ser indicada para a confecção de tijolos de solo-cimento-resíduos vegetais.

No geral, a resistência apresentada pelos tratamentos aos 28 dias se mostrou superior à resistência apresentada pelos tratamentos aos sete e 56 dias. De sete para 28 dias houve um incremento de resistência, devido aos processos de hidratação do cimento, o que promove a estabilização química do solo com conseqüente aumento de sua resistência.

Analisando-se o período de 28 para 56 dias, houve, no geral, uma queda na resistência à compressão simples. Isso pode ter ocorrido pelo fato do cimento contido nos corpos-de-prova aos 28 dias, ter passado pelo processo de hidratação, o que não garante mais incremento de resistência. Ou ainda que esse incremento tenha sido muito baixo por ainda haver alguma quantidade de cimento a ser hidratada, fato esse observado nos tratamentos T₁ e T₆. A diminuição da resistência pode também ter sido causada por ocasião dos corpos-de-prova terem permanecido em câmara úmida até os 56 dias (para que fossem mantidas as mesmas condições ambi-

entais pelas quais os corpos-de-prova dos outros períodos de cura foram submetidos). Desta forma, a presença de umidade pode ter causado a diminuição de sua resistência quando submetidos à carga durante o ensaio de compressão simples.

CONCLUSÕES

1. As misturas obtidas a partir da substituição parcial do cimento pelo teor de 10% de resíduos mostram-se viáveis como matérias-primas para a fabricação de elementos construtivos não estruturais, tais como blocos e tijolos prensados, destinados às construções e instalações rurais.
2. Em geral, a idade de cura com melhor resultado em termos de resistência à compressão simples foi a de 28 dias, seguida das idades de 56 dias e sete dias.
3. Em termos de resistência à compressão simples, a substituição parcial do teor de cimento por casca de arroz poderá ser realizada nos seguintes teores: 10% para sete dias de idade, 10%, 20%, 30% e 40% para 28 dias, e 10% e 20% para 56 dias. Já para a casca de braquiária, nos seguintes teores: 10% para sete dias, 10% e 20% para 28 dias, e 10% para 56 dias.
4. Em termos de absorção total de água, a substituição parcial do teor de cimento por casca de arroz ou de braquiária poderá ser utilizada nos teores de 10%, 20% e 30%.

REFERÊNCIAS

- Akasaki, J.L. & A.P. Silva. 2001. Estudo de composições do solo estabilizado com cal e resíduos agroindustriais. p.1-4. In Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 30. Foz do Iguaçu, Paraná. 1 CD-Rom.
- ABCP. Associação Brasileira de Cimento Portland. 1985. Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland, Boletim Técnico 111. 4 p.
- ABCP. Associação Brasileira de Cimento Portland. 1985. Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland. 4 p. (Boletim Técnico 111)
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1982. Rio de Janeiro. NBR 07251. Agregado em estado solto. Determinação da massa específica unitária. Rio de Janeiro, 3 p.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 1984a. NBR 07181. Solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 13 p.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 1984b. NBR 06459. Solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 6 p.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. NBR 07180. Solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984c. 3 p.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 1986. NBR 7182. Solo: ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 10 p.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 1990a. NBR 12024. Solo-cimento. Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro. 8 p.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 1990b. NBR 12025. Solo-cimento. Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 8 p.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 1991. NBR 07215. Cimento Portland. Determinação da resistência à compressão simples. Rio de Janeiro, 7 p.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 1992a. NBR 07175. Cal hidratada para argamassas. Rio de Janeiro, 3 p.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 1992b. NBR 08491. Tijolo maciço de solo-cimento. Rio de Janeiro, 8 p.
- Beraldo, A.L. & A.A.O. Roque. 2003. Argamassa de cimento, areia e casca de arroz. p.323-337. In Fórum das Universidades Públicas Paulistas – Ciência e Tecnologia em Resíduos, 1. São Pedro, São Paulo. 1 CD-Rom.
- Beraldo, A.L. & J.H.V. Tojal. 2001. Utilização de argamassas de cimento e casca de arroz em moradias populares. p.1-4. In Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 30. Foz do Iguaçu, Paraná. 1 CD-Rom.
- Caputo, H.P. 2003. Mecânica dos solos e suas aplicações, Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro. 219 p.
- Fang, H.S. 1991. Foundation engineering handbook. Van Nostrand Reinhold, New York. 923 p.
- Ferreira, R.C. & W.J. Freire. 2003. Propriedades físico-mecânicas de solos estabilizados com cimento e silicato de sódio avaliadas por meio de testes destrutivos e não-destrutivos. Engenharia Agrícola, 23: 221-232.
- Hall, M.B. 2001. Recent advanced in non-ndf carbohydrates for the nutrition of lactating cows.

- p.139-148. In Simpósio Internacional em Bovinos de Leite, 2. Ufla-Faepe, Lavras, Minas Gerais. Proceedings.
- Houben, H. & H. Guillaud. 1994. Earth construction: a compressive guide. Intermediate Technology Publications, London. 290 p.
- Jauberthie, R., F. Rendel, S. Tamba & I.K. Cissé. 2003. Properties of cement-rice husk mixture. *Construction and Building Materials*, 17: 239-243.
- Khedari, J., P. Watsnasathaoirn & J. Hirunlabh. 2005. Development of fibre-based soil cement block with low thermal conductivity. *Cement and Concrete Composites*, 27: 111-116.
- Milani, A.P.S. & W.J. Freire. 2006. Características físicas e mecânicas de misturas de solo, cimento e casca de arroz. *Engenharia Agrícola*, 26:1-10.
- Rocha, G.L. 1996. Perspectivas e problemas de adubação de pastagens no Brasil. p. 1-30. In Simpósio sobre calagem e adubação de pastagens, 1. Nova Odessa. Anais... Potafos, Piracicaba, São Paulo. 285 p.
- Sarmiento, C.R. & Freire, W.J. 1998. Argamassa de cimento e areia combinada com fibras de bagaço de cana-de-açúcar. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, 17:1-8.
- Savastano Jr., P.G. Warden & R.S.P. Coutts. 2000. Brazilian waste fibres as reinforcement for cement-based composites. *Cement and Concrete Composites*, 22: 379-384.
- Sherwood, P.T. 1993. Soil stabilization with cement and lime: state of the art review. HMSO, London. 153 p.
- Silveira, A., A.A. Ferreira, & D.C.C. Dalmolin. 1996. A cinza da casca de arroz como adição mineral. p.39-45. In Workshop reciclagem e reutilização de resíduos como materiais de construção civil. São Paulo, São Paulo. 1 CD-Rom.
- Taylor, H.F.N. 1992. Cement chemistry. Academic Press, London. 475 p.
- Walker, P.J. 1995. Strength, durability and shrinkage characteristics of cement stabilized soil blocks. *Cement and Concrete Composites*, 17: 301-310.
- Zucco, L.L. 1999. Estudo da viabilidade de fabricação de placas de compósitos à base de cimento e casca de arroz. Dissertação. Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo. 119 p.