

# **Avaliação física, mecânica e térmica de misturas de solo-cimento adicionadas de cinza de casca de arroz sem atividade pozzolânica**

## **Physical, mechanical and thermal evaluation of mixtures soil-cement added of rice husk ash without pozzolanic effect**

**Ana Paula da Silva Milani, Wesley Jorge Freire**

*Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, SP*

*ana.silva@agr.unicamp.br, wesley@agr.unicamp.br*

**RESUMO:** No Brasil existem sérios problemas ambientais no que se refere à extração indiscriminada de recursos naturais e à constante geração de resíduos agroindustriais. Buscando soluções que minimizem esta degradação ambiental, os autores caracterizaram misturas de solo arenoso + cimento + cinza de casca de arroz por meio de ensaios físicos, mecânicos e térmicos. Para tal, foram confeccionados corpos-de-prova de solo-cimento-cinza de casca de arroz na umidade ótima de compactação e após cura úmida durante 7 dias, os corpos-de-prova foram submetidos aos ensaios de compressão simples, de absorção de água, de ultra-som, de durabilidade; de condutividade térmica e de calor específico. Os resultados obtidos indicaram que o solo arenoso, quando substituído pelo teor de 7,5% de cinza e estabilizados com 10% e 13% de cimento, apresentou-se como promissor material alternativo a ser utilizado em construções rurais e/ou urbanas.

**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 accomplishing study of mixtures made of sandy soil-cement- rice husk ash through physical, mechanical and thermal tests. For this purpose, the different mixtures of soil-cement-rice husk ash were tested the specimens molded at the optimum moisture content. Afterwards 7 days old they were submitted to compression tests, to water absorption tests, to durability tests; to ultrasonic pulse velocity tests; to thermal conductivity tests and to specific heat tests. The obtained results showed that the sandy soil partially substituted by 7,5% of ash and stabilized with 10% and 13% of cement pointed out its promising use as an alternative material for use in both rural and urban constructions.

### **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.

Visando soluções que minimizem esta degradação ambiental e ao mesmo tempo reduzam os custos do produto final, 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.

Dentro desse âmbito, 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 [1], 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).

Ainda voltado à 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 [9].

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.[10]. 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 enfocam 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 sem atividade pozolânica a misturas de solo-cimento como carga mineral (“filler”), possibilitando destinação final a este resíduo, assim como sua possível utilização como material

de construção para a redução do volume de solo empregado.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a execução da presente pesquisa foram utilizados os seguintes materiais: cinza de casca de arroz, coletada em fornalha 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, da marca Votoran.

Após a coleta do material solo, o mesmo 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 procedimentos a saber.

### 2.1 Procedimentos aplicados à cinza de casca de arroz

Para efetuar um estudo sobre a influência da granulometria (finura) da cinza no comportamento físico-mecânico das misturas de solo-cimento-cinza, foram adotados dois tipos de cinza a serem adicionados aos solos: cinza CCA-A (material passante na peneira de 0,6 mm de abertura de malha) e cinza CCA-B (material compreendido entre as peneiras de 0,6 e 0,15 mm de abertura de malha). Posteriormente, foram realizados ensaios de caracterização física e química das cinzas.

### 2.2 Estudo de dosagem das misturas de solo-cimento-cinza de casca de arroz

A cinza foi utilizada como carga mineral (“filler”) para a substituição parcial do solo, sendo adotadas, para estudo de dosagem, diversas combinações de solo e cinza de casca de arroz, as quais foram estabilizadas com diferentes teores de cimento (% em relação à massa seca da mistura solo-cinza). As diferentes misturas de solo-cimento-cinza foram submetidas ao ensaio de compactação de Proctor Normal para a determinação da massa específica aparente seca máxima ( $M_{max}$ ) e umidade ótima (hot). Utilizando-se estes parâmetros, foram confeccionados, para cada mistura, corpos-de-prova ( $\phi$  5 cm x 10 cm de altura), os quais foram curados durante 7 dias em câmara úmida e

posteriormente submetidos ao ensaio de compressão simples ( $R_p$ ), aos 7 dias de idade.

Após a aplicação destes ensaios, as misturas de solo-cimento-cinza escolhidas para a etapa de caracterização física e mecânica foram as que apresentaram maior quantidade de cinza incorporada aliada a um valor referencial de resistência à compressão simples superior a 1,0 MPa, pois este foi considerado o mínimo necessário para que a mistura solo-cimento-cinza de casca de arroz fosse aceitável, em termos de resistência, como componente construtivo.

### 2.3. Caracterização física e mecânica das misturas de solo-cimento-cinza

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

Primeiramente foram realizadas leituras dos tempos de propagação da onda ultra-sônica nos corpos-de-prova nos períodos de 7, 30, 60, 90, 120, 180 e 360 dias com o aparelho portátil de ultra-som, da marca Steinkamp/BP7, acoplado a um transdutor de 45 kHz de seção ponta e, calculadas as referentes velocidades do pulso ultra-sônico (VPU) no eixo de compactação.

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 [3] e NBR 13555 [6]. 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 [5] 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.

### 2.4. Caracterização específica da mistura de solo-cimento-cinza de melhor desempenho

Para a realização da caracterização específica foi escolhida a mistura de solo-cimento-cinza de melhor desempenho frente aos esforços mecânicos, durabilidade e absorção de água.

A caracterização específica realizada para tal mistura abordou os seguintes parâmetros: a caracterização térmica, a qual baseou-se nos resultados de ensaios laboratoriais realizados pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. Foram executados ensaios de condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida, mediante os procedimentos da ASTM C177-04; e o ensaio de calor específico, a qual utilizou-se o equipamento calorímetro e os procedimentos da ASTM C-351-92. E a caracterização física, a qual baseou-se no ensaio de permeabilidade à água conforme prescrições da NBR 13292 [4].

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O solo utilizado na presente pesquisa apresentou as seguintes características físicas: composição granulométrica em torno de 72% de areia, 19% de silte e 9% de argila; solo não-plástico; massa específica dos grãos de 2,673 g/cm<sup>3</sup>; massa unitária de 1,17 g/cm<sup>3</sup>; e classificação, segundo critérios da AASHTO, como solo A<sub>2-4</sub>. Conforme recomendações da ABCP [1], este solo é adequado para fabricação de elementos construtivos de solo-cimento.

A cinza de casca de arroz coletada em fornalha sem controle efetivo de temperatura apresentou cor acinzentada, massa específica de 2,18 g/cm<sup>3</sup>, superfície específica de 12,7 m<sup>2</sup>/g, teor de SiO<sub>2</sub> de aproximadamente 96% e cerca de 3% de teor de carbono. A cinza de casca de arroz, após passar pelo processo de peneiramento, apresentou as seguintes características:

Tabela 1. Caracterização física da cinza.

Tipo de Cinza	Distribuição em tamanho - # peneiras			Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )
	(0,6-2,0 mm)	(0,15-0,6 mm)	(<0,15 mm)	
CCA (direto da fornalha)	31%	60%	9%	0,14
CCA-A	-	74%	26%	0,21
CCA-B	-	100%	-	0,17

A partir destas características físico-químicas pode-se afirmar que a cinza em estudo 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 ou com área superficial entre 50 e 150 m<sup>2</sup>/g.

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° 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.

### 3.1. Estudo de dosagem

A análise de variância do ensaio de compactação normal de Proctor mostrou que o tipo de combinação solo-cinza promoveram efeitos significativos nas variáveis massa específica aparente seca máxima (M<sub>max</sub>) e umidade ótima (hot), sendo que, independente do tipo de cinza e do teor de cimento, quanto maior foi o teor de cinza incorporado a mistura, menores e maiores, respectivamente, foram os valores de M<sub>max</sub> e de hot. A aplicação do teste de Tukey aos dados da Tabela 2 revelou que as misturas de solo-cimento-cinza CCA-A apresentaram valores de M<sub>max</sub> significativamente maiores que os valores encontrados para as suas correspondentes misturas de solo-cimento-cinza CCA-B.

A análise de variância do ensaio de compressão simples preliminar mostrou que os fatores tipo de combinação solo-cinza e teor de cimento promoveram efeitos significativos na variável resistência à compressão simples preliminar dos corpos-de-prova de solo-cimento-cinza, sendo que, independente do tipo de cinza, quanto maior foi o teor de cimento incorporado à mistura, maiores foram os valores de R<sub>c</sub>, assim como os valores R<sub>c</sub> diminuiram tanto mais quanto maior foi o teor de cinza incorporada à mistura. A aplicação do teste de Tukey aos dados da Tabela 2 revelou que as misturas de solo-cimento-cinza CCA-A apresentaram valores de R<sub>c</sub> significativamente iguais aos valores encontrados para as suas correspondentes misturas de solo-cimento-cinza CCA-B.

Os valores de M<sub>max</sub> das misturas de solo-cimento-cinza apresentaram semelhante comportamento quando relacionados aos valores de R<sub>c</sub>, sendo que, independente do tipo de cinza a ser adicionada à mistura, o teor de cimento e de cinza foram os fatores relevantes para o bom

desempenho físico-mecânico das mesmas. Essa semelhança de comportamento pode ser explicada pela relação existente entre as propriedades físico-mecânicas do sistema solo-cimento compactado, pois, quanto menos vazios no sistema, melhor será a interação entre solo-aditivo e, conseqüentemente, maiores serão as resistências alcançadas.

Segundo estudos de Neves [11], 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% de solo arenoso + 10 % de cinza estabilizada com 7% de cimento não atendeu a esta recomendação.

Conforme resultados apresentados, 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 serão analisadas somente as misturas adicionadas de cinza CCA-A, pois a obtenção deste tipo de cinza requer procedimento de peneiramento simplificado, ou seja, somente a retirada do material orgânico (cascas de arroz não calcinadas).

Dessa forma, analisando o teste de Tukey aplicado aos dados da Tabela 2 e seguindo o critério de maior teor de cinza aliado ao valor mínimo de resistência à compressão simples, as misturas de solo-cimento-cinza indicadas para um maior aprofundamento nos estudos de caracterização física e 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

### 3.2. Caracterização física e mecânica

A análise de variância dos ensaios de compressão simples e de ultra-som mostrou que o fator tipo de tratamento promoveu efeitos significativos na variável resistência à compressão simples (RCS) e velocidade de pulso ultra-sônico (VPU) dos corpos-de-prova de solo-cimento-cinza de casca de arroz. Nas Figuras 1 e 2 observou-se que no ensaio de ultra-som, as VPU alcançadas apresentaram comportamento semelhante quando relacionadas às RCS do ensaio de compressão simples.

Para ambos ensaios (Figuras 1 e 2), o teste de Tukey mostrou que, independente da idade, os tratamentos T3 e T2 alcançaram os maiores valores de RCS e de VPU, 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 e de VPU 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 e de VPU nas idades de 120 ou de 180 dias. Entretanto, após atingir os valores máximos de RCS e de VPU, 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 interna 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 contrações internas, resultando em processos de microfissuração interna. Silva [12] 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 3), 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 [11] que indica que o sistema solo-cimento deve apresentar perda de massa igual a 10% e resistência mínima de 1 MPa. Observou-se para todos os tratamentos (Figura 4) 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 nas primeiras idades 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 4 apresentou comportamento semelhante à Figura 1, corroborando a diminuição da resistência mecânica após 6 meses e a estabilização ao final de 372 dias.

Em termos de resistência à compressão simples, somente os tratamentos T1 e T4 não atenderam às especificações da NBR 8491 [2] 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.

### 3.3 Caracterização específica

Analisando-se as características físico-mecânicas dos diferentes tratamentos de solo-cimento-cinza, as misturas T5 e T6 foram os tratamentos com adição de cinza que atendeu aos requisitos mínimos de resistência à compressão e máximos de absorção de água especificados pela norma NBR 8491 [2] e também apresentaram bom desempenho frente aos ensaios de durabilidade e de ultra-som. Portanto, dentro dos critérios analisados e levando em consideração o menor teor de cimento incorporado na mistura, o tratamento T5 - (92,5% de solo + 7,5% de cinza) estabilizado com 10% de cimento foi definido como o material (tratamento) para a realização da caracterização específica.

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 g/cm<sup>3</sup>, condutividade térmica de 0,65 W/(m.K) e calor específico de 0,96 kJ/(kg.K). Tais propriedades foram semelhantes aos valores encontrados em pesquisa de Ferreira [7] com misturas de solo-cimento.

Em relação à propriedade física permeabilidade, o tratamento T5 apresentou baixa permeabilidade, sendo o coeficiente de permeabilidade em torno de  $6,6 \cdot 10^{-7}$  cm/s. Tal valor encontrou-se próximo aos estudos de Houben e Guillaud [8], a qual especificaram permeabilidade de  $10 \cdot 10^{-7}$  cm/s para solo-cimento utilizado como componente construtivo.

## 6. CONCLUSÕES

De modo geral, os valores de massa específica aparente seca máxima, de resistência à compressão simples e de velocidade da onda ultra-sônica das misturas de solo-cimento-cinza de casca de arroz, decresceram com o aumento do teor de cinza na composição.

A distribuição em tamanho dos dois tipos de cinza utilizados nas misturas de solo-cimento não influenciou significativamente as propriedades estudadas.

A utilização conjunta de ensaios destrutivos e não destrutivos resultou em valores expressivos para a caracterização física, mecânica e térmica dos tratamentos de solo-cimento-cinza.

Os resultados promissores para a confecção de componentes construtivos foram alcançados pelos tratamentos com solo arenoso substituído parcialmente pelos teores de 7,5% de cinza (em massa) e estabilizados com 10% e 13% de cimento (em massa).

## REFERÊNCIAS

1. Associação Brasileira De Cimento Portland – ABCP. *Fabricação de Tijolos de Solo-Cimento com a Utilização de Prensas Manuais*. São Paulo: ABCP, Boletim Técnico 111, 1985. 4 p.
2. Associação Brasileira De Normas Técnicas – ABNT. NBR 8491 - *Tijolo maciço de solo-cimento*. Rio de Janeiro, 1984. 4p.
3. \_\_\_\_\_. NBR 12025 - *Solo-Cimento. Ensaio compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 1990. 3p.
4. \_\_\_\_\_. NBR 13292 – *Solo. Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante*. Rio de Janeiro, 1995. 5p.
5. \_\_\_\_\_. NBR 13554 - *Solo-Cimento. Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem*. Rio de Janeiro, 1996b. 3 p.
6. \_\_\_\_\_. NBR 13555 - *Solo-Cimento. Determinação da absorção de água*. Rio de Janeiro, 1996a. 3 p.
7. Ferreira, R. C. *Desempenho físico-mecânico e propriedades termofísicas de tijolos e mini-painéis de terra crua tratada com aditivos químicos*. 204 p. Tese (Doutorado em Construções Rurais) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas. 2003.
8. Houben, H.; Guillaud, H. *Earth Construction – A comprehensive guide*. London: Intermediane Technology Publications. 362 p.
9. Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística - IBGE. *Levantamento sistemático da produção agrícola – 20005*. Levantamento sistemático da produção agrícola - 2005. Disponível em: [www.ibge.gov.br/Producao\\_Agricola](http://www.ibge.gov.br/Producao_Agricola). Acesso em: 10 jun. 2005.
10. 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: Editora da UNICAMP, 2003. cap.6, p. 145-90.
11. 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. Anais...Florianópolis: p. 58-64.
12. Silva, P. R. *Estudo da interação solo-estrutura de fundação em solo-cimento*. 1992. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília.

Tabela 2 - Massa específica aparente seca máxima  $M_{max}$  ( $g/cm^3$ ); teor de umidade ótimo hot (%) e resistência à compressão simples  $R_c$  (MPa), aos 7 dias de idade, dos corpos-de-prova de solo-cimento-cinza de casca de arroz da etapa de estudo de dosagem (cada valor representa a média aritmética de 3 repetições).

Mistura de solo-cimento-cinza de casca de arroz	Cinza CCA - A			Cinza CCA - B		
	$M_{max}$	$h_{ot}$	$R_c$	$M_{max}$	$h_{ot}$	$R_c$
C1 – (100%solo+0%cinza) 7%cim	1,956 a	11,57	2,83 cdefg	1,956 a	11,57	2,83 cd
C2 – (97,5%solo+2,5%cinza) 7%cim	1,890 b	12,23	2,41 defgh	1,860 b	13,93	2,34 cd
C3 – (95%solo+5%cinza) 7%cim	1,785 c	14,80	1,86 efgh	1,772 c	14,77	1,91 cd
C4 – (92,5%solo+7,5%cinza) 7%cim	1,686 d	15,77	1,32 gh	1,648 ef	15,97	1,22 d
C5 – (90%solo+10%cinza) 7%cim	1,566 e	17,90	0,88 h	1,538 h	18,13	0,99 d
C6 – (100%solo+0%cinza) 10%cim	1,967 a	11,50	3,79 bcd	1,967 a	11,50	3,79 bc
C7 – (97,5%solo+2,5%cinza)10%cim	1,895 b	12,17	3,61 bcdef	1,882 b	13,30	3,79 bc
C8 – (95%solo+5%cinza) 10%cim	1,793 c	14,53	3,04 cdefg	1,764 c	15,00	3,19 bc
C9 – (92,5%solo+7,5%cinza)10%cim	1,700 d	16,43	2,55 defgh	1,680 de	16,27	2,26 cd
C10 – (90%solo+10%cinza) 10%cim	1,605 e	17,13	1,80 fgh	1,586 g	18,60	2,00 cd
C11– (100%solo+0%cinza) 13%cim	1,974 a	11,40	6,86 a	1,974 a	11,40	6,86 a
C12–(97,5%solo+2,5%cinza)13%cim	1,889 b	11,60	5,15 ab	1,871 b	12,73	5,03 ab
C13 – (95%solo+5%cinza)13%cim	1,796 c	14,53	4,63 bc	1,781 c	14,97	3,28 bc
C14–(92,5%solo+7,5%cinza)13%cim	1,714 d	16,03	3,73 bcde	1,697 d	15,60	2,55 cd
C15 – (90%solo+10%cinza)13%cim	1,607 e	18,10	2,45 defgh	1,602 fg	18,30	1,93 cd

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

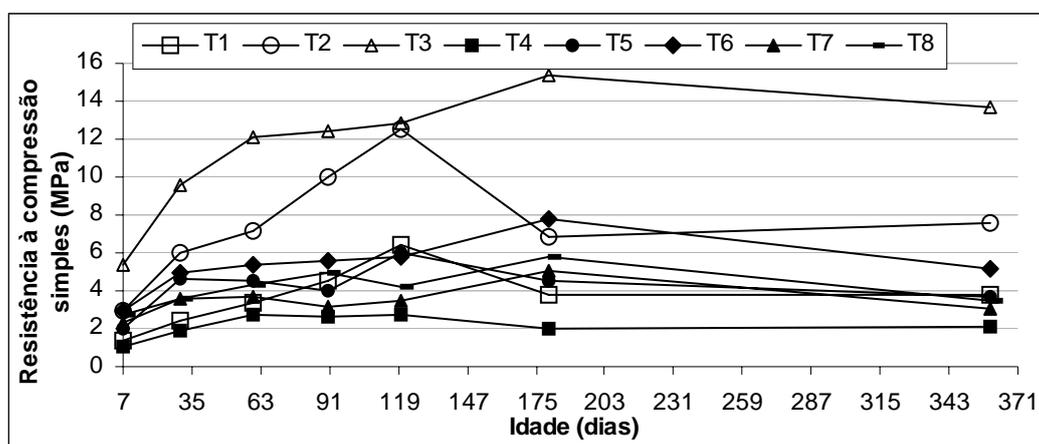


Figura 1. Resultados do ensaio de compressão simples.

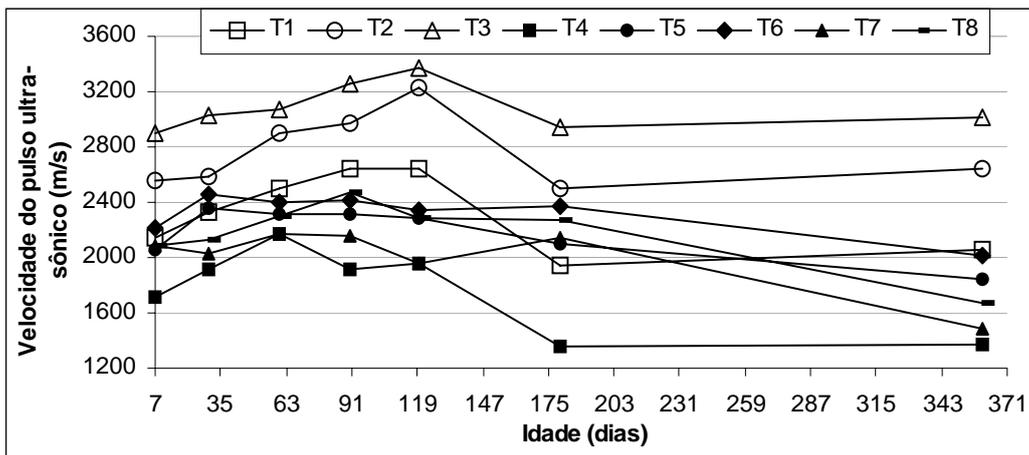


Figura 2. Resultados do ensaio de ultra-som.

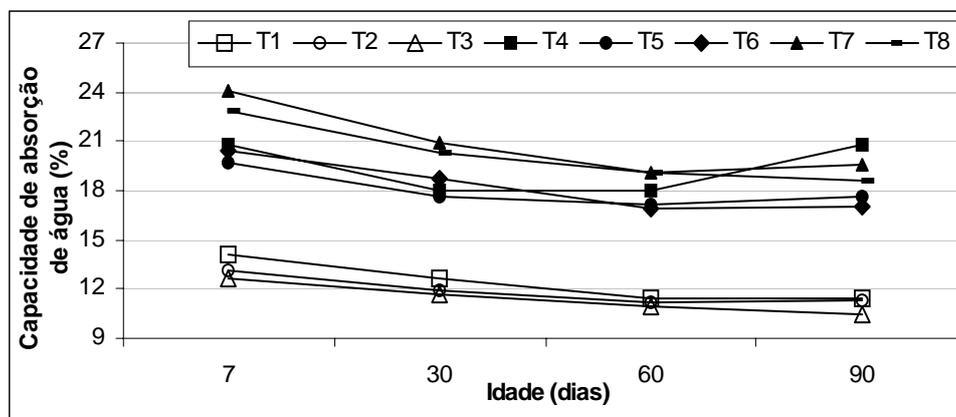


Figura 3. Resultados do ensaio de absorção de água.

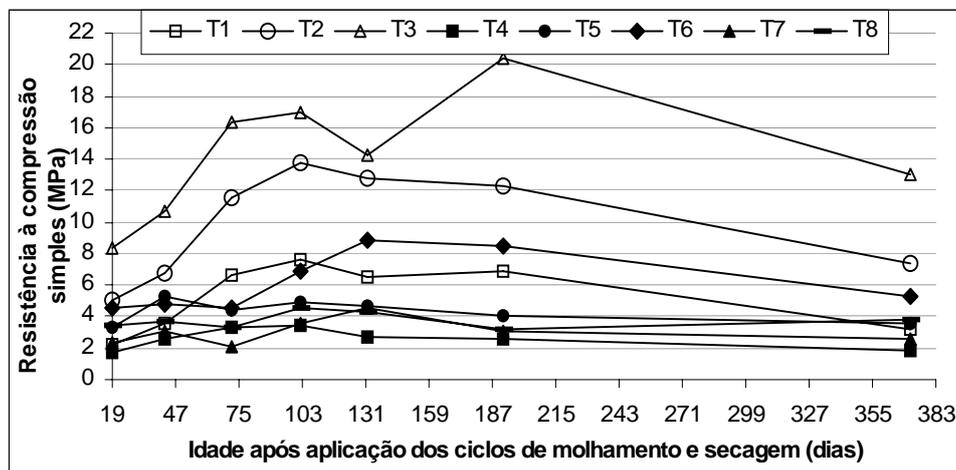


Figura 4. Resultados do ensaio de compressão simples após ciclos de molhamento e secagem.