

# CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂNICAS DE MISTURAS DE SOLO, CIMENTO E CINZAS DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

MARTHA DEL C. MESA VALENCIANO<sup>1</sup>, WESLEY J. FREIRE<sup>2</sup>

**RESUMO:** Este trabalho teve por finalidade analisar algumas características de misturas de solo, cimento e cinzas de bagaço de cana-de-açúcar para sua possível utilização na fabricação de materiais alternativos de construção. Para tal, amostras de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar foram submetidas a um tratamento prévio que consistia de peneiramento e moagem, antes de serem incorporadas às misturas de solo e cimento. Diferentes combinações de cimento-cinzas foram estudadas, determinando-se, para cada uma delas, a consistência normal e a resistência à compressão simples, aos 7 e 28 dias. Posteriormente, corpos-de-prova moldados com tais misturas de solo-cimento-cinzas foram submetidos a ensaios de compactação, compressão simples e absorção de água. Os resultados indicaram a possibilidade de substituir até 20% do cimento Portland, na mistura, por cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, sem prejuízo da resistência à compressão simples.

**PALAVRAS-CHAVE:** resíduo agroindustrial, cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, resistência à compressão simples.

## PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF SOIL-CEMENT-BAGASSE ASH MIXTURES

**SUMMARY:** This work was done with the objective of studying some physical and mechanical characteristics of the sugarcane bagasse ash added to a soil-cement mixture, in order to obtain an alternative construction material. The sugarcane bagasse ash pre-treatment included both sieving and grinding, before mixing with soil and cement. Different proportions of cement-ash were tested by determining its standard consistence and its compressive resistance at 7 and 28 days age. The various treatments were subsequently applied to the specimens molded with different soil-cement-ash mixtures which in turns were submitted to compaction, unconfined compression and water absorption laboratory tests. The results showed that it is possible to replace up to 20% of Portland cement by sugarcane bagasse ash without any damage to the mixture's compressive strength.

**KEYWORDS:** agricultural industrial residue, sugarcane bagasse ash, compressive strength.

## INTRODUÇÃO

A atividade pozolânica das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar foi analisada por CINCOTTO (1983), que concluiu ser seu comportamento similar ao de um cimento pozolânico, muito embora a viabilidade de seu uso dependa ainda de outros fatores.

BARBOSA FILHO & PIRES SOBRINHO (1998) estudaram a incorporação de cinzas de casca de arroz e cinzas de bagaço de cana-de-açúcar como adição mineral em argamassa de cimento e areia de traço 1:3, nas proporções de 0; 1; 3; 5; 10 e 20% em relação à massa de cimento. Foram utilizados o cimento CP II-F 32 e areia fina. Os corpos-de-prova, após cura à temperatura média de 29 °C e

<sup>1</sup> Mestre em Engenharia Agrícola, Arquiteta, Aluna de Pós-graduação, Faculdade de Engenharia Agrícola, FEAGRI/ UNICAMP, Campinas - SP, Fone: (0XX19) 3788.1036, e-mail: martha@agr.unicamp.br

<sup>2</sup> Prof. Titular, Departamento de Construções Rurais, FEAGRI/ UNICAMP, Campinas - SP, e-mail: wesley@agr.unicamp.br

Recebido pelo Conselho Editorial em: 6-9-2001

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 1<sup>o</sup>-12-2003

umidade relativa da ordem de 67%, foram rompidos à compressão simples, flexão e tração na compressão diametral, aos 7 dias de idade. Os resultados mostraram que houve pequeno decréscimo nos valores da resistência à compressão e pequeno acréscimo nos valores da resistência à flexão com o aumento do teor de cinzas na mistura, tanto para as cinzas de casca de arroz como para as de bagaço de cana-de-açúcar. A resistência à tração na compressão diametral foi determinada apenas para a argamassa com adição de cinzas de casca de arroz, registrando um aumento proporcional ao teor de cinzas empregado na mistura. Ambas as argamassas tiveram sua capacidade de absorção de água aumentada com o aumento do teor de cinzas.

FREITAS et al. (1998) pesquisaram o efeito da adição de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar na resistência à compressão simples de argamassas confeccionadas com cimento Portland CP-I 32 e areia normal, com substituição parcial do cimento Portland por 0; 5; 10; 15 e 20% de cinzas em relação ao peso do aglomerante total. Os corpos-de-prova foram rompidos aos 3; 7; 14; 21; 28 e 63 dias de idade, mostrando os resultados que a adição de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar aumentou os valores da resistência à compressão em até 22% (aos 28 dias e para o teor de 15% de cinzas), em relação à testemunha.

Em outra oportunidade, FREITAS (1996) estudou as cinzas resultantes da queima do bagaço de cana em mistura com solo-cimento na obtenção de tijolos para uso em construção civil. Adotando o método proposto pela ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) em seu Boletim Técnico nº 111, para a realização dos ensaios de compressão e de absorção d'água, a autora confeccionou tijolos com traços 1:0:12; 1:1:11; 1:2:10; 1:3:9 e 1:4:8 (cimento:cinzas:solo), em volume. O cimento, as cinzas e o solo foram misturados manualmente até obter uma coloração uniforme. Após a mistura seca e para a determinação da umidade ideal, a água foi adicionada aos poucos, sendo em seguida aplicado o teste de esfrelamento no chão. Os resultados desses ensaios revelaram valores de resistência à compressão simples variando de 2,2 a 1,9 MPa, para traços variando de 1:0:12 a 1:4:8. A autora pesquisou, também, a resistência mecânica de tijolos moldados com traços 1:0:10; 1:0:11; 1:0:12; 1:1:10; 1:1:11; 1:1:12; 1:2:10; 1:2:11 e 1:2:12 (cimento:cinzas:solo), em volume, alcançando valores superiores a 4,0 MPa para a resistência à compressão simples, aos 28 dias de idade, para todos os traços.

Com o objetivo de contribuir para a maior compreensão desse assunto, neste trabalho, procurou-se analisar algumas características físicas e mecânicas de misturas de solo, cimento e cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, para avaliar sua possível utilização como material alternativo de construção.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

Os materiais utilizados foram os seguintes: cimento Portland CP II-E-32, marca Cimento Ribeirão; cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, fornecidas pela Usina Furlan, Município de Santa Bárbara, D'Oeste - SP; solo argiloso, coletado em área localizada dentro do Câmpus Experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP (Universidade Estadual de Campinas), em Campinas - SP; solo arenoso, coletado em jazida situada no Município de Sumaré - SP.

A metodologia empregada atendeu aos seguintes procedimentos experimentais:

### **Procedimentos aplicados às cinzas de bagaço de cana-de-açúcar**

As principais características físicas das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar foram determinadas em laboratório, a saber: massa específica aparente seca, umidade, granulometria (via peneiramento) e finura (em moinho de bolas).

A composição química das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, relativa à fração passante na peneira ABNT nº 100, foi realizada na Central Analítica do Instituto de Química da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). A técnica analítica utilizada foi a da absorção atômica por

atomização por chama e a da análise elementar CHN. Para a absorção atômica, foi observado o seguinte procedimento: abertura da amostra por digestão ácida, seguida da quantificação dos metais por absorção atômica via atomização por chama. Para a análise elementar CHN: determinação direta com analisador elementar CHN Perkin Elmer.

### **Procedimentos aplicados às misturas de cimento e cinzas**

Para cada uma das misturas de cimento-cinzas, foi determinada a consistência normal da pasta e moldados corpos-de-prova que, posteriormente, foram rompidos à compressão simples.

As misturas de cimento-cinzas foram feitas fazendo-se variar os teores de cimento e cinzas desde 100% de cimento e 0% de cinzas, até 50% de cimento e 50% de cinzas, em incrementos de 10%. A relação água-cimento foi determinada para diferentes combinações de cimento e cinzas, de acordo com a norma NBR 11580 (ABNT, 1991), utilizando-se da “Flow Table” e considerando-se pasta de consistência normal aquela cujo índice de consistência fosse igual a  $6 \pm 1$  mm. A moldagem dos corpos-de-prova de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura seguiu os procedimentos indicados pela norma NBR 07215 (ABNT, 1996). A cura foi feita em câmara úmida.

### **Procedimentos aplicados aos solos**

A massa específica dos sólidos dos solos arenoso e argiloso foi determinada de acordo com a norma brasileira NBR 07215, enquanto os limites de liquidez e de plasticidade foram determinados de acordo com as normas NBR 06459 e NBR 07180 (ABNT, 1984), respectivamente. A análise granulométrica dos solos foi feita de acordo com a norma NBR 07181 (ABNT, 1984) e seus parâmetros de compactação determinados através do ensaio de compactação normal de Proctor, tal como preconizado pela norma NBR 07182 (ABNT, 1986).

### **Procedimentos aplicados às misturas de solo, cimento e cinzas**

As misturas de solo-cimento-cinzas foram submetidas a ensaios de compactação para a determinação da massa específica aparente seca máxima e do teor de água ótima para, em seguida, serem moldados corpos-de-prova que, posteriormente, foram ensaiados à compressão simples, aos 28 e 60 dias, determinando-se, também, sua capacidade de absorção de água.

O ensaio de compactação foi conduzido de acordo com a norma NBR 12023 (ABNT, 1990), aplicada a solo-cimento, sendo a moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos, de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, realizada conforme os procedimentos indicados pela norma NBR 12024 (ABNT, 1992). Na preparação das misturas, levou-se em conta a quantidade de água determinada nos ensaios de compactação realizados anteriormente. A mistura dos componentes foi feita manualmente, sendo primeiramente misturados o cimento e as cinzas, até se conseguir homogeneidade e igual coloração, para depois adicionar-se o solo e, por último, a água. Os moldes foram previamente untados com óleo mineral desmoldante, sendo a moldagem dos corpos-de-prova feita logo em seguida. A cura se processou em câmara úmida durante 7 dias.

Para o estudo das misturas solo-cimento-cinzas, foram definidas as seguintes combinações:

T<sub>1</sub> - Solo argiloso;

T<sub>2</sub> - Solo argiloso + 3% de cimento;

T<sub>3</sub> - Solo argiloso + 3% de cimento (80% de cimento Portland + 20% de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar);

T<sub>4</sub> - Solo arenoso;

T<sub>5</sub> - Solo arenoso + 3% de cimento, e

T<sub>6</sub> - Solo arenoso + 3% de cimento (80% de cimento Portland + 20% de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar)

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tão logo recebidas e após secagem ao ar, as cinzas de bagaço de cana-de-açúcar foram passadas em peneira de 4,76 mm de abertura de malha, anotando-se que aproximadamente 94% do material passou através das malhas dessa peneira. O restante compreendia materiais pulverulentos não-aproveitáveis que se perdiam no processo de peneiramento. A propósito, FREITAS (1996) trabalhou com cinzas *in natura* 100 % passantes na peneira de 4,76 mm.

A fração passante na peneira de 4,76 mm foi novamente submetida ao peneiramento através de um jogo de peneiras. Os resultados comparativos da composição granulométrica das cinzas procedentes da Usina São José (FREITAS, 1996) e da Usina Furlan estão registrados na Tabela 1.

TABELA 1. Resultados comparativos das análises granulométricas das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar da Usina São José (Campos - RJ) e da Usina Furlan (Santa Bárbara D'Oeste - SP).

Peneiras		Total Acumulado (%)			
		Cinzas Retidas		Cinzas Passantes	
nº	mm	Usina São José*	Usina Furlan**	Usina São José*	Usina Furlan**
4	4,76	0,00	0,00	100,00	100,00
8	2,40	0,30	0,14	99,70	99,86
16	1,20	0,60	1,10	99,40	98,90
30	0,60	2,10	5,60	97,90	94,40
50	0,30	7,10	29,96	92,90	70,04
100	0,15	23,10	73,54	76,90	26,46
200 e Fundo	< 0,15	100,00	100,00	0,00	0,00

\* FREITAS (1996); \*\* MESA VALENCIANO (1998)

As grandes diferenças observadas entre os resultados das análises granulométricas dessas cinzas, principalmente no que se refere à peneira nº 100 (0,15 mm), devem-se ao maior grau de finura das cinzas procedentes da Usina São José (76,9% do material passando na peneira nº 100, contra 26,4% para as cinzas procedentes da Usina Furlan).

Várias opções foram testadas a fim de conseguir maior grau de finura e maior eficiência do moinho de bolas, estando os resultados apresentados na Tabela 2.

TABELA 2. Peneiramento das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar a partir de uma amostra inicial de 3 kg, sob diferentes tempos de moagem.

Peneiras		Porcentagem Retida em Cada Peneira Após Moagem					
nº	mm	Não moída	15 minutos	60 minutos	3 horas	8 horas	16 horas
4	4,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	2,40	1,44	0,40	0,05	0,05	0,05	0,05
16	1,20	0,96	1,20	0,80	0,70	0,65	0,70
30	0,60	4,50	4,90	4,90	3,60	3,80	3,75
50	0,30	24,36	8,50	8,20	8,30	8,30	8,30
100	0,15	39,68	40,20	40,30	41,50	41,80	41,90
200	< 0,15	25,46	36,10	36,90	38,50	36,60	36,50
Fundo		3,60	8,70	8,85	7,35	8,80	8,80

Tomando-se como referência as quantidades de cinzas retidas nas peneiras nº 200 (< 0,15 mm) e fundo, pode-se observar, pelo exame da Tabela 2, que os acréscimos percentuais verificados no grau de finura, em relação à testemunha (cinzas não moída), foram de aproximadamente 54; 57; 58; 56 e 55% para os tempos de moagem de 15 min; 60 min; 3 h; 8 h e 16 h, respectivamente, a partir de uma

amostra inicial de 3 kg. Analisando-se os resultados obtidos, pode-se observar que o maior grau de finura foi alcançado com o tempo de moagem de três horas e, acima desse tempo, os tempos foram praticamente iguais, tendo sido esse o tempo selecionado para a moagem.

Depois da moagem de 3 kg de cinzas por um tempo de três horas, foram alcançados valores de 45,85% de material passando na peneira n° 100.

A composição química parcial das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar está apresentada na Tabela 3.

TABELA 3. Composição química parcial das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar.

Elemento	Teor	Elemento	Teor
Cálcio	0,25% em massa	Magnésio	0,16% em massa
Cádmio	< 2 ppm	Mercurio	< 0,05 ppm
Carbono	4,43% em massa	Níquel	5 ppm
Chumbo	< 2 ppm	Nitrogênio	< 0,1% em massa
Cobre	23 ppm	Potássio	0,46% em massa
Cromo	32 ppm	Sódio	36 ppm
Hidrogênio	0,47% em massa		

A composição química das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar utilizada (Tabela 3) se assemelha à das cinzas relatadas por FREITAS (1996). Infelizmente, por limitação própria do laboratório que realizou a análise química, o teor de sílica, alumina e ferro não foi determinado.

O teor de água médio das cinzas recém-chegadas da Usina foi igual a 17,5%; depois de secas ao ar durante vários dias, o teor de água das cinzas reduziu-se a 2,4%. A massa específica aparente seca média foi igual a 2,06 g cm<sup>-3</sup>.

Foram feitos os ensaios de caracterização dos solos arenoso e argiloso, estando os resultados registrados na Tabela 4.

TABELA 4. Características físicas dos solos estudados.

Parâmetros	Solos		
	Arenoso	Argiloso	
Composição textural (% em peso)	Areia grossa (0,42 - 2,00 mm)	14,83	8,45
	Areia fina (0,05 - 0,42 mm)	64,71	37,32
	Silte (0,005 - 0,05 mm)	13,34	14,25
	Argila (< 0,005 mm)	2,38	35,18
Limites de consistência (%)	Limite de liquidez	15,50	47,40
	Limite de plasticidade	13,80	31,87
	Índice de plasticidade	0,87	15,53
Classificação	AASHTO	A <sub>2-4</sub>	A <sub>7</sub>
	Bureau of Public Roads	Arenoso	Argiloso
Massa específica dos grãos (g cm <sup>-3</sup> )	2,63	2,88	

Os resultados da determinação da resistência à compressão simples dos corpos-de-prova confeccionados com diferentes combinações de cimento Portland/cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, aos 7 e 28 dias, estão apresentados na Tabela 5.

TABELA 5. Resistência à compressão simples (MPa), aos 7 e 28 dias, de corpos-de-prova confeccionados com diferentes combinações de cimento Portland/cinzas de bagaço de cana-de-açúcar (média de três repetições).

Parâmetros		Combinações de Cimento Portland/Cinzas de Bagaço de Cana-de-Açúcar					
		C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>
		100% de cimento - 0% de cinzas	90% de cimento - 10% de cinzas	80% de cimento - 20% de cinzas	70% de cimento - 30% de cinzas	60% de cimento - 40% de cinzas	50% de cimento - 50% de cinzas
Resistência à compressão aos 7 dias	Média	24,07	22,53	20,93	17,44	10,53	6,70
	Desvio-padrão médio	1,20	1,13	0,98	0,93	0,55	0,36
Resistência à compressão aos 28 dias	Média	29,15	28,99	26,56	25,70	12,18	10,49
	Desvio-padrão médio	1,62	0,98	1,47	0,58	0,64	0,59

A análise de variância aplicada aos dados de resistência à compressão simples mostrou, a 5% de probabilidade, alto grau de significância para combinações, sendo os maiores valores de resistência alcançados pelas combinações C<sub>1</sub> (100% de cimento - 0% de cinzas) e C<sub>2</sub> (90% de cimento - 10% de cinzas) e o menor valor pela combinação C<sub>6</sub> (50% de cimento - 50% de cinzas).

Referidos à idade de sete dias, os maiores valores de resistência à compressão simples foram alcançados pelos tratamentos C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>, iguais entre si e superiores aos demais; o menor valor de resistência foi apresentado pelo tratamento C<sub>6</sub>, situando-se os demais tratamentos em patamares intermediários, de acordo com a seguinte ordem decrescente: (C<sub>1</sub> = C<sub>2</sub> = C<sub>3</sub>) > (C<sub>3</sub> = C<sub>4</sub>) > C<sub>5</sub> = C<sub>6</sub>.

Considerada aos 28 dias, a análise estatística mostrou que os maiores valores de resistência foram alcançados pelas combinações C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub> e C<sub>4</sub>, iguais entre si, enquanto os menores valores foram apresentados pelas combinações C<sub>5</sub> e C<sub>6</sub>, as quais, a 5% de probabilidade, não diferiram entre si.

O aumento do teor de cinzas, nas diferentes combinações de cimento-cinzas testadas, provocou decréscimos significativos na resistência à compressão simples dos corpos-de-prova confeccionados com cimento Portland/cinzas de bagaço de cana-de-açúcar a partir da incorporação de 30% de cinzas na mistura, em ambas as idades.

Tais resultados indicam a possibilidade de substituir até 20% do cimento Portland por cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, sem prejuízo da resistência à compressão simples.

Em relação à combinação C<sub>1</sub> (100% de cimento e 0% de cinzas), as reduções percentuais nos valores da resistência à compressão simples foram de 1,9; 8,8; 11,5; 58,2 e 64,0% para as combinações C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>, C<sub>5</sub> e C<sub>6</sub>, respectivamente, para corpos-de-prova rompidos aos 28 dias; para corpos-de-prova rompidos aos 7 dias, as reduções foram de 6,4; 13,0; 27,5; 56,2 e 72,2%, respectivamente.

Os valores da massa específica aparente seca máxima e da umidade ótima das diferentes misturas de solo-cimento-cinzas, obtidas do ensaio de compactação normal de Proctor, estão apresentados na Tabela 6.

O teste de Tukey, aplicado aos dados obtidos do ensaio de compactação, revelou que os maiores valores de massa específica aparente seca máxima ( $\gamma_{m\acute{a}x}$ ) foram apresentados pelos tratamentos T<sub>4</sub> (solo arenoso), T<sub>5</sub> (solo arenoso + 3% de cimento) e T<sub>6</sub> [solo arenoso + 3% de cimento (80% de cimento Portland + 20% de cinzas)] que, a 5% de probabilidade, não diferiram entre si. Os menores

valores, por outro lado, foram apresentados pelos tratamentos T<sub>1</sub> (solo argiloso), T<sub>2</sub> (solo argiloso + 3% de cimento) e T<sub>3</sub> [solo argiloso + 3% de cimento (80% de cimento Portland + 20% de cinzas)].

TABELA 6. Massa específica aparente seca máxima ( $\gamma_{\text{máx}}$ ) e umidade ótima ( $h_{\text{ot}}$ ) do ensaio de compactação das misturas (tratamentos) de solo-cimento-cinzas (médias de três repetições).

Parâmetros		Tratamentos					
		Solo Argiloso			Solo Arenoso		
		T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>
$\gamma_{\text{máx}}$ (g cm <sup>-3</sup> )	Média	1,56	1,58	1,57	1,93	1,91	1,92
	Desvio-padrão médio	0,03	0,25	0,06	0,57	0,46	0,31
$h_{\text{ot}}$ (%)	Média	27,80	27,16	27,56	11,60	12,85	13,01
	Desvio-padrão médio	0,17	0,23	0,25	0,36	0,25	0,15

O que se pode depreender dessa análise é que a substituição parcial do cimento Portland por 20% de cinzas na mistura não provocou qualquer modificação significativa nos valores da massa específica aparente seca máxima de ambos os solos, tratados ou não com cimento. Por outro lado, os corpos-de-prova moldados com solo arenoso apresentaram sempre maiores valores de massa específica aparente seca máxima do que com solo argiloso.

Os resultados do ensaio de resistência à compressão simples, aos 28 e 60 dias, de corpos-de-prova confeccionados com diferentes misturas de solo-cimento-cinzas estão apresentados na Tabela 7.

TABELA 7. Resistência à compressão simples (MPa), aos 28 e 60 dias, de corpos-de-prova confeccionados com diferentes misturas de solo-cimento-cinzas (médias de três repetições).

Parâmetros		Tratamentos					
		Solo Argiloso			Solo Arenoso		
		T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>
Resistência à compressão aos 28 dias	Média	1,46	1,79	1,85	1,33	1,92	1,94
	Desvio-padrão médio	0,04	0,10	0,10	0,07	0,03	0,02
Resistência à compressão aos 60 dias	Média	1,63	1,97	1,99	1,58	2,08	2,04
	Desvio-padrão médio	0,08	0,11	0,05	0,04	0,10	0,05

No que diz respeito à resistência à compressão simples de corpos-de-prova de solo-cimento-cinzas, o teste de Tukey, aplicado às médias de tratamentos, mostrou que, independentemente das idades consideradas, não houve qualquer diferença significativa entre os tratamentos. O mesmo resultado foi revelado quando se tomava como referência a idade de ruptura de 28 dias; já, aos 60 dias, e a 5% de significância, o teste de Tukey mostrou que os tratamentos T<sub>5</sub> e T<sub>6</sub>, iguais entre si, alcançaram os maiores valores de resistência à compressão simples, estando os menores valores associados aos tratamentos T<sub>1</sub> e T<sub>4</sub>, também iguais entre si, e testemunhas dos solos argiloso e arenoso, respectivamente. Em ambos os solos, a incorporação de 3% de cimento Portland ou sua substituição parcial por 20% de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar aumentou os valores da resistência à compressão simples dos corpos-de-prova de solo-cimento-cinzas rompidos aos 60 dias de idade.

Os resultados dos ensaios de absorção de água, aplicados às misturas de solo-cimento-cinzas, são apresentados na Tabela 8.

TABELA 8. Absorção de água, em porcentagem, dos corpos-de-prova de solo-cimento-cinzas (médias de três repetições), determinada aos 7 dias de idade.

Parâmetro		Tratamentos					
		Solo Argiloso			Solo Arenoso		
		T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>
Absorção de água (%)	Média	-	15,40	15,72	-	13,71	13,56
	Desvio-padrão médio		0,40	0,35		0,18	0,36

Não foi possível aplicar o ensaio de absorção de água aos corpos-de-prova de solo em estado natural, pois os mesmos se desmanchavam tão logo eram imersos em água, motivo pelo qual a testemunha passou a ser, neste caso, o solo tratado com 3% de cimento. Como se pode observar, a partir dos resultados deste ensaio, os tratamentos T<sub>6</sub> [solo arenoso + 3% de cimento (80% de cimento Portland + 20% de cinzas)] e T<sub>5</sub> (solo arenoso + 3% de cimento) foram os que levaram aos menores valores de absorção de água, sendo ambos estatisticamente iguais entre si. Por outro lado, os tratamentos T<sub>2</sub> (solo argiloso + 3% de cimento) e T<sub>3</sub> [solo argiloso + 3% de cimento (80% de cimento Portland + 20% de cinzas)], iguais entre si, apresentaram os maiores valores de absorção de água. Os corpos-de-prova com solo argiloso absorveram mais água do que os corpos-de-prova com solo arenoso.

## CONCLUSÕES

A substituição parcial do cimento Portland por 20% de cinzas na mistura de solo-cimento-cinzas não afetou significativamente a massa específica aparente seca máxima dos solos estudados, tratados ou não com cimento.

A incorporação de 3% de cimento ou sua substituição parcial por 20% de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar em misturas de solo-cimento-cinzas aumentou a resistência à compressão simples de ambos os solos, referida aos 60 dias de idade.

No caso de misturas de solo-cimento-cinzas, pode-se afirmar que, de modo geral, os resultados obtidos com solo arenoso foram melhores do que aqueles com solo argiloso para a massa específica aparente seca máxima, umidade ótima de compactação e absorção de água; em se tratando da resistência à compressão simples, ambos os solos produziram resultados estatisticamente iguais entre si.

## AGRADECIMENTOS

À FAPESP, pelo suporte financeiro dado a este trabalho.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. *Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais*. São Paulo, 1985. 4 p. (Boletim Técnico, 111)
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 06459*: Solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984. 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 07180*: Solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984. 3 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 07181*: Solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 07182*: Solo: ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986. 10 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 07215*: Cimento Portland: determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 11580*: Cimento Portland: determinação da água da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 1991. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12023*: Solo-cimento: ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1990. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12024*: Solo-cimento: moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1992. 5 p.

BARBOSA FILHO, E.L.; PIRES SOBRINHO, C.W.A. Estudo de argamassas com adições de cinzas de casca de arroz e cinzas de cana-de-açúcar. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO - QUALIDADE NO PROCESSO CONSTRUTIVO, 7., 1998, Florianópolis. *Anais...* São Paulo: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 1998. v.1, p.879-84.

CINCOTTO, M.A. Utilização de subprodutos e resíduos na indústria da construção civil. *A Construção*, São Paulo, v.1855, p.27-30, 1983. (IPT - Encarte TE, 9)

FREITAS, E.D.G.A. *Obtenção de tijolos de solo-cimento com adição de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar para uso na construção civil*. 1996. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 1996.

FREITAS, E.G.A.; RODRIGUES, E.H.V.; ARAUJO, R.C.L.; FAY, I. Efeito da adição de cinzas de bagaço de cana na resistência à compressão de argamassa normal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., 1998, Poços de Caldas. *Anais...* Lavras: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1998. v.4, p.219-21.

MESA VALENCIANO, M.C. *Incorporação de resíduos agroindustriais e seus efeitos sobre as características físico-mecânicas de tijolos de solo melhorado com cimento*. 1999. 102 f. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.