

ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS (END) APLICADOS A COMPÓSITOS DE ORIGEM VEGETAL

Antonio Ludovico Beraldo. Professor Associado, Departamento de Construções Rurais, Faculdade de Engenharia Agrícola, Unicamp, beraldo@agr.unicamp.br.

Flávia de Freitas Vieira. Técnica em Edificações, Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Unicamp.

RESUMO

No presente trabalho buscou-se avaliar o efeito da substituição parcial do cimento Portland em argamassa, por cinza de casca de arroz produzida industrialmente. Testou-se, igualmente, o efeito causado pela adição de fibras de sisal à matriz cimentícia. Ensaio não destrutivo (END) foram aplicados aos compósitos. Os resultados obtidos permitiram obter curvas matemáticas para a estimativa da velocidade de propagação da onda ultra-sônica em função da idade do material. Foram estabelecidas correlações entre a velocidade final (aos 28 dias) e a resistência à compressão axial dos compósitos.

PALAVRAS-CHAVE

Compósito, sisal, cinza de casca de arroz, ultra-som, END

ABSTRACT

In this work it was analyzed the effect of a partial Portland cement replacement in mortar, by rice husk ash industrially produced. It was also evaluated the effect of sisal fibers additions to the matrix. Non destructive evaluating test (NDE) was applied to the composites. Results showed that ultrasonic speed across the specimens could be estimated by means a mathematical model according to the specimens age. Correlation between ultrasonic speed (at 28 days age) and compression strength was obtained.

KEYWORDS

Composite, sisal, rice husk ash, ultrasonics, NDE

1. INTRODUÇÃO

Fibras naturais são utilizadas há muito tempo na fabricação de tijolos de adobe e como elemento de cobertura em construções. Geralmente associadas a países tropicais tais materiais apresentam como maiores vantagens a disponibilidade local, baixo custo para sua obtenção além de necessitarem de reduzido consumo de energia para a sua produção.

No entanto, estudos mais recentes têm questionado a possível eficácia da modificação de matrizes frágeis, por meio da sua combinação com materiais fibrosos de origem vegetal. Embora a adição de fibras modifique o comportamento pós-fissuração de uma matriz frágil (AGOPYAN, 1993), o principal argumento contrário refere-se à limitada vida útil do compósito, acarretada pelo ambiente alcalino gerado durante a hidratação do cimento. SWAMY (1990) ressaltou outros aspectos negativos do uso de fibras

vegetais: o baixo módulo de elasticidade e a falta de aderência à matriz, na região da interface.

Vários estudos apontaram soluções a serem buscadas e, dentre elas, a modificação da matriz (adição de pozolanas e uso de aceleradores) e o tratamento preliminar da matéria-prima vegetal (lavagem, envelopamento e mineralização) são os mais citados.

Constituiu o objetivo deste trabalho a avaliação preliminar do comportamento de argamassa de cimento modificada pela adição de fibras de sisal, além do efeito da substituição parcial do cimento pela cinza de casca de arroz, originária de um processamento industrial.

Sisal

Em várias cidades baianas, tais como Valente e São Domingos, a exploração de matérias-primas de origem vegetal, para usos artesanais, vem sendo difundida há longo tempo. A principal fonte de renda de várias cidades nordestinas é o cultivo e beneficiamento do sisal (*Agave sisalana*), o uso da palha do ariri e da fibra do caroá, além de outras matérias-primas (site APAEB).

A fibra de sisal apresenta grandes vantagens, pois trata-se de um produto antialérgico e, quando devidamente processado, apresenta durabilidade, resistência, além do inegável valor estético, fruto de um legado de várias gerações.

Nas pequenas indústrias e cooperativas o principal uso da fibra de sisal é em artesanato (tapetes, carpetes, pastas e objetos decorativos). Porém, um mercado ainda competitivo é o da cordoaria, embora exista uma forte concorrência com similares à base de fibras sintéticas. Vários países também têm mostrado interesse no uso da fibra de sisal para o enfardamento de feno.

Embora geralmente se associe o plantio do sisal à lavoura de subsistência, alguns plantios mais recentes podem ser considerados como empreendimentos agropecuários, devido à área prevista (3000 ha) e à produção semanal de fibra batida (60 t a 80 t) (site FISD).

Cinza de casca de arroz

Conforme relatado por FREIRE (1991), a casca de arroz é constituída de 40% a 45% de celulose, de 25% a 30% de lignina e de 15% a 20% de cinzas (93% na forma de sílica).

A cinza produzida pela queima a céu aberto, ou como combustível em caldeiras, é geralmente *inerte é não é efetiva* como aglomerante no concreto. A atividade da cinza de casca de arroz (RHA – rice husk ash) depende da temperatura de queima, da sua duração, das características do ar durante a queima, da taxa de resfriamento e do grau de moagem (site CSIR Technology).

A sílica, presente na cinza da casca de arroz, *reage com a cal* na presença de água para formar silicatos de cálcio hidratados que funcionam como aglomerantes. Pesquisas desenvolvidas nas Filipinas abordaram o uso de cinzas derivadas da palha e da casca de arroz para a fabricação de blocos não portantes para programas habitacionais voltadas para famílias de baixa renda (site Luella L. Sadicon, S&T Media Service).

HIRUNSTITPORN et al. (1991) estudaram as propriedades do cimento Portland contendo cinza de casca de arroz, cinzas volantes e superplastificante. Os autores constataram que a adição de quantidade adequada de RHA aumentou as resistências inicial e final. O aumento na dosagem de RHA diminuiu a resistência principalmente nas idades iniciais. No entanto, colocando-se 1,25% de superplastificante pôde-se reduzir o fator água/cimento (a/c) entre 12% e 21%. O aumento na resistência foi maior nas idades iniciais e para misturas que apresentavam menor resistência.

Avaliação dos materiais por métodos não destrutivos

Modificações nas características de diversos materiais à base de cimento são passíveis de serem obtidas por meio de ensaios não destrutivos. Dentre eles destaca-se o uso da velocidade de propagação da onda ultra-sônica, a partir da qual pode-se efetuar o acompanhamento temporal do estágio de endurecimento do material (BERALDO, 1999). A análise da evolução da velocidade de propagação ao longo do tempo permite detectar efeitos deletérios causados pela presença de matéria-prima incompatível com o cimento, ou de adições que modifiquem acentuadamente a pega e o endurecimento do aglomerante. Na maioria dos casos, a velocidade de propagação apresenta boa correlação com a resistência mecânica do material. A magnitude da velocidade de propagação para materiais à base de cimento depende de uma série de fatores, a saber: tipo de cimento, razão entre os constituintes, idade do material, forma de compactação, umidade, geometria do corpo-de-prova, além de características relacionadas ao equipamento de medição e à sua interface com a material a ser medido.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Classificação das fibras e resíduos

2.1.1 Sisal

O sisal natural foi fornecido pela empresa Lwarcel, situada em Lençóis Paulista - SP. O material original foi fornecido em feixes com cerca de 1 m de comprimento. A seguir, procedeu-se ao corte desse material com o auxílio de uma lâmina metálica. Selecionou-se fibras de comprimento da ordem de 1,5 cm (FIG. 1), devido às limitações no tamanho das fôrmas a serem utilizadas na fabricação dos corpos-de-prova. Fibras que apresentassem maior dimensão poderiam dificultar a compactação da mistura, acarretando a presença de bolhas de ar e outras heterogeneidades.

O outro tipo de fibras de sisal, provenientes de resíduos de tapeçaria contendo corante, foi enviado pela APAEB (Associação de Pequenos Agricultores do Estado da Bahia), situada na cidade de Valente - BA. O material foi fornecido já cortado em fibras de comprimentos variados e em três diferentes tonalidades de corante (branco, amarelo e vermelho). Estudos preliminares mostraram que a cor do corante na fibra não causou diferença significativa entre os resultados do compósito argamassa de cimento e fibras, no ensaio de compressão simples. Desse modo, foram selecionadas fibras coloridas de comprimento da ordem de 1,5 cm, independentemente da cor do resíduo.

2.1.2 Cinza de casca de arroz

A cinza foi obtida a partir da queima industrial da casca de arroz (FIG. 2). O material utilizado apresentou massa específica de $2,11 \text{ g/cm}^3$, determinada por meio da NBR 6474. A superfície específica do resíduo foi obtida com o auxílio do método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine, MB-348 da NBR) tendo sido obtido o valor de $593 \text{ cm}^2/\text{g}$. Dados obtidos na literatura (Internet) indicaram o tamanho das partículas (47 micras), a densidade (2,04 e 2,20), e o índice de pozolanicidade (77% e 108%) da cinza de casca de arroz.

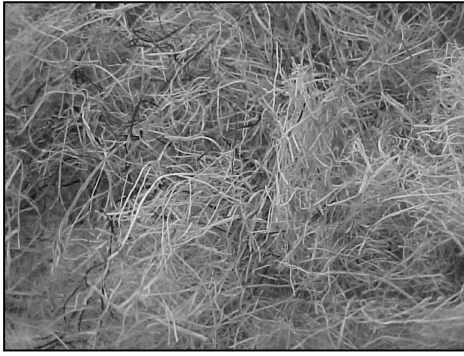


FIG. 1- Resíduo de sisal



FIG. 2 – Cinza de casca de arroz

2.2 Preparação e ensaio dos compósitos

Foram produzidos compósitos à base de argamassa de cimento Portland (CPII-E32 – NBR 11578) e areia lavada de rio (granulometria determinada de acordo com a NBR 7217), obtendo-se para esse agregado mineral módulo de finura igual a 1,71 e dimensão máxima característica de 2,4 mm (de acordo com a NBR 7211).

2.2.1 Sisal

As fibras foram utilizadas em duas condições: naturais, ou seja, sem tratamento; e lavadas em água fria (imersão por 24 h). Adotou-se, assim, quatro tipos de tratamento:

- a) Sisal (fibra natural) – sem tratamento
- b) Sisal (fibra natural) – água fria
- c) Sisal (resíduo com corante) – sem tratamento
- d) Sisal (resíduo com corante) – água fria

Os corpos-de-prova foram moldados segundo os seguintes procedimentos:

- relação cimento:areia – 1:1,5;
- adição das fibras: 3,6%; 7,2% e 10,8% em relação à massa de cimento;
- fator água/cimento: 0,4 para adição de 3,6% de fibras; 0,46 para adição de 7,2 % de fibras e 0,48 para adição de 10,8% de fibras. À medida que a dosagem em fibras tornava-se mais elevada, observou-se maior dificuldade em realizar a homogeneização da mistura.
- moldagem de corpos-de-prova cilíndricos (5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, de acordo com a NBR 7215) – três repetições para cada tratamento e adição das fibras.

Também foram confeccionados corpos-de-prova sem adição de fibra (testemunha), com relação água/cimento de 0,4.

2.2.2 Cinza de casca de arroz

A confecção do compósito utilizando cinza de casca de arroz visou analisar o possível efeito causado nas características da argamassa ao se substituir uma porcentagem do cimento pelo resíduo. Assim, foram testadas sete porcentagens de substituição, a saber: 1,5%; 3%; 5%; 10%; 20%; 30% e 40%.

Dessa forma, foram confeccionados três corpos-de-prova cilíndricos (NBR 7215) para cada valor de substituição do cimento pelo resíduo. Os corpos-de-prova foram produzidos com matriz de argamassa de cimento e areia na proporção em massa de 1:1,5. O fator água/cimento correspondente a cada substituição foi de 0,4 para as três primeiras substituições (1,5%; 3% e 5%) de 0,46 para a substituição de 10%; de 0,54 para as substituições de 20% e 30%; e 0,56 para a substituição de 40%. À medida que se aumentava a porcentagem de substituição observou-se que a mistura adquiria menor trabalhabilidade, sendo necessário, portanto, aumentar o fator água/cimento nas misturas.

2.3 Cura

Os corpos-de-prova com fibras de sisal e com substituição parcial do cimento pela cinza de casca de arroz foram desmoldados 24 h após a fabricação. A seguir, permaneceram durante 7 dias em câmara úmida, seguido de 21 dias de colocação ao ar livre.

2.4 Ensaio não destrutivo – END

Efetou-se o acompanhamento da etapa de endurecimento da mistura por meio da medição do tempo de propagação (em μ s) da onda ultra-sônica através dos corpos-de-prova. Além disso, buscou-se obter uma correlação entre a resistência mecânica e a velocidade de propagação da onda ultra-sônica. Os corpos-de-prova foram submetidos a medições do tempo de propagação da onda durante 28 dias. Para isso, foi utilizado o aparelho Ultrasonic Tester, modelo BP7 da STEINKAMP, com transdutores de seção exponencial de 45 kHz de frequência de ressonância.

Foram obtidos dois gráficos para cada tipo de tratamento efetuado, sendo um deles o gráfico auxiliar (necessário para a obtenção da curva do comportamento teórico da propagação do sinal) e o outro comparando as curvas obtidas experimentalmente com o modelo teórico (BERALDO, 1999). O gráfico auxiliar foi obtido por meio de:

$$v = v_{\max} (1 - \exp(A-Bt)) \quad (1)$$

sendo: v = velocidade teórica de propagação da onda através do corpo-de-prova;

v_{\max} = velocidade máxima de propagação obtida experimentalmente. Adotou-se a idade de 7 dias como limite.

Fazendo

$$\left(\frac{v - v_{\max}}{v_{\max}}\right) = -\exp(A - Bt) \quad (2)$$

Tem-se,

$$\ln\left(\frac{v_{\max} - v}{v_{\max}}\right) = A - Bt \quad (3)$$

Os coeficientes A e B , determinados por regressão, permitiram obter a equação que rege o comportamento da velocidade de propagação da onda ultra-sônica através dos corpos-de-prova originários dos diferentes tratamentos realizados. O coeficiente A pode ser considerado como um certo valor de “retardo” podendo, em alguns casos, assumir um valor nulo. O coeficiente B , por sua vez, pode ser associado a um tipo de "aceleração de endurecimento" da mistura, ou seja, em misturas mais adequadas sob o ponto de vista da compatibilidade química, a velocidade máxima geralmente é obtida em um menor intervalo de tempo após a fabricação.

2.5 Ensaio de compressão

Aos 28 dias, os corpos-de-prova foram capeados e ensaiados à compressão simples, segundo as recomendações da norma NBR 7215.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Efeito da substituição parcial do cimento pela cinza de casca de arroz

3.1.1. Ensaio não destrutivo

Na tabela 1 apresenta-se os coeficientes A e B obtidos para os diferentes valores de substituição da cinza de casca de arroz.

TAB. 1 - Coeficientes obtidos para as diferentes porcentagens de substituições de cinza.

Cinza	Equação auxiliar	R ²
1,50%	$y = -0,34x - 1,37$	0,95
3%	$y = -0,33x - 1,33$	0,98
5%	$y = -0,22x - 2,04$	0,92
10%	$y = -0,37x - 1,06$	0,89
20%	$y = -0,55x - 0,67$	0,98
30%	$y = -0,53x + 0,11$	0,93
40%	$y = -0,41x - 0,35$	0,98
Testemunha	$y = -0,46x - 0,98$	0,97

Na FIG. 3 apresenta-se as curvas das velocidades de propagação das ondas ultra-sônicas em função das idades dos corpos-de-prova, para as diferentes substituições de cimento por cinza de casca de arroz. Para todos os casos analisados verificou-se um comportamento similar para as diferentes curvas: uma região correspondente ao período inicial de endurecimento da mistura, na qual a inclinação da curva é elevada (1 a 2 dias), seguida de uma segunda região, na qual a inclinação da curva diminui (3 a 5 dias) e, finalmente, uma região de estabilização da velocidade de propagação (em torno de 7 a 14 dias). A partir dessa idade, ou o método adotado tornou-se muito grosseiro para detectar as possíveis alterações ocorridas no seio da mistura, ou tratou-se, por outro lado, de uma indicação que em tais compósitos a etapa de endurecimento apresenta um período mais limitado quando comparada com outros materiais à base de cimento.

Observa-se que para maiores porcentagens de substituição (30% e 40%) as velocidades máximas de propagação reduziram-se acentuadamente (2,8 km/s e 2,3 km/s, respectivamente) quando comparadas com a testemunha (4,2 km/s). Para o valor intermediário de 20% de substituição essa redução foi menos acentuada (da ordem de 3,5 km/s). Para menores valores de substituição (1,5%, 3% e 10%) a redução foi menos significativa denotando, sob o ponto de vista do ensaio não destrutivo, que o método utilizado mostrou-se inadequado para prever as modificações ocorridas na matriz, ou que para tais porcentagens de substituição do cimento pela cinza da casca de arroz, não ocorreria uma perda significativa na resistência do material em relação à testemunha.

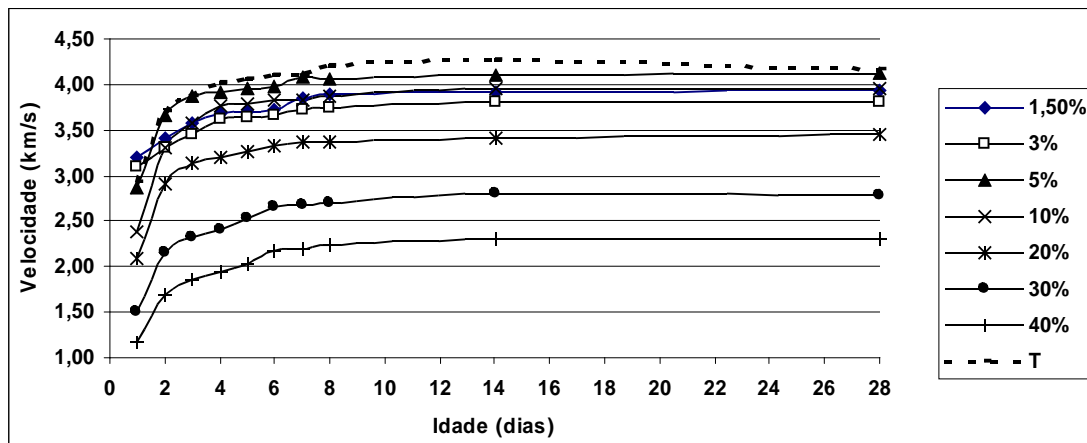


FIG. 3 – Velocidade de propagação versus idade do corpo-de-prova. Valores em porcentagem representam a substituição do cimento por cinza de casca de arroz.

3.1.2. Ensaio de compressão simples

Na FIG. 4 apresenta-se o efeito da substituição parcial do cimento pela cinza da casca de arroz, quando os corpos-de-prova foram submetidos à compressão axial. Os resultados obtidos permitiram confirmar a hipótese oriunda do ensaio não destrutivo, de que a substituição do cimento por maiores quantidades de cinza provocou redução drástica na resistência do material em compressão axial. Com efeito, enquanto a testemunha apresentou resistência de 36,6 MPa, substituições de 30% e 40% do cimento por cinza da casca de arroz fizeram com que valor se reduzisse para cerca de 5 MPa.

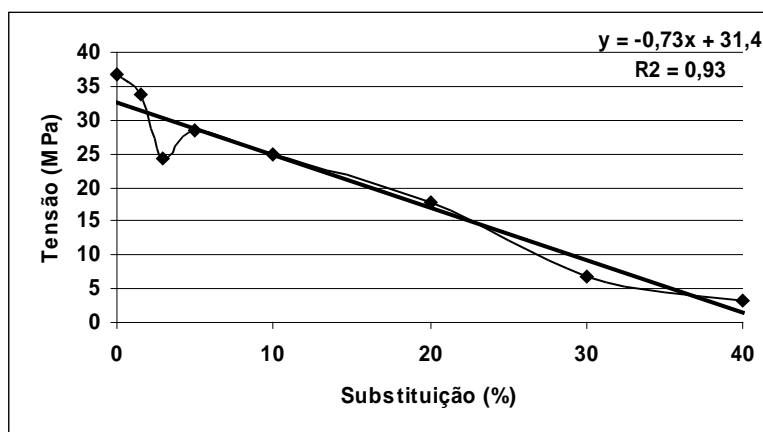


FIG. 4 – Efeito da substituição do cimento por cinza da casca de arroz na resistência à compressão axial do compósito

3.2. Efeito da adição de fibras de sisal

3.2.1. Ensaio não destrutivo

Na tabela 2 apresenta-se os coeficientes A e B obtidos para os diferentes tratamentos realizados e para as três dosagens utilizadas das fibras de sisal.

TAB. 2 - Coeficientes obtidos para os diferentes tratamentos e dosagens de sisal.

Dosagem	3,6%		7,2%		10,8%	
Tratamento	Equação Auxiliar	R ²	Equação Auxiliar	R ²	Equação Auxiliar	R ²
Resíduo - AF	$y = -0,71x - 0,53$	0,89	$y = -0,43x - 0,74$	0,96	$y = -0,76x - 0,03$	0,98
Resíduo-s/ trat.	$y = -0,33x - 0,99$	0,99	$y = -0,41x + 0,38$	0,99	$y = -0,63x + 0,53$	0,99
Natural - AF	$y = -0,327x - 1,28$	0,92	$y = -0,18x - 1,92$	0,93	$y = -0,40x - 1,19$	0,81
Natural-s/ trat.	$y = -0,40x - 0,46$	0,92	$y = -0,43x + 1,36$	0,81	$y = -0,31x + 0,61$	0,75
	Equação auxiliar			R ²		
Testemunha	$y = -0,46x - 0,98$			0,97		

Nas FIG. 5 a 8 apresenta-se a variação das velocidades de propagação da onda ultra-sônica em função da idade, da composição e dos diferentes tratamentos utilizados na preparação dos corpos-de-prova.

Sisal natural – Sem tratamento: pode-se verificar o efeito totalmente desfavorável da adição de porcentagens elevadas de sisal natural. Nos primeiros dias, inclusive, o equipamento de medida do tempo de propagação da onda ultra-sônica não foi capaz de detectar qualquer sinal, denotando o caráter altamente inibitório do sisal natural. Para 3,6% de adição de sisal natural, no entanto, a velocidade máxima de propagação foi da mesma magnitude daquela obtida para a argamassa testemunha.

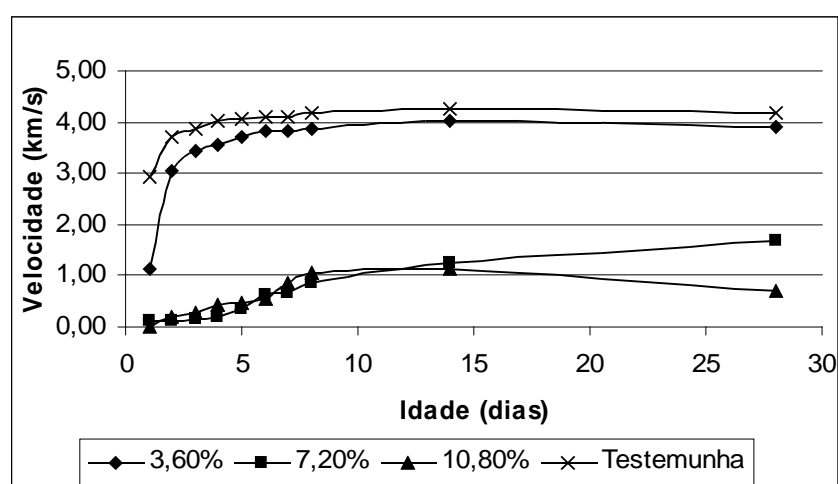


FIG. 5- Efeito da adição de fibras naturais de sisal sem tratamento na velocidade de propagação.

b) Sisal natural – água fria: o efeito benéfico da lavagem das fibras de sisal foi muito evidente para as adições de 7,2% e 10,8%. A velocidade de propagação da onda aproximou-se de $\frac{3}{4}$ daquela correspondente à argamassa testemunha; para a adição de 3,6% não se observou nenhuma modificação.

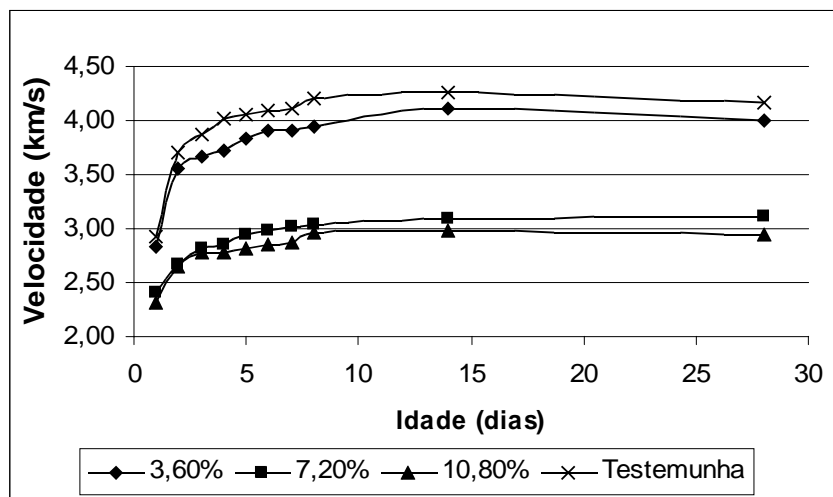


FIG. 6- Efeito da adição de fibras naturais de sisal tratadas em água fria na velocidade de propagação.

c) Resíduo de sisal com corante: embora as diferentes misturas realizadas com os resíduos apresentem uma etapa de endurecimento mais lenta, a velocidade máxima de propagação situou-se entre 2 e 3 km/s, denotando que esse tipo de resíduo apresenta-se menos problemático à pega do cimento do que o resíduo à base de fibras naturais de sisal, quando se comparam as mesmas dosagens.

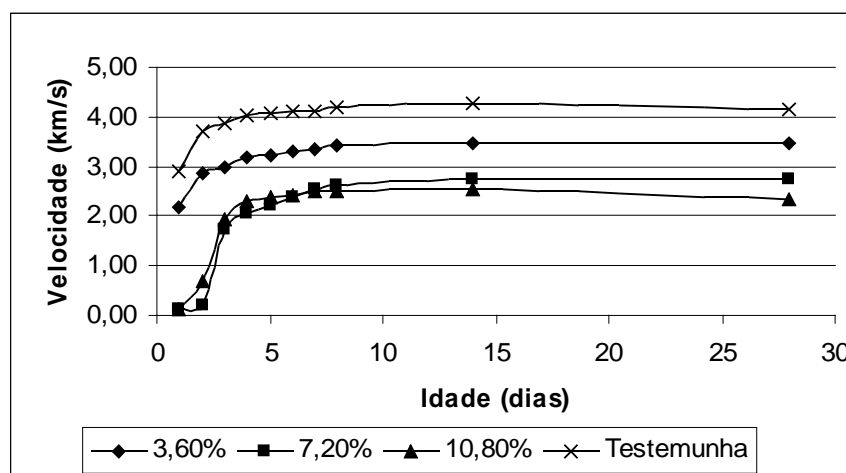


FIG. 7- Efeito da adição de fibras de sisal com corante sem tratamento na velocidade de propagação.

d) Resíduo de sisal com corante – água fria: pode-se observar que a lavagem em água fria eliminou parcialmente extrativos presentes nos resíduos, favorecendo a propagação da onda ultra-sônica.

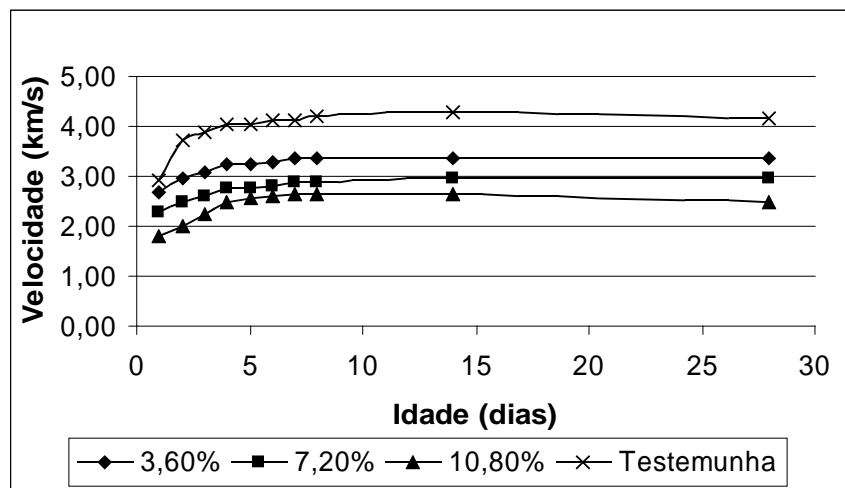


FIG. 8- Efeito da adição de fibras de sisal com corante tratadas em água fria na velocidade de propagação.

3.2.2 Ensaio de compressão simples

Na figura 9 observa-se o resultado do ensaio de compressão simples para os corpos-de-prova originários dos tratamentos aos quais as fibras foram submetidas, e com as três dosagens empregadas.

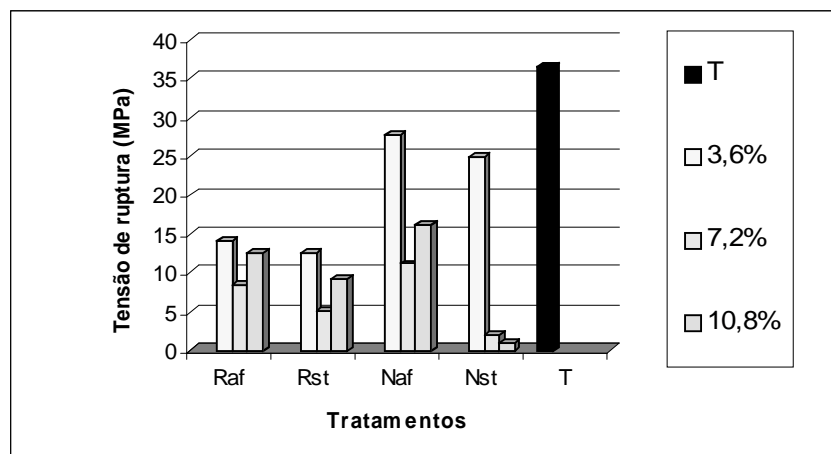


FIG. 9 - Efeito dos tratamentos e das dosagens na resistência à compressão da argamassa de areia e cimento modificada pela adição de fibras de sisal.

Legenda: Raf = resíduo tratado em água fria; Rst = resíduo sem tratamento; Naf = sisal natural tratado em água fria; Nst = sisal natural sem tratamento; T = testemunha.

Efeito da dosagem- valores muito elevados (7,2% e 10,8%) provocaram diminuição acentuada na resistência do material.

Efeito do tratamento- o sisal natural sem tratamento tornou-se problemático ao cimento quando foi usado em dosagens mais elevadas (7,2% e 10,8%), enquanto o sisal natural lavado em água fria mostrou melhores resultados, diminuindo a problemática com o cimento até mesmo para porcentagens mais elevadas de adição das fibras. O sisal resíduo com corante não apresentou diferenciação considerável entre os tratamentos, porém se comparado ao sisal natural tratado em água fria, apresentou resultados inferiores, justificado pela presença do corante na fibra.

4. CONCLUSÕES

O método não destrutivo de propagação da onda ultra-sônica permitiu acompanhar a etapa de endurecimento de misturas à base de argamassa de cimento. Tanto para a substituição parcial do cimento por cinza de casca de arroz, como para o uso de dois tipos de resíduos do processamento do sisal, foram obtidos modelos matemáticos preditivos do comportamento da velocidade de propagação da onda ultra-sônica em função da idade do material.

O sisal natural, ou resíduos de seu processamento industrial mostraram-se inibitórios à pega e ao endurecimento do cimento, quando foram utilizadas as dosagens de 7,2% e 10,8%; tratamento de água fria melhorou o comportamento do compósito.

A substituição parcial do cimento por cinza de casca de arroz mostrou-se adequada apenas para dosagens inferiores a 5%; valores mais elevados provocaram redução substancial na resistência à compressão axial do material.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. Rio de Janeiro.
MB-348 Determinação da área específica, método de ensaio.
NBR 7211 Agregados para Concreto, especificação, 1983.5p.
NBR 7215 Cimento Portland: Determinação da resistência à compressão, método de ensaio, 1996, 8p.
NBR 7217 Agregados: Determinação da composição granulométrica, método de ensaio, 1987, 3p.
NBR 6474 Cimento Portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica, método de ensaio, 1984, 4p.
AGOPYAN V. O emprego de materiais fibrosos na construção civil. In: Simpósio Internacional sobre materiais reforçados com fibras para construção civil. EPUSP-USP, p. 11- 25, 1993.
BERALDO A. L. Ultrasonic speed wave: cure type influence on wood-cement composite compression strength. In: Proceedings of the NDTISS '99 – International Symposium on Nondestructive Testing Contribution to the Infrastructure Safety Systems in the 21st Century, UFSM, Torres, RS, p. 86-90, 1999.

FREIRE W. J. Materiais alternativos de construção. In: BERALDO A. L.; NAAS I. A.; FREIRE W. J. Materiais para construções rurais. Livros Técnicos e Científicos Editora. Cap. 4, p. 105-161, 1991.

HIRUNSTITPORN B.; CHIDAPRASIT P.; VADHANAVIKKIT C.; HORMDEE D. A study of properties of Portland cement containing rice husk ash fly ash and superplasticizer. 1991. PhD Thesis. Consultado pela Internet.

SWAMI R. N. Vegetable fibre reinforced cement composites – a false dream or a potential reality? In: SOBRAL H. S. (ed.). Vegetable Plants and their Fibres as Building Materials. Chapman and Hall, p.3-8, 1990.