

## **AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE ENDURECIMENTO DE MISTURAS DE MADEIRA-CIMENTO POR MEIO DE ULTRA-SOM**

Antonio L. Beraldo<sup>1</sup>, Erik Baradit<sup>2</sup>

*Copyright 2006, ABENDE*

*Trabalho apresentado no I Seminário sobre a aplicação de Ensaios Não-Destrutivos na Madeira e em Materiais a Base de Madeira, Itatiba, São Paulo.*

*As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do (s) autor(es).*

### **RESUMO**

Neste trabalho se avaliou a avaliação do processo de hidratação de compostos de partículas de madeira (maravalha e pó-de-serra) com cimento Portland por meio de ultra-som. Os resultados obtidos indicaram que a velocidade do pulso ultra-sônico (VPU) depende do tamanho das partículas vegetais, da proporção entre os constituintes e do efeito de catalisadores utilizados nas misturas. A VPU sofre mudanças significativas nas idades iniciais dos compostos, tendendo a se estabilizar de acordo com uma lei exponencial.

**Palavras chaves:** ultra-som, compósitos, cimento Portland, partículas de madeira.

### **INTRODUÇÃO**

Durante o processamento mecânico da madeira geram-se importantes quantidades de resíduos na forma de cavacos, raspas ou maravalhas e pó-de-serra. A maioria desses resíduos é depositada ao ar livre ou então queimados sem nenhum controle, aumentando a poluição ambiental. No entanto, produtos resultantes do processamento da madeira podem substituir total ou parcialmente os agregados minerais (areia, brita e pedregulho) utilizados na fabricação de argamassas e concretos.

Existem diferentes formas de avaliar o grau dessa interação entre a biomassa vegetal e o aglomerante inorgânico. Os ensaios mecânicos são os mais utilizados embora necessitem um tempo demasiado longo até que o material atinja uma determinada idade, normalmente de 28 dias. Por outro lado, o emprego de ensaios não destrutivos (END) permite avaliar a eficiência da reação química entre os constituintes do compósito (cimento, biomassa vegetal, água e aditivos) por meio da determinação da

---

<sup>1</sup> Doutor. Professor Associado. Faculdade de Eng. Agrícola – Unicamp. [beraldo@agr.unicamp.br](mailto:beraldo@agr.unicamp.br)

<sup>2</sup> Departamento de Física. Universidad Del Bío-Bío – Concepción, Chile. [ebaradit@ubb.cl](mailto:ebaradit@ubb.cl)

velocidade de propagação do pulso ultra-sônico (VPU) em função do tempo (ou da idade do corpo-de-prova). Esta técnica permite detectar a presença de defeitos internos nestes materiais e, no caso específico do concreto, este método é utilizado para acompanhar a evolução da hidratação dos constituintes do cimento (NAIK et al., 2004).

Na literatura encontram-se informações limitadas sobre o comportamento dos compósitos de biomassa vegetal e cimento, avaliado por meio de END. Aparentemente não foram desenvolvidas investigações sobre este tema, salvo raras exceções (BERALDO, 1999; TEIXEIRA & MOSLEMI, 2001).

De acordo com Beraldo (1999), a lei que comanda a evolução da VPU em materiais à base de cimento pode ser representada por:

$$V_e = V_{\max} [1 - \exp(-k e)] \quad (1)$$

Onde:  $V_e$  = VPU na idade  $e$  (em dias);  $k$  = constante global de desaceleração.

O objetivo deste trabalho consistiu na análise do comportamento da VPU em compósitos de partículas de *Pinus radiata* Don e cimento Portland, como indicativo da evolução da resistência mecânica dos compósitos.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Foram fabricados corpos-de-prova com dois tipos de partículas da madeira (maravalha e pó-de-serra, retidos 33% e 18% na peneira de 2,39 mm, respectivamente) de *Pinus radiata* D. Don e cimento Portland. Utilizou-se o equipamento Panametrics 5800 com transdutores de frequência de ressonância de 1 MHz e um osciloscópio Tektronix TDS 340 para avaliar a VPU de acordo com a idade dos corpos-de-prova.

Para cada tratamento foram fabricados três corpos-de-prova cilíndricos (45 mm de diâmetro e 33 mm de altura), sendo a mistura colocada em fôrmas de PVC previamente untadas e compactada manualmente.

Ao mesmo tempo, com o objetivo de obter a VPU nas primeiras idades, também foram fabricadas pequenas vigas (25 mm x 30 mm x 224 mm). A mistura era distribuída de forma uniforme e se aplicava uma pressão de 1,0 MPa em uma máquina Instron.

Preparação das misturas. Inicialmente se efetuava a mistura entre o cimento de pega rápida (cimento Bio-Bio – Alta resistência inicial - ARI) e as partículas da madeira. A seguir se adicionava água à mistura e se continuava misturando até obter-se uma coloração uniforme.

Tratamentos aplicados às partículas vegetais. Com o objetivo de verificar se o ultra-som era sensível para detectar as mudanças ocorridas na reação entre o cimento e as partículas vegetais, foram adotados os seguintes tratamentos:

a) *Natural*: partículas em sua forma original (testemunha); b) *Lavado*: partículas lavadas em água quente (2 h a 80 °C); c) *Acelerador*: uso dos aceleradores de pega - cloreto de cálcio, sulfato de alumínio e silicato de sódio (2% em relação à massa de cimento); d) *Combinado*: combinação entre os tratamentos b) e c).

As proporções adotadas entre as massas para os corpos-de-prova cilíndricos foram:

a) Maravalha: 1 : 0,33 : 0,61 (cimento : madeira : água); b) Pó-de-serra: 1 : 0,33 : 0,63.

Para as vigas prensadas: foram adotadas nas seguintes condições:

a) Partículas naturais: vigas V1 e V2 (1 : 0,10 : 0,33), viga V3 (1 : 0,30 : 0,50) foram fabricadas utilizando-se as partículas da madeira. Estas vigas foram posteriormente cortadas para que fosse possível avaliar a VPU nas três direções ortogonais (considerando “y” a direção paralela à direção de prensagem da viga). Também se fabricou a viga V6, similar à viga V3, porém, utilizando-se o pó-de-serra na mistura.

b) Aceleradores: foram fabricadas as vigas V4, adicionando-se cloreto de cálcio (2%), e a viga V5, adicionando-se sulfato de alumínio (2%), ambas similares à viga V3.

Argamassas: Também foram preparadas misturas de argamassa de cimento, areia e água (1 : 3: 0,5 em massa) e de argamassa de cimento, areia, partículas de madeira e água (1 : 2: 0,1 : 0,5, em massa) para comparar a evolução da VPU em função do tempo (idade do corpo-de-prova).

*Cura dos corpos-de-prova*: Para todos os corpos-de-prova fabricados adotou-se a cura em meio úmido (saco plástico) durante uma semana.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os resultados obtidos neste trabalho são apresentados nas Figuras 1 a 5, estando separados em corpos-de-prova cilíndricos e vigas prensadas.

I. Corpos-de-prova cilíndricos. Na análise dos resultados para corpos-de-prova cilíndricos foram considerados três fatores: a) Proporção entre os constituintes, b) Tipo de partícula vegetal, e c) Tipo de tratamento aplicado às partículas.

As reações de hidratação do cimento ocorrem de forma muito intensa nas idades iniciais dos corpos-de-prova, ocorrendo o mesmo para as VPU. Na Figura 1 se apresentam as VPU para uma argamassa (**mortero**) de cimento e areia (1: 3: 0,48), um compósito (**Cam**) de argamassa de cimento e areia com adição de partículas de madeira (1: 2 : 0,1 : 0,5) e um compósito (**Cmd**) de cimento e partículas de madeira (1 : 0,33 : 0,61). A alta frequência do sensor não permitiu detectar o sinal nas idades iniciais principalmente quando se utilizaram maravalhas ou quando o tratamento aplicado às partículas não conseguiu sobrepujar o efeito negativo dos extrativos da madeira.

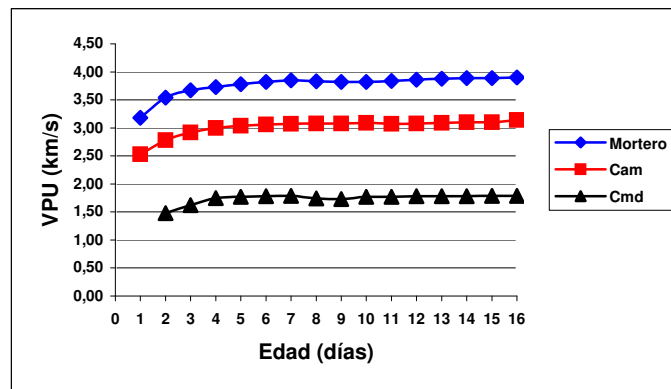


Figura 1 – Comparação entre as VPU de distintos materiais à base de cimento em função do tempo (idade do corpo-de-prova).

Com os dados da estabilização ( $V_{max}$ ) e com a densidade dos corpos-de-prova também foram obtidos os módulos de elasticidade dinâmicos ( $E_d$ ). Para a argamassa e para os compósitos **Cam** e **Cmd** os valores foram de 33,0 GPa, 18,7 GPa e 3,6 GPa, respectivamente. Para a argamassa o valor obtido situou-se muito próximo daquele correspondente aos concretos (Naik et al. 2004). Para o composto **Cam** se observou que a modificação de uma parte de areia por 10% de partículas de madeira, com relação à massa de cimento, reduziu o  $E_d$  em cerca de 40%. Os valores de densidade e de VPU do compósito **Cmd** foram da ordem da metade daquelas correspondentes à argamassa, e, portanto, seu  $E_d$  foi da ordem de 1/8 do  $E_d$  da argamassa.

b) Os compósitos com maravalhas apresentam uma estrutura muito mais heterogênea do que aquela propiciada pelo uso do pó-de-serra. Embora para ambos os compósitos a razão mássica com relação ao cimento tenha se mantido constante (30% da massa de cimento), a estrutura específica formada nos

compósitos de maravalhas provoca maior dissipação de energia da onda ultra-sônica. Outro aspecto a ser destacado, se refere à região de contato do corpo-de-prova com os transdutores. Para o caso dos compósitos de maravalha se observa um mau acoplamento, devido ao maior tamanho das partículas, em comparação com o pó-de-serra.

As propriedades físicas e mecânicas dos compósitos de partículas de madeira e cimento dependem significativamente das características específicas destes constituintes. Neste experimento foram utilizadas duas matérias-primas que favorecem a propagação das ondas ultra-sônicas, pois a espécie vegetal pode ser considerada moderadamente inibitório à pega do cimento. As curvas de VPU mostradas nas figuras 2 e 3 correspondem às misturas utilizadas neste experimento. Portanto, qualquer modificação no traço, conduzirá à obtenção de VPU de outra magnitude.

Devido aos comentários precedentes, optou-se por efetuar a análise dos resultados dos compósitos de forma separada, pois a magnitude da VPU nos compósitos de pó-de-serra (Figura 2) sempre se mostrou superior àquela dos compósitos de maravalha (Figura 3). Nas duas figuras se pode observar que o uso de determinados tratamentos permitiu detectar o sinal de ultra-som nas idades iniciais do corpo-de-prova e também, permitiu uma estabilização mais rápida da VPU.

As densidades dos corpos-de-prova referentes a ambos tipos de partículas foram muito similares, de modo que a diferença entre os valores de  $E_d$  se pode atribuir à diferença no arranjo estrutural dos compósitos. Os resultados obtidos permitiram confirmar que a espécie *Pinus radiata* pode ser considerada moderadamente compatível com o cimento de alta resistência inicial (CP-V-ARI). Com efeito, os valores de  $E_d$  para compósitos de pó-de-serra natural ou após tratamento com aceleradores, se situaram próximos de 4,0 GPa. Dentre os aceleradores utilizados, o cloreto de cálcio (2% em relação à massa de cimento) permitiu obter as VPU mais elevadas, indicando dessa forma, sua melhor adequação para a fabricação de compósitos. Para o caso de compósitos de maravalhas o valor médio de  $E_d$  se situou em torno de 3,0 GPa, podendo ser observada a mesma tendência relatada para o pó-de-serra, quanto ao efeito favorável do uso do cloreto de cálcio como acelerador.

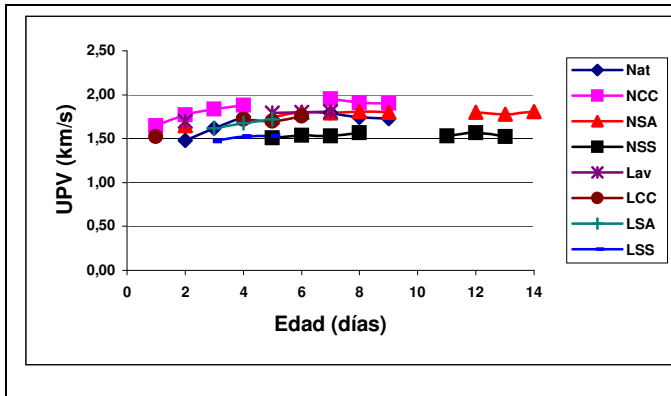


Figura 2 – UPV para compósitos de pó-de-serra.

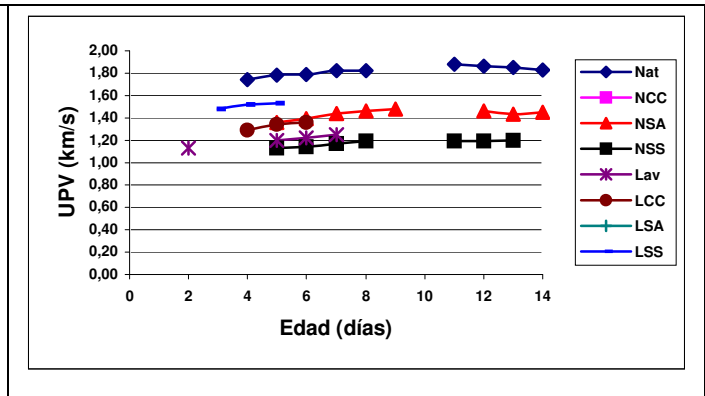


Figura 3 – UPV para compósitos de maravalha.

## II. Vigas prensadas

Os resultados das VPU nas três direções ortogonais das vigas prensadas evidenciaram sua natureza ortotrópica, pois a VPU na direção paralela à direção de compactação da mistura (direção *y*) mostrou-se muito inferior às outras direções (*x* e *z*). Para a viga com 10% de partículas de pó-de-serra os valores de *E<sub>d</sub>* para as direções *x*, *y*, *z*, foram de 12,4 GPa, 8,4 GPa e 13,3 GPa, respectivamente. Os valores se reduziram acentuadamente a 4,6 GPa, 1,9 GPa e 5,5 GPa, respectivamente, ao aumentar-se o teor de partículas de madeira em 30%. Para vigas prensadas utilizando-se 30% de maravalhas, também se pôde confirmar o efeito favorável do uso do cloreto de cálcio, comparado com os aceleradores sulfato de alumínio e silicato de sódio. No entanto, para vigas prensadas não se observou o efeito do tamanho das partículas na magnitude da VPU, contrariamente ao que havia sido observado nos corpos-de-prova não prensados. Para a viga com 30% de partículas de pó-de-serra, os valores de *E<sub>d</sub>* nas direções *x* e *y* foram de 5,1 GPa e 2,9 GPa, respectivamente.

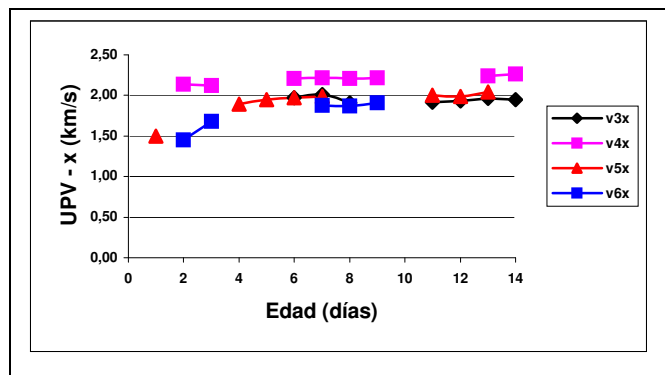


Figura 4 – VPU na direção *x* – vigas.

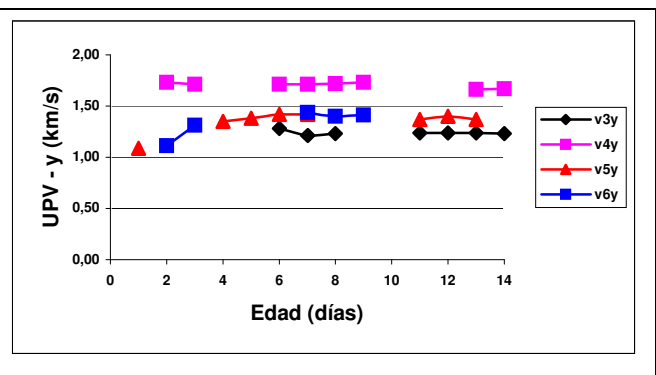


Figura 5 - VPU na direção *y* – vigas.

## **CONCLUSÕES**

O ensaio não destrutivo (END) por ultra-som mostrou-se viável para efetuar o monitoramento do processo de pega e de endurecimento de compósitos de cimento Portland e partículas vegetais. Para corpos-de-prova cilíndricos não prensados o END permitiu detectar o efeito do tamanho das partículas vegetais e do tipo de tratamento na magnitude da velocidade do pulso ultra-sônico (VPU). Para vigas prensadas, o END indicou sua heterogeneidade, traduzida pela diferentes VPU obtidas.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- BERALDO A. L. Ultrasonic speed wave: cure type influence on compression strength of wood-cement composite.1999. Proc. Int. Symp. on Nondestructive Testing Contribution to the Infrastructure Safety Systems. Torres, RS, Brasil, p. 86-90.
- NAIK, T. R., MALHOTRA, V. M., POPOVICS, J. S. 2004. Handbook on Nondestructive Testing of Concrete. CRC Press.
- TEIXEIRA, D. E., MOSLEMI, A. 2001. Assessing Modulus of Elasticity of Wood-fiber Cement (WFC) Sheets Using Nondestructive Evaluation (NDE). Bioresource Technology. 79 (2):193-198.