

DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DO PULSO ULTRA-SÔNICO (VPU) EM COMPÓSITO À BASE DE CIMENTO PORTLAND E PARTÍCULAS DE MADEIRA

Augusto C. Stancato¹, Flávia F. Vieira. Ferreira² e Antonio L. Beraldo³

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 dos autores.

RESUMO

A resistência mecânica de compósitos à base de partículas de madeira em matriz cimentícia representa uma das propriedades mais importantes a ser avaliada no processo de caracterização com vistas à sua aplicação como material alternativo para construções rurais. Por meio da correlação existente entre a resistência à compressão e a velocidade do pulso ultra-sônico (VPU) pode-se avaliar o desempenho do compósito durante o endurecimento da mistura até o período de 28 dias. Nesta pesquisa foram utilizados os resíduos provenientes de duas espécies vegetais (*Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea*), para a produção de compósitos com cimento Portland CPV-ARI, pó de pedra, areia lavada, e os polímeros estireno-butadieno (SBR) e acetato versatato (PAV22). A metodologia se baseou na utilização do equipamento Ultrasonic Tester, modelo BP7 da Steinkamp, com transdutores de seção exponencial de 45 kHz de frequência de ressonância para a medição da VPU em corpos-de-prova cilíndricos com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Com os resultados obtidos constatou-se um aumento da velocidade ao longo dos primeiros 7 dias da moldagem das amostras, seguindo-se de um período de estabilização da VPU. Nos compósitos à base de *Eucalyptus grandis* apresentaram VPU mais elevada quando foram utilizados os teores de 7% de SBR e 3% de PAV22; já para os compósitos à base de *Pinus caribaea* não houve aumento da VPU com a adição dos polímeros em relação materiais originais (sem a adição de polímeros). A metodologia de medição do VPU mostrou-se adequada para avaliar a modificação estrutural do compósito durante o período de endurecimento.

PALAVRAS-CHAVE: pulso ultra-sônico, partículas de madeira, compósito, cimento, polímeros.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com Komlos et al. (1996), a maioria dos países padronizou procedimentos específicos para avaliar o desempenho de materiais submetidos a ensaio, por meio da criação de normas técnicas. O ensaio não destrutivo (END) é freqüentemente utilizado para estimar a resistência do concreto, mas pode, também, ser utilizado para outras finalidades. Entretanto, a confiabilidade dos resultados destes ensaios pode ser duvidosa. A determinação da velocidade de propagação da onda específica para todas essas normas é baseada no mesmo princípio. Pulsos longitudinais, ondas de solicitações elásticas, são gerados por um transdutor eletroacústico que é fixado diretamente na superfície do concreto submetido ao ensaio. Existem também diferenças de como as normas discutem os fatores que afetam a velocidade de propagação da onda ultra-sônica (VPU) no concreto, tal como, o tipo de reforço utilizado, temperatura, umidade, tamanho e forma da amostra. De acordo com Beraldo e Vieira (2003), as modificações nas características de diversos materiais à base de cimento são passíveis de serem obtidas por meio de ensaios não destrutivos (END). Dentre

¹ Doutorando em Engenharia - Faculdade de Engenharia Agrícola - Unicamp. stancato@agr.unicamp.br; augustostancato@saac.sp.gov.br

² Graduanda em Eng. Civil. Técnica de Laboratório. LME - Faculdade de Engenharia Agrícola - Unicamp. flavia@agr.unicamp.br

³ Doutor. Professor Associado. Faculdade de Engenharia Agrícola - Unicamp. beraldo@agr.unicamp.br

eles destaca-se a obtenção da VPU, a partir da qual se pode efetuar o acompanhamento temporal do estágio de endurecimento do material. A análise da evolução da VPU 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. Beraldo (1999), utilizando-se da metodologia de medição do tempo de propagação por meio de equipamento ultra-sônico com o objetivo de verificar a influência de diversos tratamentos de cura em compósitos cimentícios, definiu um modelo matemático para a estimativa da resistência à compressão axial. Através dos dados obtidos foram estabelecidas correlações entre a velocidade final e a resistência à compressão axial dos compósitos. Foi obtido um gráfico auxiliar, necessário para a obtenção da curva do comportamento teórico da propagação do sinal, descrita por meio da Equação 1:

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

onde:

v : velocidade teórica de propagação da onda através do corpo-de-prova (km/s);

v_{\max} : velocidade máxima de propagação obtida experimentalmente (km/s);

A e B são coeficientes experimentais que dependem do intervalo de tempo considerado.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Materiais utilizados e caracterização dos compósitos

Foram utilizados partículas de madeira da espécie *Eucalyptus grandis*, material proveniente do abate de uma árvore de 3 anos, da qual se utilizou apenas a região basal, fornecido pela International Paper, Mogi Guaçu, SP e partículas de madeira da espécie *Pinus caribaea*, fornecidas pela Indústria Faber Castell, proveniente de serraria situada em Prata - MG, originando-se de árvores com mais de 30 anos, destinadas à fabricação de lápis. Para a confecção dos compósitos, além dos resíduos vegetais foram utilizados os agregados minerais constituindo-se em areia fina lavada, proveniente da escavação do subsolo na região de Descalvado, SP; pó de pedra proveniente de uma pedreira da região de Paulínia; a matriz composta pelo Cimento Portland de alta resistência inicial (NBR-5733). Os polímeros utilizados foram fornecidos pela Rhodia do Brasil, dispersão aquosa de copolímero estireno-butadieno (SBR); copolímero de acetato e versatato de vinila (PAV22). A caracterização dos materiais foi feita com base na seqüência de procedimentos: distribuição em tamanho das partículas (Figura 1 e Tabela 1) e massa unitária dos agregados minerais (NBR-7217), características físicas e mecânicas dos cimentos (fornecida pelos fabricantes) e características físicas e mecânicas dos polímeros (fornecidas pelos fabricantes).

Tabela 1 - Distribuição do tamanho das partículas.

Abertura de peneiras (mm)	<i>Eucalyptus grandis</i>	<i>Pinus caribaea</i>	Areia fina	Pó de pedra
	% Massa acumulada retida	% Massa acumulada retida	% Massa acumulada retida	% Massa acumulada retida
4,76	0,1	0,2	0,0	4,2
2,38	5,6	1,4	0,1	33,9
1,19	58,4	11,5	0,2	52,4
0,59	85,0	38,9	0,9	67,8
0,297	95,0	69,4	20,3	77,2
0,149	98,2	90,9	81,1	86,9
0,074	99,4	98,4	98,5	92,7
Fundo	100,0	100,0	100,0	100,0

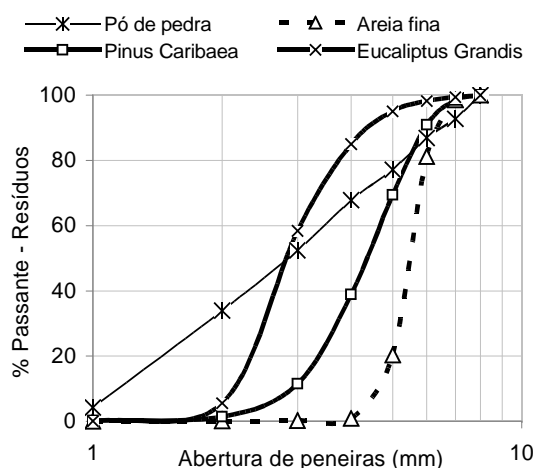


Figura 1 - Curva da distribuição do tamanho das partículas.

Os procedimentos de mistura dos componentes foram realizados conforme padronização prescrita pela normalização de argamassas de acordo com a norma NBR-13276, excetuando-se alguns procedimentos adaptados, decorrentes das características inerentes aos resíduos vegetais e também a mistura produzida com os outros componentes da mistura (cimento, polímero, areia lavada e pó de pedra). Inicialmente realizou-se a pesagem dos componentes de acordo com os quantitativos da Tabela 2, correspondente ao traço em massa.

Tabela 2 - Traço do teor em massa dos componentes para cada compósito.

tipo de compósito	TRAÇO DO TEOR EM MASSA DOS COMPONENTES				teor de polímeros (SBR e PAV22)	água
	cimento	resíduo vegetal	agregados minerais			
			areia	pó de pedra		
Compósitos de <i>Eucalyptus grandis</i>	1	0,36	1,50	3,00	0% - 3% - 5% - 7% e 9%	0,84
Compósitos de <i>Pinus caribaea</i>	1	0,36	1,50	3,00	0% - 3% - 5% - 7% e 9%	1,08

A homogeneização das misturas foi feita em argamassadeira mecânica, marca Solotest, em duas etapas. Inicialmente utilizou-se a mistura anidra, ou seja, sem a presença de água, e após, com a adição da água de amassamento. Na mistura anidra foi empregado um tempo de agitação de 1 min; após a adição de água agitou-se a mistura por mais 2 min, totalizando um período de 3 min. Após a execução da mistura observou-se a manutenção do teor de água presente nas mesmas; em razão disto, no período de tempo decorrido entre um ensaio e outro, cobriu-se a argamassadeira com um pano úmido evitando-se a perda de água por evaporação. Considerando-se as propriedades higroscópicas das partículas é sempre importante observar a capacidade imediata da mistura tanto de absorver como de perder umidade para o meio. De acordo com recomendações de Stancato et al. (2005), os polímeros foram redispersos na água de amassamento antes da homogeneização final da mistura.

2.2 Metodologia de medição do pulso ultra-sônico

Os ensaios para aferição da velocidade do pulso ultra-sônico (VPU) foram realizados no Laboratório de Materiais e Estruturas da Faculdade de Engenharia Agrícola da Unicamp. Em conformidade com a metodologia desenvolvida por Beraldo (1999), ou seja, buscando-se obter informações sobre a cinética da reação de hidratação do aglomerante. Os corpos-de-prova foram monitorados por meio de medições do tempo de propagação da onda durante um período

correspondente a 28 dias. Para tal, utilizou-se o equipamento Ultrasonic Tester, modelo BP7 da Steinkamp, com transdutores de seção exponencial de 45 kHz de frequência de ressonância. O dispositivo apresenta sensibilidade de 0,1 μ s na medição do tempo. Para cada traço de trabalho avaliou-se a VPU média de três repetições (3 corpos-de-prova da mesma mistura). Os ensaios foram realizados em amostras cilíndricas nas dimensões 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, posicionando-se os sensores ortogonalmente em relação às faces diametrais no ponto central do círculo, como pode ser observado na Figura 2 (a) e (b).

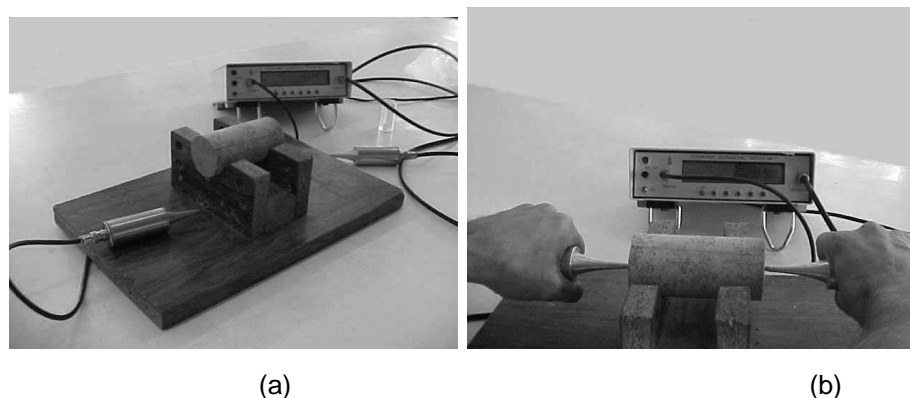


Figura 2 - Monitoramento com dispositivo de medição da velocidade do pulso ultra-sônico em amostras cilíndricas.

(a) dispositivo de medição e apoio dos corpos-de-prova. (b) ensaio.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Tabelas 3 a 6 e nas Figuras 3 a 6 estão apresentados os resultados obtidos com a determinação da velocidade do pulso ultra-sônico (VPU) através dos compósitos. De um modo geral, foi constatado um aumento da velocidade ao longo dos 7 primeiros dias após a moldagem dos compósitos. Decorrido esse período de tempo, até o limite de 28 dias, os resultados apresentaram valores oscilantes com tendências à sua estabilização para um valor próximo àquele obtido na idade de 7 dias dos corpos-de-prova. Como o equipamento de ultra-som detecta descontinuidades internas em materiais, a propagação da onda gerada no interior dos compósitos reflete a descontinuidade existente em razão da heterogeneidade, que pode haver sido influenciada pelo processo de mistura, granulometria, densidade dos componentes, etc. Embora tenha ocorrido aumento da velocidade de propagação da onda no período de 7 dias, em todos os casos analisados, as adições dos polímeros tiveram influência positiva ou negativa em função do tipo e do teor de polímero utilizado. O tipo de partícula, bem como sua distribuição em tamanho das partículas, também influenciou nos valores de VPU obtidos. Nos compósitos à base de *Eucalyptus grandis* verificou-se um aumento da velocidade do pulso ultra-sônico (VPU), na idade correspondente a 7 dias da moldagem dos corpos-de-prova, em relação aos compósitos sem adições, sendo que os maiores valores corresponderam a 7% de SBR e 3% de PAV22. Do mesmo modo, os tipos de resíduos também influenciaram no aumento ou na diminuição da VPU. No caso dos compósitos de *Pinus caribaea* VPU reduziu-se com a adição dos teores de polímeros, considerando como referência o material original, ou seja, sem a adição de polímeros. No período de tempo correspondente a 7 dias da moldagem, as amostras foram mantidas em câmara úmida, e após esse período foram retiradas e expostas ao ambiente de laboratório até os 28 dias. De certa forma, esta operação pode ter influenciado os valores de VPU determinados no intervalo entre 7 dias e 28 dias, considerando-se as características higroscópicas dos compósitos. As variações do teor dos polímeros (SBR e PAV22), tanto nos compósitos com partículas de *Eucalyptus grandis* como nos compósitos com partículas de *Pinus caribaea*, não trouxe diferenças significativas para os resultados de VPU.

Tabela 3 - Velocidade do pulso ultra-sônico do compósito de *Eucalyptus grandis* (SBR).

Modelo matemático para velocidade do pulso ultra-sônico (VPU)			
tipo de compósito	Teor de SBR	Equação da $v=f(t)$	Cof. de determinação
Eucalyptus grandis traço 1:0,36:0,84	0%	$v = 1,73.[1-\exp(-1,34-0,63t)]$	$r^2 = 0,98$
	3%	$v = 1,67.[1-\exp(-1,49-0,60t)]$	$r^2 = 0,96$
	5%	$v = 1,76.[1-\exp(-1,11-0,61t)]$	$r^2 = 0,99$
	7%	$v = 1,82.[1-\exp(-1,11-0,56t)]$	$r^2 = 0,98$
	9%	$v = 1,75.[1-\exp(-0,74-0,68t)]$	$r^2 = 0,95$

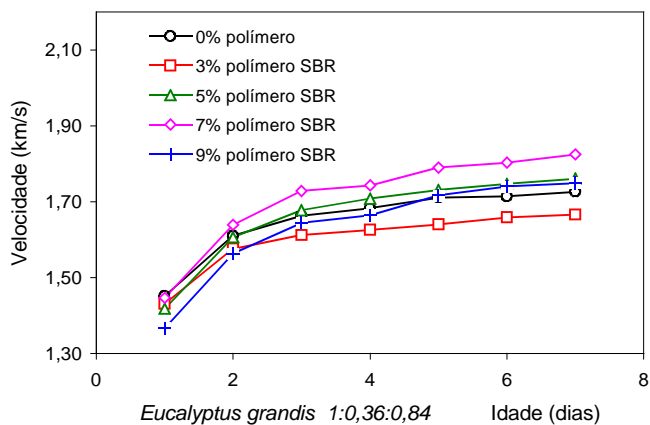


Figura 3 - Velocidade do pulso ultra-sônico do compósito de *Eucalyptus grandis* (SBR).

Tabela 4 - Velocidade do pulso ultra-sônico do compósito de *Eucalyptus grandis* (PAV22).

Modelo matemático para velocidade do pulso ultra-sônico (VPU)			
tipo de compósito	Teor de PAV22	Equação da $v=f(t)$	Cof. de determinação
Eucalyptus grandis traço 1:0,36:0,84	0%	$v = 1,73.[1-\exp(-1,34-0,63t)]$	$r^2 = 0,98$
	3%	$v = 1,84.[1-\exp(-1,28-0,56t)]$	$r^2 = 0,98$
	5%	$v = 1,78.[1-\exp(-1,00-0,65t)]$	$r^2 = 0,98$
	7%	$v = 1,79.[1-\exp(-1,00-0,58t)]$	$r^2 = 0,94$
	9%	$v = 1,83.[1-\exp(-0,74-0,71t)]$	$r^2 = 0,99$

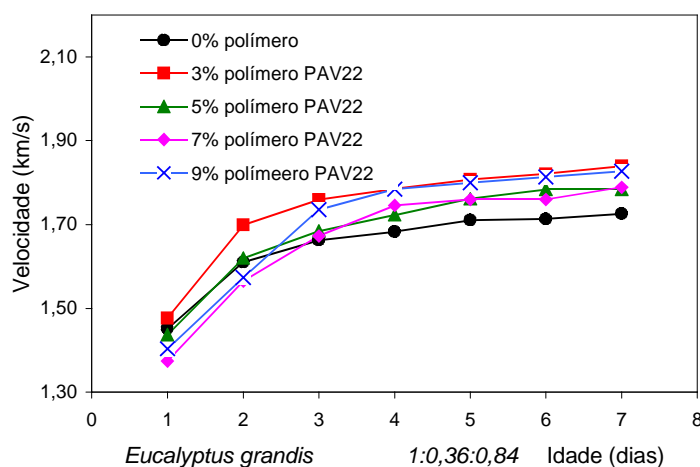


Figura 4 - Velocidade do pulso ultra-sônico do compósito de *Eucalyptus grandis* (PAV22).

Tabela 5 - Velocidade do pulso ultra-sônico do compósito de *Pinus caribaea* (SBR).

<i>Modelo matemático para velocidade do pulso ultra-sônico (VPU)</i>			
<i>tipo de compósito</i>	<i>Teor de SBR</i>	<i>Equação da v=f(t)</i>	<i>Cof. de determinação</i>
Pinus caribaea traço 1:0,36:1,08	0%	$v = 2,13.[1-\exp(-1,24-0,70t)]$	$r^2 = 0,93$
	3%	$v = 2,07.[1-\exp(-1,24-0,67t)]$	$r^2 = 0,99$
	5%	$v = 2,09.[1-\exp(-1,08-0,70t)]$	$r^2 = 0,98$
	7%	$v = 2,07.[1-\exp(-0,92-0,73t)]$	$r^2 = 0,97$
	9%	$v = 2,02.[1-\exp(-1,00-0,73t)]$	$r^2 = 0,96$

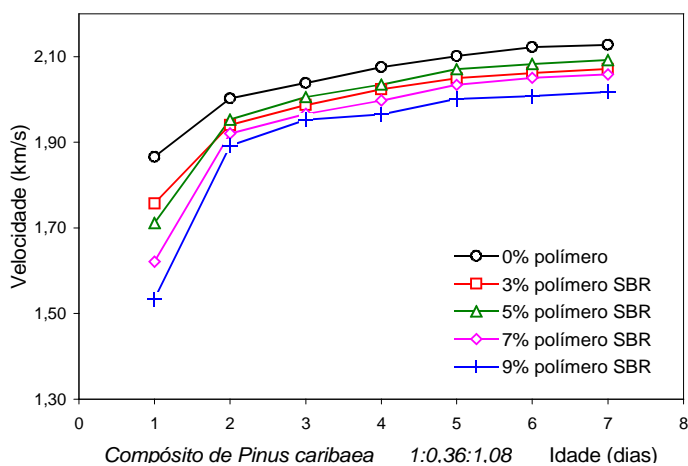


Figura 5 - Velocidade do pulso ultra-sônico do compósito *Pinus caribaea* (SBR).

Tabela 6 - Velocidade do pulso ultra-sônico do compósito de *Pinus caribaea* (PAV22).

<i>Modelo matemático para velocidade do pulso ultra-sônico (VPU)</i>			
<i>tipo de compósito</i>	<i>Teor de PAV22</i>	<i>Equação da v=f(t)</i>	<i>Cof. de determinação</i>
Pinus caribaea traço 1:0,36:1,08	0%	$v = 2,13.[1-\exp(-1,24-0,70t)]$	$r^2 = 0,93$
	3%	$v = 2,10.[1-\exp(-1,62-0,54t)]$	$r^2 = 0,96$
	5%	$v = 2,10.[1-\exp(-1,22-0,72t)]$	$r^2 = 0,96$
	7%	$v = 2,08.[1-\exp(-1,43-0,56t)]$	$r^2 = 0,96$
	9%	$v = 2,06.[1-\exp(-2,16-0,56t)]$	$r^2 = 0,97$

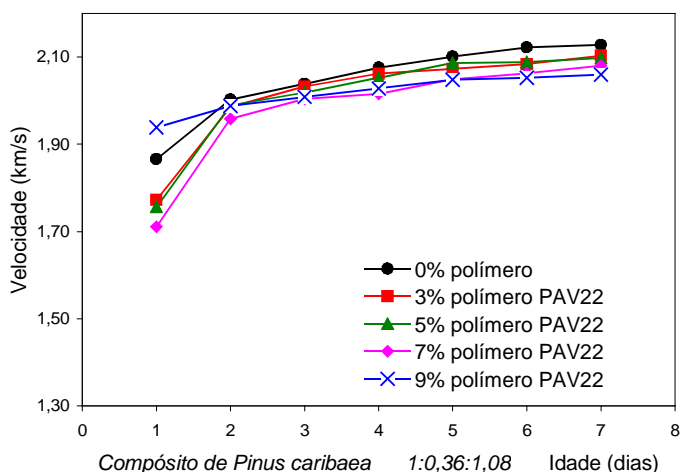


Figura 6 - Velocidade do pulso ultra-sônico do compósito de *Pinus caribaea* (PAV22).

4. CONCLUSÕES

A metodologia para medição da velocidade do pulso ultra-sônico (VPU) em compósitos à base de partículas de madeira, já aplicada aos materiais cimentícios em geral, é adequada para avaliar a evolução da resistência durante o período de endurecimento ao longo da cura das amostras. Os resultados obtidos com os ensaios de ultra-som na aferição da VPU, com a modificação da matriz cimentícia pela adição dos polímeros, embora tenha ocorrido certa variação dos valores, não foram significativos. O tipo de partícula de madeira utilizada nos compósitos influenciou os resultados de VPU, os compósitos provenientes das partículas de *Eucalyptus grandis* apresentaram maiores valores em relação aos do *Pinus caribaea*. O modelo matemático, determinado a partir dos estudos realizados por Beraldo (1999), pode ser utilizado para se prever o comportamento da VPU nos compósitos durante seu período de endurecimento.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. Rio de Janeiro.
_____. NBR 7217 **Agregados: Determinação da composição granulométrica**, método de ensaio, 1987.
_____. NBR 5733 **Cimento Portland de alta resistência inicial**, especificação, 1983.
- 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.
- BERALDO, A. L. e VIEIRA, Flávia de Freitas. **Ensaaios não destrutivos (END) aplicados à argamassa com adição de fibras de sisal**. In: Congresso Panamericano de ensaios não destrutivos-PANNDT, 2003, Rio de Janeiro. Anais dos Trabalhos Técnicos. Rio de Janeiro : ABENDE, v. 1. p. 1-8, 2003.
- KOMLOS, K.; POPOVICS, S.; NIIRNBERGEROH, T.; BABD, B.; POPOVICS, J. S. **Ultrasonic Pulse Velocity Test of Concrete Properties as Specified in Various Standards**. Cement and Concrete Composites, vol. 18, p. 357-364, 1996.
- STANCATO, A. C., BURKE, A. K., BERALDO, A. L. **Mechanism of a vegetable waste composite with polymer-modified cement (VWCPM)**. Cement and Concrete Composites, vol. 27, p. 599-603, 2005.