

COMPOSITOS COM ADIÇÃO DE SERRAGEM DE EUCALIPTO, SUBMETIDOS AO ENSAIO NÃO DESTRUTIVO (END)Antonio L. Beraldo¹, Michelle Santos Rodrigues² e Angélica Mendes³*Copyright 2006, ABENDE**Trabalho apresentado no I Seminário sobre a aplicação de Ensaio 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**

Este trabalho teve como finalidade avaliar a aplicação do método do ultra-som em compósitos com adição de serragens de Eucalipto (*Eucalyptus* sp) submetidas a diferentes tratamentos buscando-se um melhor conhecimento da cinética da reação de hidratação do aglomerante. Os tratamentos realizados foram: madeira natural; imersão em solução a 3% de cloreto de cálcio; lavagem em água quente; lavada em solução de cal, lavada em solução de soda, imersão em solução a 3% de sulfato de alumínio, imersão em solução a 3% de silicato de sódio, mineralizada com a lavagem em 5% de silicato de sódio e em 10% de sulfato de alumínio e a lavagem em 5% de silicato de sódio e em 3% de cloreto de cálcio. Foram confeccionados três corpos-de-prova cilíndricos (5 cm x 10 cm) para cada tratamento. O traço adotado foi de 1:0,375 (cimento: madeira) e relação a/c de 0,60. Durante 14 dias os corpos-de-prova foram submetidos a medições de velocidade ultra-sônica através dos corpos de prova. A velocidade de propagação da onda ultra-sônica tendeu a estabilizar-se em torno de 7 dias. Observou-se maiores valores de velocidade de propagação do ultra-som (VPU) em compósitos de madeira mineralizada, e nos compósitos produzidos com cimento do tipo V-ARI.

PALAVRAS-CHAVE: compósitos, ensaio de ultra-som, eucalipto.**1. INTRODUÇÃO**

Países tropicais apresentam significativas oportunidades para a produção de compósitos de fibras vegetais (GUIMARÃES, 1990), especialmente porque é possível a utilização de subprodutos das principais atividades agrícolas desses países. Como relataram Agopyan & John (1992), a utilização de compósitos formados de fibras vegetais e cimento, preparados com cimentos de baixa alcalinidade, oferece uma alternativa para a construção de edifícios a um baixo custo, visto que, reduz-se a preocupação com a degradação da fibra em um ambiente alcalino. O uso de compósitos formados por resíduos vegetais permite um campo vasto de estudo da produção e da aplicação dos mesmos na construção civil. É importante a aplicação destes elementos, entre outros aspectos, devido ao aproveitamento, por exemplo, de resíduos da indústria madeireira, visto que estes são materiais facilmente reutilizáveis, disponíveis e de baixo custo. A viabilidade do uso dos resíduos vegetais na pasta do cimento depende de um tratamento químico apropriado para cada espécie (STANCATO et al., 2005).

Os ensaios Não-Destrutivos (END) são aplicados aos materiais para verificar a existência ou não de descontinuidades ou defeitos internos, sem alterar suas características físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais e sem interferir em seu uso posterior. Estes ensaios são recentes na construção civil e constituem uma das principais ferramentas do controle da qualidade de materiais e produtos (PUCCINI, 2002; ABENDE, 2003).

¹ Doutor. Professor Associado. Faculdade de Eng. Agrícola – Unicamp. beraldo@agr.unicamp.br

² Mestranda. Faculdade de Eng. Agrícola - Unicamp. m002222@dac.unicamp.br

³ Doutoranda. Faculdade de Eng. Agrícola - Unicamp. angelica.mendes@agr.unicamp.br

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 (VPU), a partir da qual pode-se efetuar o acompanhamento temporal do estágio de endurecimento do material (BERALDO, 1999). Segundo esse autor, a avaliação da VPU permite detectar a presença de perturbações acarretadas pelo uso de uma biomassa vegetal incompatível quimicamente com o cimento. O sinal emitido e recebido pelo aparelho de ultra-som permite detectar a presença de descontinuidades internas em um material, baseando-se no fenômeno de reflexão de ondas acústicas, quando as mesmas encontram obstáculos à sua propagação, dentro de um determinado material.

Este trabalho teve o objetivo de avaliar a aplicação do método do ultra-som em compósitos com adição de serragens de eucalipto submetidas a diferentes tratamentos, buscando-se um melhor conhecimento da cinética da reação de hidratação do aglomerante.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização do material

O material analisado foi fornecido pela Madeireira Santa Cruz, localizada no município de Taubaté, São Paulo. Tratou-se de uma mistura de *Eucalyptus sp*, devido à dificuldade na separação do resíduo. A produção mensal da serraria é de cerca de 200 m³, gerando resíduos estimados em 40% a 50% desse montante. Um dos resíduos utilizados é originário da serragem primária das toras (F - serra fita) e o outro da obtenção das peças estruturais de madeira (C - serra circular). O resíduo tipo F foi 100% passante na peneira de 1,20 mm, enquanto que o resíduo tipo C situou-se entre as aberturas 2,40 mm e 1,20 mm.

2.2. Preparação dos compósitos

Os compósitos foram produzidos utilizando-se de dois tipos de cimento Portland CP II-E-32 (NBR 11578) e CP V-ARI (NBR 5733). Os corpos-de-prova foram moldados segundo os seguintes procedimentos: relação cimento: madeira – 1: 0, 40, fator água/cimento: 0,60 para todas as adições. Efetuou-se a moldagem de três corpos cilíndricos para cada tratamento (com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, de acordo com a NBR 7215). A madeira foi empregada na condição natural e, por apresentar efeito inibitório à pega do cimento, foi submetida aos tratamentos: madeira natural; imersão em solução a 3% de cloreto de cálcio, de sulfato de alumínio e de silicato de sódio; lavagem em água quente; lavada em solução de cal (a 5%) e lavada em solução de soda (a 5%).

Realizou-se também o processo denominado de mineralização, o qual pode melhorar a compatibilidade entre o cimento e a biomassa vegetal. Nesse trabalho realizou-se a mineralização de duas formas. Na primeira delas, a madeira foi imersa em solução de 5% de silicato de sódio por 5 minutos e, após isso, imersa em outra solução de 10% de sulfato de alumínio. O material, então, foi deixado ao ar livre para secagem. A outra forma de efetuar a mineralização consistiu na imersão da madeira em solução de 5% de silicato de sódio e, em seguida, em solução de 3% de cloreto de cálcio. Após a secagem dos materiais, estes foram utilizados na confecção dos corpos-de-prova. Os tratamentos realizados para os dois tipos de madeira (C e F), podem ser visualizados na Tabela 1.

2.3. Cura

Compósitos de biomassa vegetal e cimento são muito sensíveis à perda de água por evaporação, devido à sua natureza extremamente porosa, quando comparada com materiais cimentícios convencionais. Desse modo, de forma a garantir que a hidratação dos constituintes do cimento fosse o mais eficiente possível, depois de desmoldar os corpos-de-prova após decorridas 24 h de sua fabricação, seguiu-se a etapa da cura, consistindo da permanência dos mesmos em uma câmara úmida durante sete dias, seguidos de mais 7 dias de secagem ao ar livre.

Tabela 1. Tratamentos aplicados às partículas de madeira.

Tratamentos	Cimento	
	ARI	CPII
Natural	T1	T2
Natural + cloreto de cálcio (3%)	T3	T4
Lavada em água quente – a 80° C durante 24h	T5	T6
Lavada em solução de cal (5%)	T7	T8
Lavada em solução de soda (5%)	T9	T10
Natural + sulfato de alumínio (3%)	T11	T12
Natural + silicato de sódio (3%)	T13	T14
Natural + silicato de sódio (5%) + sulfato de alumínio (10%)	T15	T16
Natural + silicato de sódio (5%) + cloreto de cálcio (3%)	T17	T18

2.4. Ensaio não destrutivo – END

Efetuiu-se o acompanhamento da etapa de endurecimento da mistura por meio da medição do tempo de propagação (em μs) 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, foi utilizado o aparelho Ultrasonic Tester, modelo BP7 da STEINKAMP, com transdutores de seção exponencial de 45 kHz de frequência de ressonância.

De acordo com resultados apresentados por Beraldo (1999), a evolução da magnitude da VPU, em função da idade t do compósito obedece uma lei exponencial :

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

onde: v = velocidade teórica de propagação da onda através do corpo-de-prova; v_{\max} = velocidade máxima de propagação obtida experimentalmente. Geralmente se adota a idade t de 7 dias como sendo aquela em que ocorre a estabilização da velocidade, ocorrendo, a partir dessa idade, flutuações no tempo (e na velocidade) de propagação da onda ultra-sônica.

2.5. Ensaio de compressão axial

Aos 14 dias, os corpos-de-prova foram capeados (mistura de 75% de enxofre e 25% de caulim) e ensaiados à compressão simples, segundo as recomendações da norma NBR 7215. Os ensaios foram realizados em máquina universal de ensaios, marca Versa Tester. Adotou-se uma velocidade de carregamento de modo que a ruptura da amostra ocorresse em até 5 minutos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Ensaio não-destrutivo

Na Tabela 2 apresentam-se os coeficientes A e B e os coeficientes de determinação (R^2) obtidos para os diferentes tratamentos realizados nos compósitos de eucalipto, por meio da aplicação de transformação na equação 1. Os coeficientes referentes à equação 1 foram obtidos com o auxílio de

um gráfico auxiliar, apresentado na figura 1, para cada tratamento considerado, adotando-se a transformação logarítmica para o eixo das ordenadas.

Tabela 2. Coeficientes A e B do modelo $v = v_{\text{máx}}((1-\exp(A+Bt)))$.

Tipos de Madeira→	C (Serra Circular)				F (Serra Fita)			
	A	B	R ²	Vmáx	A	B	R ²	Vmáx
Ari+ Natural	0,21	-0,47	0,87	0,90	0,14	-0,47	0,81	0,90
CPII +Natural	0,25	-0,58	0,98	0,80	1,13	-0,73	0,84	0,65
Ari+ 3% de CaCl ₂	-1,68	-0,44	0,93	1,80	0,29	-1,13	0,98	1,65
CPII+3% de CaCl ₂	-0,07	-0,47	0,94	1,50	0,26	-0,48	0,98	1,40
Ari+ Lav em água	0,82	-1,32	0,98	1,50	-0,07	-0,84	0,94	1,90
CPII+ Lav em água	-0,11	-0,48	0,98	1,10	0,07	-0,57	0,97	0,90
Ari+ Lav em cal	0,47	-0,44	0,98	1,00	-0,09	-0,57	0,96	0,50
CPII+ Lav em cal	0,81	-0,56	0,93	0,80	1,25	-1,06	0,83	0,50
Ari+ Lav em soda	0,23	-0,87	0,99	1,70	0,78	-0,97	0,98	1,30
CPII+ Lav em soda	-0,31	-0,19	0,90	1,50	0,81	-0,89	0,98	1,30
Ari+ Sulfato Alumínio	-1,17	-0,39	0,99	1,50	-0,99	-0,36	0,98	1,10
CPII +Sulfato Alumínio	-1,18	-0,28	0,96	1,40	-0,84	-0,29	0,96	0,90
Ari+ Silicato Sódio	-0,62	-0,32	0,97	1,60	-0,36	-0,2	0,95	1,10
CPII +Silicato Sódio	-0,8	-0,25	0,93	1,50	-0,25	-0,28	0,93	1,00
Ari+ Ssódio, Saluminio	-1,93	-0,57	0,94	2,40	-1,92	-0,55	0,97	2,00
CPII+Ssódio, Saluminio	-0,73	-0,53	0,98	1,90	-0,86	-0,49	0,97	1,60
Ari+ Ssódio, Ccalcio	-2,36	-0,48	0,92	2,30	-1,24	-0,63	0,93	1,90
CPII+ Ssódio, Ccalcio	-0,99	-0,65	0,98	1,80	-1,14	-0,45	0,97	1,70

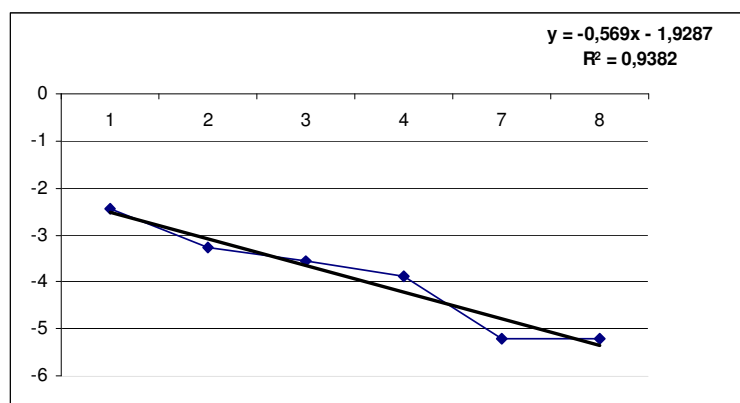


Figura 1. Gráfico auxiliar do logaritmo da variação da velocidade em função da idade do corpo-de-prova em dias – Compósito com madeira C (serra circular) mineralizada, com imersão em silicato de sódio e sulfato de alumínio (T15).

Nas Figuras 2 e 3 apresentam-se as curvas das VPU em função das idades dos corpos-de-prova, para os diferentes tratamentos efetuados nas serragens de eucalipto. Pode-se verificar nestas figuras os bons resultados obtidos e um comparativo com o tratamento que não apresentou um resultado satisfatório, como o tratamento T1 (compósito de ARI, com madeira C e partículas naturais). Nas partículas naturais, sem tratamento, e com adição de 3% de cloreto de cálcio (T3), verifica-se VPU mais elevadas, quando do uso de partículas do tipo C (mais grosseiras) do que para as partículas F. Entre os tratamentos referentes às partículas lavadas verificou-se que as VPU mais elevadas foram obtidas quando do uso do cimento tipo V-ARI. Porém, o tratamento T10, com cimento tipo II e madeira tipo C lavada em soda, forneceu resultados similares aos dos compósitos produzidos com cimento tipo V-ARI. Devido à inadequação nas curvas da VPU, tratamentos de lavagem das partículas da madeira em cal não foram satisfatórios, como se observa o tratamento T8.

Os tratamentos de mineralização das partículas da madeira propiciaram a obtenção de VPU mais elevadas, como se pode verificar nas figuras 2 e 3, para os tratamentos T15, T16 e T18, sobretudo para as madeiras do tipo **C** e para os tratamentos com o uso do cimento tipo V-ARI. Em geral observou-se a estabilização das VPU em torno dos 7 dias para a maioria dos tratamentos aplicados às madeiras.

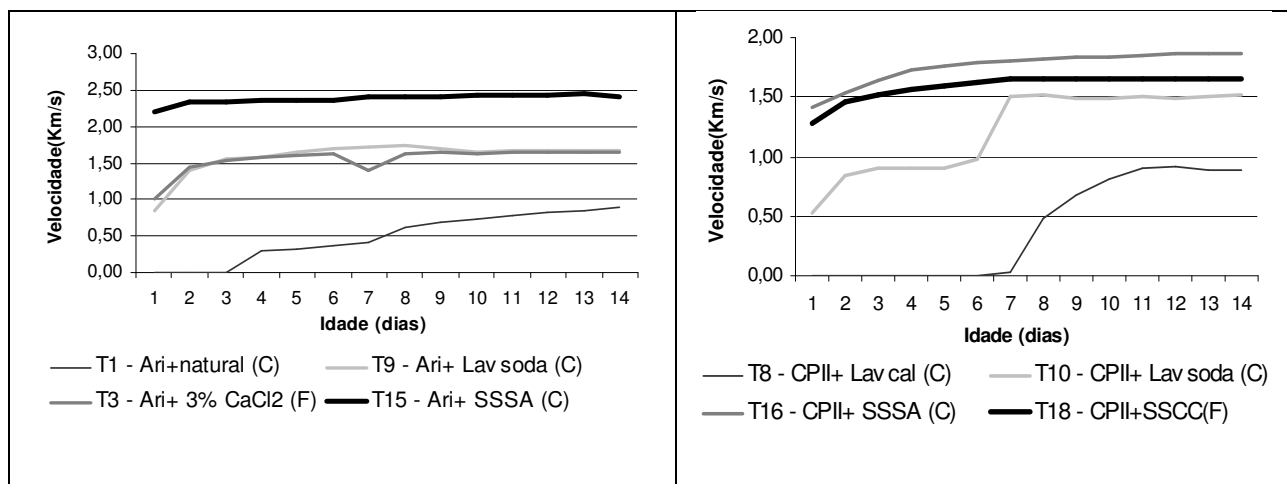


Figura 2. VPU para compósitos de cimento tipo CP- V-ARI. Figura 3. VPU para compósitos de cimento CP II-E-32.

3.2 Tensão de ruptura

Os resultados dos ensaios de compressão simples são apresentados nas figuras 4 e 5 para os compósitos produzidos com cimento ARI e CII, respectivamente. Para os mesmos tratamentos, os compósitos de cimento ARI mostraram-se superiores àqueles produzidos com cimento tipo II. O uso das partículas de madeira **C** também forneceu os melhores resultados com relação à madeira **F**, com exceção ao tratamento T5. Verificou-se que o uso de partículas de madeira em sua forma natural não permitiu atingir valores satisfatórios quanto à resistência a compressão, confirmando a necessidade de realizar-se tratamentos preliminares das partículas. Por outro lado, os tratamentos de mineralização forneceram as tensões de ruptura mais elevadas.

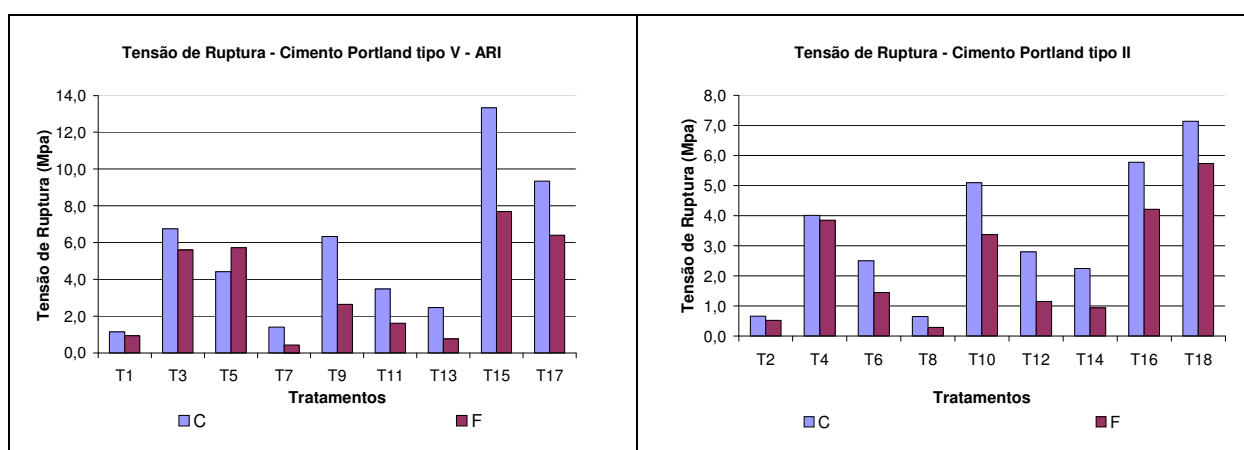


Figura 4 - Resistência à compressão simples em compósitos produzidos com cimento ARI. Figura 5 - Resistência à compressão simples em compósitos produzidos com cimento CII.

3.3 Resistência à compressão versus velocidade de propagação da onda ultra-sônica

As figuras 6 e 7 apresentam o gráfico do comportamento da resistência à compressão em função da velocidade final de propagação da onda ultra-sônica (aos 14 dias) através de corpos-de-prova, à base de compósito de cimento, serragens de eucalipto, para diferentes tratamentos.

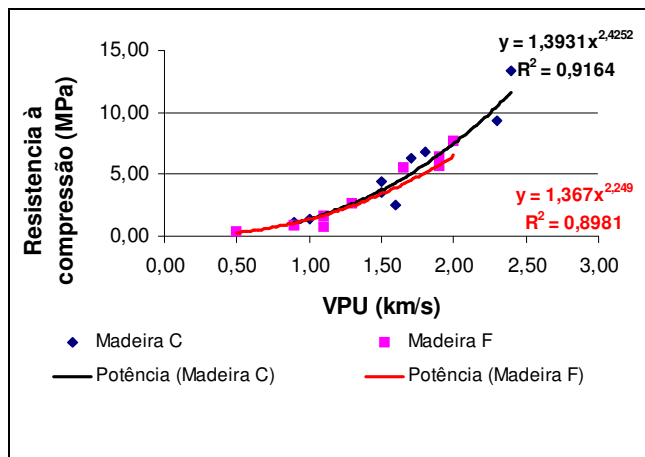


Figura 6: Resistência à compressão versus VPU para as madeiras C e F com cimento ARI

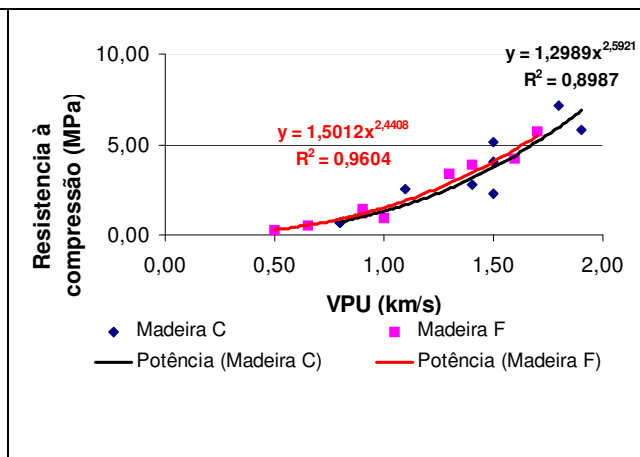


Figura 7: Resistência à compressão versus VPU para as madeiras C e F com cimento CII

4. CONCLUSÕES

Por meio do ensaio não destrutivo de ultra-som, verificou-se que as partículas de madeira F apresentaram maior efeito inibidor ao cimento do que as partículas C. Observou-se também, por meio desse ensaio, a ineficiência das misturas com partículas de eucalipto naturais, que não tenham sofrido nenhum tipo de tratamento, principalmente ao produzir-se compósitos com o cimento tipo II. Os compósitos produzidos com o cimento ARI mostraram desempenho superior ao dos compósitos de cimento tipo II. Mesmo sendo necessário efetuar o tratamento das partículas de madeira, a fabricação dos compósitos é uma forma de aproveitar racionalmente os resíduos gerados, evitando que sejam simplesmente queimados, liberando o gás carbônico e contribuindo para a contaminação ambiental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABENDE, www.abende.org.br, capturado em Março de 2006.
- AGOPYAN V, JOHN V. M. 1992. Durability evaluation of vegetable fibre reinforced materials. *Build Res Infor.* 20(4):233-235.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. Rio de Janeiro.
- NBR 5733 Cimento Portland de alta resistência inicial, especificação, 1991. 5 p.
- NBR 7215 Cimento Portland: Determinação da resistência à compressão, método de ensaio, 1996. 8p.
- NBR 11578 Cimento Portland composto, especificação, 1991. 8p
- BERALDO A. L. Ultrasonic speed wave: cure type influence on wood-cement composite compression strength. In: *Proceedings of the NDTISS'99 – International Symposium on Non Destructive Testing Contribution to the Infrastructure Safety Systems in the 21st Century*, UFSM, Torres, RS, p. 86-90, 1999.
- GUIMARÃES S. S. 1990. Vegetable fiber-cement composites. In: Sobral HS, editor. *Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Vegetable Plants and their fibres as Building Materials*. London: Chapman & Hall. p. 98-107.
- PUCCINI C. E. Avaliação de aspectos de qualidade da madeira utilizando ultra-som. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, 127p. 2002.
- STANCATO, A. C., BURKE, A. K., BERALDO, A. L. 2005. Mechanism of a vegetable waste composite with polymer-modified cement (VWCPMC). *Cement & Concrete Composites* 27. 599–603.