

EFEITO DA ESPÉCIE VEGETAL, DO TIPO DE CIMENTO E DO TRATAMENTO UTILIZADO SOBRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE COMPÓSITOS

BERALDO, A. L.⁽¹⁾; LOPES, W. G. R.⁽²⁾; CARVALHO, J. V.⁽²⁾;
ARZOLLA J.A.P.R.⁽²⁾; SEVEGNANI, K.⁽²⁾; SOUZA, P.⁽²⁾

(1) Professor Doutor-FEAGRI-UNICAMP,
Campinas, SP. E-mail: beraldo@agr.unicamp.br

(2) Alunos de Pós-Graduação
FEAGRI-UNICAMP, Campinas, São Paulo, E-mail: wilza@agr.unicamp.br

RESUMO

Compósitos à base de materiais lignocelulósicos e cimento Portland aliam a grande disponibilidade a baixo custo, do primeiro componente, com a versatilidade e simplicidade do segundo. A natureza da matéria prima vegetal exerce grande influência sobre as características do compósito obtido que, além disso, depende também de forma estreita do tipo de cimento utilizado como aglomerante. No presente trabalho avaliou-se o efeito da natureza de cinco espécies vegetais, a saber: *Eucalyptus saligna*, Cedrinho (*Erisma uncinatum*), Cedro (*Cedrela sp*), *Pinus caribea* e bambu (*Dendrocalamus giganteus*). Tratamentos físicos (lavagem ou não das partículas vegetais) e químicos (uso de cloreto de cálcio ou de sulfato de alumínio) foram adotados. Dois tipos de cimento (CP II-E-32 e CP V-ARI) foram utilizados como aglomerantes. O traço adotado foi de 1:0,375:0,750. Os resultados indicaram o efeito particular do material lignocelulósico utilizado, indicando, para alguns, o caráter altamente inibidor (*E. uncinatum* e *Cedrela*) moderadamente inibidor (*P. caribea* e *D. giganteus*) e não inibidor (*E. saligna*). A lavagem das partículas melhorou, de forma acentuada, o comportamento dos compósitos quando submetidos à compressão. O efeito dos aceleradores, combinado ou não com a lavagem das partículas, dependeu, igualmente, da espécie vegetal considerada. A resistência dos compósitos à compressão, após os tratamentos adequados, situou-se em torno de 8,0 MPa.

ABSTRACT

Lignocellulosic-cement composites are very recommended for construction purposes. This kind of composites show technological characteristics such as lightweight, availability of raw materials and mechanical performance. However, the composite structure depends on lignocellulosic-cement chemical compatibility. In this work the effect of four treatments on the compression strength of the samples was determined. Samples were made from five kinds of vegetal particles (three hardwoods, one softwood and a bamboo specie) and two Portland cement types. Compression strength of the samples showed to be strongly related to the cement and vegetal specie utilized. Best results with inhibitory species were obtained when Portland cement type V was used.

1. INTRODUÇÃO

A construção civil vem utilizando, nos dias atuais, vários materiais desenvolvidos a partir do uso de fibras associadas a compostos inorgânicos, destacando-se as fibras sintéticas e minerais, que apesar de apresentarem excelente performance e grande variedade de tipos, são problemáticas no tocante ao consumo de energia necessária para sua produção, além de representarem ameaça à saúde dos operários encarregados de sua manipulação.

As fibras vegetais, por outro lado, não apresentam esta limitação e, segundo SAVASTANO e AGOPYAN (1996), seu uso como reforço nos compósitos fibra-cimento tem como vantagens, além de aumentar a resistência ao impacto, maior capacidade de absorção de energia, possibilidade de trabalho no estado pós-fissurado e isolamento termo-acústico elevado.

Muitas das fibras potencialmente utilizáveis são provenientes de resíduos oriundos da cadeia de produção dos setores agrícola e industrial, e seu aproveitamento em componentes construtivos acrescenta às vantagens de seu uso, a possibilidade de reciclagem e reaproveitamento deste material, dando um destino final a uma parte do grande volume gerado contribuindo, desta forma, na preservação do meio ambiente.

BERALDO (1997) destacou que a quantidade de resíduos provenientes dos processos de exploração agrícola é representativa, ao fazer referência ao volume de 200 t/mês de casca de arroz, apenas de um fabricante, e de 75 t/mês de resíduos da indústria de fabricação de vassouras de piaçava. Ressalta, ainda, que a proibição da queima de resíduos em algumas regiões e o transtorno ambiental causado pela deposição dos mesmos a céu aberto exigem soluções racionais, que resultem no seu aproveitamento.

JOHN (1996) afirmou que os resíduos gerados pelos diferentes processos econômicos são a principal fonte de degradação ambiental. Apontou a redução do volume de resíduos produzidos e a reciclagem destes como as duas alternativas, não excludentes, que proporcionaram a redução dos custos de deposição e de tratamento de resíduos.

CINCOTTO & KAUPATEZ (1988) consideraram a construção civil, dentre os setores de atividade tecnológica, como o mais indicado para absorver os resíduos sólidos, devido ao volume de recursos naturais consumidos. Destacaram ainda, que este aproveitamento pode contribuir para a redução de custos na construção civil, possibilitando o acesso à casa própria a uma maior parte da população.

Vários tipos de fibras podem ser utilizadas na execução de compósitos, devendo-se priorizar aquelas disponíveis localmente e que apresentem menor custo. Segundo AGOPYAN & DEROLLE (1988) as fibras vegetais são heterogêneas, e dependem do tipo de solo, das condições climáticas, dos fertilizantes empregados, do tipo de colheita e da sua obtenção, das partes da planta, folhas, fruto ou do caule, merecendo cuidados especiais para o seu melhor desempenho no uso em compósitos.

Neste sentido, várias pesquisas têm sido realizadas, visando o conhecimento das características físicas e químicas dos materiais, na perspectiva de resolver problemas inerentes à associação fibras vegetais e cimento, destacando-se entre eles a incompatibilidade química biomassa vegetal-cimento.

Para BERALDO (1997) os taninos, resinas e açúcares, presentes em algumas espécies vegetais representam as substâncias mais nocivas à pega do cimento. Em análise de partículas de bambu, foram detectados através de cromatografia de alto desempenho, três tipos de açúcares: sacarose, glicose e frutose. Para BIBLIS & LO (1968), existe

uma relação direta entre a quantidade de açúcares redutores e o tempo de pega, que é elevado à medida que o teor de açúcares aumenta. A mistura do cimento com fibras retiradas do cerne necessitou de um tempo maior para a pega do que aquelas retiradas do alburno, devido a maior quantidade de extrativos existentes no cerne. Os autores observaram, ainda, que a extração em água quente reduziu o tempo de pega.

LEE & HONG (1986) utilizaram ensaios de compressão, como um indicador da compatibilidade madeira-cimento, em compósitos com cimento Portland e seis espécies diferentes de madeira, constatando que a resistência à compressão foi linearmente dependente da temperatura máxima de hidratação, mas independente do tempo para a ocorrência do pico de hidratação.

Para minimizar os efeitos das substâncias agressivas à pega do cimento, na fabricação de chapas de com partículas de madeira, TEIXEIRA & GUIMARÃES (1989) estudaram o efeito da imersão das partículas da espécie *Acacia mearnsii*, em água quente a 80 °C durante os períodos de ½ hora e de uma hora, bem como o uso de cloreto de cálcio (CaCl_2), a 3% do peso do cimento, também com imersão em água quente, por uma hora e posterior adição de cloreto de cálcio na mistura. O tratamento com imersão das partículas vegetais em água quente e com a adição de CaCl_2 foi o que apresentou melhores resultados. Nesse contexto, BERALDO (1995) relatou, ainda, que para minimizar o efeito negativo da biomassa vegetal em presença do cimento, podem ser adotados procedimentos tais como a lavagem das partículas em água (quente ou fria) ou em solução aquosa (cal, soda ou ácidos) ou imersão em soluções salinas (aluminatos, silicatos). SIMATUPANG (1990), por sua vez, no estudo de compósitos de cimento-madeira utilizou carbonato de potássio, de sódio ou de amônio como aceleradores, para reduzir tempo de início de pega do cimento.

ZHENGTIAN & MOSLEMI (1985) em experimentos conduzidos com a espécie de madeira *western larch*, fortemente inibidora à pega do cimento, estudaram a influência de 30 aceleradores inorgânicos e orgânicos sobre a temperatura de hidratação da mistura, concluindo que foram os cloretos (SnCl_2 , FeCl_3 , e AlCl_3 e CaCl_2) que proporcionaram os melhores resultados.

Objetivou-se, com o presente trabalho, avaliar o efeito da natureza de cinco espécies vegetais, *Eucalyptus saligna*, Cedrinho (*Erisma uncinatum*), Cedro (*Cedrela sp*), *Pinus caribea* e bambu (*Dendrocalamus giganteus*), associado a tratamentos físicos (lavagem ou não das partículas vegetais) e químicos (uso de cloreto de cálcio ou de sulfato de alumínio), utilizando-se dois tipos de cimento como aglomerantes (CP II-E-32 e CP V-ARI).

2. MATERIAL E MÉTODOS

Para avaliar o efeito das características intrínsecas a cada fitomassa particular sobre a pasta de cimento foram escolhidas cinco espécies vegetais, a saber: uma conífera exótica (*Pinus caribaea*), uma gramínea (*Dendrocalamus giganteus*), uma folhosa exótica (*Eucalyptus saligna*) e duas folhosas nacionais (*Cedrela sp* e *Erisma uncinatum*). Procurou-se aumentar o leque de suprimento de matéria-prima combinando-se o uso de resíduos provenientes da fabricação de lápis (*P. caribaea*- PC), de serrarias (*E. saligna*- ES; Cedro- CS; Cedrinho- EU) e de bambu (DG). Com exceção do bambu, que necessitou de uma etapa preliminar de produção de cavacos em cepilhadeira Volpato, os demais resíduos vegetais foram separados em peneiras. Para todos os materiais adotou-se diâmetro máximo do agregado de 2,4 mm. A umidade

média situou-se entre 11 e 12%. A massa específica aparente do granulado, na condição não compactada, variou de 170 a 280 kg/l.

Após a realização da etapa preliminar de caracterização da fitomassa e, baseado em trabalhos anteriores, fixou-se a dosagem empírica de cimento (680 kg/m^3 de compósito). Houve pequena variação no traço adotado (de 1:0,35:0,75 a 1:0,37:0,78). Devido à higroscopidez das partículas vegetais o fator a/c teve que ser mais elevado do que aquele normalmente utilizado em argamassas convencionais. Deve-se ressaltar que o slump test não se mostra adequado para caracterizar a trabalhabilidade do compósito. Testes preliminares de obtenção dos parâmetros da curva de hidratação das misturas (temperatura máxima e tempo necessário para a sua ocorrência) indicaram o comportamento diferenciado das espécies vegetais em relação à pasta de cimento (CP II-E-32 e CP V-ARI). O eucalipto (ES) mostrou-se compatível; *P. caribaea* (PC) moderadamente compatível; as demais espécies foram incompatíveis quimicamente com o cimento, principalmente com o CP II-E-32.

Desse modo buscou-se encontrar a forma mais eficiente para tornar cada espécie compatível com o cimento. O procedimento adotado foi o de efetuar os seguintes tratamentos:

- Natural (N); Natural com CaCl_2 (NCC); Natural com $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (NSA);
- Lavado (L); Lavado com CaCl_2 (LCC); Lavado com $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (LSA).

Os aceleradores foram utilizados na razão de 3% da massa de cimento; a lavagem foi efetuada em água quente (2,0 h a 80 °C). Utilizou-se, igualmente, a mineralização das partículas vegetais, adaptado de FURUNO et al. (1991), conforme descrito por BERALDO (1997).

Após a preparação da pasta de cimento adicionou-se lentamente as partículas vegetais, buscando homogeneizar a mistura. A seguir, depositou-se o material em fôrmas metálicas ($\phi 50 \text{ mm}$ e altura de 100 mm), previamente lubrificadas, e efetuou-se a compactação com o auxílio de uma espátula. A desmoldagem foi realizada após decorridas 24 h da fabricação e, a partir desse momento, acompanhou-se a perda de massa durante a secagem ao ar livre, realizada durante 13 dias.

Após transcorrido o período de secagem os corpos-de-prova (3 repetições por tratamento) foram capeados e ensaiados à compressão simples. Para alguns corpos-de-prova à base de partículas de Cedrinho (EU) avaliou-se, igualmente, a evolução da velocidade de propagação de onda ultrasonora, ao longo do tempo de secagem.

Para cada espécie vegetal estudada buscou-se, em etapa posterior, otimizar o tratamento mais adequado, quer fosse modificando a dosagem empregada, ou utilizando produtos químicos que também fossem resíduos de fabricação industrial, ou que não apresentassem a pureza dos aceleradores utilizados anteriormente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

a)- Influência da espécie vegetal e da lavagem das partículas: conforme apontado por diversos pesquisadores a qualidade do compósito fitomassa-cimento depende de forma acentuada das características de cada um desses componentes fundamentais. Confirmado os resultados obtidos no teste de hidratação das misturas, verificou-se o caráter altamente inibitório das espécies Cedro (CS) e Cedrinho (EU), conforme Figura 1. Além disso, salvo raras exceções, o cimento CP V-ARI foi mais tolerante à presença de substâncias inibitórias presentes nas partículas vegetais ou, então, a

velocidade de endurecimento da pasta superou aquela da migração das substâncias inibitórias para a superfície das partículas vegetais. A lavagem das partículas (Figura 2) apresentou um efeito notável sobre o compósito à base de Cedrinho (**EU**); aumentou também de forma significativa o desempenho mecânico de compósitos à base de bambu (**DG**) e eucalipto (**ES**). O *P. caribaea* (**PC**) mostrou-se indiferente a esse tipo de tratamento, ao passo que, para o Cedro (**CS**), o tratamento foi totalmente ineficaz. Para essa última espécie, que apresenta um odor característico, verificou-se o efeito ocasionado pela extração de componentes em álcool. Constatou-se que os componentes nocivos à pega do cimento não são ligados às substâncias odoríferas presentes nessa madeira, pois, após a extração, desapareceu o odor e, no entanto, o compósito fabricado com esse tipo de material continuou apresentando um baixíssimo desempenho mecânico.

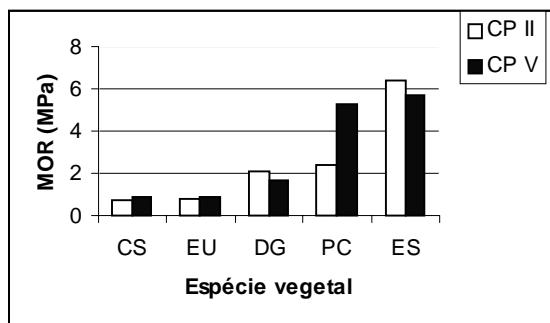


Figura 1- Efeito da natureza da fitomassa

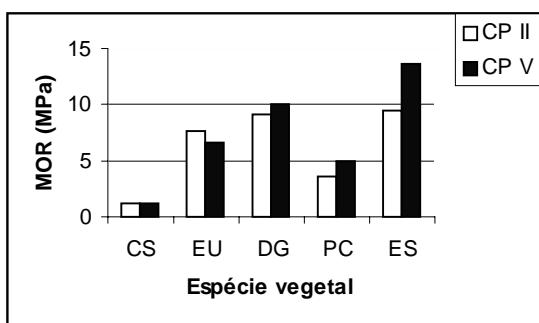


Figura 2- Efeito da lavagem das partículas

b) Efeito da adição de aceleradores: constatou-se uma interação entre a fitomassa e os tipos de acelerador e de cimento empregados. Embora o cloreto de cálcio seja o acelerador mais recomendado na fabricação de componentes à base de madeira-cimento, tal regra depende de forma estreita das naturezas da fitomassa e do cimento utilizados (Figura 3). Com efeito, o bambu (**DG**) e o Cedrinho (**EU**) mostraram-se mais sensíveis ao uso do sulfato de alumínio (Figura 4). O Cedro (**CS**) continuou totalmente inadequado para a fabricação de compósitos mostrando-se ambos os aceleradores incapazes de bloquear a ação das substâncias inibitórias presentes nessa madeira. Nem mesmo o uso do cimento CP V-ARI mostrou ser uma opção válida para contornar esse problema. Para determinadas espécies vegetais constatou-se o melhor desempenho da simples lavagem das partículas (Figura 2) do que com a adição de aceleradores. Resíduos da lavagem de partículas de bambu são inofensivos, constituídos, na sua maior parte, por açúcares (sacarose, glicose e frutose). Para as demais espécies acredita-se na presença de taninos, fenóis e resinas, os quais, provavelmente, poderiam ser eliminados sem causar sérios danos ambientais. Desse modo, sob determinadas condições pode-se descartar o uso de aceleradores, principalmente quando da fabricação artesanal de compósitos madeira-cimento, pela simplicidade da operação de lavagem das partículas.

c) Operação combinada: lavagem e uso de aceleradores: para algumas espécies vegetais e, em particular, o Cedro, as etapas anteriores- lavagem e uso de acelerador, não melhoraram seu comportamento de forma substancial embora, em alguns tratamentos, tenha se logrado obter o dobro da resistência do compósito à compressão. Enquanto que a lavagem baseia-se no princípio de extrair e eliminar constituintes nocivos à pega do cimento, o uso de aceleradores visa aumentar a taxa de endurecimento da pasta, geralmente retardada ou anulada pela presença de tais substâncias.

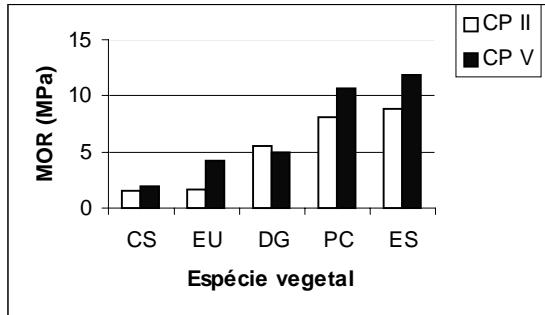


Figura 3- Efeito do cloreto de cálcio

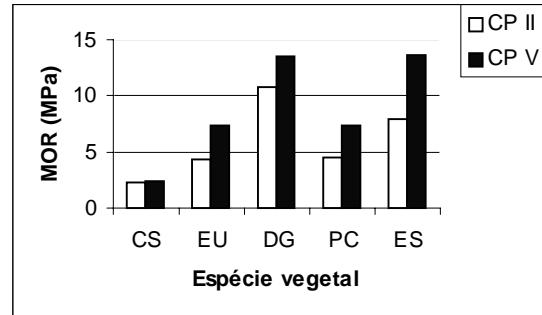


Figura 4- Efeito do sulfato de alumínio

Desse modo, para espécies altamente inibitórias recomenda-se a combinação dessas operações, pois, a eficiência dos aceleradores tornar-se-á muito maior se houver a eliminação parcial de componentes que impeçam o seu pleno desempenho. Constatou-se (Figuras 5 e 6) a adequação desse procedimento para a madeira Cedro (CS), que mostrou-se extremamente sensível à lavagem, seguida da adição de cloreto de cálcio. O eucalipto (ES) mostrou um desempenho extraordinário com o mesmo tratamento, pois atingiu resistência superior ao concreto convencional, embora apresentando 2/3 da massa específica aparente (1400 kg/m^3). O Cedrinho (EU) mostrou-se, neste caso, indiferente ao tipo de acelerador, principalmente quando foi empregado o cimento CP V-ARI.

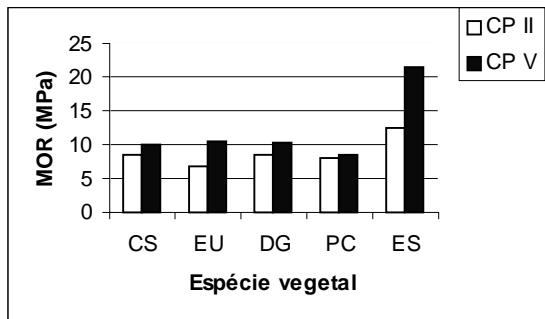


Figura 5- Lavagem + cloreto de cálcio

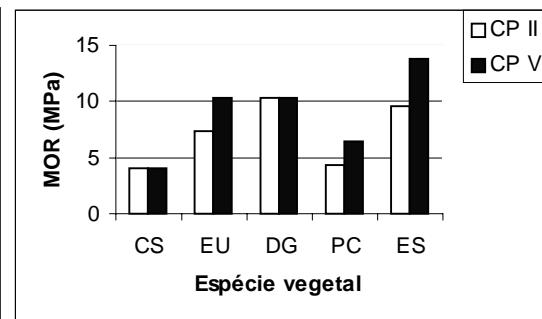


Figura 6- Lavagem + sulfato de alumínio

d) Efeito da mineralização: a resistência dos compósitos em compressão, para esse tratamento, situou-se entre 6,5 MPa (Cedro) e 10,1 MPa (Bambu), quando foi utilizado como matriz o cimento CP II-E-32. Embora tais níveis de resistência mecânica possibilitem o uso dos compósitos em estruturas não-portantes, cabe ressaltar os custos envolvidos, pois trabalhou-se com produtos químicos puros para análise (silicato de sódio e sulfato de alumínio).

e) Outros tratamentos: na etapa posterior do trabalho procurou-se reduzir o consumo de cimento nos traços, ou substituir-se os produtos químicos por similares, porém sem o grau de pureza apresentado pelos anteriores. Para o bambu, em particular, utilizou-se silicato de sódio líquido proveniente de processamento industrial. O material original foi diluído em água, adotando-se as razões produto/água de 50/950; 100/900 e 200/800. Testou-se, igualmente, sulfato de alumínio utilizado em tratamento de água (figura 7). Os resultados indicaram que ambos os tratamentos podem ser promissores para a fabricação de compósitos à base de partículas de bambu e cimento. Na figura 8 apresenta-se o resultado obtido variando-se o traço da mistura para a madeira Cedro. Verificou-se que o equilíbrio entre os componentes é muito tênue, pois embora tenha

sido adotado o tratamento das partículas lavadas e, a seguir, fosse adicionado o cloreto de cálcio ao cimento CP V-ARI, a resistência à compressão do compósito reduziu-se drasticamente.

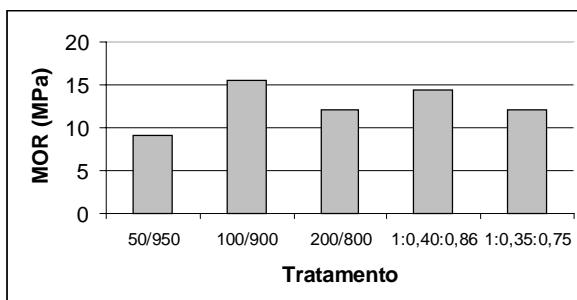


Figura 7- Tratamentos sobre o Bambu

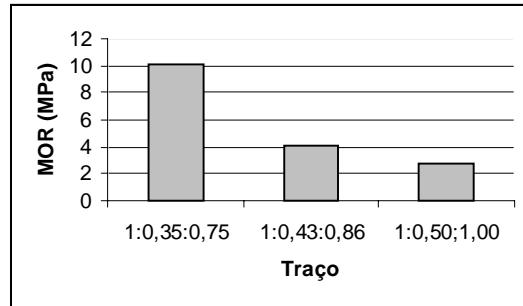


Figura 8- Tratamentos sobre o Cedro

f) Ensaios não-destrutivos: compósitos à base de partículas lavadas de Cedrinho e de cimento CP V-ARI, com adição de 3% de sulfato de alumínio, foram fabricados em quatro traços: T1 (1:0,38:0,75), T2 (1:0,50:0,80); T3 (1:0,43:0,86) e T4 (1:0,60:0,92). Logo após a desmoldagem efetuou-se o acompanhamento da evolução da velocidade de propagação de onda ultrasonora através do equipamento Ultrasonic Tester BP-7, durante 28 dias (figura 9). A variação da velocidade ao longo do tempo obedeceu uma lei exponencial, sendo possível obter-se o valor máximo (denotado pela oscilação em torno de média) e a taxa de aumento da velocidade, que atinge sua maior intensidade nas primeiras idades. Ao final desse período de observação os corpos-de-prova foram ensaiados e procurou-se correlacionar a velocidade máxima de propagação da onda ultrasonora (em km/s) com a resistência à compressão (MPa), conforme apresentado na figura 10. Verificou-se uma boa correlação entre as variáveis, embora uma maior quantidade de traços estudados talvez pudesse apontar para a adequação de um modelo exponencial.

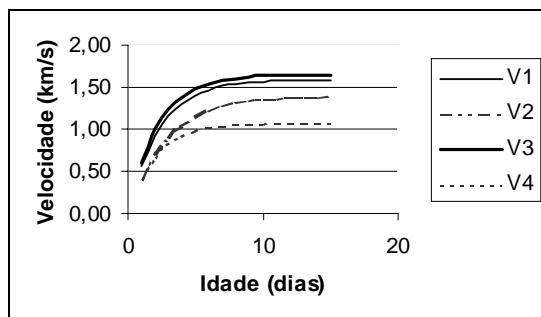


Figura 9- Evolução da velocidade

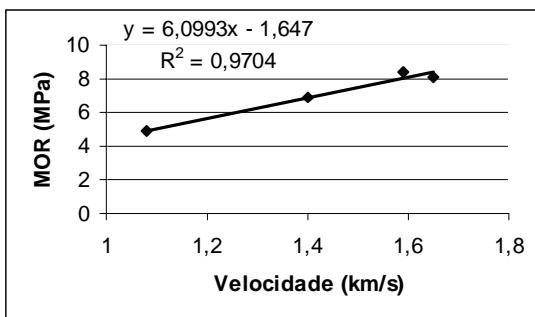


Figura 10- Relação entre MOR x velocidade

4. CONCLUSÕES

Baseado nas condições em que foi desenvolvido o presente trabalho pôde-se concluir que:

- o uso do cimento CP V-ARI permitiu, para a grande maioria das situações analisadas, obter-se compósitos de melhor desempenho mecânico;
- as espécies Cedro e Cedrinho, quando empregadas em sua forma natural, são altamente inibitórias à pega do cimento, sobretudo do CP II-E-32. Recomenda-se,

para essas espécies, que sejam tomadas medidas tais que visem eliminar parcialmente a presença de extractivos, ou, então, de acelerar a reação de hidratação do cimento;

- c) o tratamento combinado de lavagem das partículas vegetais, seguido da adição de 3% de cloreto de cálcio, permitiu homogeneizar a resistência dos compósitos em compressão, independentemente da espécie vegetal utilizada;
- d) o uso de método não destrutivo de impulsão de onda ultrasonora permitiu acompanhar a evolução do endurecimento das misturas, sobretudo nas idades iniciais. Obteve-se, igualmente, uma boa correlação entre a velocidade de propagação da onda e a resistência à compressão do compósito.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGOPYAN, V.; DEROLLE, A. Materiais de construção reforçados com fibras: uso do papel-imprensa. In: IPT –Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. *Tecnologia de Edificações*. São Paulo, Pini, 1988. cap1, p.35-38.
- BERALDO, A. L. *Compósitos Biomassa Vegetal-Cimento*. In: TOLÊDO Fº, R. D.; NASCIMENTO, J. W. B.; GHAVAMI, K. Materiais não convencionais para construções rurais. Campina Grande, UFPB/ Sbea, 1997.
- BERALDO, A. L. Compósitos Biomassa Vegetal-Cimento: Possibilidade de utilização como material de vedação. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Rio de Janeiro, RJ, 1995. *Anais*, v.2. p.661-666.
- BIBLIS, E. J.; LO, C. Sugars and others wood extractives: Effect on setting of southern-pine cement mixtures. *Forest Products Journal*, 18(8), 1968, p.97-90.
- CINCOTTO, M. A; KAUPATEZ, R.M.Z. Seleção de materiais quanto à atividade pozolânica. In: IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. *Tecnologia de Edificações*. São Paulo, Pini, 1988. Cap1, p.23-26.
- JOHN, V. M. Pesquisa e desenvolvimento de mercado para resíduos. In: WORKSHOP RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL, São Paulo-SP, ANTAC – Associação Nacional de Tecnologia de Ambiente Construído, 1996. *Anais*, p. 21-30. 1996.
- LEE, A. W. C.; SHORT, P. H. Pretreating hardwood for cement-bonded excelsior board. *Forest Products Journal*, 39(10), 1989, p. 68-70.
- SAVASTANO JR. ,H.; AGOPYAN, V. Microestrutura X Desempenho dos compósitos reforçados com fibras vegetais. In: WORKSHOP RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL, São Paulo-SP, ANTAC – Associação Nacional de Tecnologia de Ambiente Construído, 1996. *Anais*, p. 153-156. 1996.
- SIMATUPANG, M.H. *Properties and durability of rapidly curing cement-bonded particle boards, manufactured by addition of a carbonate*. In: SOBRAL, H. S. Vegetable Plants and their fibres as building Materials. RILEM, Salvador, Bahia, Brasil, 1990. p. 239-247.
- TEIXEIRA,E. D. GUIMARÃES, T. L. Tratamento de partículas de *Acacia mearnsii De Wild.* para produção de chapas de cimento-madeira. Brasília, IBAMA, DIPRED, LPF, 1989. 9p.
- ZHENGTIAN, L.; MOSLEMI, A. A. Influence of chemical additives on the hydration characteristics of western larch wood-cement-water mixtures. *Forest Products Journal*. 35(7), 1985, p.37-43.