

Compósito *Eucalyptus grandis* – cimento Portland

Portland cement – *Eucalyptus grandis* composite

Antonio Ludovico Beraldo
José Vitório de Carvalho

RESUMO: No Brasil, o eucalipto é a matéria-prima mais importante para a fabricação de celulose e papel e uso energético. Mas existem outras aplicações industriais possíveis, tais como, compensados e madeira laminada-colada, além do uso na fabricação de chapas aglomeradas. No entanto a combinação de matéria-prima de origem vegetal com aglomerantes inorgânicos, tais como o cimento Portland, ainda não despertou o interesse industrial. Esse uso alternativo para a madeira de eucalipto pode mostrar-se interessante, pois durante o processamento mecânico da madeira gera-se grande quantidade de resíduos. Neste trabalho avaliou-se o comportamento mecânico de compósito eucalipto-cimento submetido ao ensaio de compressão axial de corpos-de-prova cilíndricos. Foi escolhida a espécie *Eucalyptus grandis*, coletada em duas épocas: inverno e verão; para essa última avaliou-se, igualmente o efeito da degradação biológica na qualidade do compósito. As amostras foram coletadas em três posições ao longo da altura do tronco (base, meio e topo), para árvores com três idades (3, 5 e 7 anos). Após a desintegração mecânica dos toretes (1 m de comprimento), as partículas foram combinadas com dois tipos de cimento de cimento Portland (CP II-E-32 e CP V-ARI). O resultado do ensaio de compressão axial evidenciou a interação entre os parâmetros analisados, destacando-se, principalmente, a importância no uso do cimento Portland CP V-ARI e da época de corte da árvore (inverno).

PALAVRAS-CHAVE: Compósitos, Eucalipto, Resíduos vegetais

ABSTRACT: *Eucalyptus* wood is the most important raw-material for cellulose and paper production in Brazil. But, there are other possibilities for its utilization such as particleboard, plywood and wood laminated-glued. However, the combination of wood and mineral binders (Portland cement) did not revealed yet a commercial application. This alternative use for *Eucalyptus* wood can be very interesting for industrial purposes, because during wood process there is a great production of residues. In this research mechanical property of *Eucalyptus*-cement composite was evaluated. It was chosen *Eucalyptus grandis* species, cut in two seasons: winter and summer; for the latter it was also evaluated the biological decay of the wood in the composite properties. Samples were collected in three trunk positions (bottom, middle and top), for three trees ages (3, 5 and 7 years). Wood particles, produced by means of a mechanical device, were mixed with two Brazilian Portland cement types (CP II-E-32 and CP V-ARI). Compression strength of the samples showed interaction between parameters analyzed, mainly Portland cement type V and winter season cut influences.

KEYWORDS: Composites, *Eucalyptus*, Vegetable waste

INTRODUÇÃO

O *Eucalyptus* é o gênero exótico mais amplamente utilizado em reflorestamento no Brasil. Segundo a SBS (2000), a área plantada com eucalipto era de cerca de 3 milhões de hectares.

Porém, além do inegável efeito benéfico do uso do eucalipto em siderurgia e para a produção de celulose e papel, observa-se que durante o seu

processamento mecânico em serrarias, a exemplo do que ocorre com outras madeiras, gera-se importante quantidade de resíduos, os quais podem vir a se tornar uma importante fonte de suprimentos para a construção civil, para a produção de artefatos à base de cimento Portland.

Nos últimos tempos várias pesquisas têm sido desenvolvidas sobre produtos à base de cimento

Portland, embora em ritmo muito mais lento do que aquelas voltadas para compósitos à base de aglomerantes orgânicos (compensados, aglomerados e chapas de fibras).

O uso das fibras vegetais, no reforço de matrizes à base de cimento, tem avançado recentemente. Fibras de vidro, de aço, de amianto e de carbono, embora apresentem características mecânicas adequadas, continuam ainda despertando polêmica devido aos seus altos custos de produção, ou quanto aos comprovados danos que causam ao meio ambiente.

Compósitos biomassa vegetal-cimento (CBVC) ou CWPB (cement wood particleboard) apresentam grande potencial de aplicação devido às suas características interessantes, tais como: disponibilidade de matéria-prima renovável, possibilitando o aproveitamento de enorme gama de resíduos, boa resistência a agentes deterioradores, facilidade de moldagem, transporte, corte, ligações, resistência a impactos, bom isolamento termo-acústico e alta resistência à ação da umidade.

As propriedades do CBVC dependem estreitamente da origem da matéria-prima vegetal que o constitui. Conforme citam vários autores, raras são as fitomassas que podem ser adicionadas in natura ao cimento sem que lhe causem problemas, e vários trabalhos publicados a esse respeito, citados por Beraldo (1994), evidenciaram o efeito nefasto de fitomassas inadequadas, assim como propuseram alternativas para minimizar tal efeito.

O objetivo deste trabalho foi analisar o uso de partículas de madeira de *Eucalyptus grandis* na fabricação de compósitos à base de cimento Portland, avaliando-se o efeito da idade da árvore, da posição de amostragem ao longo do tronco e da época de corte, na resistência à compressão axial de compósitos à base de dois tipos de cimento Portland (CP-II-E-32 e CP V-ARI). Modelos matemáticos preditivos do efeito dos diferentes fatores sobre a resistência à compressão axial dos compósitos também foram estudados, buscando-se combinações nas quais se pudesse utilizar, por exemplo, o topo das árvores na produção das partículas a serem utilizadas na fabricação do compósito.

Incompatibilidade química entre biomassa vegetal e o cimento

Uma das principais qualidades requeridas para um agregado de biomassa vegetal é que o mesmo não modifique negativamente as propriedades finais do aglomerante utilizado. De uma maneira geral, quando há compatibilidade química entre a madeira e o cimento, a hidratação do aglomerante atinge um nível significativo, o qual permite a formação de uma rede de silicatos, ligando as partículas.

O efeito de substâncias inibitórias ao cimento pode ser verificado quando se varia a concentração das mesmas em relação à massa de cimento (Beraldo, 1994). A glicose, na concentração de 1%, inibiu completamente a pega de um tipo de cimento (Simatupang, 1986). Glicose, sacarose e frutose foram responsáveis pelo fraco desempenho de CBVC à base de partículas de bambu (Beraldo, 1994).

Fatores que afetam a compatibilidade química entre a biomassa vegetal e o cimento Portland

Reações que ocorrem entre a madeira e o cimento

Quando da interação entre o cimento e a madeira, uma parte da hemicelulose começa a solubilizar e retarda a pega do cimento (Simatupang, 1986; Simatupang et al., 1988). O ataque sofrido pela madeira pela ação dos álcalis do cimento pode converter parcialmente as hemiceluloses e polímeros de açúcar, o que provoca problemas na pega do cimento. Resinas e outras substâncias químicas podem migrar para a superfície da madeira durante o período de secagem da madeira. A formação de uma camada, considerada hidrófoba, reduz as pontes de hidrogênio entre a madeira e o cimento, o que, sem dúvida, implica em redução da resistência na interface (Miller e Moslemi, 1991).

Constatou-se também, no que diz respeito à compatibilidade química entre a biomassa vegetal e o cimento, que não se deve apenas considerar a quantidade de extrativos, mas também o tipo de extrativo (ácidos graxos, taninos, carboidratos e outros). Substâncias solúveis em água apresentam um efeito mais pronunciado sobre a inibição da pega do cimento (Hachmi e Moslemi, 1989).

Madeiras ricas em taninos deveriam ser descartadas para a fabricação de compósitos à base de cimento (Lignum, 1960). Conforme Pimentia et al. (1994), nenhuma teoria, por mais complexa que seja, pode ser aplicada ao efeito de todos os açúcares em presença de todos os constituintes do cimento.

Época de corte das árvores

A época de corte da árvore pode ter grande influência no que diz respeito à pega da mistura madeira e cimento, pois o teor de açúcares livres sofre alteração durante o decorrer do ano. De acordo com Fischer et al. (1974), testes realizados de acordo com amostragem efetuada ao longo da altura dos troncos, mostraram diferenças significativas na distribuição dos açúcares (sacarose, glicose, frutose), em espécies coníferas alemãs. Foi constatado que o teor em açúcares foi mais elevado nos meses de abril (primavera) e mais baixo em agosto (verão). Efeito mais notável foi observado sobre a frutose, a qual, praticamente, desapareceu (transformou-se) na primavera.

Idade das árvores

CBVC fabricado a partir de material proveniente de árvores juvenis apresentou grande instabilidade dimensional (Pugel et al., 1990). Tais árvores, por possuírem altura reduzida e baixo desenvolvimento do tronco em diâmetro, indicam maior porcentagem de alburno do que de cerne. Tal fato pode influenciar significativamente o comportamento físico-mecânico do CBVC, devido à diferença no teor de extrativos nessas duas regiões da madeira.

Armazenamento

O tipo de armazenamento da madeira, após o corte, exerceu grande influência na diminuição dos teores de açúcares, pois, segundo Schwarz e Simatupang (1984), para madeira hêtre ou faia (*Fagus sylvatica*), tais valores passaram de 0,2% (madeira pouco protegida) para 0,1% (secagem em ambiente protegido). Teores de açúcares diminuíram devido às ações enzimáticas. As transformações dos açúcares conduziram à obtenção de constituintes não inibitórios ao cimento, segundo Lee et al. (1987). No entanto, não foram encon-

tradas diferenças sistemáticas entre o armazenamento de partículas de madeira em temperatura de 7 °C, e ao ar livre, em condições normais de temperatura, segundo Schwarz (1988).

Embora o armazenamento apresente efeitos benéficos, pois provoca a diminuição percentual de açúcares da madeira, constatou-se que esse fato não ocorreu para compostos fenólicos (Simatupang, 1986; Valenzuela, 1989). Verificou-se que, após 90 dias de armazenamento, o teor de açúcares da madeira foi reduzido de forma significativa, enquanto que o teor em taninos não apresentou variações.

Segundo Beraldo (1994), partículas de bambu (*Phyllostachys viridis*), estocadas durante dois anos em ambiente protegido, apresentaram queda significativa no teor de açúcares, embora tal operação ainda se mostrasse insuficiente para permitir a pega do cimento.

Tipos de cimento

A constituição química e as diferentes proporções entre os constituintes fundamentais do cimento desempenham um papel fundamental nas características do CBVC. De um modo geral, constatou-se que o uso de um cimento de pega rápida é mais recomendado para a fabricação do CBVC (Beraldo, 1997).

Tratamentos visando melhorar a compatibilidade madeira – cimento

Na grande maioria das vezes, torna-se difícil a escolha de espécies compatíveis com o cimento e, portanto, se faz necessário tratá-las com técnicas simples e confiáveis (Simatupang et al., 1978). Conforme Simatupang et al. (1988), as técnicas mais utilizadas para proporcionar a compatibilidade entre a madeira e o cimento são: maturação da madeira ou das partículas, extração de componentes inibitórios, secagem das partículas, utilização de cimento de alta resistência inicial (no Brasil, o CP-V-ARI), utilização de cimento aluminoso, uso de aceleradores de pega, dentre outros. No entanto, determinadas matérias-primas vegetais requerem maiores cuidados compreendendo, às vezes, o uso de mais de uma técnica para que se obtenha compatibilidade com o cimento.

A melhor maneira para a obtenção de um compósito adequado é a de se adotar medidas coerentes que viabilizem a fabricação de CBVC, quer sejam atuando isoladamente ou em conjunto sobre a biomassa vegetal e o cimento, para que os mesmos se encaixem na faixa ótima de compatibilidade.

Lavagem das partículas vegetais

A lavagem permite eliminar certa quantidade de extrativos presentes na biomassa vegetal. A eficiência do método depende do pH da solução, da temperatura e tempo de extração, dentre outros. No entanto, avaliando a influência da lavagem das partículas na resistência à compressão simples (aos 7 dias) de CBVC, Beraldo e Rolim (1996) não observaram diferenças significativas na resistência à compressão, quando foram comparados compósitos fabricados com partículas lavadas com não lavadas de *Eucalyptus citriodora*. Aparentemente, a lavagem pode melhorar o comportamento de espécies inibitórias à pega do cimento, não se mostrando eficaz (ou se fazendo desnecessária) quando se utilizam partículas vegetais moderadamente inibitórias ou não inibitórias à pega do cimento.

Ensaio de compressão axial

A maioria dos pesquisadores, para avaliar a compatibilidade madeira-cimento, lança mão do ensaio da curva de hidratação, de método não destrutivo por ultra-som (Beraldo, 1994), ou então, baseia-se em resultados obtidos em ensaios mecânicos. O mais usual é o de tração na flexão, visando apoiar-se em normas similares para compósitos madeira-aglomerantes orgânicos. Lee et al. (1987), no entanto, propuseram também o uso do ensaio de compressão axial, para a avaliação do comportamento do compósito madeira-cimento. Esse tipo de ensaio, além de ser de mais fácil execução, permite que a desmoldagem dos corpos-de-prova seja feita após decorridas 24 horas da fabricação. Beraldo (1994), Zucco (1999) e Pimentel (2000), embora tenham trabalhado com compósitos à base de espécies vegetais diferentes, também evidenciaram a adequação do ensaio de compressão axial na avaliação da matéria-prima vegetal, dos tratamentos a ela aplicados e das interações entre ambos.

Normalmente o ensaio de compressão axial pode ser conduzido de 7 a 14 dias após a fabricação do compósito. No caso de ocorrer incompatibilidade química entre os constituintes a tensão de ruptura é muito baixa (inferior a 1,0 MPa). Em pesquisa realizada na França, Beraldo (1994) buscou compósitos cuja resistência à compressão axial fosse superior a 4,0 MPa, valor este estipulado por uma empresa do setor da construção civil. A tensão de ruptura depende, evidentemente, além da natureza dos constituintes utilizados, da razão entre os mesmos (traço). Dosagens muito elevadas do aglomerante podem mascarar o efeito nocivo à sua pega, causado por uma matéria-prima vegetal rica em extrativos.

MATERIAL E MÉTODOS

A natureza da fitomassa, assim como as condições de armazenamento a que ela foi submetida antes da fabricação, influem de forma decisiva nas características do CBVC. Desse modo, visando eliminar parte dessas interferências na qualidade do CBVC, no presente trabalho foi adotada, como fonte de matéria-prima, a madeira proveniente de apenas uma espécie vegetal, o *Eucalyptus grandis*. A madeira foi fornecida pela empresa Chamflora Agrícola Ltda, subsidiária da International Paper, situada no Município de Mogi Guaçu, SP.

Corte das árvores e preparação das partículas vegetais

As árvores selecionadas foram coletadas em três talhões diferentes e em 2 anos consecutivos (1998 e 1999), sendo que de cada um dos talhões retirou-se uma árvore com diferentes idades (3, 5, 7 anos). Para essas idades as árvores cortadas em novembro de 1998 apresentaram DAP de 15,0 cm, 20,0 cm e 18,0 cm, respectivamente; as alturas correspondentes foram de 18,30 m, 29,60 m e 29,50 m, respectivamente. Para o outro corte (julho de 1999), os DAP foram de 13,0 cm, 17,0 cm e 15,5 cm, respectivamente; as alturas foram de 21,60 m, 30,25 m e 28,90 m, respectivamente.

Das árvores abatidas foram retirado toretes de 1 m de comprimento, em três posições da árvore, denominadas de base (B), meio (M) e topo

(T). Procurou-se adotar a amostragem na tora de forma que os diferentes toretes fossem retirados em função da altura (h) das árvores. Desse modo, adotou-se: Base = 0,125h; Meio = 0,500h; Topo = 0,875h.

Após a retirada da casca os toretes foram transformados em fragmentos do tipo maravalha, com espessura aproximada de 1 mm e comprimento da ordem de 5 cm, utilizando-se de uma cepilhadeira de 4 eixos.

As partículas obtidas, através da fragmentação dos toretes, foram colocadas ao sol, por um período de, aproximadamente, 8 horas. Após isso, as mesmas foram embaladas em sacos plásticos e armazenadas em locais abrigados, até o momento em que tais partículas foram desintegradas em moinho de martelo.

Tratamentos aplicados à biomassa vegetal

Foram adotados os seguintes procedimentos durante a realização dos experimentos:

Época de corte: foram escolhidas apenas duas estações do ano (primavera e inverno), para verificar suas possíveis influências nas modificações das características da fitomassa. Os cortes para usos desses materiais receberam as seguintes denominações: VD (corte no Verão e uso em Dezembro), IJ (corte no Inverno e uso em Julho).

Armazenamento da fitomassa: buscou-se analisar o efeito do armazenamento das partículas vegetais, em ambientes protegidos ou não, sobre as características do CBVC. Neste trabalho verificou-se o efeito do armazenamento do material cortado no verão, e deixado na mata, para que pudesse ser processado em julho (corte/uso-VJ).

Lavagem das partículas: buscou-se comparar o efeito do uso de partículas naturais de eucalipto com aquelas provenientes de lavagem, realizada segundo metodologia adaptada por Beraldo e Rolim (1996). Esse procedimento consistiu na imersão do material em água quente (80 °C), por um período de 2 horas, para eliminar ao máximo as substâncias químicas inibitórias à pega do cimento. Em seguida, o material passou por um processo de secagem ao ar livre, e após isso, foi

embalado em sacos plásticos e guardado em locais abrigados.

Tipos de matriz

Para verificar a possível influência do aglomerante utilizado testou-se o efeito de dois tipos de cimento, a saber, cimento CP II-E-32 (ABNT-NBR 11578, 1991) e CP V-ARI (ABNT-NBR 5733, 1991), na confecção dos corpos-de-prova. Os tratamentos foram denominados, respectivamente de CP II e ARI. O primeiro deles foi doado pela Votorantim; o segundo, de marca Cauê, foi adquirido no comércio local.

Amostragem

Efeito da posição: conforme detalhado anteriormente estudou-se os possíveis efeitos sobre a resistência à compressão axial para compósitos fabricados com materiais provenientes de três regiões do tronco, a saber: base (B), meio (M) e topo (T).

Efeito da idade da tora: buscou-se verificar o possível efeito da idade da tora na qualidade do compósito. Para tanto, foram escolhidos os seguintes tratamentos: 3 anos, 5 anos e 7 anos.

Confecção dos corpos-de-prova

Uma vez peneiradas as partículas vegetais, escolheu-se a granulometria desejada (passante na peneira de 2,40 mm), e, após, eventualmente tratadas conforme necessidade do tipo de material em estudo, pôde-se iniciar a confecção dos corpos-de-prova. Para tanto, procurou-se, à medida do possível, obedecer às recomendações de norma NBR-7215 adotada em ensaios de argamassa de areia e cimento (ABNT, 1996).

As partículas foram inicialmente misturadas ao cimento e, após a homogeneização, lentamente adicionou-se água; continuou-se a mistura até que a mesma atingisse a consistência necessária.

A mistura foi então, colocada em fôrmas metálicas (diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm) e compactada manualmente com o auxílio de um soquete. Efetuaram-se três repetições por tipo de tratamento.

Para a confecção dos corpos-de-prova de um mesmo tratamento usou-se 400 g de cimento, 150 g de biomassa vegetal (eucalipto) e 300 g de

água, ou seja, um traço em massa de 1:0,375:0,75 (ou seja, razão madeira: cimento de 1: 2,67). Procurou-se fixar o traço, levando-se em consideração resultados de trabalhos anteriores (Beraldo e Rolim, 1996; Zucco, 1999; Pimentel, 2000), nos quais foram indicadas as quantidades necessárias para se obter três corpos-de-prova (repetições) para cada mistura (critério da dosagem constante dos materiais). Moslemi e Pfister (1987) recomendaram que, para ter melhor eficiência no processo de fabricação do CBVC, deve-se atender às seguintes especificações: relação cimento/madeira 1:0,5, com cerca de 170 kg de partículas vegetais/m³ de compósito.

Após preenchimento das fôrmas, aguardou-se cerca de 24 horas, antes que os corpos-de-prova fossem desmoldados. A cura foi efetuada em ambiente de laboratório durante cerca de 28 dias, após os quais os corpos-de-prova foram ensaiados à compressão axial.

Ensaio de compressão axial

Para análise da resistência à compressão axial dos corpos-de-prova, os mesmos foram submetidos a um carregamento em máquina universal de ensaios Versa Tester, à razão de 100 kgf/minuto. Para a análise estatística dos resultados foi utilizado o software SANEST (Zonta e Machado, 1991), com o qual se efetuou a análise de variância e a comparação das médias dos tratamentos por meio do teste de Tukey (a 5% de significância). Foram ensaiados 324 corpos-de-prova correspondendo a 3 repetições de 3 tipos de corte/uso (VD, VJ e IJ), 2 tipos de cimento (CP II e CP V), 3 idades (3 anos, 5 anos e 7 anos), 3 posições de amostragem (base, meio e topo) e 2 tratamentos (partículas naturais e lavadas).

Análise estatística dos resultados do ensaio de compressão simples dos corpos-de-prova cilíndricos por meio do programa MATLAB

O objetivo da análise foi verificar quais seriam os fatores que, quando combinados, propiciassem a obtenção de compósito com maior resistência à compressão axial. Os dados foram estruturados em um delineamento fatorial, no qual cada fator de interesse era uma variável categórica.

Devido à natureza dos dados e ao objetivo a ser alcançado foi utilizada a análise de regressão múltipla, de tal forma que, no modelo obtido, as variáveis regressoras fossem os fatores, obtendo-se, como variável resposta, a resistência à compressão axial.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de variância dos resultados obtidos no ensaio de compressão axial indicou a grande influência das variáveis testadas, com elevados valores de F: corte/uso (655,13); tipo de cimento (3390,42); idade da tora (802,11); posição de amostragem (143,25); e lavagem das partículas em água quente não apresentou efeito significativo (0,59). Além disso, diversas interações entre as variáveis mostraram-se importantes, principalmente a época de corte/uso x tipo de cimento (200,13) e época de corte/uso x idade da tora (224,51).

A média global da resistência à compressão axial dos compósitos para os diversos tratamentos efetuados (não se considerando as influências causadas pela época de corte/uso, tipo de cimento, idade, posição de amostragem e altura da tora) foi de 6,7 MPa; o coeficiente de variação foi de apenas 10%. Para compósitos à base de CP-II-E-32 e CP V-ARI as médias encontradas foram de, respectivamente, 4,2 MPa e 8,4 MPa, indicando a grande influência do tipo de cimento na resistência à compressão axial do compósito. Beraldo e Sampaio (2002), estudando outras espécies vegetais e os mesmos tipos de cimento, obtiveram, em ensaio de compressão axial, as tensões médias de 6,8 MPa (*Dinizia excelsa*), 3,8 MPa (*Bambusa vulgaris*), 7,8 MPa (*Eucalyptus tereticornis*) e 5,8 MPa (*Pinus caribaea*). Tais resultados indicam que o *E. grandis*, para determinadas condições analisadas, pode ser considerado moderadamente inibitório à pega dos dois tipos de cimento, pois algumas formulações adotadas forneceram valores inferiores a 4,0 MPa. Cabe ressaltar, no entanto, que no Brasil ainda não existe uma especificação técnica para avaliar compósitos de acordo com o resultado do ensaio de compressão axial. Alguns trabalhos existentes na literatura referem-se apenas a corpos-de-prova extraídos

de chapas prensadas, aos quais se aplicam ensaios de compressão e de tração na flexão baseados na norma ASTM D-1037-78B (ASTM, 1982).

Efeito das variáveis sobre a resistência à compressão axial dos corpos-de-prova

Época de corte/uso: independentemente da época de corte/uso verificou-se uma grande dispersão nos resultados obtidos (Figura 1), notando-se, claramente, a menor adequação para a fabricação de compósitos cujas partículas vegetais constituintes fossem originárias do corte e uso VJ (ou seja, toretes cortados durante o inverno e deixados deliberadamente na mata), denotando o efeito nocivo do uso dessas partículas degradadas biologicamente.

Biblis e Lo (1968), por sua vez, haviam afirmado que o tempo de pega de mistura alburno-cimento foi mais longo quando as árvores foram cortadas durante a primavera, do que em condições idênticas com árvores cortadas durante o inverno. No entanto, essa afirmativa deve ser vista com ressalva pois os tipos de cimento utilizados também influem significativamente nos resultados.

De uma forma global (ou seja, sem considerar as diferenças ocasionadas pelos demais fatores envolvidos no experimento, tais como, tipo de cimento, idade, posição e tratamento) o teste de Tukey (5%) indicou haver diferença significativa devido à época de corte/uso do material na resistência à compressão axial do compósito.

Os tratamentos VD (corte e uso em dezembro) e IJ (corte e uso em julho) não apresentaram diferença estatística entre si, sendo a resistência média em compressão de, respectivamente, 7,8 MPa e 7,6 MPa. O tratamento VJ (corte em dezembro e permanência da tora na floresta até julho), por sua vez, forneceu 4,8 MPa, denotando, provavelmente, o efeito nocivo da degradação da madeira deixada na mata, quando da fabricação do compósito. A esse respeito diferentes autores não chegaram a um consenso: para determinadas matérias-primas a degradação biológica pode ser benéfica (Biblis e Lo, 1968; Simatupang et al., 1978; Schwarz, 1988) ou não (Weatherwax e Tarkow, 1967). Evidentemente, a resposta para essa variação não é muito simples pois vários fatores podem estar envolvidos (espécie vegetal,

idade, duração do armazenamento na mata, tipo de organismo, além de fatores edafoclimatológicos). Com efeito, nas Figuras 1 e 2 constata-se que devido à inclusão dos resultados obtidos para partículas originárias de árvores de 5 anos (de um talhão diferente das demais), o corte/uso VJ afetou em menor grau a resistência à compressão axial do compósito, contrariamente ao que foi observado para as outras duas épocas de corte/uso.

Tipo de cimento: quanto ao tipo de cimento utilizado, observou-se que o CP V-ARI permitiu, na maioria dos casos, a obtenção de compósitos com maior resistência à compressão axial, do que aqueles fabricados à base de cimento CP II-E-32 (Figura 2). Cabe esclarecer, no entanto, que vários corpos-de-prova à base de CP II-E-32 também apresentaram tensões de ruptura elevadas, o que os qualificaria também para fins de fabricação (adotando-se o valor mínimo de 4,0 MPa, conforme preconizado por Beraldo, 1994). Observa-se, igualmente, que em determinadas situações (sobretudo quando a madeira era proveniente do corte/uso VJ) nem mesmo o uso do cimento CP V-ARI permitiu a obtenção de compósitos com um mínimo de resistência à compressão axial.

Observou-se que para o CP II-E-32 (mantidos todos os outros fatores constantes), a análise estatística também indicou haver diferenças significativas entre as épocas de corte/uso. Com efeito, verificou-se a seguinte gradação (doravante adotando-se o sinal > quando houver diferença significativa ao nível de 5% entre os valores e sinal = para a sua igualdade):

VD (6,0 MPa) > IJ (4,4 MPa) > VJ (3,3 MPa);

ou seja, houve diferença estatística ao nível de 5% de probabilidade entre as épocas de corte e uso.

Para o CP V-ARI, igualmente, as diferenças foram significativas: IJ (10,8 MPa) > VD (9,6 MPa) > VJ (6,4 MPa). Esse fato mereceria uma abordagem mais aprofundada, não prevista no escopo do presente trabalho, visando buscar a explicação para essa aparente modificação da adequação entre a época de corte/uso e o tipo de cimento (composição química diferente); por outro lado confirma-se, na maioria dos casos, o efeito negativo do uso de partículas de *E. grandis* originárias de toras que tenham sido deixadas na mata (VJ).

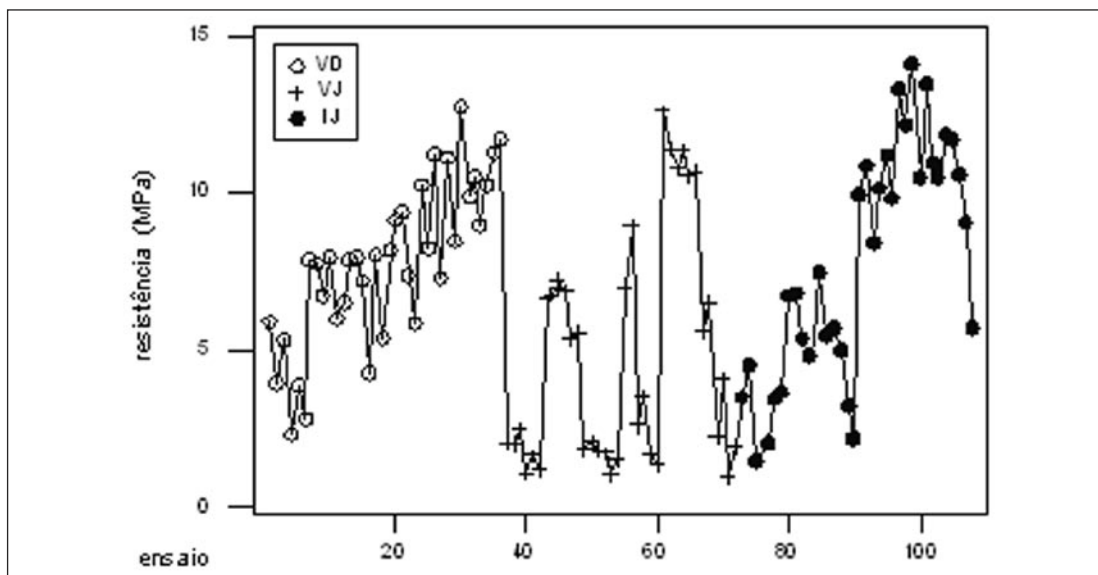


Figura 1

Efeito da época de corte/uso da madeira na resistência média à compressão axial de compósito à base de cimento Portland. Legenda: VD (corte/uso Verão/Dezembro: corpos-de-prova 01 a 36); VJ (corte/uso Verão/Julho: corpos-de-prova 37 a 72); IJ (corte/uso Inverno/Julho: corpos-de-prova 73 a 108).

(Wood cut/use effect on Portland cement composite average compression strength. VD (cut/use Summer/December: samples 01 to 36); VJ (cut/use Summer/July: samples 37 to 72); IJ (cut/use Winter/July: samples 73 to 108))

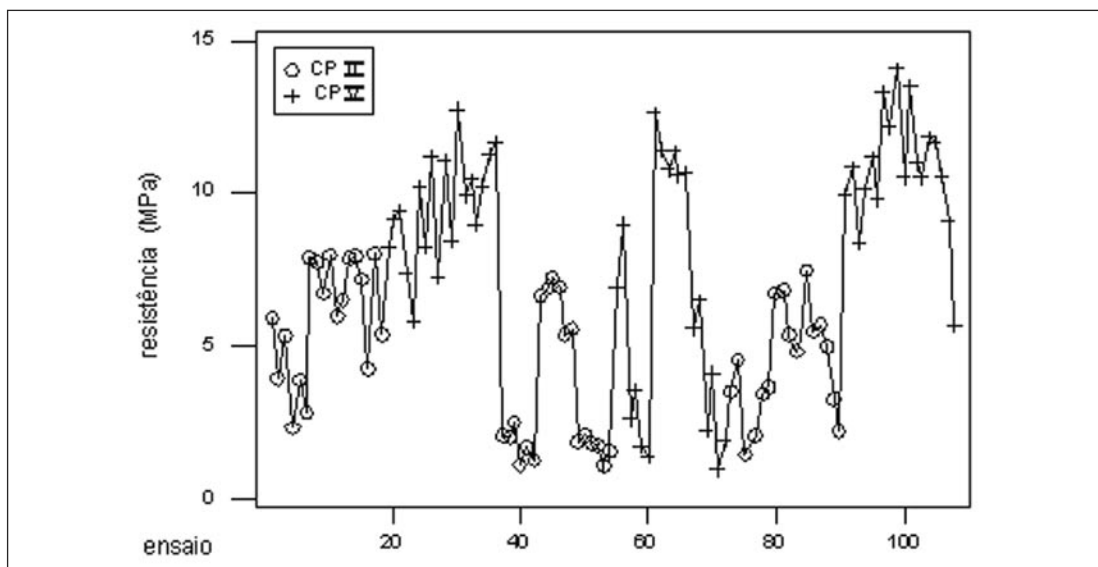


Figura 2

Efeito do tipo de cimento (CP II e CP V) na resistência média à compressão axial de compósitos à base de cimento Portland. Legenda: VD (corte/uso Verão/Dezembro: corpos-de-prova 01 a 18 – CP II; 19-36 – CP V); VJ (corte/uso Verão/Julho: corpos-de-prova 37 a 54 – CP II; 55 a 72 – CP V); IJ (corte/uso Inverno/Julho: corpos-de-prova 73 a 90 – CP II; 91 a 108 – CP V).

(Cement type (CP II and CP V) effect on Portland cement composite average compression strength. VD (Summer/December: samples 01 to 18 – CP II; 19-36 – CP V); VJ (Summer/July: samples 37 to 54 – CP II; 55 to 72 – CP V); IJ (Winter/July: samples 73 to 90 – CP II; 91 to 108 – CP V))

Efeito da idade das toras: a idade de abate das toras, combinada com a época de corte/uso, indicou que: IJ: 5 anos (9,0 MPa) > 7 anos (7,4 MPa) > 3 anos (6,5 MPa); VD: 7 anos (8,6 MPa) = 5 anos (8,5 MPa) > 3 anos (6,2 MPa); VJ: 5 anos (8,9 MPa) > 3 anos (3,0 MPa) > 7 anos (2,6 MPa). Os resultados indicam uma tendência de que árvores mais velhas sejam mais adequadas para a fabricação do compósito, para os corte/uso VD; para o corte/uso IJ o melhor comportamento foi obtido com árvores de 5 anos. Além disso, os resultados confirmam o efeito negativo do uso de partículas degradadas biologicamente (corte/uso VJ).

Efeito da posição de amostragem: a posição de amostragem, combinada com a época de corte/uso, indicou: VD: Base (8,2 MPa) > Topo (7,7 MPa) > Meio (7,4 MPa); IJ: Base (8,4 MPa) > Meio (7,7 MPa) > Topo (6,8 MPa); VJ: Base (6,2 MPa) > Meio (4,7 MPa) > Topo (3,6 MPa). Observou-se tendência de que a região da base forneça o material mais adequado. Uma possível explicação para esse fato refere-se à proporção diferente entre o cerne e o albúrnio nas três regiões da árvore (base, meio e topo), para as quais também é diferente o teor em extrativos (considerados inibitórios à pega do cimento).

Efeito da lavagem: o tratamento de lavagem das partículas de *E. grandis* não apresentou efeito significativo sobre a resistência à compressão axial do compósito, corroborando o resultado de trabalho anterior de Beraldo e Rolim (1996), no qual já se apontava a não necessidade de efetuar a lavagem de partículas de *E. citriodora*, quando da confecção de corpos-de-prova à base de cimento Portland. Desse modo, para a fabricação de compósitos à base de *E. grandis* e cimento, também não há necessidade de efetuar a lavagem das partículas, o que facilita uma possível aplicação industrial dessa espécie. Doravante, os resultados a serem apresentados farão menção apenas ao uso de partículas naturais dessa madeira.

As Figuras 3 e 4 apresentam os resultados da resistência à compressão axial de compósitos de partículas naturais (ou seja, sem sofrer o processo de lavagem em água quente) da madeira de *E. grandis* e dos cimentos CP II-E-32 e CP V-ARI, respectivamente. Observa-se a grande influência da época de corte/uso principalmente para árvores de 3 e 7 anos, independentemente da região na qual se efetuou a coleta de material para a produção das partículas vegetais.

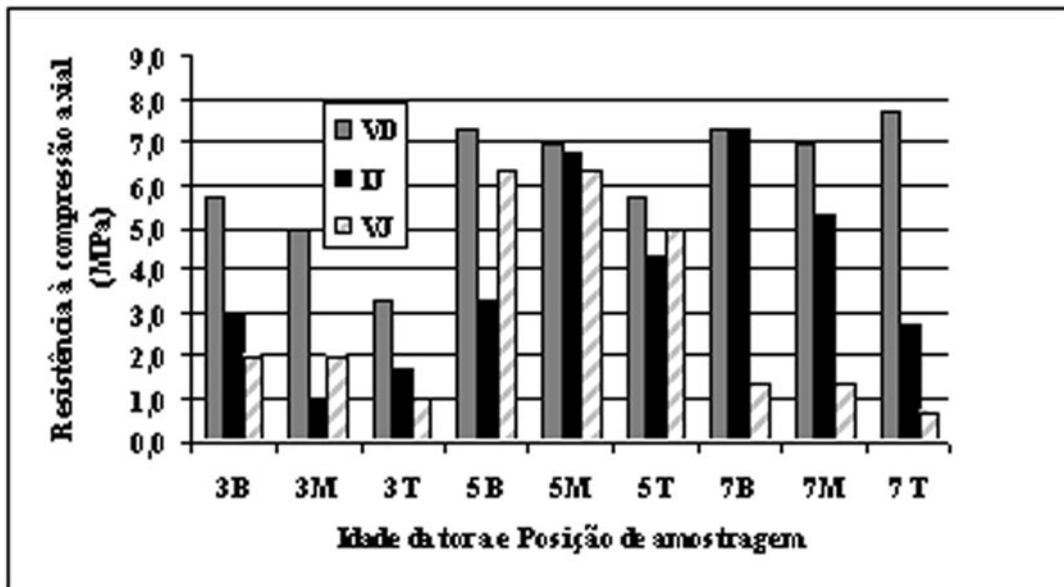


Figura 3

Resistência à compressão axial de compósitos à base de partículas naturais da madeira de *E. grandis* e cimento CP II-E-32. Efeito da idade da árvore (3, 5 e 7 anos) e da posição de amostragem (B - Base, M - Meio e T - Topo). Legenda: VD - árvore cortada e usada no verão; IJ - árvore cortada e usada no inverno; VJ - árvore cortada no verão e usada no inverno.

(Compression strength of CP II cement - *E. grandis* natural particles composite. Age (3, 5 and 7 years) and sampling position (B - Bottom, M - middle and T - Top) effects. VD (cut/use Summer/December); IJ (cut/use Winter/July); VJ (cut/use Summer/July).

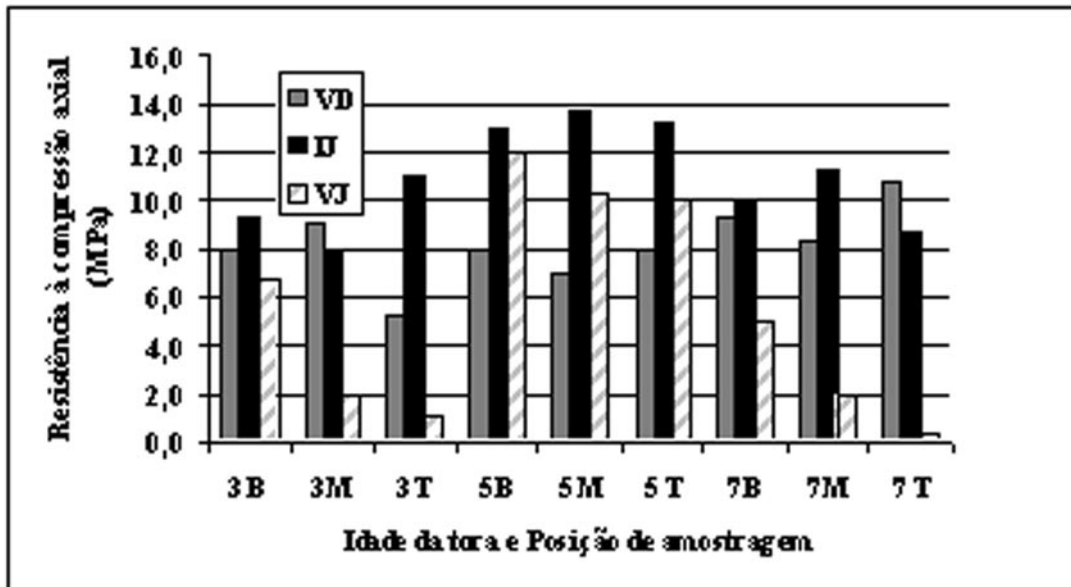


Figura 4

Resistência à compressão axial de compósitos à base de partículas naturais da madeira de *E. grandis* e cimento CP V-ARI. Efeito da idade da árvore (3, 5 e 7 anos) e da posição de amostragem (B - Base, M - Meio e T - Topo) Legenda: VD – árvore cortada e usada no verão; IJ - árvore cortada e usada no inverno; VJ - árvore cortada no verão e usada no inverno.

(Compression strength of CP V cement - *E. grandis* natural particles composite. Age (3, 5 and 7 years) and sampling position (B- Bottom, M – middle and T – Top) effects. VD (cut/use Summer/December); IJ (cut/use Winter/July); VJ (cut/use Summer/July).)

Modelos matemáticos estimatórios da resistência à compressão axial dos compósitos

Para o corte e uso VJ, devido às explicações anteriores, não houve possibilidade de efetuar o ajuste da curva, sendo o coeficiente de correlação de apenas 28,5%. Esse fato pode ser responsabilizado em grande parte pelo comportamento das árvores de 5 anos de idade (Figuras 1 e 2), que foi totalmente oposto ao das árvores das outras idades, para esse corte/uso. A análise de regressão múltipla permitiu indicar, para os tipos de corte e uso VD e IJ, modelos matemáticos estimatórios da resistência à compressão axial dos compósitos:

$$\sigma_c = 5,99 + 2,65B + 1,21C + 1,84BE \quad R^2 = 0,70$$

Corte e uso VD

No modelo matemático, B representa o tipo de cimento adotado (valor 0 para o CPlI E-32 e valor 1 para o CP V-ARI; C representa a idade da

árvore (-1, 0 e 1, para, respectivamente, 3 anos, 5 anos e 7 anos); BE representa a interação entre o tipo de cimento (B) e o tipo de tratamento físico efetuado nas partículas vegetais (0 e 1, para, respectivamente, Lavado e Natural). De acordo com o modelo, a máxima resistência à compressão axial (11,7 MPa) seria obtida, combinando-se os seguintes níveis:

Cimento CP V-ARI + árvore de 7 anos (independentemente da posição de amostragem, ou seja toda a tora) + material Natural (interação com o CP V-ARI).

Corte e uso IJ

$$\sigma_c = 4,39 + 6,43B - 1,20DE \quad R^2 = 0,79$$

No modelo matemático, B representa o tipo de cimento adotado (valor 0 para o CP E-32 e valor 1 para o CP V-ARI); D representa a posição de amostragem (-1, 0 e 1, para, respectivamente, base, meio e topo); E representa o tipo de tratamento físico efetuado nas partículas vegetais (0 e

I, para respectivamente, Lavada e Natural). De acordo com o modelo adotado a máxima resistência à compressão axial (12,0 MPa) seria obtida combinando-se os seguintes níveis:

Cimento CP V-ARI + interação entre a base do tronco (D=-1) e madeira Natural (E=1).

A região do topo da árvore, quando apresenta diâmetro inferior a determinado valor destina-se, via de regra, à geração de energia nas caldeiras. No modelo precedente vislumbrou-se uma forma de valorização desse material, para a fabricação de compósitos, com resistência teórica à compressão axial de 10,8 MPa, propondo-se a seguinte combinação:

Cimento CP V-ARI + interação entre topo (D=1) e material Lavado (E=0).

CONCLUSÕES

O *Eucalyptus grandis* mostrou-se, para determinadas condições, moderadamente inibitório à pega dos cimentos CP II-E-32 e CP V-ARI.

Verificou-se haver interação entre as variáveis: tipo de cimento (II e V), época de corte e de uso (VD- Verão/Dezembro; IJ- Inverno/Julho e VJ- Verão/Julho), idade de corte (3, 5 e 7 anos) e posição de amostragem (base, meio e topo), na resistência à compressão axial do compósito.

Modelos matemáticos obtidos indicaram a adequação do uso do cimento CP V-ARI e, na maior parte dos casos, que o corte das árvores deva ser efetuado durante o inverno.

Partículas obtidas de árvores com 5 anos propiciaram compósitos com resultados mais homogêneos no ensaio de compressão axial.

A lavagem das partículas vegetais não alterou o desempenho dos compósitos submetidos ao ensaio de compressão axial.

AUTOR

ANTONIO LUDOVICO BERALDO é Professor Associado da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP / DCONRU / FEAGRI – Caixa Postal 601 I - Cidade Universitária Zeferino Vaz – Campinas, SP - 13083-875 – E-mail: beraldo@agr.unicamp.br

JOSÉ VITÓRIO DE CARVALHO é Mestre em Engenharia Agrícola pela Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-5733 - cimento Portland de alta resistência inicial, especificação.** Rio de Janeiro, 1991. 5p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-7215 - cimento Portland: determinação da resistência à compressão, método de ensaio.** Rio de Janeiro, 1996. 8p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-11578 - cimento Portland composto, especificação.** Rio de Janeiro, 1991. 8p.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. Standard methods of evaluating the properties of wood-based fiber and particle panel materials. In: ASTM. Annual book of ASTM standards. **Philadelphia**, 1982. (ASTM D-1037-78B).
- BERALDO, A.L. Compósito biomassa vegetal-cimento. In: GHAVAMI K.; TOLEDO FILHO, R.D.; NASCIMENTO, W.J. **Materiais não convencionais para construções rurais.** Campina Grande: Editora Gráfica Marcone, 1997. p.1-48
- BERALDO, A.L. **Généralisation et optimisation de la fabrication d'un composite biomasse végétale-ciment à variations dimensionnelles limitées vis-à-vis des variations de l'humidité.** Nancy, 1994. 222p. Tese (Doutorado). Université Henri Poincaré, Nancy I.
- BERALDO, A.L.; ROLIM, M.M. Efeito de tratamentos sobre a resistência à compressão de compósitos cimento-madeira de reflorestamento. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO Y II INTERNACIONAL DE INGENIERÍA RURAL, Neuquén, Argentina, 1996. **Anais.** Neuquén, 1996. v.10, p. 773-778
- BERALDO, A.L.; SAMPAIO, C.A. Compósitos à base de resíduos vegetais e cimento Portland. In: EBRAMEM – ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 8, Uberlândia, 2002. **Anais.** Uberlândia, 2002. (CD-ROM, p.120-126)
- BIBLIS, E.J.; LO, C. Sugars and others wood extractives: effect on the setting of Southern-pine cement mixtures. **Forest products journal**, v.18, n.8, p.28-34, 1968.
- FISCHER, V.F.; WIENHAUS, O.; RYSSSEL, M.; OLDBRECHT, J. The water-soluble carbohydrates of wood and their influence on the production of lighthweight wood-wools boards. **Holztechnologie**, v.15, n.1, p.12-19, 1974.
- HACHMI, M.; MOSLEMI A.A. Correlation between wood-cement compatibility and wood extractives. **Forest products journal**, v.39, n.6, p.55-58, 1989.

- LEE, A.W.C.; HONG, Z.; PHILLIPS, D.R.; HSE, C.Y. Effect of cement/wood ratios and wood storage conditions on hydration temperature, hydration time, and compressive strength of wood-cement mixtures. **Wood and fiber science**, v.19, n.3, p.262-268, 1987.
- LIGNUM. **Bases technologiques/Matériaux dérivés du bois/Matériaux à base de particules de bois et de liant mineral**. Lignum: Zurich, 1960. 9p.
- MILLER, D.P.; MOSLEMI, A.A. Wood-cement composites: effect of model compounds on hydration characteristics and tensile-strength. **Wood and fiber science**, v.23, n.4, p.472-482, 1991.
- MOSLEMI, A.A.; PFISTER, S.C. The influence of cement/wood ratio and cement type on bending strength and dimensional stability of wood-cement composite panels. **Wood and fiber science**, v.19, n.2, p.165-175, 1987.
- PIMENTEL, L.L. **Telhas onduladas à base de cimento Portland e resíduos de *Pinus caribaea***. Campinas, 2000. 67p. Tese (Mestrado). Faculdade de Engenharia Agrícola. Universidade Estadual de Campinas
- PIMIENTA, P.; CHANDELIER, J.; RUBAUD, M.; DUTREL, F.; NICOLE, H. Étude de faisabilité des procédés de construction à base de béton de bois. **Cahiers du CSTB**, p.12-36, 1994.
- PUGEL, A.D.; PRICE E.W.; HSE C.Y. Composites from southern pine juvenile wood: part 2 - durability and dimensional stability. **Forest products journal**, v.40, n.3, p.57-61, 1990.
- SBS - SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA. <http://www.sbs.org.br>, acesso em 20/12/2000.
- SCHWARZ, H.G. Cement-bonded boards in Malaysia. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FIBER AND PARTICLEBOARD BONDED WITH INORGANIC BINDER, Spokane, 1988. **Proceedings**. Moscow: Idaho University, 1988. v.1, p.91-92.
- SCHWARZ, H.G.; SIMATUPANG, M.H. Einfluß der chemischen Zusammensetzung von portlandzement auf die druckfestigkeit von versuchskörpern aus zement und fichten- oder buchenspänem. **Holz als roh-und werkstoff**, v.41, p.65-69, 1984.
- SIMATUPANG, M. H. Abbaureaktionen von glucose, cellobiose un holz unter dem einfluß von portlandzementmörtel. **Holzforschung**, v.40, n.3, p.149-155, 1986.
- SIMATUPANG, M.H.; SCHWARZ, H.G.; BRÖKER, F.W. Small scale plants for the manufacture of mineral-bonded wood composites. In: WORLD FORESTRY CONGRESS, 8, Jakarta, 1978. **Proceedings**. Jakarta, 1978. v.6, p.98-120
- SIMATUPANG, M.H.; LANGE, H.; KASIM, A.; SEDDIG, N. Influence of wood species on the setting of cement and gypsum. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FIBER AND PARTICLEBOARD BONDED WITH INORGANIC BINDER, Spokane, 1988. **Proceedings**. Moscow: Idaho University, 1988. v.1, p.33-42
- VALENZUELA, W.A. **Contribution à la détermination de l'aptitude d'essences forestières pour la fabrication de panneaux de fibro-ciment**. Gembloux, 1989. 135p. Tese (Doutorado). Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux.
- WEATHERWAX, R.C.; TARKOW, H. Effect of wood on the setting of Portland cement: decayed wood as an inhibitor. **Forest products journal**, v.17, n.7, p.30-32, 1967.
- ZONTA PE.; MACHADO, A.D. **SANEST: sistema de análise estatística**. Piracicaba: ESALQ/USP, 1991.
- ZUCCO, L.L. **Estudo da viabilidade de fabricação de placas de compósitos à base de cimento e casca de arroz**. Campinas, 1999. 118p. Tese (Mestrado). Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas