



FERNANDA ALVARENGA POMARICO

**POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DA MADEIRA
DE CLONES DE EUCALIPTO NA PRODUÇÃO
DE PAINÉIS CIMENTO-MADEIRA**

LAVRAS - MG

2013

FERNANDA ALVARENGA POMARICO

**POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE CLONES DE
EUCALIPTO NA PRODUÇÃO DE PAINÉIS CIMENTO-MADEIRA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Ciência e Tecnologia da Madeira, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Lourival Marin Mendes

LAVRAS-MG

2007

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Coordenadoria de Produtos e
Serviços da Biblioteca Universitária da UFLA**

Pomárico, Fernanda Alvarenga.

Potencial de utilização da madeira de clones de eucalipto na
produção de painéis cimento-madeira / Fernanda Alvarenga
Pomárico. – Lavras : UFLA, 2013.

69 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2007.

Orientador: Lourival Marin Mendes.

Bibliografia.

1. Painéis cimento-madeira. 2. Clones. 3. Eucalipto. 4. Inibição.
I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 674.836

FERNANDA ALVARENGA POMARICO

**POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE CLONES DE
EUCALIPTO NA PRODUÇÃO DE PAINÉIS CIMENTO-MADEIRA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Ciência e tecnologia da Madeira, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 07 de Agosto de 2007.

Dr. Fábio Akira Mori UFLA

Dr. Giovanni Francisco Rabelo UFLA

Dr. Lourival Marin Mendes

Orientador

LAVRAS - MG

2007

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus.

Meus pais Paulo César e Lydia, meu irmão Giovanni, pelo amor, apoio e compreensão nos momentos difíceis. Sintam-se igualmente vitoriosos.

A meu marido Ançano e meu filho Antônio, pelos momentos em família.

À Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Ciências Florestais pela oportunidade.

À FAPEMIG pela concessão da bolsa de estudos e principalmente por financiar o projeto CAG 983/03, sem o mesmo não seria possível a realização deste trabalho.

Ao Professor Lourival Marin Mendes pela orientação, amizade e ensinamentos que certamente serão aplicados no decorrer da vida.

À Companhia Mineira de Metais pela doação dos clones.

Ao professor Fabio Akira Mori pela coorientação.

Ao Professor Giovanni Francisco Rabelo pela participação da banca examinadora.

Ao professor João Vicente de Figueiredo Latorraca pelos esclarecimentos prestados sempre com muito interesse e carinho, mesmo estando tão longe.

Ao professor José Márcio Faria pela amizade durante o curso.

Às amigas de Pós-graduação Pollyana, Marina, Claudinéia e Adriana.

Aos funcionários Wellington, Gilson, Hernani, Clair e Claret.

Aos amigos e colegas Meire, Luana, José Benedito, Rafael, Arthur, Romina, Thais e a todos que contribuíram de alguma forma para a conclusão deste trabalho.

A todos que estiveram presentes em minha vida, muito obrigado!!!

RESUMO

A madeira é um material amplamente utilizado na construção civil, não encontrando substituto em muitas operações nessa área. Isso acontece por ela apresentar ótimas características de resistência mecânica e durabilidade associadas à fácil trabalhabilidade. Porém, a madeira ainda apresenta certas restrições de uso devido, principalmente, à sua anisotropia. Os painéis reconstituídos de madeira podem ser utilizados para reduzir os efeitos indesejáveis associados à madeira bruta e, ao mesmo tempo, manter as características que fazem da madeira um material tão indicado por arquitetos e engenheiros. Nesse contexto, os painéis de cimento-madeira são uma ótima escolha, apresentando boa resistência ao ataque de fungos, bom isolamento térmico e acústico, além de serem parcialmente incombustíveis. Este trabalho foi realizado com os objetivos de verificar a viabilidade técnica da utilização de partículas de madeiras a partir de diferentes clones de Eucalipto na produção de painel cimento-madeira, verificar a viabilidade técnica do potencial de utilização desses clones na produção de painéis cimento-madeira e determinar as propriedades físicas e mecânicas dos painéis produzidos. Para isso foram utilizados 6 clones de Eucalipto, com 5 árvores para cada clone. Foram obtidos discos a 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da altura do tronco. A partir desses discos foram retiradas cunhas para a determinação da densidade básica. As análises químicas feitas foram solubilidade em água quente e fria, extrativos totais, teor de lignina insolúvel e holocelulose. O tratamento em água fria foi o preferido, sendo utilizado no restante das partículas. Foram definidos os parâmetros de prensagem e a quantidade de material utilizada para a confecção dos painéis. Para efeito de comparação, foram feitos painéis com uma mistura, em partes iguais, das partículas dos seis clones e também painéis com partículas provenientes de 4 árvores de *Pinus oocarpa*. Com os painéis prontos, aguardou-se por um tempo de cura de 28 dias. A análise estatística foi feita pelo teste de Scott-Knott, a 5% de significância. Os resultados mostraram ser viável a confecção de painéis de cimento-madeira a partir da madeira de clones de Eucalipto.

Palavras-chave: Painéis cimento-madeira. Clones. Eucalipto. Inibição.

ABSTRACT

The wood is a material thoroughly used in the building site, not finding substitute in a lot of operations in that area. That happens for her to present great characteristics of mechanical resistance and durability associated to the easy workableness. However, the wood still presents certain restrictions of due use, mainly, to his/her anisotropia. The reconstituted panels of wood can be used to reduce the effects undesirable associates to the rude wood and, at the same time, to maintain the characteristics that do such a suitable material of the wood for architects and engineers. In that context, the cement-wood panels are a great choice, presenting good resistance to the attack of mushrooms, good thermal and acoustic isolation, besides they be partially incombustible. This work was accomplished with the objectives of verifying the technical viability of the use of particles of wood starting from different clones of *Eucalyptus* in the production of panel cement-wood to verify the technical viability of the potential of use of those clones in the production of panels cement-wood and to determine the physical and mechanical properties of the produced panels. For that 6 clones of *Eucalyptus* were used, with 5 trees for each clone. They were obtained disks to 0%, 25%, 50%, 75% and 100% of the height of the trunk. To leave of those disks wedges they were removed for the determination of the basic density. The done chemical analyses were solubility in hot and cold, extractive water total, tenor of insoluble lignin and holocelulose. The treatment in cold water was the favorite, being used in the remaining of the particles. They were defined the prensagem parameters and the amount of material used for the making of the panels. For comparison effect, they were made panels with a mixture, in same parts, of the particles of the six clones and also panels with coming particles of 4 trees of *Pinus oocarpa*. With the ready panels, it was awaited by a time of cure of 28 days. The statistical analysis was made by the test of Scott-Knott, to 5% of significância. The results showed to be viable the making of cement-wood panels starting from the wood of clones of *Eucalyptus*.

Keywords: Panels cement-wood. Clones. *Eucalyptus*. Inhibition.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Processo de produção de Painéis de Madeira.....	16
Figura 2	a) Sistema de aquisição de dados e caixa térmica acoplada para os testes de aptidão e b) vista interna da caixa térmica, detalhe das garrafas utilizadas para armazenar as amostras.....	41
Figura 3	Partículas usadas para a confecção dos painéis, em que: a) detalhe do molho, partículas liberando os extrativos e b) partículas secando ao ar livre para produção dos painéis.....	43
Figura 4	Acessório de grampeamento.....	47
Figura 5	Esquema da retirada dos corpos de prova dos painéis.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Tratamentos para a verificação de interação madeira-cimento.	40
Tabela 2	Índice de inibição utilizado para classificar a compatibilidade das partículas de madeira com o cimento.....	42
Tabela 3	Compatibilidade do cimento com os cinco tratamentos das partículas de <i>Eucalyptus</i> spp.....	43
Tabela 4	Parâmetros para confecção do painel.....	44
Tabela 5	Variáveis da prensagem.....	44
Tabela 6	Valores médios de densidade básica por tratamento.....	50
Tabela 7	Análise química da madeira.....	51
Tabela 8	Média das densidades dos painéis por tratamento e razão de compactação.....	51
Tabela 9	Valores médios dos testes físicos com absorção de água, a 2 e a 24 horas e inchamento em espessura, a 2 e 24 horas.....	52
Tabela 10	Valores médios dos testes mecânicos com módulo de elasticidade em kgf/cm ² , Módulo de ruptura em kgf/cm ² , ligação interna em kgf/cm ² e compressão em kgf/cm ²	54

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1	Painéis de cimento–madeira	14
2.2	Produção de painéis cimento-madeira	16
2.2.1	Composição dos painéis.....	17
2.2.2	Cimento.....	17
2.2.3	Madeira.....	19
2.2.4	Água	21
2.2.5	Aditivos químicos.....	22
2.3	Painéis cimento-madeira: processo e aplicações	24
2.4	Limitações na produção de painéis cimento-madeira	26
2.5	A madeira de eucalipto.....	28
2.6	Efeito da madeira sobre a “pega” e o endurecimento do cimento.....	29
2.7	Aptidão dos materiais lignocelulósicos com o cimento	31
2.7.1	Interação cimento-madeira	31
2.7.2	Métodos de avaliação da aptidão.....	33
3	MATERIAL E MÉTODOS	37
3.1	Madeira.....	37
3.2	Análise da densidade e química da madeira	37
3.2.1	Densidade básica.....	37
3.2.2	Análise química.....	38
3.3	Aglomerante	39
3.4	Água	39
3.5	Aditivos químicos.....	39
3.6	Análise de aptidão.....	39
3.7	Tratamento das partículas	42
3.8	Preparo dos painéis	44
3.8.1	Parâmetros dos painéis e da prensagem	44
3.8.2	Cálculo dos componentes do painel.....	45
3.8.3	Manufatura dos painéis madeira-cimento.....	46
3.9	Avaliação das propriedades dos painéis	48
3.10	Análise estatística.....	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
4.1	Densidade básica da madeira.....	50
4.2	Análises químicas.....	50
4.3	Propriedades físicas	51
4.4	Propriedades mecânicas	53
5	CONCLUSÕES.....	56
	REFERÊNCIAS.....	57

ANEXOS.....63

1 INTRODUÇÃO

A madeira, por apresentar características de resistência e durabilidade mesmo sendo um material relativamente leve e fácil de ser trabalhado, é bastante requisitada na construção civil. Ela pode ser usada como viga ou na construção de telhados, portas e esquadrias, entre diversos outros usos. Na qualidade de um material natural, a madeira pode e deve ser usada no intuito de promover no homem a sensação de proximidade com a natureza, proporcionando qualidade de vida. Assim, o uso da madeira como revestimento já é consagrado entre arquitetos e engenheiros civis. No entanto, devido à sua anisotropia, pode apresentar restrições de uso.

O surgimento de novas tecnologias proporcionou o aparecimento de um produto que, ao mesmo tempo, mantém grande parte das qualidades da madeira e não apresenta suas características indesejáveis. Surgiram, assim, os painéis de madeira. Dentre eles destacam-se: compensados, vigas laminadas, LVL, chapas de partículas, OSB e painéis de cimento-madeira. Além das suas vantagens estruturais, o desenvolvimento de painéis de madeira é uma possibilidade para o uso de resíduos das indústrias madeireiras, diminuindo a pressão exercida sobre os ecossistemas florestais.

Os painéis minerais (*mineral-bonded wood*) são obtidos da mistura de partículas de madeira, um aglutinante mineral e aditivos químicos. Apesar de sua larga aceitação e utilização em mercados exigentes, como a Europa e a Ásia, onde sua produção está em torno de 2,5 milhões de metros cúbicos, esse tipo de painel ainda não está inserido comercialmente no mercado brasileiro.

A grande aceitação na utilização desses painéis cimento-madeira deve-se à sua boa trabalhabilidade, grande resistência ao ataque de fungos e cupins, bom isolamento térmico e acústico e por apresentar-se parcialmente incombustível. Com relação à matéria-prima (madeira), sua produção apresenta baixa exigência

quanto a forma, dimensões e defeitos naturais. Além disso, o cimento utilizado como aglutinante tem custo bastante reduzido em relação aos adesivos sintéticos.

A utilização dessas chapas ocorre desde construções civis simples até as mais sofisticadas. Como resultado têm-se maiores rendimentos na construção, o que pode viabilizar a implementação de projetos de interesse social utilizando esses tipos de painéis.

Esses fatores contribuem para que a utilização dos painéis cimento-madeira ganhe uma posição de destaque entre os produtos florestais. Porém, algumas limitações, como a incompatibilidade de algumas espécies e a carência de estudos científicos com espécies florestais brasileiras, podem restringir o emprego destes painéis. Isso ocorre devido à presença de algumas substâncias químicas da madeira, que retardam a “pega” e o endurecimento do composto, prejudicando as propriedades finais dos painéis.

A procura por novas espécies e de tratamentos adequados tem sido o foco de pesquisas no intuito de minimizar os efeitos indesejáveis na produção de painéis de cimento-madeira. As diferentes espécies de *Eucalyptus*, principalmente clones de alta produtividade volumétrica, podem ser promissoras como matéria-prima na fabricação desse tipo de painel.

O plantio de eucalipto no Brasil é um dos mais produtivos no mundo, entretanto, seu aproveitamento é maior nas indústrias de papel e celulose e na siderurgia.

Na medida em que as pesquisas avançam e o aperfeiçoamento dos processos de produção desenvolvidos são confirmados, os painéis de cimento-madeira produzidos com diferentes espécies florestais poderão ser consolidados de maneira similar ao processo de produção de aglomerados convencionais.

O presente trabalho foi realizado com os objetivos de:

1. Verificar a viabilidade técnica da utilização de seis clones de eucaliptos na produção de painéis cimento-madeira;
2. Avaliar as propriedades físicas (absorção de água e inchamento em espessura) dos painéis cimento-madeira;
3. Avaliar as propriedades mecânicas (flexão estática MOE e MOR, compressão e ligação interna) dos painéis cimento-madeira.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Painéis de cimento–madeira

Os painéis cimento-madeira são uma mistura de partículas de madeira, aglutinante mineral (cimento Portland), água e aditivos químicos, consolidados por meio de prensagem a frio.

Historicamente, no âmbito da construção civil, resíduos vegetais de diversas naturezas, combinados com uma matriz aglomerante, vêm sendo empregados há quase um século. Todavia, somente nos últimos anos, com o avanço do conhecimento da microestrutura dos materiais cimentantes, foi possível o aprofundamento das pesquisas desse tipo de material (PIMENTAL e BERHALDO, 2000 citado por FONSECA et al., 2002). Segundo Zucco (1999), os hebreus recorriam às fibras vegetais para reduzir a presença de fissuras em tijolos queimados ao sol, além de torná-los mais leves.

Essa mesma concepção tem sido aplicada em tempos atuais, utilizando-se fibras ou partículas de madeira combinada com cimento Portland e outros materiais inorgânicos, tais como gesso e magnesita (MOSLEMI, 1989).

Relatos atuais mostram que os compósitos de madeira com matriz cimento foram mencionados, pela primeira vez, em 1908. O grande desenvolvimento desses compósitos ocorreu após a Segunda Guerra Mundial (VALENZUELA, 1989).

Beraldo (1994) afirma que o compósito obtido a partir de produtos à base de cimento e partículas de madeira tornou-se de interesse comercial nos anos 1930, com a fabricação de painéis leves cujo ligante era cimento magnesiano. Esses painéis eram conhecidos como “Excelsius”, nos Estados Unidos ou “Heraklit”, na Europa, tendo, em meados dos anos 1950, várias patentes sido depositadas pela sociedade Elmendorf. O mesmo autor também

ressalta que a maior parte das atuais indústrias de painéis utiliza, ainda, os processos derivados dessas patentes.

Em 1960, esse tipo de indústria existia em mais de 28 países (VALENZUELA, 1989). A produção mundial de 2,5 milhões de m³, em 1996, demonstra o potencial desse produto. Entre os países produtores, citam-se: Japão, Alemanha, Rússia, Estados Unidos, Austrália, Holanda, França, Finlândia, Hungria, Costa Rica, Bulgária, Israel, Egito, Índia, Servia, Malásia, China, Canadá, Irã, Indonésia, Dinamarca, Áustria, Reino Unido, Bélgica, México e Portugal (LATORRACA e ALBUQUERQUE, 2002). Porém, a produção de painéis de cimento-madeira no Brasil, ainda inexistente em escala industrial, apesar de ser um produto já consolidado em diversos países (LATORRACA, 2001).

Atualmente, eles são aceitos em muitos países por causa de suas características vantajosas sobre outros painéis (MOSLEMI e PFISTER, 1986), tais como: alta durabilidade, trabalhabilidade similar à dos produtos de madeira, bom comportamento no emprego de pregos e parafusos, alta resistência ao fogo, resistência a mudanças drásticas de temperatura, alta resistência à umidade, alta resistência a fungos e insetos e não contêm formaldeído. Além disso, são adequados a aplicações externas e internas e têm boa aceitação a tratamentos superficiais, como verniz, lâminas e pinturas, entre outros (ELTOMATION WOOD CEMENT BOARD PLANTS, 2003). Essas características os tornam bastante utilizados na construção civil.

Esses painéis possuem uma longa história de aplicação no setor de construção civil na Europa e na Ásia (WATAI, 1996 citado por LOPES, 2004), podendo ser utilizados em residências, pavilhões, estádios e edifícios públicos, presentes em banheiros, lavanderias e cozinhas (DIX, 1989 citado por LATORRACA, 2001). Outro fator para que ocupem posição de destaque entre os produtos florestais é o custo do aglutinante utilizado (cimento) que,

comprovadamente, é bastante inferior ao custo das resinas sintéticas (SIMATUPANG et al., 1978; LEE, 1984; MOSLEMI e AHN, 1980 citados por LATORRACA e IWAKIRI, 2000).

Porém, grande parte dessas possíveis vantagens do compósito pode vir a ser totalmente anulada pela ocorrência de um fenômeno – a incompatibilidade química entre a matéria-prima vegetal e o aglomerante. Esses fatos levaram diversos pesquisadores a buscar soluções que evitassem ou minimizassem o efeito deletério sobre a matriz, causado por determinadas substâncias químicas presentes na madeira, ou outro vegetal, denominadas genericamente de extrativos (BERALDO et al., 2002).

2.2 Produção de painéis cimento-madeira

O processo de produção de painéis de cimento-madeira está apresentado na Figura 1.

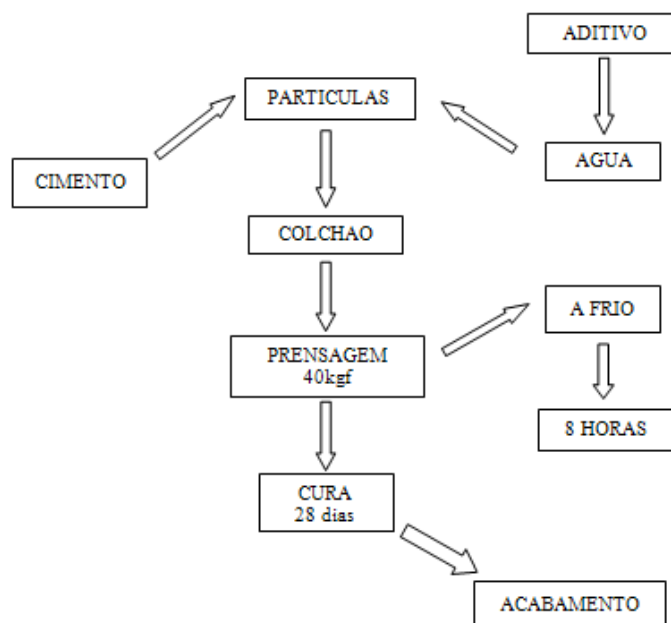


Figura 1 Processo de produção de Painéis de Madeira.

2.2.1 Composição dos painéis

Os painéis cimento-madeira apresentam composição bastante simples, sendo compostos por partículas do tipo Excelsior, strands, flakes ou fibras de materiais lignocelulósicos misturadas com cimento Portland, água e pequena quantidade de aditivos químicos. As partículas de madeira são agregadas e agentes reforçantes, tendo o cimento como material ligante, a água como reagente e os aditivos como catalisadores (OKINO et al., 2003).

2.2.2 Cimento

O cimento, por definição, é um material aglomerante que se apresenta na forma de um pó muito fino. Em contato com a água provoca reações químicas que liberam calor (reação exotérmica) e forma uma pasta capaz de endurecer por secagem natural (LATORRACA, 2000).

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), o cimento Portland foi uma criação do inglês Joseph Aspdin, por volta de 1824. Esse nome foi dado devido à sua cor cinzenta ser semelhante à de uma pedra, oriunda da ilha de Portland, localizada ao sul da Inglaterra, comumente usada para construção nessa época.

O cimento de antigamente nada mais era que uma cal hidráulica artificial com composição e temperatura de cozimento diferentes do cimento Portland atual. Foi somente em 1845 que Isaac Johnson iniciou a produção do que é hoje o produto mais difundido na construção, o cimento Portland (NÃÃS, 1991).

O cimento Portland é composto de clínquer e adições. O clínquer é o principal componente e tem como matérias-primas o calcário e a argila. O clínquer, em pó, tem a peculiaridade de desenvolver uma reação química na

presença da água e, inicialmente, torna-se pastoso e, em seguida, endurece, adquirindo resistência e durabilidade. As adições são as outras matérias-primas que, misturadas ao clínquer, permitem a fabricação dos diversos tipos de cimento. Essas outras matérias-primas, de acordo com as informações de Kattar e Almeida (1997), são o gesso, as escórias de alto-forno, os materiais pozolânicos e os materiais carbonáticos.

O cimento Portland comum é uma referência para comparação com as características e propriedades dos tipos básicos disponíveis no mercado brasileiro (Medeiros, 2003). Os principais tipos de cimentos oferecidos no mercado, de acordo com a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP (2002), são:

- Cimento Portland comum (CP I);
- Cimento Portland composto (CP II);
- Cimento Portland de alto-forno (CP III);
- Cimento Portland pozolânico (CP IV);
- Cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI).

O tipo menos utilizado e mais difícil de encontrar no mercado brasileiro é o cimento Portland CP V-ARI, utilizado para a fabricação de blocos pré-fabricados, processo que requer elevadas temperaturas e uma maior velocidade na secagem.

Durante as reações químicas, quando o cimento é hidratado, ocorre liberação de calor. A quantidade de calor depende, dentre outros fatores, do tipo de cimento, da sua granulometria, da temperatura, do tempo de hidratação, etc. (ABCP, 2002). Os principais produtos hidratados no cimento são os silicatos de cálcio hidratados (C_3S e C_2S) e aluminatos tricálcicos hidratados (C_3A) (Neville, 1982). Grande parte do calor liberado durante a hidratação é atribuída a esses

componentes, C_3S e C_3A , uma vez que são componentes expressivos do cimento que apresentam maior calor de hidratação individualmente. Assim, cimentos com altos teores de C_3S e C_3A potencialmente apresentarão alta temperatura de hidratação, como é o caso do cimento de alta resistência inicial (CP V-ARI) (BATTAGIN e ESPER, 1988, citados por LATORRACA, 2000 e por LOPES, 2004). Por apresentarem essa alta temperatura de hidratação, possuem pega mais rápida e, por isso, normalmente são os mais adequados ao uso em painéis cimento-madeira (MUSOKOTWANE, 1982 citado por LATORRACA, 2000 e por LOPES, 2004). O tempo de pega é definido como o tempo necessário para se obter a temperatura máxima de hidratação e a pasta deixa de ser deformável para pequenas cargas, tornando-se um bloco rígido (BIBLIS e LO, 1968; PETRUCCI, 1987).

O processo de pega é acompanhado por mudanças de temperatura na pasta do cimento e é representado por dois estágios, início e fim da pega. O início corresponde a uma rápida elevação de temperatura e o fim ao pico da temperatura (NEVILLE, 1982).

Após a pega, a massa continua a aumentar em coesão e resistência, ocorrendo a fase do endurecimento (PETRUCCI, 1987). Essa fase pode durar muitos dias e, aos 28 dias de endurecimento, considera-se a massa de cimento com uma resistência relativa de 100% (GIAMMUSSO, 1992). É por isso que os ensaios de resistência são realizados aos 28 dias.

2.2.3 Madeira

A maioria dos materiais lignocelulósicos pode ser utilizada na composição de painéis cimento-madeira, comparados a outros tipos de painéis, como compensados e sarrafeados, por apresentarem menores exigências quanto

a forma, dimensões e defeitos naturais. A maior exigência se refere à sua composição química, que pode interferir na solidificação do cimento.

As essências florestais são as mais utilizadas pelas indústrias na fabricação desses painéis. Dentre elas, as coníferas, por apresentarem menores limitações quanto à cura do cimento, mas podem também ser utilizados resíduos vegetais, como casca de coco, bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz, etc. (CHITTENDEN et al., 1975, citados por LATORRACA, 2000).

A utilização industrial da madeira de eucalipto na produção de painéis cimento-madeira ainda é inexpressiva. Apesar de ser um dos gêneros mais promissores, em termos de utilização comercial, pesquisas científicas foram realizadas apenas procurando investigar a sua aptidão para o uso na manufatura desse tipo de painel.

Estudos realizados com *Eucalyptus globulus*, *E. camaldulensis*, *E. grandis* e *E. urograndis* mostraram resultados satisfatórios em testes quanto às propriedades físicas e mecânicas dos painéis produzidos. Pesquisas demonstram a necessidade de estudos da interação cimento-madeira (LATORRACA, 2000). Conforme trabalho realizado por Jain et al. (1989), citados por Latorraca (2002), dentre as 36 espécies de folhosas estudadas, o *Eucalyptus camaldulensis* foi uma das mais promissoras.

Outras espécies, como *Eucalyptus dunnii*, *E. citriodora* e *E. saligna*, também têm sido testadas. Manzanares et al. (1991) observaram uma variação na aptidão dessas espécies quando utilizavam-se madeiras de diferentes idades. Árvores mais jovens apresentaram piores resultados em relação a árvores mais velhas. Isso é atribuído, segundo os pesquisadores, ao fato de que o conteúdo de taninos, carboidratos, açúcares e outros extrativos pode decrescer na medida em que a idade da árvore aumenta.

O *Eucalyptus dunnii*, segundo Latorraca e Iwakiri (2000), tem possibilidades para o uso em chapas de cimento-madeira. A pesquisa mostrou

resultados satisfatórios para o módulo de elasticidade na flexão estática, mas não tão bons para ligação interna. Apesar disso, conforme o autor, resultados melhores podem ser esperados, uma vez que os tratamentos das partículas aplicadas no estudo contribuíram para os resultados obtidos. Conforme esses pesquisadores, os melhores tratamentos para painéis cimento-madeira são obtidos com as partículas tratadas, ou seja, com a eliminação de grupos de extrativos que podem interferir na interação cimento-madeira.

2.2.4 Água

A água é necessária para que ocorram as reações químicas do aglutinante, no caso o cimento Portland, para os aditivos se dissolverem e também para permitir a mistura do cimento que irá revestir as partículas de madeira uniformemente (SCHIMITZ, 1959, citado por SIMATUPANG et al., 1978, e por LATORRACA, 2000). Esses autores constataram que é necessário adicionar uma quantidade de água superior à quantidade teórica para promover as reações e, durante a cura, o excesso dessa água é evaporada, deixando microporos.

A resistência dos painéis de cimento-madeira, segundo Simatupang et al. (1978), também é muito influenciada pela presença de todos os tipos de poros. Assim, a quantidade de água a ser adicionada deve ser mantida em níveis mínimos. Como ocorre com o concreto, a propriedade de resistência dos painéis de cimento-madeira varia com a quantidade de água adicionada.

A água presente no agregado - material lignocelulósico – se misturará à água adicionada quando houver a mistura dos componentes dos painéis. Portanto, essa água deve ser computada no cálculo da quantidade de água adicionada com relação à relação água-cimento (NEVILLE, 1982). Porém, essa água das partículas de madeira só estará disponível como um líquido se o teor de

umidade destas estiver acima do ponto de saturação das fibras (PSF). Assim, geralmente, equações desenvolvidas para determinar a quantidade de água levam em consideração a umidade no PSF (LATORRACA, 2000).

Outro ponto importante é a contaminação da água por materiais incompatíveis com o cimento, como açúcares e sulfatos, entre outros, que podem causar problemas com a cura do cimento (GIAMMUSSO, 1992; citado por LOPES, 2004). Portanto, a água a ser utilizada deve estar livre desses materiais.

2.2.5 Aditivos químicos

A indústria de aditivos, durante os últimos 40 anos, cresceu enormemente, em função do entendimento de que as propriedades do concreto, tanto no estado fresco como endurecido, podem ser modificadas pela adição de certos materiais.

Os aditivos variam de tensoativos, sais solúveis e polímeros a minerais insolúveis. As finalidades para as quais eles são geralmente utilizados incluem a melhora da trabalhabilidade, aceleração ou desaceleração de tempo de pega e controle do desenvolvimento da resistência. Os aditivos podem ser orgânicos e inorgânicos quanto à sua composição, mas a sua natureza química é a principal característica, ao contrário dos minerais (LATORRACA, 2000).

Simatupang (1986), Simatupang e Lange (1988), citados por Grandi (1995), relataram as tecnologias existentes para a redução do tempo de produção de painéis de cimento-madeira, gesso e magnésio. Os aditivos são usados em pequenas quantidades; os mais comumente utilizados em concretos são os aceleradores da resistência inicial e o melhor acelerador de endurecimento do concreto é o cloreto de cálcio (CaCl_2). A adição de CaCl_2 aos concretos aumenta a velocidade de elevação da resistência, pois aumenta a velocidade de despreendimento de calor nas primeiras horas após a mistura. Sendo assim, este é,

provavelmente, um catalisador das reações de hidratação do C_3S e do C_2S , componentes do cimento (NEVILLE, 1982).

A presença de material lignocelulósico, normalmente, prolonga ou pode impedir a pega do cimento. Com a adição de aditivos aceleradores, principalmente o $CaCl_2$, a ação das substâncias inibidoras do cimento presentes nos materiais pode ser contrabalanceada. Porém, a eficiência da ação desses aceleradores depende do material lignocelulósico empregado, embora, em certas situações, nem mesmo o emprego de aceleradores elimine as barreiras que impedem a adequada reação do cimento em presença desses materiais (BERALDO, 1997).

Estudando quatro diferentes aditivos químicos aceleradores, $CaCl_2$, $MgCl_2$, Na_2SiO_3 e $Al(SO_4)_3$, na concentração de 3%, Latorraca (2000), citado por Lopes (2004), verificou que o $CaCl_2$ obteve resultado satisfatório e o Na_2SiO_3 , os resultados mais insatisfatórios. O mesmo autor estudou, então, outras duas concentrações para o $CaCl_2$, 2% e 4%, e concluiu que o $CaCl_2$, num potencial de 4% em massa de cimento, proporcionou os melhores resultados.

Um importante aspecto da maioria dos aditivos é que eles devem ser usados, fundamentalmente, com base em experiências ou em ensaios quando necessários. A quantidade de aditivo colocado numa mistura deve ser cuidadosamente controlada (NEVILLE, 1982).

Mehta e Monteiro (1994) e Neville (1997) apresentam a classificação dos aditivos, segundo a Norma Americana ASTM C 494-92. De acordo com a nomenclatura americana, eles são designados como aditivos químicos. Tal classificação apresenta os seguintes tipos de aditivos:

- Tipo A – plastificantes (reduzidor de água);
- Tipo B – retardadores (retardadores de pega e endurecimento);
- Tipo C – aceleradores (aceleradores da resistência inicial);

- Tipo D – plastificantes retardadores (reductor de água e retardador de pega e endurecimento);
- Tipo E – plastificantes aceleradores (reductor de água e aceleradores de pega e endurecimento);
- Tipo F – superplastificantes (reductor de água de alta eficiência);
- Tipo G – superplastificantes retardadores (reductor de água de alta eficiência e retardador).

Segundo Souza (1992), alguns aditivos são empregados com o propósito de reduzir o tempo de endurecimento do cimento em painéis cimento-madeira. O acelerador mais comumente utilizado, durante muitas décadas, segundo Neville (1997), foi o cloreto de cálcio, possivelmente por ser eficiente para a aceleração da hidratação dos silicatos de cálcio, principalmente o C_3S , além de ser de custo reduzido.

A quantidade de aditivo a ser adicionada varia de acordo com a espécie que se utilizará (VALENZUELA, 1989) e cujos valores podem variar de 2% a 7% (do peso do cimento).

2.3 Painéis cimento-madeira: processo e aplicações

A tecnologia de produção de painéis cimento-madeira é similar ao processo de produção de aglomerados com resina sintética. Esse tipo de painel apresenta uma composição relativamente simples (LATORRACA, 2001); ele é composto, basicamente, de partículas ou fibras de madeira (agregado), cimento Portland (aglomerante) e água, e a proporção comumente utilizada é de 1:3:1,5, podendo o gesso também ser utilizado. Aditivos químicos têm sido empregados com o propósito de reduzir o tempo de endurecimento do cimento, acelerando o desenvolvimento da resistência. Os aditivos mais comumente utilizados são

cloreto de cálcio e silicato de sódio, acondicionados de 1% a 5% p/p (MOSLEMI, 1998).

Os painéis de cimento-madeira, segundo Moslemi (1998), são produzidos em menor quantidade, quando comparados à produção de aglomerados convencionais. Essa pequena capacidade deve-se à lenta velocidade de cura dos painéis. A madeira é reduzida a partículas, classificadas em sistema de peneiras, não sendo necessária a secagem das mesmas. A madeira, o cimento e a água são misturados juntos para formar o colchão que será levado para a prensagem. A quantidade precisa desses materiais é controlada por um dispositivo eletrônico e a preparação dos aditivos químicos é realizada em tanques especiais, utilizando um sistema controlado automaticamente.

Uma quantidade desses colchões, segundo Moslemi (1998), é depositada sob aparatos onde serão prensados e grampeados por meio de um dispositivo especialmente desenhado. A formação do colchão na estação formadora é realizada sobre aparatos de aço em linha que se movimentam ininterruptamente. Uma mistura contendo partículas finas é depositada para formar as camadas superficiais das chapas e outra, com partículas maiores, forma o miolo. Logo após serem grampeadas, as chapas são resistentes e as mesmas ficam ali por um período de 6 a 8 horas, à temperatura de 60°C. Ao completar o processo de cura, as chapas retornam à prensa onde os grampos são abertos e os aparatos de prensagem retornam para a linha de produção. As chapas são esquadrejadas e estocadas em pátio, por 10 a 14 dias.

Pesquisas nos Japão indicam que, com a inclusão de autoclave na linha de produção e com modificações na formulação dos materiais dos painéis, pode-se eliminar a necessidade de curar os painéis em pátio.

Após a maturação, os painéis são transportados através de uma estufa de secagem, assegurando-se que fiquem com o teor de umidade entre 9% a 10%. Já

aconicionados, os painéis recebem acabamento final para que, então, possam estar disponíveis para comercialização (MOSLEMI, 1998).

Sua provada versatilidade permite, segundo Moslemi (1998), que os painéis de cimento-madeira possam ser utilizados em uma vasta gama de aplicações, superior a qualquer outro tipo de painel. Desde o início dos anos 1960, os painéis de cimento-madeira têm sido utilizados sucessivamente em ambientes com variações climáticas, tais como quente/frio e seco/úmido. Essa única propriedade faz dele um material ideal para uso tanto exterior como interior, em construções civis. Sua aplicação vai além dos usos indicados para o aglomerado convencional, especialmente em ambientes úmidos e com riscos de incêndios, em que o emprego de aglomerados convencionais se torna inadequado.

Dix (1989), citado por Latorraca (2000), destaca o uso para paredes de casas pré-fabricadas, bancadas, pisos, revestimentos de túneis, paredes divisórias, paredes isolantes térmicos e acústicos, portas corta-fogo, forros de casas, etc.

A sua utilização não abrange somente residências, mas também pavilhões, estádios e edifícios públicos, estando presentes em banheiros, lavanderias, cozinhas, etc.

2.4 Limitações na produção de painéis cimento-madeira

As dificuldades encontradas na produção dos painéis são o elevado peso, a lenta velocidade de cura e, principalmente, a seleção de espécies adequadas para a produção. Vários estudos mostram que a capacidade de solidificação do cimento na presença de materiais lignocelulósicos é determinada pela composição química dos mesmos e que o cimento não reage igualmente bem

com todas as espécies de materiais lignocelulósicos (MOSLEMI e PFISTER, 1987).

Os grandes responsáveis pelas diferenças nas reações com o cimento são os extrativos solúveis em água ou álcali e açúcares. Esses extrativos tendem a prolongar o tempo de pega do cimento (HOFSTRAND et al., 1984). Os extrativos são substâncias que podem ser removidas com solventes orgânicos ou água, tanto da madeira quanto da casca, onde normalmente apresentam maiores quantidades, em torno de 20%–40 % e, na madeira, em torno de 1%- 0 % para folhosas. Essas substâncias são resinas, gorduras, gomas, hidrocarbonetos, terpenos, esteróides, alcalóides, álcoois, proteínas, pigmentos, taninos, glicosídeos e carboidratos, entre outros (BROWNING, 1975). Esses extrativos, no caso da produção de painéis cimento-madeira, podem retardar e, em alguns casos, impedir a pega do cimento, sendo necessária a utilização de algum processo para minimizar a influência dessas substâncias sobre a hidratação do cimento. A remoção dessas substâncias pela ação de soluções aquosas ou imobilização das substâncias por meio do recobrimento por uma película protetora (oleosa ou salina) pode melhorar a compatibilidade do material com o cimento (BERALDO et al., 2002).

Quando a água é adicionada ao cimento, ocorrem as reações de hidratação e o calor é liberado. Durante os estágios iniciais de hidratação, os silicatos di e tricálcicos são convertidos em um gel ($\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) e em hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Após isso ocorre um aumento de pH da mistura cimento e material lignocelulósico para, aproximadamente, 12,5, o que facilita a dissolução dos constituintes do material lignocelulósico, particularmente os extrativos do cerne e os carboidratos de peso molecular baixo. Esses componentes podem interferir na hidratação do cimento (SANDERMANN e KOHLER, 1964 citado por EVANS et al., 2000 e por LOPES, 2004).

As reações inibidoras podem se desenvolver na interface material lignocelulósico-cimento ou na matriz e enfraquecer as ligações mecânicas ou químicas entre o material e o cimento. Terpenos, resinas e substâncias graxas podem migrar para a superfície do material, durante a secagem. A formação de uma camada superficial hidrofóbica reduz as ligações de hidrogênio entre o material e o cimento, implicando em redução da resistência na interface (MILLER e MOSLEMI, 1991).

Os compostos fenólicos, tais como os taninos, apresentam a capacidade de se combinar com íons metálicos do cimento, o que pode impedir as reações de hidratação. A incompatibilidade da madeira de *Acacia mangium* com o cimento deve-se à presença de substâncias fenólicas, sobretudo de taninos condensados (TACHI et al., 1988, citados por BERALDO, 1997 e por LOPES, 2004).

Sendo assim, o maior problema tecnológico para a produção desses painéis é que a resistência à adesão depende de várias características dos materiais lignocelulósicos empregados.

2.5 A madeira de eucalipto

Nos últimos anos, o estoque de florestas nativas vem diminuindo consideravelmente, o que tem despertado o interesse de empresas florestais por espécies alternativas que apresentem rápido crescimento, sendo uma das opções o gênero *Eucalyptus* (VALE, 2000).

As espécies do gênero *Eucalyptus* têm sua origem na Austrália, Tasmânia e ilhas da Oceania. São árvores de grande porte e de crescimento rápido, porém, é uma madeira que requer certos cuidados por ocasião do seu processamento, pois possui algumas características desfavoráveis, como

retratibilidade relativamente alta, susceptibilidade ao colapso durante a secagem da madeira serrada e presença das altas tensões de crescimento (MUÑIZ, 2002).

As empresas de produtos florestais, além de concentrar esforços e tecnologia para a produção de florestas energéticas de eucalipto, nos últimos anos, têm direcionado suas atividades também para diversificar produção e produtos, a fim de diluir os riscos e a vulnerabilidade de um único segmento de negócio. Algumas dessas empresas optaram pelo desenvolvimento de clones com alta produtividade volumétrica, provenientes de matrizes selecionadas e melhoradas para usos específicos, como, por exemplo, aqueles destinados à produção de madeira para serraria (ASSIS, 2001).

Nesse contexto, as espécies de *Eucalyptus* estão sendo estudadas e consideradas como alternativas viáveis para a produção de madeira com dimensões e qualidade apropriadas ao processo mecânico.

2.6 Efeito da madeira sobre a “pega” e o endurecimento do cimento

De acordo com Chittenden et al. (1975), citados por Latorraca (2000), em geral, a maioria dos produtos lignocelulósicos pode, teoricamente, ser empregada como matéria-prima para, junto com o cimento, compor as chapas minerais. A exigência maior se refere à composição química desse material, a qual pode afetar a solidificação do cimento. As essências florestais são, geralmente, as mais utilizadas nas indústrias desses painéis, podendo também ser utilizados resíduos vegetais, tais como casca de coco, bagaço de cana, casca de arroz, etc.

A composição natural da madeira inclui diversas substâncias químicas que não fazem parte da estrutura dos tecidos vegetais, mas que participam do metabolismo. Essas substâncias são extraíveis com relativa facilidade da madeira e, por isso, são chamadas de extrativos. Tais substâncias (fenóis, ácidos,

açúcares etc.) podem retardar e, em alguns casos, impedir a pega do cimento, sendo necessária a utilização de algum processo de compatibilização da madeira com a matriz do cimento, para que ocorra a menor influência possível no processo de hidratação (SAVASTANO et al., 2000, citados por FONSECA et al., 2002).

Esses tratamentos podem ser feitos por diversos meios, em geral, determinados em função do uso da peça a ser fabricada ou da disponibilidade tecnológica. Segundo Fonseca et al. (2002) são eles:

- Tratamentos químicos: impregnação da madeira por material quimicamente idêntico ou similar aos extrativos, com a finalidade de dificultar o acesso da água de amassamento ao interior da madeira. Também é possível impregnar a madeira com epóxi;
- Tratamentos físicos: o resíduo pode ser comprimido para que se obtenha maior estabilidade dimensional, maior compactidade e maior massa específica ou pode ser lavado com água ou outros solventes para que seja eliminada a maior parcela de extrativos possível;
- Aceleração de pega: não é propriamente um tratamento, mas sim a aditivação da mistura de cimento com aditivos modificadores de pega para minimizar os efeitos dos extrativos da madeira;
- Mineralização: a madeira é submersa em uma solução salina para que libere extrativos e absorva os íons da solução que, posteriormente, irão cristalizar no interior da fibra. Esse método produz excelentes resultados, porém, diminui a maleabilidade das fibras, tornando-as mais frágeis.

Pode-se, também, analisar o fenômeno da incompatibilidade química pela vertente da matriz, ou seja, deve-se buscar um tipo de aglomerante que seja mais adequado, ou menos sensível, à combinação com a matéria-prima vegetal.

Desse modo, pode-se utilizar o cimento aluminoso (pouco disponível no Brasil) ou um cimento de pega rápida, como, por exemplo, o CP-V-ARI, largamente utilizado na fabricação de pré-moldados. Outros autores recomendam matrizes nas quais o pH seja diminuído, de forma que se consiga aumentar a durabilidade do compósito (JOHN e AGOPYAN, 1993, citados por BERALDO et al., 2002).

Pesquisas têm sido realizadas no intuito de identificar quais são elementos constituintes da madeira afetam com maior intensidade a pega e a solidificação do cimento. Estudos com base no teor de extrativos solúveis em água fria e ou quente são os mais realizados. Gnanaharan e Dhamodaran (1985), citados por Latorraca (2000), por exemplo, estudando extrativos solúveis em água quente e fria e em NaOH (5%) de 13 espécies tropicais, concluíram que as espécies mais e menos promissoras ao uso em chapas de cimento-madeira foram aquelas, respectivamente, que apresentam o menor e maior percentual de extrativos. Oyagade et al. (1994), citados por Latorraca (2000), analisaram a compatibilidade de algumas espécies tropicais e concluíram que, para a espécie que apresentou a melhor compatibilidade com o cimento, por meio do estudo da evolução da temperatura de hidratação, a extração dos extrativos da madeira solúveis em água quente não resultou em melhorias de compatibilidade, porém, para as espécies menos compatíveis, a extração resultou num aumento considerável na compatibilidade.

2.7 Aptidão dos materiais lignocelulósicos com o cimento

2.7.1 Interação cimento-madeira

A adesão entre a madeira e o cimento pode ser física, química ou uma combinação de ambas. A adesão física ocorre pelo entrelaçamento interfacial, enquanto que a química ocorre por pontes de hidrogênio, segundo Coutts e

Kightly (1984), citados por Latorraca (2000). Hachmi e Campbell (1989) relatam que o desenvolvimento da adesão entre o cimento e a madeira pode ser dividido em três estágios. O primeiro é um estágio químico, no qual a madeira e o cimento apresentam alta mobilidade que diminui com o tempo. O segundo estágio é químico e físico; o cimento começa a cristalizar e desenvolve uma matriz que envolve a madeira. O terceiro estágio é físico e pode continuar por muitos anos.

A principal fonte de resistência nos produtos sólidos da pasta, ou seja, silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), sulfoaluminatos de cálcio, hidróxido de cálcio e grãos de clínquer não hidratado, é a existência de “forças de atração de Van der Waals”, segundo Mehta e Monteiro (1994). De acordo com esses autores, a adesão entre duas superfícies sólidas pode ser atribuída a essas forças. Os pequenos cristais de C-S-H e sulfoaluminatos de cálcio possuem área específica e capacidade de adesão elevadas. Esses produtos de hidratação do cimento Portland tendem a aderir fortemente, não só entre si, como também a outros sólidos com área específica baixa, tais como hidróxidos de cálcio, grãos de clínquer anidro e partículas de agregado miúdo e graúdo.

Ahn e Moslemi (1980) relatam que o cimento sofre interferência por açúcares de formação cristalina, afetando, dessa maneira, a possível interação entre madeira e o cimento, e a interação interna do próprio cimento, o que segundo Weatherwax e Tarkow (1964), resulta em chapas de qualidades inferiores.

A responsabilidade pela interação inibitória entre o cimento e a madeira é atribuída aos açúcares simples, que migram para a superfície da madeira durante a secagem. Provavelmente, tais açúcares formam uma camada inibitória, reduzindo a velocidade da reação de hidratação do cimento. Além desses açúcares, extrativos não polares, tais como terpenos, resinas e gorduras, podem, provavelmente, também reduzir a resistência dos painéis de cimento-

madeira. Segundo eles, a água e os sais dissolvidos, principalmente o hidróxido de cálcio, são absorvidos pela madeira causando inchamento. Tal inchamento ocorre principalmente nas hemiceluloses devido à sua estrutura amorfa. Como os cátions metálicos e os íons hidróxidos migram para o interior da parede celular, determinadas substâncias da madeira, como extrativos, açúcares simples hemiceluloses, começam a formar complexos, solúveis e ou insolúveis, com os sais dissolvidos. Esses processos, segundo os autores, cessam ligações de hidrogênio e formam novos complexos iônicos, favorecendo o inchamento da madeira. Alguns desses extrativos e hemiceluloses dissolvem-se em meio alcalino e difundem-se na interface cimento-madeira. Os carboidratos complexarão com cálcio, alumínio e cátions férricos por meio de hidrólise sobre menoses e galactoses ou de grupos de ácido glucorônico para retardar a taxa de hidratação do cimento e reduzir sua cristalinidade e resistência, segundo Hachmi e Campbell (1989), citados por Latorraca (2000).

Neville (1997) relata que a ação de retardadores de pega e endurecimento do cimento pode ser explicada pelo fato de eles modificarem o crescimento dos cristais ou sua morfologia, sendo absorvidos sobre a camada de cimento hidratado que se forma rapidamente, tornando lento o crescimento dos núcleos dos cristais de hidróxido de cálcio.

2.7.2 Métodos de avaliação da aptidão

Na literatura, alguns métodos têm sido sugeridos para se avaliar a aptidão da madeira com o cimento. Um dos mais difundidos e utilizados é o proposto por Sandermann e Kohler (1964), citado por Hachmi et al.(1990), que consiste em mensurar a elevação da temperatura de hidratação durante o processo de endurecimento da mistura cimento-madeira-água.

Weatherwax e Tarkow (1964) desenvolveram um índice para medir a extensão da inibição da madeira, baseando-se no aumento do tempo para endurecimento do cimento, como mostrado na Equação 1, a seguir:

$$I = t'^2 - t^2 \cdot \left(\frac{100}{t^2} \right) \quad (1)$$

Em que:

t'^2 = tempo requerido para que a temperatura máxima da mistura madeira, cimento e água seja atingida;

t^2 = tempo requerido para que a temperatura máxima da mistura cimento e água seja atingida.

Hofstrand et al. (1984), além do tempo de hidratação, incorporaram também na equação (demonstrada na Equação 2) a temperatura máxima da mistura cimento-madeira-água e cimento-água, além da variação máxima do tempo e da temperatura.

$$I = 100 \cdot t'^2 - \left(\frac{t'^2 \cdot T'^2}{t^2} \right) - \left(\frac{T^2 \cdot S'^2}{T^2} \right) - \left(\frac{S^2}{S'^2} \right) \quad (2)$$

$$S'^2 = \frac{\Delta T'^2}{\Delta t'^2}$$

$$S^2 = \frac{\Delta T^2}{\Delta t^2}$$

Em que:

t^2 = tempo para se atingir a temperatura máxima de hidratação da mistura água-cimento;

t^2 = tempo para se atingir a temperatura máxima de hidratação da mistura água-cimento-madeira;

T^2 = temperatura máxima atingida pela mistura cimento-água;

T'^2 = temperatura máxima atingida pela mistura cimento-madeira-água;

S^2 = variação máxima de temperatura por hora para mistura cimento-água;

S'^2 = variação máxima de temperatura por hora para mistura cimento-madeira-água.

Hofstrand et al. (1984) consideraram espécies com baixo e alto índice de inibição como sendo aquelas que obtiveram valores inferiores a 10% e superiores a 50%, respectivamente e, entre 10% e 50%, índice moderado de inibição.

Outro método é o baseado no tempo para alcançar a temperatura máxima de hidratação, descrito por Weatherwax e Tarkow (1964), citados por Lopes (2004) e chamado de índice de inibição. Por meio dele, espécies misturadas com o cimento que levam um período de tempo de 15 horas para atingir a temperatura máxima são consideradas apropriadas para a manufatura de painéis; já as que alcançam mais de 20 horas para atingir essa temperatura podem ser consideradas altamente inibidoras (HOFSTRAND et al., 1984).

A resistência de corpos-de-prova cilíndricos é utilizada para determinar a compatibilidade de várias espécies com o cimento Portland (LEE et al., 1986 citados por Latorraca, 2000 e por Lopes 2004), o que é utilizado também para avaliar a resistência de um concreto (NEVILLE, 1982).

Além desses métodos de avaliação da compatibilidade, existem ainda outros que utilizam a evolução da temperatura de hidratação para gerar equações, como é o caso da empregada por Hachmi et al. (1990). Eles utilizam valores de temperatura máxima e tempo de hidratação para determinar o que eles

chamam de razão do índice de temperatura máxima e consideraram espécies adequadas aquelas que obtiveram uma elevação de temperatura acima de 60°C. As inadequadas são aquelas que não excederam a 50°C e as intermediárias as que tiveram uma elevação entre 50°C e 60°C.

Segundo Latorraca (1996), o mais importante são os resultados das propriedades físicas e mecânicas dos painéis. Portanto, torna-se claro que os valores obtidos para as propriedades dos painéis são também utilizados para determinar a aptidão das espécies. Porém, o estudo da evolução da temperatura tem grande valia, uma vez que se pode dispensar, em determinada circunstância, todo o trabalho de ter que produzir painéis para se obter resposta a respeito da aptidão ao uso de determinadas espécies.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Madeira

Foram utilizados neste estudo seis clones de *Eucalyptus urophylla*, provenientes da Companhia Mineira de Metais, instalada na cidade de Vazante, MG. Coletaram-se cinco árvores de cada clone e, após a identificação, as toras foram levadas à Unidade Experimental de Produção de Painéis de Madeira da Universidade Federal de Lavras, em Lavras, MG, para o processo de produção. Além desses, foram confeccionados painéis com *Pinus oocarpa*, para servirem como referência e também realizou-se a manufatura de painéis com mistura dos clones (MIX).

Essas árvores foram seccionadas proporcionalmente da base ao fuste, obtendo-se quatro toras. Foram extraídos discos das porções: base, 25%, 50%, 75% e topo de cada árvore. Essas seções foram utilizadas nas análises química e física (densidade).

As toras foram laminadas para posterior utilização na produção de compensados multilaminados. Os resíduos da laminação, arredondamento das toras, passaram por um moinho martelo, para serem transformados em partículas, sendo estas submetidas a peneiramento mecânico. O material utilizado foi aquele que passou por peneira de 2 mm e ficou retido na de 0,64 mm.

3.2 Análise da densidade e química da madeira

3.2.1 Densidade básica

O material utilizado para a mensuração da densidade básica foi parte dos discos (cunhas opostas) extraídos de cada uma das árvores, obtendo-se, assim, a média de densidade por clone. A determinação desses valores é de grande importância, uma vez que a quantidade de madeira para produção dos painéis está diretamente relacionada ao seu peso. A densidade foi obtida por ensaios, de acordo com a Norma ABNT NBR 11941/2003.

3.2.2 Análise química

Para a realização das análises químicas, foi utilizado o material que restou dos discos utilizados para a determinação da densidade da madeira. Esse material foi passado na plaina, obtendo-se a serragem, que foi submetida à secagem ao ar livre. Após a secagem, a serragem passou em um moinho Willey. O material selecionado para análises foi aquele que atravessou a peneira de 40 mesh e ficou retido na de 60 mesh, sendo acondicionado em ambiente climatizado, à temperatura de $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ e a $60\pm 5\%$ de umidade relativa.

Amostras foram preparadas para a determinação das substâncias químicas presentes na madeira, especialmente os extrativos. Determinaram-se os extrativos solúveis em água fria e em água quente, extrativos totais, teor de lignina insolúvel e holocelulose.

A solubilidade da madeira em água, fria e quente, foi determinada de acordo com o padrão estabelecido em norma da Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel (1974) M 4/68.

O teor de extrativos totais foi determinado de acordo com o padrão estabelecido em norma da Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel (1974) M 3/69.

O teor de lignina (Klason) foi determinado de acordo com procedimentos descritos por Gomide e Demuner (1986).

A porcentagem de holocelulose foi calculada por meio da Equação 3:

$$H(\%) = 100 - \% ET - \% TLI \quad (3)$$

Em que:

ET = Extrativos Totais

TLI = Teor de lignina insolúvel

3.3 Aglomerante

O aglomerante utilizado foi o cimento Portland ARI-V (alta resistência inicial), fabricado por Holcim, na cidade de Barroso, MG.

3.4 Água

A água foi utilizada como um dos constituintes do painel, sendo ela tratada.

3.5 Aditivos químicos

O aditivo usado foi o cloreto de cálcio, pois é eficaz na aceleração do endurecimento e da pega do cimento, conforme descrito por Latorraca (2000).

3.6 Análise de aptidão

Para essa avaliação utilizaram-se partículas peneiradas, que passaram na peneira de 0,61mm e foram submetidas a tratamentos (Tabela 1) para a verificação da influência de extrativos na interação madeira-cimento.

Tabela 1 Tratamentos para a verificação de interação madeira-cimento.

Tratamento	Tipo	Período
T1	Água fria	24h
T2	Água quente	6h
T3	Água + NaOH (1%)	24h
T4	Água + NaOH (0,7%)	24h
T5	Água + NaOH (0,4%)	24h
Testemunha	-	-

Este ensaio consistiu em mensurar, de forma sistemática, a evolução da temperatura da mistura madeira-cimento durante certo período de tempo. O monitoramento dessa temperatura de reação é utilizado como parâmetro para se determinar o índice de inibição da pega ou endurecimento do cimento.

Para a medição da temperatura foram utilizados sensores termopares. Esses termopares eram acoplados a um sistema de aquisição de dados de fabricação da Yocogawa, modelo DC100 –12–11–1D –Data Collector, no qual os dados eram gerados e armazenados. As leituras de temperaturas em cada cabo conectado eram realizadas em intervalos de um minuto, durante um tempo total de 24 horas. Posteriormente, os dados foram transferidos para um microcomputador e processados por meio do aplicativo computacional Microsoft Excel.

Um sistema hermeticamente fechado foi projetado para colocar a mistura cimento-madeira-água e acoplar o cabo termopar, de modo que o calor obtido da reação exotérmica do cimento não dissipasse para o ambiente. Adaptaram-se quatro garrafas térmicas com capacidade de 1 litro no interior da caixa térmica, totalmente isolada por lã de vidro. Cada termopar atravessava a tampa da caixa e era inserido na amostra dentro da garrafa térmica (Figura 2).



Figura 2 a) Sistema de aquisição de dados e caixa térmica acoplada para os testes de aptidão e b) vista interna da caixa térmica, detalhe das garrafas utilizadas para armazenar as amostras.

As partículas, o cimento e a água eram misturados em um béquer, no qual o tempo decorrido para a mistura total desses componentes não excedia a cinco minutos, sendo transferidos imediatamente para um saco plástico (4 x 20cm). Em seguida, o cabo termopar era inserido na mistura, a qual era fechada e envolvida com uma folha de alumínio. O conjunto, já com o cabo conectado, era colocado dentro das garrafas térmicas e a caixa térmica fechada hermeticamente. Cada ensaio era composto de quatro repetições.

As quantidades de cimento e de partículas de madeira absolutamente seca foram de 200g e 15g, respectivamente, mantendo-se assim uma relação madeira-cimento de 1:13. Para o cálculo da água necessária utilizou-se a Equação 4, sugerida por Souza (1994), citada por Lopes (2004).

$$\text{ÁGUA(g)} = \text{taxa água:cimento} \cdot \text{cimento(g)} + \text{madeira} \cdot 0,3 - \left(\frac{\text{UM(\%)}}{100} \right) \quad (4)$$

Em que:

UM = umidade da madeira

Os índices de inibição foram calculados de acordo com a Equação 2 de Hostrand et al. (1984), utilizada por Lopes (2004). A equação, além do tempo de hidratação, incorpora também a temperatura máxima da mistura cimento-madeira-água e cimento-água, e da variação máxima do tempo e da temperatura.

Para classificar a compatibilidade das partículas de madeira com o cimento foi utilizada a classificação de Okino et al. (2003), também utilizada por Lopes (2004), conforme Tabela 2.

Tabela 2 Índice de inibição utilizado para classificar a compatibilidade das partículas de madeira com o cimento.

Índice de inibição (%)	Classificação
$I < 10$	Baixa
$10 \leq I < 50$	Intermediária
$50 \leq I \leq 100$	Alta
$I > 100$	Muito Alta

Fonte: Okino et al. (2003).

3.7 Tratamento das partículas

O tratamento em água fria, que apresentou o menor índice de inibição (Tabela 3), foi o utilizado na retirada dos extrativos das partículas.

Tabela 3 Compatibilidade do cimento com os cinco tratamentos das partículas de *Eucalyptus* spp.

Tratamento	T. Máx (°C)	Tempo (h)	S Max. (°C/h)	Índice Calculado	Inibição
T1-Água fria	44,2	9,96	3,5	1,3	Baixa
T2-Água quente	41,6	11,82	2,8	6,3	Baixa
T3-Água+NaOH 1%	41,4	12,62	3,2	7,8	Baixa
T4-Água+NaOH 0,7%	45,2	10,89	4,1	2,5	Baixa
T5-Água+NaOH 0,4%	33,6	17,08	1,4	16,9	Moderada
Testemunha	42,4	10,43	2,9	2,6	Baixa

As partículas foram colocadas em recipientes e adicionou-se água fria, até total cobertura das mesmas, que ficaram imersas em água por um período de 24 horas (Figura 3a). A água foi retirada e as partículas foram filtradas e lavadas em água corrente, até obter uma coloração clara da água. Após tratamento, as partículas foram secas ao ar livre (Figura 3b).



a



b

Figura 3 Partículas usadas para a confecção dos painéis, em que: a) detalhe do molho, partículas liberando os extrativos e b) partículas secando ao ar livre para produção dos painéis.

3.8 Preparo dos painéis

3.8.1 Parâmetros dos painéis e da prensagem

No estudo das propriedades dos painéis de madeira-cimento foram utilizados os parâmetros para o painel e para prensagem listados nas Tabelas 4 e 5, respectivamente.

Tabela 4 Parâmetros para confecção do painel.

Parâmetros do painel	Valor
Dimensões	49,5 cm de largura
	49,5 cm de comprimento
	1,5 cm de espessura
Relação madeira:cimento	1:2,5
Relação água:cimento	1:1,5
Taxa de água hidratação:cimento	0,25
Quantidade de aditivo	CaCl ₂ (3% em relação à massa do cimento)
Porcentagem de perdas	6%
Densidade	1,2 g/cm ³

Tabela 5 Variáveis da prensagem.

Parâmetros da prensagem	Valor
Tipo de prensagem	A frio
Pressão	40 kgf/cm ²
Tempo total de prensagem e grampeamento	24 horas

Após serem desgrampeados, os painéis ficaram em câmara climatizada por um período de 28 dias, correspondente ao tempo da cura do cimento.

3.8.2 Cálculo dos componentes do painel

Para cálculo dos componentes de cada painel, foi utilizada a metodologia utilizada por Souza (1994), de acordo com:

a) Determinação do peso do painel (Equação 5):

$$PC = \text{comprimento} \cdot \text{largura} \cdot \text{espessura} \cdot \text{peso específico (seco)} \cdot \text{perdas} \quad (5)$$

b) Determinação da quantidade de cimento (Equação 6) e madeira (Equação 7) para o painel seco:

$$Cimento(g) = \frac{PC}{\left(+ \text{ taxa madeira : cimento} + \text{ taxa água hidratação : cimento} \right)} \quad (6)$$

$$Madeira(g) = \frac{PC \times \text{ taxa madeira : cimento}}{\left(+ \text{ taxa madeira : cimento} + \text{ taxa água hidratação : cimento} \right)} \quad (7)$$

c) Determinação da quantidade de cimento (Equação 8), madeira (Equação 9), água (Equação 10) e aditivo (Equação 11):

$$CIMENTO(g) = cimento(g) \times \left(1 - \frac{\text{aditivo}\%}{100} \right) \quad (8)$$

$$MADEIRA(g) = madeira(g) \times \left(1 - \frac{UM\%}{100} \right) \quad (9)$$

$$ADITIVO (g) = cimento (g) \times \left(\frac{aditivo\%}{100} \right) \quad (10)$$

$$ÁGUA (g) = taxa\ água : cimento \times cimento (g) + madeira \times 0,3 - \left(\frac{UM (\%)}{100} \right) \quad (11)$$

Em que:

UM = umidade da madeira

d) Determinação do peso total do painel (Equação 12):

$$PT (g) = CIMENTO (g) + MADEIRA (g) + ADITIVO (g) + ÁGUA (g) \quad (12)$$

e) Cálculo da quantidade de material que irá para a prensa (Equação 13):

$$MP = PESO\ TOTAL \times \left(1 - \frac{PERDAS}{100} \right) \quad (13)$$

3.8.3 Manufatura dos painéis madeira-cimento

Inicialmente foi feito o cálculo de cada componente, ou seja, as partículas de madeira, o cimento Portland ARI-V, a água e o aditivo químico cloreto de cálcio ($CaCl_2$). A metodologia empregada foi sugerida por Souza (1994), utilizada por Latorraca (1996) e Lopes (2004).

Devidamente pesados, os componentes foram misturados em uma betoneira para homogeneização. Primeiramente, as partículas de madeira foram colocadas na betoneira e, com a betoneira ligada, a água foi adicionada lentamente já com o aditivo químico diluído. Para se evitar o embolamento das

partículas. Em seguida, foi colocado lentamente o cimento e deixou-se a betoneira funcionando por 8 minutos. Após 4 minutos, a betoneira foi desligada e, com a ajuda de uma espátula, a massa era desprendida do interior da betoneira para que a homogeneização fosse feita por completo. Após esse processo, a betoneira era ligada novamente para os 4 minutos finais da mistura.

Retirada da betoneira, a massa de cada painel era devidamente pesada, separada e distribuída sobre chapas de alumínio untadas com óleo diesel para facilitar a retirada do painel após sua prensagem e grampeamento.

Na chapa de alumínio foram colocadas duas barras de ferro com espessura de 15 mm e dois sarrafos de madeira para controlar as dimensões e a espessura do painel. Em seguida, era sobreposta outra chapa de alumínio, também untada com óleo diesel, formando, assim, três camadas, sendo três painéis por clone.

A prensa fria carregada com os três painéis foi fechada a uma pressão de 40 kgf/cm². A pressão era aplicada até que os colchões atingissem a espessura dos separadores e o grampeamento era efetuado, mantendo-se os painéis sobre pressão por 8 horas. Os painéis permaneceram grampeados por 24 horas (Figura 4).



Figura 4 Acessório de grampeamento.

Após as 24 horas, os grampos eram retirados e os painéis levados para o esquadreamento e retirados os corpos de prova para os ensaios físicos e mecânicos. Em seguida, os mesmos eram empilhados cuidadosamente, separados por tabiques, para garantir secagem uniforme até a cura final de 28 dias e, após esse período, foram ensaiados para a determinação das propriedades físicas e mecânicas.

3.9 Avaliação das propriedades dos painéis

Para a avaliação das propriedades físico-mecânicas dos painéis adotaram-se os procedimentos recomendados pela norma alemã DIN (1982), com as devidas modificações e a norma americana AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL - ASTM 1037 (1997).

As propriedades avaliadas foram: ligação interna (LI), flexão estática (módulo de elasticidade - MOE e módulo de ruptura - MOR), compressão paralela (CP), inchamento em espessura (IE) e absorção em água (AA) durante dois períodos, um de 2 e outro de 24 horas.

Na Figura 5 é mostrado um diagrama para retirada dos corpos-de-prova dos painéis.

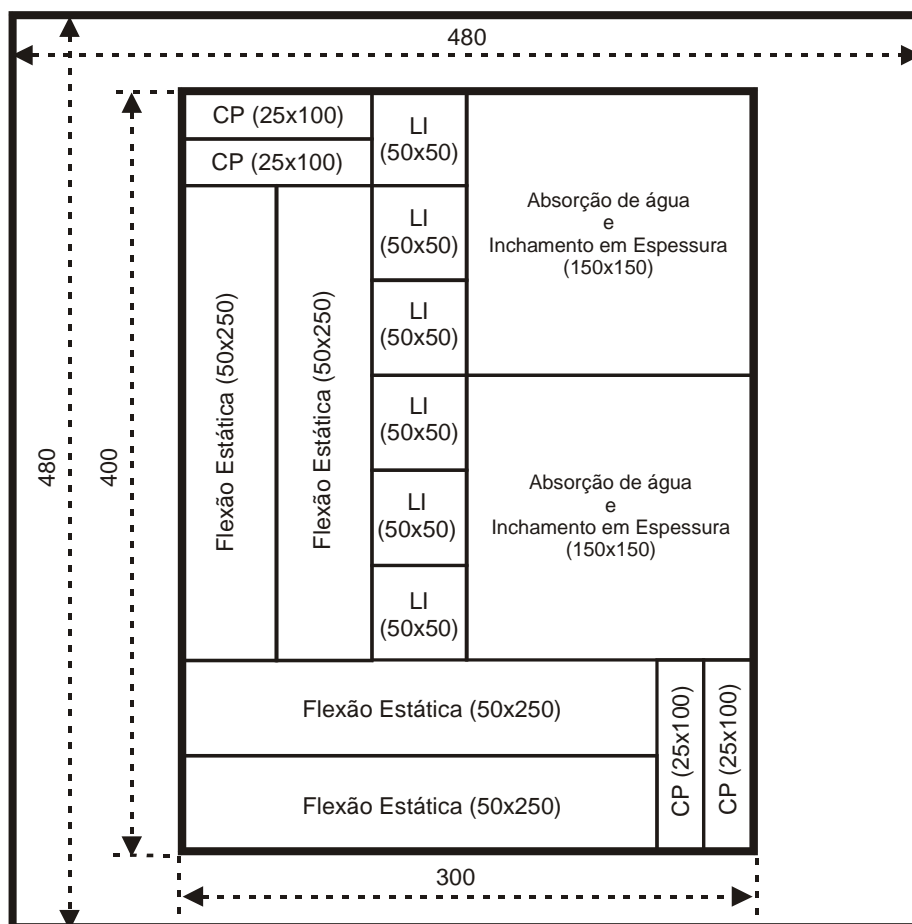


Figura 5 Esquema da retirada dos corpos de prova dos painéis.

3.10 Análise estatística

Para a análise dos dados utilizou-se o delineamento inteiramente casualizado com três repetições para cada tratamento. Foi efetuada análise de variância (ANOVA) e o teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Densidade básica da madeira

Na Tabela 6 são apresentados os valores médios de densidade básica obtidos por clone de *Eucalyptus*.

Tabela 6 Valores médios de densidade básica por tratamento.

Tratamento	Densidade básica média, g/cm ³
Clone 62	0,53
Clone 19	0,65
Clone 36	0,58
Clone 28	0,52
Clone 26	0,59
Clone 58	0,56
Pinus	0,50

Pode-se observar que o clone 28 apresenta a menor densidade média, o clone 19 possui maior densidade e os valores apresentam uma amplitude de 0,13 g/cm³. A densidade encontra-se em faixa ideal para laminação e geração de partículas, com média de 0,57 g/cm³ e coeficiente de variação de 8,24%.

4.2 Análises químicas

A análise química da madeira apresentou valores de extrativos totais de 6,35% a 8,13% (Tabela 7). Segundo Silva (2002), citado por Lopes (2004), para madeira de *Eucalyptus grandis*, foi encontrado um valor médio de 4,6% de extrativos totais.

A quantidade de extrativos totais encontrados na madeira dos clones é superior aos valores encontrados na literatura, o que pode ter comprometido a compatibilidade desta com o cimento.

Tabela 7 Análise química da madeira.

Clones	Análises				
	Solubilidade (%)		Extrativos totais	Teor de lignina	Holocelulose
	Água fria	Água quente			
62	4,26	6,14	6,35	22,76	70,89
19	6,46	8,13	8,81	26,19	65,00
36	6,15	7,45	8,91	26,72	64,37
28	4,82	6,47	8,65	29,21	62,14
26	3,46	6,33	6,91	24,12	68,97
58	5,68	7,46	8,52	26,47	65,01

4.3 Propriedades físicas

Os valores médios de densidade dos painéis por clone são mostrados na Tabela 8. Os clones 62 e 28, juntamente com o *Pinus*, apresentaram valores próximos ao proposto para a produção dos painéis neste trabalho ($1,2 \text{ g/cm}^3$) e os demais apresentaram valores superiores.

Tabela 8 Média das densidades dos painéis por tratamento e razão de compactação.

Tratamentos	Densidade do painel (g/cm^3)	Razão de compactação
Clone 62	1,21	2,28
Clone 19	1,29	1,98
Clone 36	1,29	2,22
Clone 28	1,23	2,37
Clone 26	1,30	2,20
Clone 58	1,30	2,32
<i>Pinus</i>	1,22	2,44

Observam-se também, na Tabela 8, valores referentes à média de razão de compactação que é dada pelo quociente da densidade do painel pela da madeira. É um importante parâmetro, pois, quando ela é alta, indica a formação

de um colchão de maior espessura. Dessa forma, as características mecânicas acabam sendo melhoradas (ligação interna, compressão, flexão); em contrapartida, as características físicas são pioradas, pois existe uma maior quantidade de partículas sob compressão e, quando expostas à umidade, essas forças são liberadas, causando maiores alterações dimensionais. A faixa ideal é aquela acima de 1,4 (IWAKIRI, 2005). Nesse sentido, todos os painéis apresentaram valores acima destes.

Na Tabela 9 podem-se observar os valores de absorção de água e inchamento em espessura, em 2 e 24 horas.

Tabela 9 Valores médios dos testes físicos com absorção de água, a 2 e a 24 horas e inchamento em espessura, a 2 e 24 horas.

Tratamento	Inchamento 2h	Inchamento 24h	Absorção 2h	Absorção 24h
Clone 62	1,48 a	1,91 b	12,50 b	16,06 b
Clone 19	0,27 a	0,46a	7,97 a	10,59 a
Clone 36	1,07a	2,60 b	8,00 a	10,87 a
Clone 28	0,70 a	1,03 a	7,97 a	11,05 a
Clone 26	0,78 a	2,18 a	8,66 a	11,03 a
Clone 58	0,18 a	0,89 a	6,77 a	9,68 a
MIX	0,88 a	0,89 a	2,92 a	6,12 a
<i>Pinus</i>	13,44 c	21,50 b	9,42 b	11,64 b

Médias seguidas de, pelo menos, uma mesma letra não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste de Tukey.

Para absorção de água, verifica-se que, a 2 horas, o clone que apresentou maior aumento em peso foi o de número 62, sendo estatisticamente igual ao *Pinus*, que também apresentou alta absorção de água.

Os demais clones, juntamente com o MIX, apresentaram valores estatisticamente iguais e menores que os citados anteriormente.

Latorraca (2002) encontrou valores médios de absorção de água para as seguintes espécies: *Eucalyptus pellita*, 15,86% e 20,27%; *Corimbia citriodora*, 14,13% e 15,69%; *E. urophylla*, 12,90% e 16,21% e, para *E. robusta*, de 18,74%

e 22,22%, para 2 horas e 24 horas, respectivamente. Dessa forma, os valores encontrados para os clones, Pinus e Mix apresentaram menores valores, em absorção de água tanto a 2 como a 24 horas.

Na Tabela 9 são apresentados, ainda, valores da propriedade física de inchamento em espessura, com 2 horas e 24 horas de imersão em água dos painéis, para os diferentes tratamentos.

Os clones 19, 28, 26 e 58, juntamente com o MIX, foram os que apresentaram menores inchamentos em espessura em 2 horas. Os clones 62 e 36 apresentaram valores intermediários, enquanto o Pinus apresentou o maior valor de inchamento.

Para o inchamento em espessura a 24 horas, somente o Pinus apresentou-se estatisticamente diferente, com 21,5%. Os clones se mostraram estatisticamente iguais.

Os valores encontrados para os clones estão próximos aos exigidos pelo processo de BISON (1978), citado por Latorraca (2002), que considera valores máximos de 0,8% para 2 horas e 1,8% para 24 horas.

4.4 Propriedades mecânicas

Na Tabela 10 são apresentados valores das propriedades mecânicas de módulo de elasticidade, módulo de ruptura, ligação interna e compressão para os diferentes tratamentos. Ainda na tabela podem-se verificar os valores obtidos por meio de ensaios de compressão. O clone 58 e os painéis de *Pinus* foram os que apresentaram maior valor para esta variável, sendo estatisticamente iguais.

Um grupo de valores de compressão intermediário foi visualizado, no qual se encontram os clones 19, 36 e 26, com valores estatisticamente iguais.

Tabela 10 Valores médios dos testes mecânicos com módulo de elasticidade em kgf/cm², Módulo de ruptura em kgf/cm², ligação interna em kgf/cm² e compressão em kgf/cm².

Tratamento	MOE	MOR	Ligação interna	Compressão
Clone 62	12357,49 a	42,56 a	5,51 b	94,33 a
Clone 19	14346,16 a	45,06 a	4,06 a	111,83 b
Clone 36	13814,67 a	43,46 a	5,25 b	114,92 b
Clone 28	12225,84 a	42,77 a	4,96 b	100,17 a
Clone 26	13974,46 a	35,65 a	5,00 b	107,25 b
Clone 58	16990,45 a	37,26 a	3,94 a	122,42 c
<i>Pinus</i>	13160,25 a	46,41 a	3,63 a	108,08 c
MIX	12206,50 a	37,16 a	4,68 b	75,75 a

Médias seguidas de, pelo menos, uma mesma letra não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste de Tukey.

Os menores valores obtidos foram com os clones 62 e 28, juntamente com o MIX. Apesar dessa variação, todos esses valores estão superiores ao encontrado por Latorraca (2000) que, para painéis produzidos com madeira de *E. urophylla*, encontrou 66,86 kgf/cm².

Na Tabela 10 são apresentados, ainda, os valores de módulo de elasticidade (MOE) à flexão estática dos painéis.

Estatisticamente, não houve diferença significativa entre as médias avaliadas para os clones, *Pinus* e MIX. Contudo, o clone 58 apresentou o maior valor de módulo de elasticidade com 16990,45 kgf/cm². Já o menor valor encontrado foi para o MIX, com o valor de 12206,50 kgf/cm².

Okino et al. (2003), citados por Lopes (2004), afirmam que o valor mínimo exigido no processo industrial Bison (1978) é em torno de 30590 kgf/cm². Latorraca (2000) encontrou valores em torno de 18754,94 e 34650,93 kgf/cm² para *E. citriodora* e *E. urophylla*, respectivamente. Os valores de MOE encontrados não foram satisfatórios, comparados aos encontrados na literatura.

Os valores de ligação interna dos painéis encontram-se na Tabela 10. Os maiores valores verificados foram para os clones 62, 36, 28 e 26, além do MIX, que se apresentaram com médias estatisticamente iguais. Em contrapartida, os

clones 19 e 58, juntamente com o Pinus, se mostraram estatisticamente iguais e com menores valores de ligação interna.

A exigência mínima do processo Bison (1978), citado por Lopes (2004), é de $4,0 \text{ kgf/cm}^2$. Isso significa que os painéis apresentaram, em geral, um bom desempenho para essa propriedade, com exceção do clone 58, que apresentou um valor de $3,94 \text{ kgf/cm}^2$, que ainda é bem próximo do exigido.

Para o módulo de ruptura não houve diferenças estatísticas entre as médias dos tratamentos analisadas. Porém, o painel confeccionado a partir de Pinus foi o que apresentou o maior valor ($46,41 \text{ kgf/cm}^2$), enquanto o clone 26 foi o que mostrou o menor valor, com $35,65 \text{ kgf/cm}^2$.

O MOR é um importante parâmetro mecânico, pois dá idéia do quanto o painel resiste, quando submetido a uma força máxima, indicando sua aplicação estrutural.

5 CONCLUSÕES

- É viável a confecção de painéis de cimento-madeira a partir da madeira de clones de *Eucalyptus urophylla*.
- Para absorção de água tanto em 2 quanto em 24 horas todos os clones, *Pinus* e MIX apresentaram valores abaixo dos encontrados na literatura.
- Os clones apresentaram valores de inchamento em espessura a 2 e 24 horas dentro dos mencionados em normas e literatura, enquanto *Pinus* e MIX se apresentaram valores fora desses parâmetros.
- Os painéis apresentaram um bom desempenho no que se refere às características mecânicas em comparação com dados da literatura, apresentando valor inferior apenas para módulo de elasticidade.

REFERÊNCIAS

AHN, W. Y.; MOSLEMI, A. SEM examination of Wood-Portland Cement Bonds. **Wood Science**, Seoul, v. 13, n. 2, p. 77 – 82, 1980.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. Standard methods of evaluating the properties of wood-base fiber and particle panel materials. In: ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARD, ASTM D 1037-78B. Philadelphia, 1982.

ASSIS, T.F. Estratégia de melhoramento para a obtenção de madeira de qualidade para laminação e serraria. In: SEMINÁRIO MADEIRA DE EUCALIPTO: TENDÊNCIAS E USOS, 2001, Curitiba. **Anais...** Curitiba: Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná; Universidade Federal do Paraná, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Uma breve história do cimento Portland**. 2002. Disponível em: < <http://www.abcp.org.br>>. Acesso em: 10 mar. 2007.

BERALDO, A. L. Compósitos biomassa vegetal-cimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 1997, Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: UFPB/Gráfica Marcone, 1997. p. 3-48.

BERALDO, A. L. et al. Compósitos à base de resíduos vegetais e cimento Portland. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 8., 2002, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: UFU, 2002. p. 85-90.

BIBLIS, E. J.; LO, C.F. Sugar and other wood extratives: effect on the setting of southern pine-cement mixture. **Forest Products Journal**, Madison, v.8, n.8, p.28-34, Aug. 1968.

BROWNING, B. L. **The chemistry of wood**. New York: Robert E. Krieger Publishing Company, 1975. 689p.

ELTOMATION WOOD CEMENT BOARD PLANTS. Apresenta informações sobre os produtos à base de cimento e madeira da indústria. Disponível em: <<http://www.eltomation.nl>>. Acesso em: 20 dez. 2004.

FONSECA, F.de O.; LIMA, A.M. de; MACEDO, A.N., TEIXEIRA, M.M. Compósito cimento-madeira com resíduos provenientes da indústria madeireira da Região Amazônica. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 8., 2002, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: UFU, 2002.

GIAMMUSSO, S. E. **Manual do concreto**. São Paulo: Pini, 1992. 161p.

GRANDI, L.A.C. **Placas pré-moldadas de argamassa de cimento e pó de serra**. 1995. p. 124. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995.

HACHMI, M.; CAMPBELL, A. G. Wood- cement chemical relationships. In: THE 1ST INORGANIC BONDED FIBER COMPOSITES SYMPOSIUM; Inorganic bonded wood and fiber composite materials. Session II: Raw Material Considerations. **Proceedings...** USA, 1989. v. 1, p. 43-47.

HACHMI, M.; MOSLEMI, A. A.; CAMPBELL, A. G. A new technique to classify the compatibility of wood with cement. **Wood Science and Technology**, New York, v.24, n.4, p. 345- 354, 1990.

HOFSTRAND, A. D.; MOSLEMI, A. A.; GARCIA, J.F. Curing characteristics of wood particles from nine northern Rocky Mountain species mixed with Portland cement. **Forest Products Journal**. Madison, v. 34, n. 2, p. 57-61, 1984.

KATTAR, J. E.; ALMEIDA, N. A. **Cimento Portland**. São Paulo: Holdercrim Brasil, 1997. 43 p.

LATORRACA, J. V. F. **Estudo da viabilidade do uso da espécie *Eucalyptus dunnii* (Maid) na manufatura de painéis de madeira-cimento**. 1996. 191 p. Dissertação (Mestre em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1996.

LATORRACA, J. V. F. ***Eucalyptus spp.* na produção de painéis de cimento-madeira**. 2000. 191p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

LATORRACA, J. V. F. Painéis de cimento-madeira: composição, processo de produção, características e aplicações. In: SEMINÁRIO DE INDUSTRIALIZAÇÃO E USOS DE MADEIRA DE REFLORESTAMENTO, 2.; SIMPÓSIO FLORESTAL DO RIO GRANDE DO SUL, 6., Caxias do Sul, 2001. **Anais...** Caxias do Sul: Universidade de Caxias do Sul, 2001, p. 99- 106.

LATORRACA, J. V. F.; ALBUQUERQUE, C. E. C. de. Produção de painéis cimento-madeira de eucalipto. In: SEMINÁRIO SÓLIDOS DE EUCALIPTO: avanços Científicos e Tecnológicos, 1., 2002, Lavras. **Anais...** Lavras: UFLA, 2002.

LATORRACA, J. V. F.; IWAKIRI, S. Efeito do tratamento das partículas de *Eucalyptus dunnii* (Maid), da variação da relação madeira-cimento e do uso de aditivos sobre as propriedades físicas e mecânicas de chapas de madeira-cimento. **Cerne**, Lavras, v. 6, n. 1, p. 68-76, 2000.

LOPES, Y. L. V. **Utilização da madeira e cascas de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden na produção de painéis cimento-madeira**. 2004. 60 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

MANZANARES, K. et al. Aptitud del material de raleo de três espécies forestales para formar aglomerados com cimento. **Revista Forestal Baracoa**, La habana, v. 21, n. 1, p. 59-73, 1991.

MEDEIROS, H. A. de A. **A versatilidade do cimento brasileiro**. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br>>. Acesso em: 10 mar. 2007.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, 1994. 309 p.

MILLER, D. P.; MOSLEMI, A. A. Wood-cement composites: effect of model compounds on hydration characteristics and tensile strength. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 23, n. 4, p. 472 – 482, Oct. 1991.

MOSLEMI, A. A. Emerging technologies in mineral-bonded wood and fiber composites. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE PRODUTOS SÓLIDOS DE MADEIRA DE ALTA TECNOLOGIA, 1., ENCONTRO SOBRE TECNOLOGIAS APROPRIADAS DE DESDOBRO, SECAGEM E UTILIZAÇÃO DE MADEIRA DE EUCALIPTO, 1., 1998, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: UFV, 1998. p. 144-156.

MOSLEMI, A.A. Wood-cement panel products: coming of age. In: THE 1ST INORGANIC BONDED FIBER COMPOSITES SYMPOSIUM; Inorganic Bonded wood and fiber composite materials. Session I: State of the art in mineral-bonded boards. **Proceedings...** USA, 1998. v. 1, p. 12-18.

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**, Madison, v. 19, n. 2, p. 165 – 175, Apr. 1987.

MUÑIZ, G. I. B. Fatores que limitam a utilização da madeira de *Eucalyptus*. In: SEMINÁRIO SÓLIDOS DE EUCALIPTO: avanços científicos e tecnológicos, 1.; 2002, Lavras. **Anais...** Lavras: Ufla, Lavras, 2002.

- NÃÃS, I. de A. Argamassa, concreto e materiais cerâmicos. In: _____. **Construções rurais: materiais**. Rio de Janeiro: Livro Técnico e Científico, 1991. p. 63-103.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2.ed. São Paulo: Pini, 1997.
- NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. São Paulo: Pini, 1982. 738p.
- OKINO, E. Y. A. et al. Cement-bonded wood particleboard with a mixture of eucalypt and rubberwood. **Cement & Concrete Composites**, Barking, v. 25, n. 1, p. 1-6, Jan. 2003
- PETRUCCI, E. G. R. **Concreto armado Portland II**. Rio de Janeiro: Globo, 1987. 307 p.
- SIMATUPANG, M. H.; SCHWARZ, G. H.; BRÖKER, F.W. Small plants for the manufacture of mineral-bonded wood composites. In: **WORLD FORESTRY CONGRESS**, 8., 1978, DJakarta. **Special Paper...** Jakarta: Department of Agriculture, 1978. 21 p.
- SOUZA, M. R. **Durability of cement-bonded particle board made conventionally and carbon dioxide injection**. 1994. 123 p. These (Doctor of Philosophy) – University of Idaho, Idaho, 1994.
- SOUZA, M. R. **Effect of carbon dioxide gás in manufacturing cement-bonded particle board**. 1992. 121 p. Dissertação (Master of Science) – University of Idaho, idaho, 1992.
- VALE, R.S. **Efeito da desrama artificial no crescimento e na qualidade da madeira de clones de eucalipto, em sistema agro-silvo-pastoril**. 2000. 95 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2000.

VALENZUELA, W. **Contribution a la determination de l'aptitud d'essences forestieres pour la fabrication de panneaux de fibro-ciment.** Gembloux: Faculté des Sciences Agronomiques, 1989. 134p.

VIROC PORTUGAL - INDÚSTRIAS DE MADEIRA E CIMENTO, S.A. **O que é cimento?** Disponível em: <<http://www.secil.pt/prod.madcim.html>>. Acesso em: 26/ set. 2002.

WEATHERWAX, R. C.; TARKOW, H. Effect of wood on setting of Portland cement. **Forest Products Journal**, Madison, v.14, n. 12, p. 567 – 570, Dec.1964.

ZUCCO, L.L. **Estudo da viabilidade de fabricação de placas de compósitos à base de cimento e casca de arroz.** 1999. 118 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

ANEXOS

ANEXO A	Página
TABELA 1A Análise de variância para absorção de água a 2 horas.....	64
TABELA 2A Distribuição de médias para teste de absorção de água a 2 horas.....	64
TABELA 3A Análise de variância de absorção de água a 24 horas.....	64
TABELA 4A Distribuição das médias de absorção de água a 24 horas.....	65
TABELA 5A Análise de variância de inchamento em espessura a 2 horas.....	65
TABELA 6A Distribuição das médias para inchamento em espessura a 2 horas.....	65
TABELA 7A Análise de variância para inchamento em espessura a 24 horas..	66
TABELA 8A Distribuição das médias para inchamento em espessura a 24 horas.....	66
TABELA 9A Análise de variância para compressão.....	66
TABELA 10A Distribuição das médias para compressão.....	67
TABELA 11A Análise de variância para MOE.	67
TABELA 12A Distribuição das médias para MOE.....	67
TABELA 13A Análise de variância para ligação interna.....	68
TABELA 14A Distribuição das médias para ligação interna.....	68
TABELA 15A Distribuição das médias para ligação interna.....	68
TABELA 16A Distribuição das médias para ligação interna.....	69

TABELA 1A Análise de variância de absorção de água a 2 horas.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Clone	7	300,2073	42,8867	12,894	0,0000
Erro	40	133,0396	3,3259		
Total	47	433,2470			
CV(%)	22,73				
Média geral	8,0250	Número de observações: 48			

TABELA 2A Distribuição de médias para teste de absorção de água a 2 horas.

Tratamentos	Médias
Pinus	2,9150 a1
Clone 58	6,7700 a2
Clone 19	7,9683 a2
Clone 28	7,9716 a2
Clone 36	8,0017 a2
Clone 26	8,6567 a2
Mix	9,4200 a2
Clone 62	12,4967 a3

Médias seguidas de, pelo menos, uma mesma letra não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste Scott-Knott.

TABELA 3A Análise de variância de absorção de água a 24 horas.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Clone	7	31,0266	44,2895	13,799	0,0000
Erro	40	128,3860	3,2096		
Total	47	438,4126			
CV(%)	16,47				
Média geral	10,88	Número de observações: 48			

TABELA 4A Distribuição das médias de absorção de água a 24 horas.

Tratamentos	Médias
Pinus	6,1200 a1
Clone 58	9,6783 a2
Clone 19	10,5867 a2
Clone 28	10,8700 a2
Clone 36	11,0333 a2
Clone 26	11,0533 a2
Mix	11,6417 a2
Clone 62	16,0617 a3

Médias seguidas de, pelo menos, uma mesma letra não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste Scott-Knott.

TABELA 5A Análise de variância de inchamento em espessura a 2 horas.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Clone	7	729,7903	109,9700	99,062	0,0000
erro	31	34,4134	1,1101		
Total	38	804,2038			
CV(%)	33,46				
Média geral	3,1492	Número de observações: 39			

TABELA 6A Distribuição das médias para inchamento em espessura a 2 horas.

Tratamentos	Médias
Clone 19	0,4620 a1
Clone 28	0,6960 a1
Clone 26	0,7840 a1
Clone 58	0,8900 a1
Mix	1,2380 a1
Clone 62	1,9116 a2
Clone 36	2,5960 a2
Pinus	13,4483 a3

Médias seguidas de, pelo menos, uma mesma letra não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste Scott-Knott.

TABELA 7A Análise de variância para inchamento em espessura a 24 horas

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	7	2126,0804	303,7257	186,321	0,0000
erro	31	50,5337	1,6301		
Total	38	2176,6142			
CV(%)	30,10				
Média geral	4,24	Número de observações: 39			

TABELA 8A Distribuição das médias para inchamento em espessura a 24 horas.

Tratamentos	Médias
Clone 58	0,1800 a1
Clone 19	0,2720 a1
Mix	0,8820 a1
Clone 28	1,030 a1
Clone 36	1,0680 a1
Clone 62	1,4750 a2
Clone 26	2,1840 a2
Pinus	21,5083 a3

Médias seguidas de, pelo menos, uma mesma letra não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste Scott-Knott.

TABELA 9A Análise de variância para compressão.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	7	17426,4062	2489,4866	17,838	0,0000
erro	88	12281,2500	139,5596		
Total	95	29707,6562			
CV(%)	11,32				
Média geral	104,3437	Número de observações: 96			

TABELA 10A Distribuição das médias para compressão.

Tratamentos	Médias
Pinus	75,7500 a1
Clone 62	94,3333 a2
Clone 28	100,1667 a3
Clone 26	107,2500 a3
Mix	108,0833 a3
Clone 19	111,8333 a4
Clone 36	114,9167 a4
Clone 58	122,4167 a4

Médias seguidas de, pelo menos, uma mesma letra não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste Scott-Knott.

TABELA 11A Análise de variância para MOE.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	7	202180962,1262	28882994,58	1,404	0,2139
erro	87	1789430960	20568171,95		
Total	94	1,9916E+0009			
CV(%)	33,35				
Média geral	13599,14	Número de observações: 95			

TABELA 12A Distribuição das médias para MOE.

Tratamentos	Médias
Pinus	12206,500000 a1
Clone 28	12225,833333 a1
Clone 62	12357,416667 a1
Mix	13160,250000 a1
Clone 36	13814,666667 a1
Clone 26	13974,416667 a1
Clone 19	14346,166667 a1
Clone 58	16990,545455 a1

Médias seguidas de, pelo menos, uma mesma letra não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste Scott-Knott.

TABELA 13A Análise de variância para ligação interna

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	7	41,0762	5,8680	3,203	0,0043
erro	98	179,5399	1,8320		
Total	105	220,6161			
CV(%)	28,96				
Média geral	4,67	Número de observações: 106			

TABELA 14A Distribuição das médias para ligação interna

Tratamentos	Médias
Mix	3,634167 a1
Clone 58	3,943636 a1
Clone 19	4,054615 a1
Pinus	4,689333 a2
Clone 28	4,961538 a2
Clone 26	5,000714 a2
Clone 36	5,248462 a2
Clone 62	5,506000 a2

Médias seguidas de, pelo menos, uma mesma letra não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste Scott-Knott.

TABELA 15A Análise de variância para módulo de ruptura

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	7	1360,1607	194,3086	1,397	0,2166
erro	88	12237,8326	139,0662		
Total	95	13597,9933			
CV(%)	28,48				
Média geral	41,41	Número de observações: 96			

TABELA 16A Distribuição das médias para módulo de ruptura

Tratamentos	Médias
Clone 26	35,653636 a1
Mix	37,162727 a1
Clone 58	37,263846 a1
Clone 62	42,562500 a1
Clone 28	42,770000 a1
Clone 36	43,464167 a1
Clone 19	45,062500 a1
Pinus	46,409231 a1

Médias seguidas de, pelo menos, uma mesma letra não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste Scott-Knott.