

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**PRODUÇÃO E PROPRIEDADES DE PAINÉIS DE FIBRA
DE COCO VERDE (*Cocos nucifera* L.) EM MISTURA COM
CIMENTO PORTLAND**

JOANA MENDES FERRAZ

**ORIENTADOR: PROF. DR. CLÁUDIO H. S. DEL MENEZZI
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

**PUBLICAÇÃO: PPGEFL.DM – 2011
BRASÍLIA/DF: FEVEREIRO – 2011**

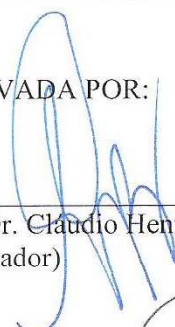
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

PRODUÇÃO E PROPRIEDADES DE PAINÉIS DE FIBRAS DE COCO VERDE
(*Cocos nucifera l.*) EM MISTURA COM CIMENTO PORTLAND

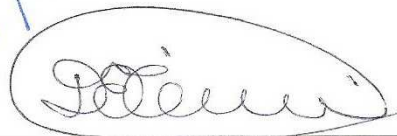
JOANA MENDES FERRAZ

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS, DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL, DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

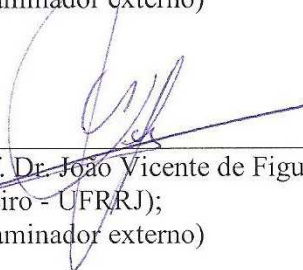
APROVADA POR:



Prof. Dr. Cláudio Henrique Del Menezzi (Departamento de Engenharia Florestal, UnB);
(Orientador)



Prof. Dr. Divino Eterno Teixeira (Laboratório de Produtos Florestais);
(Examinador externo)



Prof. Dr. João Vicente de Figueiredo Latorraca (Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - UFRRJ);
(Examinador externo)

Prof. Dr. Joaquim Carlos Gonzalez (Departamento de Engenharia Florestal, UnB);
(Examinador suplente)

Brasília, 25 de fevereiro de 2011.

FICHA CATALOGRÁFICA

FERRAZ, JOANA MENDES

Produção e propriedades de painéis de fibra de coco verde (*Cocos nucifera* L.) em mistura com cimento Portland [Distrito Federal] 2011.

xi, 89p. 210 x 297 mm (EFL/FT/UnB, Mestre, Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia)

Departamento de Engenharia Florestal

- | | |
|----------------------|-------------------------------------|
| 1. Painel de cimento | 2. Coco verde |
| 3. Compatibilidade | 4. Propriedades físicas e mecânicas |

I. EFL/FT/UnB II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FERRAZ, J. M. (2011). Produção e propriedades de painéis de fibra de coco verde (*Cocos nucifera* L.) em mistura com cimento Portland. Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais, Publicação PPGEFL.DM-159/2011. Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 89 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Joana Mendes Ferraz

TÍTULO: Produção e propriedades de painéis de fibra de coco verde (*cocos nucifera* L.) em mistura com cimento Portland

GRAU: Mestre ANO: 2011

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Joana Mendes Ferraz

Agradecimentos

Aos meus pais, Mia e Lucas, expresso a minha eterna gratidão pelo apoio, incentivo e dedicação presentes em todas as etapas da minha vida.

Ao meu amado e sempre presente namorado, Pedro Moreira, por todo o amor, carinho, paciência e apoio dados incondicionalmente.

Ao meu orientador professor Dr. Cláudio Henrique Del Menezzi, pela orientação, amizade e estímulos à elaboração e execução desta dissertação.

Aos pesquisadores Divino Eterno Teixeira, Mario Rabelo e Esmeralda Okino do LPF/Serviço florestal por todo o conhecimento compartilhado e pelo auxílio na execução do trabalho.

Ao LPF/Serviço Florestal e seus funcionários – João, Ricardo, Lopes, Lula e Fernando - pela contribuição para a realização deste trabalho.

Aos profissionais da Engenharia Florestal – Juraci e Vandui - pela contribuição na execução desse trabalho.

À Polícia Federal pelo empréstimo do microscópio eletrônico de varredura;

À Sabrina, amiga essencial para todas as horas de trabalho, de estudo e de diversão.

À Cristiane, pelas horas de estudo e pelos congressos.

Aos meus irmãos – Lisa e Ian – e aos meus tios – Rachel, Raphael, Fátima e Paulo – que apesar da distância estiveram sempre presentes, me apoiando.

À minha querida avó por ser sempre tão atenciosa e compreensiva.

Aos pequenos Alice, Gabriel, Benjamin e Bia, por fazerem o mundo mais feliz.

À Luiza, ao Giovanni pelo apoio e carinho dados sempre.

À Juliana, pelo apoio e por me ouvir sempre.

À família Ribeiro por estar sempre presente.

Às minhas amigas Carol, Mila, Vivi, Mírian, Camila, Leiliane, Stella, Glauce e Débora pela amizade e incentivo.

À CAPES, pela bolsa de mestrado.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram, participaram ou incentivaram o desenvolvimento desta dissertação, expresso aqui os meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

PRODUÇÃO E PROPRIEDADES DE PAINÉIS DE FIBRA DE COCO VERDE (*Cocos nucifera* L.) EM MISTURA COM CIMENTO PORTLAND

Autor: Joana Mendes Ferraz

Orientador: Cláudio Henrique Soares Del Menezzi

Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais

Brasília, Fevereiro de 2011.

Os objetivos do presente estudo foram avaliar o desempenho da fibra do coco (*Cocos nucifera* L.) para a confecção de compostos de cimento Portland, por meio do estudo da compatibilidade química do coco com o cimento, dos tratamentos das partículas de coco para melhorar esta compatibilidade e das propriedades físicas e mecânicas dos painéis. Para o estudo de compatibilidade foram feitos três tratamentos prévios do coco verde - imersão em água a temperatura ambiente por 72 horas (água fria), imersão em água a 80°C por 90 minutos (água quente) e imersão em solução aquosa de NaOH 5% por 72 horas (NaOH) –, além da adição de 4% de CaCl₂ à mistura e o coco in natura. No ensaio de inibição, mediu-se a evolução da temperatura de hidratação do cimento na ausência e na presença das fibras de coco in natura e tratadas (água fria, água quente e NaOH), além da adição de 4% de CaCl₂. Posteriormente, foram escolhidos três tratamentos (adição de 4% CaCl₂, água quente e NaOH) que obtiveram melhores índices de inibição e duas relações cimento/fibra de coco (3:1 e 4:1) para a confecção de 24 painéis com densidade de 1,20 g/cm³. Após 28 dias de cura, de cada painel foram retirados corpos de prova para a sua caracterização. Esta caracterização foi feita por meio dos ensaios de flexão estática (MOE, MOR), compressão paralela (COMP), ligação interna (LI), inchamento em espessura (IE) e absorção de água (ABS) (2 e 24 horas de imersão em água) conduzidos de acordo com a norma NBR 14810-3 (ABNT, 2002). O ensaio de inibição classificou a fibra in natura como de “extrema inibição”, ratificando a necessidade de se fazer um tratamento. Os tratamentos feitos na fibra do coco influenciaram, positivamente, a compatibilidade entre o cimento e o coco. Os painéis produzidos com fibras tratadas com água quente e com a adição de CaCl₂ apresentaram-se resistentes, no entanto as fibras de coco tratadas com NaOH produziram um painel com propriedades físicas e mecânicas insatisfatórias.

Palavras chave: Compostos minerais, cimento, fibra de coco, compatibilidade, propriedades físicas e mecânicas.

ABSTRACT

PRODUCTION AND PROPERTIES OF COIR (*Cocos nucifera* L.) FIBER PANELS MIXED WITH PORTLAND CEMENT.

Author: Joana Mendes Ferraz

Advisor: Cláudio Henrique Soares Del Menezzi

Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais

Brasília, February of 2011.

The objectives of the present study were to assess the performance of coir fiber (*Cocos nucifera* L.) for manufacturing Portland cement composites, through the study of the chemical compatibility of coir fiber with cement, the particle treatments used to improve such compatibility and of the panels' physical and mechanical properties. For the compatibility assessment, three coir pretreatments were tested – immersion in water at room temperature for 72 hours (cold water); immersion in water at 80°C (176°F) for 90 minutes (hot water); and immersion in NaOH 5% aqueous solution for 72 hours (NaOH) – aside from adding 4% of CaCl₂ to the mixture and in natura coir fiber. A hydration essay was conducted, and consisted in measuring the temperature evolution of cement hydration in absence and presence of in natura coir fibers, treated fibers (cold water, hot water and NaOH) and addition of a 4% CaCl₂. Later, three treatments (adding 4% of CaCl₂, hot water and NaOH – due to their better hydration indexes) and two cement:coir fiber ratio (3:1 and 4:1) were chosen for manufacturing 24 panels with 1,20 g/cm³. After 28 days of setting, five specimens were cut from each panel for properties characterization. This characterization was made through static bending (MOE, MOR), parallel compression (COMP), internal bond (LI), thickness swelling (IE) and water absorption (ABS) (2 and 24 hours water immersion) tests, all of them performed according to NBR 14810-3 standard (ABNT, 2002). The hydration test rated in natura coir fiber as “extreme inhibition”, ratifying the need to apply treatments. Coir fiber treatments influenced positively the compatibility between coir fiber and cement. Panels produced with fibers treated with hot water immersion and with CaCl₂ adding were resistant, but coir fibers treated with NaOH produced a board with unsatisfying physical and mechanical properties.

Keywords: Mineral composites, cement, coir, compatibility, physical and mechanical properties.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	XI
-------------------------	-----------

LISTA DE FIGURAS	XII
-------------------------	------------

1. INTRODUÇÃO GERAL	1
1.1. OBJETIVO GERAL	2
1.2. HIPÓTESE GERAL	2
2. REVISÃO GERAL DE BIBLIOGRAFIA	3
2.1. ADESIVOS INORGÂNICOS	3
2.2. FIBRAS NATURAIS	4
2.3. PAINÉIS MINERAIS	9
2.3.1. Painel de cimento reforçado com fibras	10
2.3.2. Vantagens e desvantagens da Utilização de Materiais baseados em Compostos Cimento-Madeira	11
3. MATERIAL E MÉTODOS GERAL DO TRABALHO	13
3.1. COCO VERDE	13
3.2. TRATAMENTOS FEITOS NA FIBRA DO COCO VERDE	15
3.2.1. Sem tratamento	15
3.2.2. Imersão em água fria	15
3.2.3. Imersão em água quente (80°C)	15
3.2.4. Imersão em solução de Hidróxido de Sódio (NaOH)	16
3.3. ADIÇÃO DE CLORETO DE CÁLCIO (CaCl ₂)	16
3.4 CIMENTO PORTLAND	16

CAPÍTULO 1	18
-------------------	-----------

EFEITO DO TRATAMENTO DAS FIBRAS DO COCO (<i>COCOS NUCIFERA</i> <i>L.</i>) SOBRE A COMPATIBILIDADE COM O CIMENTO PORTLAND	18
---	-----------

1. INTRODUÇÃO	18
1.1. OBJETIVO	19
1.2. HIPÓTESE	19
2. REVISÃO DE BIBLIOGRAFIA	20

2.1. COMPATIBILIDADE ENTRE CIMENTO E MATERIAL LIGNOCELULÓSICO	20
2.2. MÉTODOS PARA MELHORAR A COMPATIBILIDADE ENTRE O CIMENTO E O MATERIAL LIGNOCELULÓSICO	21
2.2.1. Pré tratamentos	22
2.2.2. Aditivos aceleradores de cura	24
3. MATERIAL E MÉTODOS	26
3.1. TESTE DE INIBIÇÃO	27
3.2. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DAS PARTÍCULAS TRATADAS E NÃO TRATADAS	28
3.2.1. Determinação dos extrativos	28
3.2.2. Determinação dos teores de lignina solúvel e insolúvel	29
3.2.3. Determinação do teor de cinzas	30
3.2.4. Determinação da Holocelulose	31
3.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA	31
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
5. CONCLUSÕES	36

CAPÍTULO 2 **37**

EFEITO DO TRATAMENTO E DA RELAÇÃO CIMENTO:FIBRA DE COCO SOBRE AS PROPRIEDADES DE PAINÉIS À BASE DE CIMENTO PORTLAND **37**

1. INTRODUÇÃO	37
1.1. OBJETIVOS	38
1.2. HIPÓTESE	38
2. REVISÃO DE BIBLIOGRAFIA	39
2.1. PRODUÇÃO DE PAINÉIS DE CIMENTO-MATERIAL LIGNOCELULÓSICO	39
2.2. FATORES QUE AFETAM AS PROPRIEDADES DOS PAINÉIS DE CIMENTO/MATERIAL LIGNOCELULÓSICO	40
3. MATERIAL E MÉTODOS	44
3.1. PRODUÇÃO DO PAINEL DE CIMENTO REFORÇADO COM FIBRAS DE COCO	44
3.2. ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS	46
3.3. ANÁLISE DAS FIBRAS EM MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA	48
3.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA	48
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
4.1. DENSIDADE DA FIBRA DO COCO VERDE E DO PAINEL DE CIMENTO REFORÇADO COM FIBRA DE COCO	48

4.2. ANÁLISE FATORIAL	50
4.2.1. Efeito do tratamento	50
4.2.2. Efeito da relação	54
4.2.3. Interação dos tratamentos com as relações	56
5. CONCLUSÕES	59
CONCLUSÕES GERAIS E RECOMENDAÇÕES	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
<u>APÊNDICES</u>	<u>70</u>

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Propriedades mecânicas de fibras vegetais e de fibras convencionais usadas como reforço	6
Tabela 2.2: Composição química da fibra de coco	9
Tabela 2.3: Propriedades gerais de painéis de cimento-madeira de baixa densidade produzidos com partículas excelsior	11
Tabela 3.1: Composição do cimento CP-II-Z-32	17
Tabela 3.2: Exigências físicas e mecânicas	17
Tabela 3.0.3: Exigências Químicas	17

CAPÍTULO 1

Tabela 2.1: Efeito dos aditivos na pega do cimento em compostos	25
Tabela 3.1: Delineamento experimental	26
Tabela 3.2: Classificação do material lignocelulósico de acordo com o índice de inibição	28
Tabela 4.1: Índice de inibição da fibra de coco	32
Tabela 4.2: Composição química da fibra do coco (%)	34

CAPÍTULO 2

Tabela 3.1: Delineamento experimental	44
Tabela 3.2: Propriedades físicas e mecânicas analisadas nos painéis de cimento/coco	47
Tabela 4.1: Variação de densidade no material fibroso do coco e do painel de cimento/coco	49
Tabela A1: Teste de média LSD para os índices de inibição dos tratamentos	71
Tabela A.2: Teste de média LSD para os componentes químicos da fibra do coco	72
Tabela A.3: Valores médios das Propriedades físicas e mecânicas dos painéis de cimento/coco	73
Tabela A.4: Teste de média Tukey para as densidades dos painéis	74
Tabela A.5: Análise de variância fatorial das propriedades físicas e mecânicas do painel	75
Tabela A.6: Teste de média LSD para o efeito dos tratamentos em cada relação	77
Tabela A.7: Teste de média LSD para o efeito das relações em cada tratamento	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Coco verde (<i>Cocos nucifera</i> L.)	7
Figura 2.2: Seção transversal do fruto do coco verde	8
Figura 2.3: Fotomicrografia da fibra de coco in natura (MEV)	9
Figura 3.1: Moagem da fibra de coco	13
Figura 3.2: Equipamento de peneiramento automático	14
Figura 3.3: Esquema de peneiras para classificação (modificado de ARAÚJO, 2009)	14
Figura 3.4: Partículas de coco (-3,00+1,00) sem tratamento (a); tratada com água quente (b); tratada com NaOH (c) após a classificação	14
Figura 3.5: Fibras de coco imersas em água a 80°C	15
Figura 3.6: Tratamento com NaOH	16

CAPÍTULO 1

Figura 2.1: Curva de temperatura de hidratação para cimento americano tipo I e mistura de cimento com cortiça de sobreira (modificado de HACHMI; MOSLEMI; CAMPBELL, 1990)	21
Figura 2.2: Efeito do tratamento dado às partículas de três espécies de madeira (ALBERTO et al., 2000)	23
Figura 3.1: Ensaio de inibição do coco com o cimento Portland	27
Figura 4.1: Curva de hidratação do cimento na presença do coco e apenas cimento-água	33

CAPÍTULO 2

Figura 2.1: Planta esquemática do lay-out de produção de cimento-madeira	40
Figura 2.2: Efeito da interação dos tratamentos das espécies de madeira e do tamanho das partículas sobre o MOR (modificado de SEMPLE; EVANS, 2004).	42
Figura 2.3: Correlação do MOE com a razão de cimento:madeira para diferentes tipos de cimento e tempo de cura (modificado de MOSLEMI; PFISTER, 1987).	43
Figura 3.1: Montagem do painel	45
Figura 3.2: Esquema de distribuição dos corpos de prova nos painéis para avaliação das propriedades físicas e mecânicas	46
Figura 3.3: Stress Wave Timer utilizado para determinar o E_d .	47
Figura 4.1: Efeito dos tratamentos sobre as propriedades mecânicas dos painéis	51
Figura 4.2: Efeito dos tratamentos sobre as propriedades físicas dos painéis	52
Figura 4.3: Fotomicrografias, obtidas em MEV, das fibras de coco in natura (a e b), após tratamento com água quente (c e d) e com NaOH (e e f).	54
Figura 4.4: Efeito da relação sobre as propriedades mecânicas dos painéis	55
Figura 4.5: Efeito da relação cimento:fibra de coco sobre as propriedades físicas dos painéis	56
Figura 4.6: Efeito dos tratamentos sobre cada relação nas Propriedades Mecânicas	57
Figura 4.7: Efeito da relação sobre cada tratamento nas Propriedades Mecânicas	58

1. INTRODUÇÃO GERAL

Atualmente, dentre os setores industriais que se sobressaem pela grande produção de resíduos, destacam-se os setores madeireiro e agrícola. Estes resíduos apresentam grande dificuldade de transporte, acumulando, de tal modo, uma grande quantidade de matéria prima sem valor econômico, a ser queimada ou simplesmente lançada na natureza (QUINTANA, 2009), causando graves problemas ambientais, como exemplo, a emissão de dióxido de carbono e metano na atmosfera contribuindo para o aquecimento global (PASSOS, 2005).

No Brasil, o setor agroindustrial tem crescido muito nos últimos anos, tornando-se um vetor de crescimento. Contudo, tem contribuído decisivamente para o aumento do volume de resíduos sólidos designados aos aterros sanitários (EMBRAPA, 2010). Embora tais resíduos tenham um grande potencial de aproveitamento, sua aplicação para a geração de energia, produção de adubo, utilização em compostos construtivos – como, por exemplo, painéis reconstituídos – é bastante reduzida. Segundo Passos (2005), o aproveitamento de resíduos recicláveis pode acarretar a diminuição da demanda de energia e da emissão de gases de efeito estufa.

Atualmente, no mercado da construção civil, os painéis de cimento-madeira possuem grande importância devido ao seu baixo custo e fácil produção, pois utilizam, em sua composição, resíduos abundantes nas indústrias madeireiras – sendo uma alternativa viável aos resíduos das serrarias, que apresentam grande desperdício de matéria prima. Além disso, esses painéis têm tido boa aceitação no mundo, pois se busca por meio dessa mistura reunir propriedades desejáveis da madeira e do cimento (COATES, 1994).

Muitos estudos vêm sendo feitos com vários compostos de resíduos lignocelulósicos com cimento Portland (ALMEIDA et al., 2002; OLORUNNISOLA, 2007; ASASUTJARIT et al., 2007; OLORUNNISOLA, 2008; KARADE, 2010, etc.). Segundo Eltomation (2010), estes painéis apresentam boa trabalhabilidade, são resistentes a intempéries, fungos e insetos e proporcionam um bom isolamento térmico e acústico

No entanto, segundo diversos trabalhos (GEETHAMMA et al., 1998; OKINO et al., 2004; OLORUNNISOLA, 2008), o desempenho das fibras lignocelulósicas como reforço em compostos minerais, muitas vezes, não é satisfatório, devido a algumas substâncias inibidoras (hemicelulose, extrativos, açúcares) presentes nas fibras. Contudo, essas fibras podem ser processadas de modo a melhorar as suas propriedades, tornando-se compatíveis com o cimento. Diversos tratamentos vêm sendo aplicados às fibras para melhorar sua aderência à

matriz cimentícia em compostos minerais. Os tratamentos incluem: pré-tratamento com produtos químicos, adição de aditivos aceleradores da pega, modificação do material lignocelulósico por meio da remoção de substâncias inibidoras da cura do cimento, etc.

Neste contexto, o painel de cimento/fibra de coco foi escolhido para ser estudado por ser extremamente versátil e possuir diversas aplicações. Para uma melhor apresentação do estudo, a presente dissertação foi estruturada em dois capítulos, conforme apresentado abaixo:

Capítulo I: “Efeito do tratamento das fibras de coco (*Cocos nucifera* L.) sobre a compatibilidade com o cimento Portland”, no qual são abordados aspectos relacionados à compatibilidade entre o cimento e a fibra de coco, bem como os diferentes tratamentos para melhorar essa compatibilidade.

Capítulo II: “Efeito do tratamento e da relação cimento:fibra de coco sobre as propriedades de painéis à base de cimento Portland”, no qual foram analisadas a eficiência dos tratamentos e a viabilidade técnica de se produzir painéis minerais reforçados com fibra de coco por meio de ensaios físicos e mecânicos dos mesmos.

1.1.Objetivo geral

Objetivou-se avaliar o desempenho da fibra do coco para a confecção de painéis de cimento Portland e estudar o potencial tecnológico de se produzir painéis de cimento-fibra de coco verde.

1.2.Hipótese geral

A produção de painéis de fibra de coco em mistura com o cimento é possível a partir do tratamento destas fibras.

2. REVISÃO GERAL DE BIBLIOGRAFIA

2.1. Adesivos inorgânicos

Segundo Youngquist (1999), os aglomerantes inorgânicos, devido às suas características, têm densidade mais elevada que a madeira e, comparados às resinas, precisam ser usados em maior quantidade por unidade de volume do composto. As principais categorias de aglomerantes inorgânicos são: o gesso, o cimento de magnésio e o cimento Portland. O gesso e o magnésio são suscetíveis à umidade, o que faz com que suas aplicações sejam restritas aos ambientes interiores. Já os painéis derivados do cimento Portland são mais duráveis que aqueles feitos com gesso ou cimento de magnésio, podendo ser utilizados tanto em ambiente interior como em exterior (YOUNGQUIST, 1999).

Segundo a ABCP (2002), o cimento Portland, misturado a água, pode ser mesclado a outros materiais de construção, tais como a areia, o cal, a brita, e os materiais de origem orgânica, como madeira e fibras. As características e as propriedades dos concretos e das argamassas vão depender da qualidade e das relações dos materiais misturados. Pode-se dizer do ponto de vista químico, que o cimento é o componente mais ativo e o grande responsável pela transformação da mistura dos materiais componentes no produto final adequado.

O cimento Portland é composto por *clínquer* - o principal componente presente em todos os tipos de cimento Portland - e por *adições* que definem os diferentes tipos de cimento, podendo variar de um tipo de cimento para outro (ABCP, 2002). O *clínquer* é composto, principalmente, por calcário e argila, ambos obtidos de jazidas. Primeiramente, a rocha calcária é britada, depois moída e, em seguida, misturada à argila moída. A mistura formada atravessa um forno giratório, a uma temperatura interna que pode chegar a 1450°C. Com o calor intenso, a mistura transforma-se em um novo material, denominado *clínquer*. Já as *adições* são outras matérias primas utilizadas na produção do cimento como: gesso, escórias de alto-forno, materiais pozolânicos e carbonáticos, etc. Tais materiais são misturados ao *clínquer* na fase de moagem e permitem a fabricação dos diversos tipos de cimento Portland disponíveis no mercado.

O cimento Portland como matriz no composto é um material de construção durável, barato e dotado de adequada resistência à compressão e rigidez. No entanto, apresenta baixa resistência à tração e pequena capacidade de deformação. Uma maneira eficiente de conferir a esse composto uma maior resistência à tração, ao impacto e à fadiga, além de tenacidade e

ductilidade, é a adição de fibras à mistura (VENTURA et al., 2006). Segundo Hofstrand et al. (1984), Bye (1999) e Bejó et al. (2005), o cimento Portland, quando usado como material aglutinante, pode produzir painéis de uso exterior resistentes a ataques biológicos e ao fogo.

O gesso é um conjunto de ligantes simples constituídos basicamente por sulfatos mais ou menos hidratados de cálcio e sulfatos anidros de cálcio obtidos por desidratação e cozedura da pedra de gesso ou do gesso bruto. Segundo Youngquist (1999), o gesso pode ser obtido por meio da extração de fontes naturais ou obtido como subproduto da neutralização de gases combustíveis. O gesso produzido a partir de gases derivados da combustão passou a ser fabricado em grandes quantidades nos Estados Unidos devido aos regulamentos do “Clean Air Act”. Esse processo resulta da introdução de cal no processo de combustão, no intuito de reduzir as emissões de dióxido de enxofre. Segundo Haseilen et al. (2002), uma propriedade peculiar do gesso, de grande utilidade para a colagem, é a sua possibilidade de ganhar e perder água rapidamente. Com o aquecimento, o gesso perde água, e com o umedecimento, fica com grande plasticidade e moldabilidade.

De acordo com Youngquist (1999), poucos painéis que utilizam cimento de magnésio vêm sendo produzidos, devido, principalmente, ao seu elevado custo. Entretanto, o cimento de magnésio apresenta vantagens produtivas em relação ao cimento Portland. Primeiro, os açúcares aparentemente não influenciam na cura e na colagem do aglutinante. Além disso, o cimento de magnésio é reconhecidamente mais tolerante a processos de produção com altos teores de umidade.

2.2. Fibras naturais

As fibras naturais vêm sendo estudadas há bastante tempo no que se refere à sua composição, às suas propriedades mecânicas e aos seus possíveis usos (BLEDZKI; GASSAN, 1999; SPARNIAŠ, 2006). Foram utilizadas durante muito tempo, porém substituídas por novas tecnologias. Atualmente, no entanto, o interesse por fibras naturais vem crescendo novamente, devido à possibilidade de aproveitamento, ao fato de serem fontes renováveis, biodegradáveis, recicláveis e por apresentarem economia de energia em sua produção (SILVA, 2004), havendo, portanto, uma grande retomada nas pesquisas de desenvolvimento de novos produtos que fazem uso sustentável dessas fibras, além de pesquisas para explicar o comportamento destes materiais (PASSOS, 2005).

As fibras naturais consistem, basicamente, em carboidratos – celulose e hemicelulose –, lignina e outros componentes. A celulose, um polissacarídeo linear de alta massa molecular

– produzido pela polimerização biossintética de unidades básicas de moléculas de β -D-glucose – é o principal constituinte estrutural, sendo responsável pela estabilidade e resistência das fibras (SANTOS, 2006). As hemiceluloses – as quais estão intimamente associadas à celulose nos tecidos das plantas – são polissacarídeos de massas moleculares relativamente baixas e solúveis em água e em soluções alcalinas que, sendo assim, podem ser facilmente removidas, solubilizadas e degradadas. A lignina, por sua vez, é um composto fenólico que mantém as fibras unidas, atuando como um agente de enrijecimento das moléculas de celulose dentro das paredes celulares das fibras. Todos os três componentes da parede celular contribuem em extensões diferentes para a resistência de fibra (THAKUR; SINGHA, 2010). A pectina é um polissacarídeo, rico em ácido galacturônico, presente nas paredes celulares e com função aglutinante. Já os componentes minerais são os responsáveis pela formação das cinzas após a incineração das fibras (PASSOS, 2005).

As propriedades das fibras naturais dependem, principalmente, da sua composição química. No entanto, devido a diversos fatores – localização geográfica, clima, tipo de fibra, parte da planta, condições do solo, etc. – a sua composição química, cristalinidade, propriedades de superfície, diâmetro transversal, forma, tamanho, força e rigidez podem variar de fibra para fibra (BLEDZKI; GASSAN, 1999; SPARNIAŠ, 2006).

Segundo Thakur e Singha (2010), as propriedades mecânicas das fibras dependem de fatores como a percentagem de celulose, o grau de polimerização da celulose e o ângulo microfibrilar. Fibras com alta percentagem de celulose, alto grau de polimerização e baixo ângulo microfibrilar apresentam uma maior resistência à tração. Essas fibras apresentam variações nas propriedades mecânicas, tanto ao longo do comprimento da fibra quanto entre as fibras.

Segundo Olorunnisola (2007), as fibras naturais existem em abundância, estão facilmente disponíveis a baixo custo e possuem baixo consumo de energia; estas fibras são, normalmente, incorporadas a matriz de cimento de forma descontínua. Sua função principal é reforçar, atrasar e controlar fissuras de tração.

Segundo Neto e Pardini (2006) pode-se enumerar as principais vantagens das fibras vegetais em:

- baixa massa específica;
- maciez e abrasividade reduzida;
- baixo custo;
- reciclabilidade, atoxicidade e biodegradabilidade;

- estímulo a empregos na zona rural; e,
- baixo consumo de energia em sua produção.

Já entre as desvantagens e limitações pode-se citar:

- baixas temperaturas de processamento;
- acentuada variabilidade em suas propriedades mecânicas e baixa estabilidade dimensional;
- sensibilidade a efeitos ambientais (variações de temperatura e umidade);
- presença de seções transversais de geometria complexa e não uniforme; e,
- propriedades mecânicas modestas quando comparadas às fibras sintéticas (fibra de carbono, de vidro, etc.).

Segundo Santos (2006), um critério decisivo para a escolha do tipo adequado de fibra é o seu módulo de elasticidade. A Tabela 2.1 (BLEDZKI; GASSAN, 1999) apresenta algumas propriedades mecânicas de diversas fibras sintéticas e naturais; os valores característicos das fibras naturais são bem inferiores aos encontrados para as fibras de vidro (E-vidro) e de carbono. Contudo, como a densidade da E-vidro é cerca de 45% maior que as demais, pode-se dizer que as fibras naturais apresentam valores de propriedades mecânicas comparáveis a E-vidro.

Tabela 2.1: Propriedades mecânicas de fibras vegetais e de fibras convencionais usadas como reforço

Fibra	Densidade (g/cm³)	Alongamento (%)	Resistência à Tração (MPa)	MOE (GPa)
Coco	1,2	30	175	4,0-6,0
Algodão	1,5-1,6	7,0-8,0	287-597	5,5-12,6
Juta	1,3	1,5-1,8	393-773	26,5
Linho	1,5	2,7-3,2	345-1035	27,6
Cânhamo	-	1,6	690	-
Rami	-	3,6-3,8	400-938	61,4-128
Sisal	1,5	2,0-2,5	511-635	9,4-22,0
Kraft	1,5	-	1000	40,0
E-vidro	2,5	2,5	2000-3500	70,0
Carbono padrão	1,4	3,3-3,7	3000-3150	63,0-67,0

Fonte: Bledzki e Gassan, 1999.

O coqueiro (*Cocos nucifera* L.) – pertencente à família Aracaceae, uma das mais importantes da classe Monocotyledoneae (Figura 2.1) – é uma palmeira alta e reta, com altura variando entre 10 e 20 m, sendo o seu fruto utilizado como fonte de alimentação, óleo, fibra, combustível, e outros produtos. O cultivo de coco ocorre em aproximadamente 90 países, caracterizando-se como uma cultura típica de clima tropical e subtropical originada no Sudeste Asiático, tendo como maiores produtores mundiais as Filipinas, a Indonésia e a Índia (TAVARES, 2010).



Figura 2.1: Coco verde (*Cocos nucifera* L.)

Fonte: Lorenzi (2002)

O seu fruto (Figura 2.2) é, botanicamente, uma drupa, formada por um epicarpo, que envolve o mesocarpo espesso e fibroso. No interior do fruto há uma camada fina, muito dura, denominada endocarpo ou casca rígida que recobre a copra – albúmem sólido – uma camada carnosa, branca, muito oleosa, que forma uma grande cavidade onde se encontra o albúmem líquido – a água de coco (VALE et al., 2004).

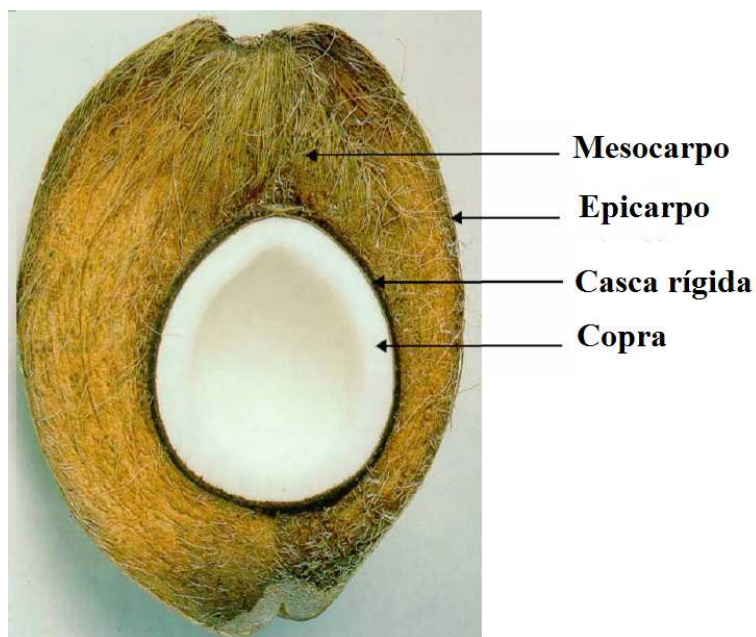


Figura 2.2: Seção transversal do fruto do coco verde

Fonte: modificado de van Dam et al. (2004)

O coco apresenta inúmeras vantagens na sua utilização. Além de ser um material ecológico e facilmente reciclável, apresenta a possibilidade de modificação química, é resistente à água, resistente ao desgaste mecânico e resistente a fungos e térmitas, além de fornecer excelente isolamento térmico e sonoro (GEETHAMMA et al.,1998).

Alguns estudos sugerem a utilização do resíduo da casca do coco verde na agricultura intensiva – principalmente no cultivo de plantas ornamentais e hortaliças – na indústria de papel, na engenharia de alimentos – para complementação alimentar humana e animal – na produção de enzimas, na indústria da construção civil – em matrizes cimentícias e poliméricas. O aproveitamento da casca do coco verde, gerado tanto como resíduo industrial quanto como resíduo sólido urbano, significaria mais uma alternativa de lucro (SENHORAS, 2004).

As fibras do coco são materiais extraídos do mesocarpo desse fruto e se caracterizam pelo alto teor de lignina (GEETHAMMA et al.,1998). Segundo Rajan et al. (2005), a fibra do coco – pertencente à família das fibras duras – é multicelular e possui baixa densidade, seu comprimento varia de 10 a 35 cm e seu diâmetro de 0,1 a 0,3 mm. Como pode ser visto na Figura 2.3, a superfície da fibra do coco é coberta por óleos, ceras e extrativos, parte da constituição natural das fibras lignocelulósicas (CARVALHO et al., 2010).

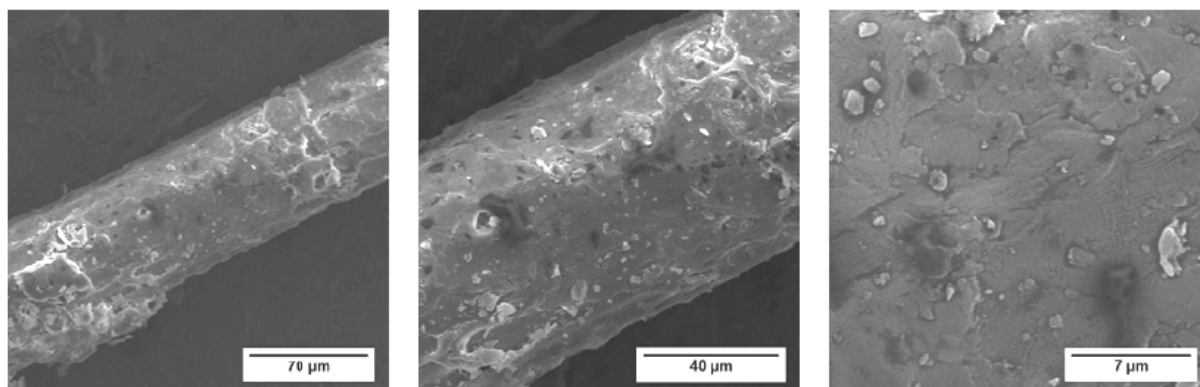


Figura 2.3: Fotomicrografia da fibra de coco in natura (MEV)

Fonte: Carvalho et al. (2010)

A fibra do coco é composta basicamente por celulose, hemicelulose, lignina e substâncias secundárias. Na Tabela 2.2 pode ser observada uma compilação de dados – de vários autores – da composição química básica da fibra do coco verde.

Tabela 2.2: Composição química da fibra de coco

Hemicelulose (%)	Celulose (%)	Lignina (%)	Referências
0,25	43,4	45,4	Rajan et al.(2005)
15 - 28	35 - 60	20 - 48	Agopyan et al. (2005)
16,8	68,9	32,1	Asasutjarit et al. (2007)
0,15 – 0,25	36 - 43	41 - 45	Corradini et al. (2006)
12,1	44,2	32,8	Abdul Khalil; Siti Alwani; Mohd Omar (2006)

Segundo van Dam et al. (2004), o teor de lignina encontrado no coco é cerca de 2 a 4 vezes maior que os valores existentes para a juta e para o sisal, conferindo-lhe, assim, um comportamento singular frente a outras fibras naturais. Isto pode ser atribuído ao fato de que a lignina ajuda a unir os tecidos vegetais e também reforça a parede celular da fibra, além de proteger os carboidratos de danos físicos e químicos (RAJAN et al., 2005).

2.3. Painéis Minerais

Composto pode ser considerado um material formado por dois ou mais constituintes que possui uma fase reforçante, no caso, as fibras; e uma fase ligante, o cimento. A vantagem

desse composto está na resistência e na dureza, relativamente maiores que as de seus materiais em separado, além do baixo peso (MATOSKI, 2005).

Compostos minerais reforçados com materiais lignocelulósicos contêm aproximadamente 30 a 70% da sua massa de material lignocelulósico em diversas formas e 70 a 30% de fase ligante. Segundo Matoski (2005), a fase ligante, por exemplo, o cimento, transmite o esforço entre as fibras, mantendo-as protegidas do meio e permitindo sua orientação apropriada. Já as fibras além de aumentar a resistência do meio abaixam seu custo e seu peso.

Youngquist (1999) afirma que uma importante característica dos painéis minerais é que sua produção é adaptável tanto ao custo final quanto ao espectro tecnológico. Isto é facilitado pelo fato de não se usar calor na cura do material. A versatilidade da produção desses painéis é ideal para uma variedade de materiais lignocelulósicos.

Segundo Ajayi (2006), a quantidade de pesquisas para desenvolver e produzir esse painel vem aumentando, em função dos seguintes fatores:

- reconhecimento da adequação das mais diversas matérias primas para este tipo de painel, a fim de reduzir a pressão sobre os atuais recursos florestais;
- desejo de se aumentar a utilização de recursos madeireiros;
- aceitabilidade dos novos produtos, nos mercados, como alternativa à madeira serrada, de modo a ir ao encontro das necessidades dos produtos madeireiros em termos de sustentabilidade;
- desejo de se proteger a biodiversidade florestal.

Atualmente, painéis de cimento-madeira, fibrocimento, painéis minerais de gesso reforçados com fibras estão sendo produzidos em várias partes do mundo. As oportunidades para empresas desse ramo estão crescendo substancialmente, uma vez que a necessidade por produtos duráveis na construção civil está crescendo (FRYBORT, 2008).

2.3.1. Painel de cimento reforçado com fibras

Segundo Wolfe e Gjinolli (1996), os painéis de cimento-madeira, como classe de materiais, possuem grande variedade em forma e função. Produtos de alta densidade (1,5 – 2,0 g/cm³), contendo de 5% a 10% do peso em fibras, são frequentemente utilizados em aplicações que requerem uma superfície durável e resistente a intempéries, como: telhados,

pisos e tapumes. Já os produtos de baixa densidade ($0,5 - 1,0 \text{ g/cm}^3$) têm sido utilizados onde a absorção sonora e a resistência ao fogo são importantes. Os valores das propriedades mecânicas para chapas de cimento-madeira de baixa densidade produzidas com partículas do tipo *excelsior* podem ser observadas na Tabela 2.3.

Tabela 2. 2: Propriedades gerais de painéis de cimento-madeira de baixa densidade produzidos com partículas excelsior

Propriedades	de	até
Módulo de Elasticidade	621 MPa	1241 MPa
Flexão estática (MOR)	1,7 MPa	5,5 MPa
Compressão	0,69 MPa	4,1 MPa
Tração	0,69 MPa	4,1 MPa
Cisalhamento	0,69 MPa	1,4 MPa

Fonte: Younquist (1999).

Segundo Frybort (2008), o objetivo de se usar partículas misturadas ao cimento é, principalmente, obter um aumento no módulo de ruptura e um ganho nas propriedades isolantes do painel. Partículas de todos os tamanhos e formatos são usadas na confecção de painéis minerais como: *strands*, flocos, fibras e chips. A geometria da partícula tem uma grande influência nas propriedades do painel.

Estudo feito por Wolfe; Gjinolli (1996) sugere que os painéis de cimento-madeira têm potencial para ser usado em aplicações estruturais, embora suas propriedades de rigidez e resistência sejam 10% menores que outros painéis estruturais.

2.3.2. Vantagens e desvantagens da Utilização de Materiais baseados em Compostos Cimento-Madeira

As principais vantagens do uso de materiais produzidos com compostos cimento-madeira são:

- disponibilidade de matéria-prima renovável, possibilitando o aproveitamento de enorme gama de resíduos (BERALDO; CARVALHO, 2004);

- baixa massa específica - o que permite sua utilização na produção de painéis de fechamento, forros, telhas, elementos de vedação e de alvenaria, etc. (BERALDO; CARVALHO, 2004);
- resistência a impactos (BERALDO; CARVALHO, 2004);
- excelente trabalhabilidade - pode ser serrado, furado, receber parafusos e pinturas (MATOSKI; IWAKIRI, 2007);
- não emissão de resíduos tóxicos durante sua produção, além do emprego de material ligante inerte e livre de riscos à saúde aos trabalhadores da linha de produção (VAN ELTEN, 2000);
- alta resistência a fogo, fungos e térmitas (ARO, 2008);
- excelentes propriedades de isolamento térmico e acústico (ARO, 2008);
- excelente estabilidade dimensional quando comparado a outros compostos de madeira, como painéis de partículas. Além disso, a absorção de água é muito pequena (MOSLEMI, 1999).

Apesar de suas vantagens em relação a outros tipos de painéis de madeira, existem vários fatores que têm impedido os compostos de cimento-madeira de serem mais difundidos.

- a longa cura do cimento leva a uma redução da capacidade da produção e exige um grande estoque de painéis durante a cura. Outro obstáculo para o desenvolvimento de indústrias de cimento-madeira é a grande variação de compatibilidade química da madeira com o cimento (MOSLEMI, 1999).
- o meio alcalino do cimento pode causar a petrificação da celulose. As fibras naturais sofrem com o meio alcalino onde a extensão do ataque vai determinar a perda da resistência e esse fator varia conforme a espécie da madeira (MATOSKI, 2005).
- as propriedades mecânicas dos materiais compostos - incluindo os painéis de cimento-madeira - são uma função direta da ligação entre a fibra e a matriz cimentícia, além de serem muito afetadas pelo tipo, o conteúdo, a geometria e arranjo das partículas na matriz cimentícia (MATOSKI, 2005).

3. MATERIAL E MÉTODOS GERAL DO TRABALHO

3.1. Coco Verde

Um fardo de 60 quilos de fibra do coco verde (*Cocos nucifera* L.) foi adquirido da empresa coco Comandatuba LTDA – Ilhéus, Bahia. Os coqueiros tinham em média 10 anos de idade e os cocos foram colhidos entre o 7º e 9º mês após sua inflorescência. Cada coco verde rende, em média, 75 gramas de fibra.

A fibra do coco (Figura 3.1a) foi reduzida por moagem em um picador agrícola com peneira de 6 mm de abertura (Figura 3.1b). Posteriormente, as fibras com tamanho reduzido (Figura 3.1c) foram classificadas em um equipamento de peneiramento automático (Figura 3.2), com um esquema de três peneiras (Figura 3.3) - 3,0 mm, 1,5 mm e 1,0 mm - para seleção do tamanho desejado para confecção das chapas e o fundo, para a retirada do pó e dos finos. Classificou-se da seguinte forma: as fibras retidas na peneira de 3,0 mm foram reservadas para, caso necessário, fossem picadas novamente; as fibras que passaram pela peneira de 3,0 mm e ficaram retidas nas peneiras de 1,5 mm e 1,0 mm foram usadas na confecção do painel (Figura 3.4: a – coco in natura; b – coco tratado com água quente e c – coco tratado com NaOH) e as que passaram na peneira de 1,0 mm foram classificadas como finos.



Figura 3.1: Moagem da fibra de coco



Figura 3.2: Equipamento de peneiramento automático



Figura 3.3: Esquema de peneiras para classificação (modificado de ARAÚJO, 2009)

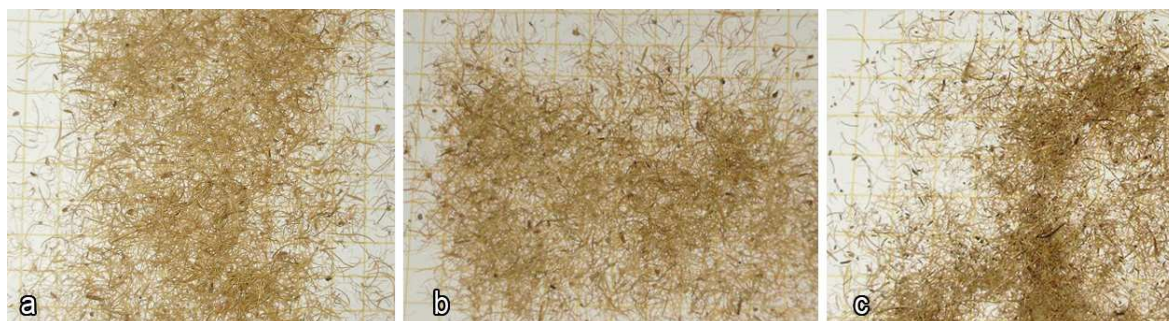


Figura 3.4: Partículas de coco (-3,00+1,00) sem tratamento (a); tratada com água quente (b); tratada com NaOH (c) após a classificação

3.2. Tratamentos feitos na fibra do coco verde

Os tratamentos das fibras de coco verde (*Cocos nucifera* L.) foram feitos antes da moagem destas. Estes tratamentos foram aplicados no intuito de melhorar a compatibilidade da fibra com o cimento.

3.2.1. Sem tratamento

As fibras in natura foram secas em estufa (103 ± 2)°C por duas horas e depois moídas e utilizadas sem tratamento - testemunha.

3.2.2. Imersão em água fria

Este tratamento consistiu na imersão das fibras de coco em água a temperatura ambiente por 72 horas. Posteriormente, as fibras foram secas ao ar livre por 48 horas.

3.2.3. Imersão em água quente (80°C)

Este tratamento consistiu na imersão das fibras de coco em água quente a 80°C por cerca de 90 minutos (Figura 3.5). Em seguida, foram secas ao ar por 48 horas.



Figura 3.5: Fibras de coco imersas em água a 80°C

3.2.4. Imersão em solução de Hidróxido de Sódio (NaOH)

Este tratamento consistiu na imersão da fibra de coco na solução de NaOH 5% p/v (100 g de fibra de coco para cada litro de solução). Estas fibras ficaram em contato com a solução alcalina por 72 horas (Figura 3.6a). Após este período, as fibras de coco foram lavadas com água corrente. Prosseguiu-se a lavagem e a troca de água por 24 horas até que a água tornasse incolor (Figura 3.6b). Em seguida, as fibras foram secas ao ar livre por 48 horas (Figura 3.6c).



Figura 3.6: Tratamento com NaOH

3.3. Adição de Cloreto de Cálcio (CaCl₂)

O aditivo químico CaCl₂, na proporção de 4%, em relação ao peso do cimento, foi adicionado à água e incorporado como agente acelerador da cura do cimento, durante a confecção do painel com fibras in natura, apenas.

3.4 Cimento Portland

O aglomerante utilizado foi o cimento Portland CP-II-Z-32 adquirido no mercado local. Nas Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3 estão apresentadas, segundo o fabricante, a composição, as exigências físicas e mecânicas e as exigências químicas do produto, respectivamente (VOTORANTIM, 2010).

Tabela 3.1: Composição do cimento CP-II-Z-32

Tipo	Sigla	Classe	Norma	Clínquer + Gesso	Calcário	Escória
II	CP II Z CP II Z RS	32	11578	76 - 94%	0 - 10%	6 - 14%

Fonte: Votorantim (2010).

Onde: CP – Cimento Portland; II – Composto; Z - Adição pozolânica; 32 - Resistência de 32 MPa.

Tabela 3.2: Exigências físicas e mecânicas

Finura	Tempo de pega	Expansibilidade		Resistência a compressão (MPa)					
		Início	Término	A frio	A quente	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
Resíduo na peneira 75 mm (%) ≤ 12,0	Área específica (m ² /kg) ≥ 260	Início (h) ≥ 1	Término (h) ≤ 10 (1)	A frio (mm) ≤ 5	A quente (mm) ≤ 5	1 dia -	3 dias ≥ 10	7 dias ≥ 20	28 dias ≥ 32

Fonte: Votorantim (2010).

Tabela 3.3: Exigências Químicas

Resíduo Insolúvel (%)	Perda ao fogo (%)	MGO (%)	SO₃ (%)	CO₂ (%)	S (%)
≤ 16,0	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 5,0	-

Fonte: Votorantim (2010).

CAPÍTULO 1

EFEITO DO TRATAMENTO DAS FIBRAS DO COCO (*Cocos nucifera* L.) SOBRE A COMPATIBILIDADE COM O CIMENTO PORTLAND

1. INTRODUÇÃO

Os painéis de cimento-madeira são usados na construção civil como: revestimento de parede em edifícios públicos, pisos, tapumes, forros, revestimentos externos, elementos de proteção contra incêndios, revestimento especializado em isolamento acústico, etc. (FAN et al., 2004; OLORUNNISOLA, 2008). A parte lignocelulósica desses compostos é obtida a partir de diferentes fontes, incluindo espécies de madeira de rápido crescimento e não-comerciais ou de baixo valor, resíduos agrícolas, etc. (SEMPLE et al., 2002).

A introdução de fibras vegetais na fabricação de materiais compostos tem recebido grande atenção tanto de pesquisadores como da indústria. As fibras naturais apresentam excelentes propriedades mecânicas, são biodegradáveis e apresentam baixo custo em relação às fibras sintéticas. Dentre as principais fibras naturais vegetais estão a do sisal, da juta, do coco, dentre outros. A produção mundial destes materiais se concentra, principalmente, nos países asiáticos (SANTIAGO; SELVAM, 2007).

A adição dessas fibras ao cimento traz algumas vantagens ao composto como: alta resistência à tração, módulo de elasticidade relativamente elevado, boa resistência ao fogo, resistência a fungos e térmitas, além da sua tecnologia ser bem desenvolvida com facilidade (SEMPLE et al., 2002; WEI; GU, 2009).

Esses fatores contribuem para que o composto ganhe uma posição de destaque entre os produtos florestais, porém algumas limitações como: a incompatibilidade de algumas espécies de madeira misturadas ao cimento devido a substâncias inibidoras e a eficiência química dos aditivos necessária para superar as propriedades inibitórias da madeira podem restringir o seu emprego (WEI et al., 2000; ASASUTJARIT et al., 2007).

Apesar dessas restrições, diversas pesquisas têm mostrado que tratamentos adequados são capazes de minimizar ou neutralizar os efeitos inibidores dessas substâncias químicas. Os tratamentos incluem basicamente a extração dessas substâncias, por meio de tratamentos físicos, químicos e biológicos. Os tratamentos químicos incluem: a imersão do material lignocelulósico em água à temperatura ambiente (ALBERTO et al., 2000; SUTIGNO, 2000) ou em água quente (MOSLEMI et al., 1983; SANTIAGO; SELVAM,

2007; ASASUTJARIT et al., 2007), imersão do material em mistura aquosa de NaOH (PRASAD, 1983; ALBERTO et al., 2000); adição de substâncias químicas aceleradoras da cura do cimento, como o cloreto de cálcio (CaCl_2) (OKINO et al., 2004; OLORUNNISOLA, 2009), cloreto de magnésio (MgCl_2) (WEI et al., 2000; LATORRACA; IWAKIRI, 2000), e substituição de parte do cimento por sílica ativa (DEL MENEZZI et al., 2007), etc.

1.1. Objetivo

O principal objetivo deste capítulo foi avaliar, por meio do ensaio de termometria, a compatibilidade entre o cimento e a fibra do coco verde (*Cocos nucifera* L.) e estudar métodos para melhorar essa compatibilidade.

1.2. Hipótese

Os tratamentos das fibras de coco verde alteram benéficamente a sua compatibilidade com o cimento Portland.

2. REVISÃO DE BIBLIOGRAFIA

2.1. Compatibilidade entre cimento e material lignocelulósico

Jorge; Pereira; Ferreira (2004) afirmam que o termo compatibilidade, quando aplicado a compostos de cimento-madeira, refere-se ao grau de endurecimento do cimento após a mistura com água e madeira - em forma fragmentada. Em termos gerais, se o processo de cura do cimento não for influenciado ou for pouco influenciado pela presença da madeira, significa que esses produtos são compatíveis, entretanto se a cura for prejudicada pela presença da madeira, então esses são ditos como incompatíveis (MOSLEMI; LIM, 1984; JORGE; PEREIRA; FERREIRA, 2004). Esse fenômeno de interação é comumente expresso pela redução das propriedades mecânicas do painel.

Segundo Lee; Short (1989), Matoski (2005) e Frybort et al. (2008), a grande preocupação com a compatibilidade entre o cimento e a madeira se deve ao fato de que a madeira possui, em maior ou menor quantidade, substâncias inibidoras como a hemicelulose, os carboidratos, os açúcares e os componentes fenólicos que retardam a adesão ao cimento e que podem causar problemas na hidratação do painel. Alguns compostos podem até inibir essa adesão, e sem a hidratação o composto não é formado.

A compatibilidade entre o cimento e a madeira pode ser expressa em termos de calor de hidratação e assim pode-se utilizar o método do calorímetro para determinar a hidratação do cimento. O cimento em contato com a água hidrata-se e reage liberando calor (reação exotérmica), podendo liberar até 500 J/g (MATOSKI, 2005), e o monitoramento da temperatura dessa reação é utilizado como parâmetro para se determinar índices de inibição da cura ou endurecimento do cimento proporcionado pelo agregado utilizado (LATORRACA, 2000).

As curvas de comportamento típico da reação do cimento e da mistura de cimento-madeira (Figura 2.1) podem ser divididas em três fases distintas de tempo e temperatura: aumento inicial de temperatura (0 para t_1 e 0 para t_1' a uma temperatura T_1 e T_1' , respectivamente), período de dormência (t_1 para t_2 e t_1' para t_2' a uma temperatura T_2 e T_2' , respectivamente) e o endurecimento do cimento exibindo rápida elevação de temperatura (t_2 para t_3 e t_2' para t_3' a uma temperatura T_3 e T_3' , respectivamente) (MOSLEMI; LIM, 1984).

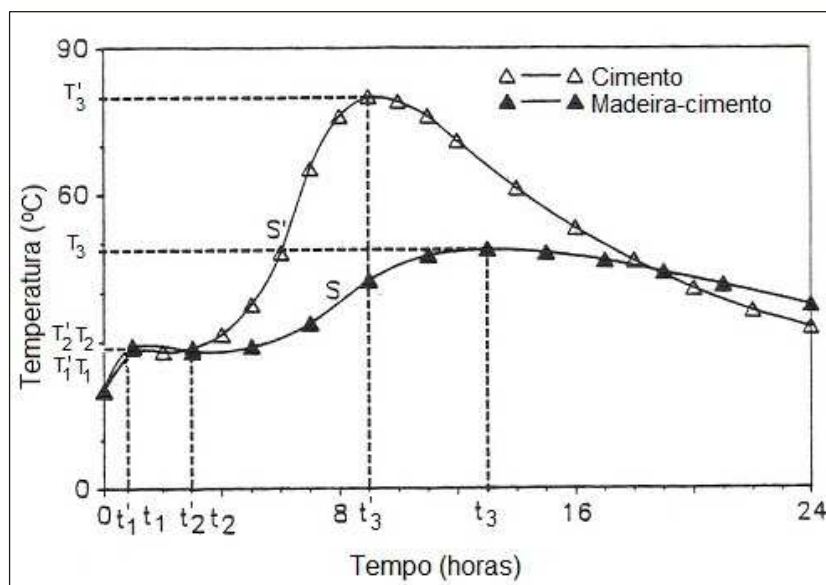


Figura 2.1: Curva de temperatura de hidratação para cimento americano tipo I e mistura de cimento com cortiça de sobreira (modificado de HACHMI; MOSLEMI; CAMPBELL, 1990)

O principal efeito inibitório da madeira sobre o cimento é o atraso no processo de cura. Outras manifestações de inibição incluem: a temperatura de hidratação relativamente baixa e o tempo prolongado para alcançar a temperatura máxima (MOSLEMI; LIM, 1984; ALBERTO; MOUGEL; ZOULALIAN, 2000). Espécies de madeira altamente inibitórias mostraram melhorias substanciais após a extração com água quente (MOSLEMI; GARCIA; HOFSTRAND, 1983), e apenas água fria foi o suficiente para várias espécies folhosas tropicais (GNANAHARAN; DHAMODARAN, 1985), apesar disso, algumas espécies podem exigir tratamento mais severo, como, por exemplo, o tratamento com solução aquosa de hidróxido de sódio (NaOH) a 1% (ALBERTO; MOUGEL; ZOULALIAN, 2000).

2.2. Métodos para melhorar a compatibilidade entre o cimento e o material lignocelulósico

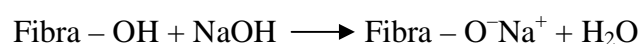
O desenvolvimento de compostos para construção usando fibras naturais - como a fibra do coco - com baixa condutividade térmica é uma alternativa interessante que poderia solucionar problemas ambientais (ASASUTJARIT et al., 2007). No entanto, a eficiência de compostos reforçados por fibras depende principalmente da relação entre a fibra e a matriz e da capacidade de transferência de tensão da matriz para a fibra. Esta eficiência da transferência de tensão tem um papel importante na determinação das propriedades mecânicas do composto. Um dos principais obstáculos na utilização de fibras naturais tem sido a baixa

compatibilidade entre as fibras e a matriz que pode levar a uma microfissura do composto e a uma degradação de propriedades mecânicas (HERRERA-FRANCO; VALADEZ-GONZÁLEZ, 2005). Vários tratamentos vêm sendo utilizados para melhorar a adesão fibra-matriz em compostos minerais reforçados por fibras naturais.

Segundo Semple; Evans (2004), existem diversas estratégias para melhorar a compatibilidade do material lignocelulósico com o cimento e com outros aglutinantes minerais, conseqüentemente aumentar a resistência desses compostos, algumas das quais são empregadas com sucesso. As estratégias incluem a modificação da madeira por meio da remoção de extrativos, o tratamento com produtos químicos, e a modificação da forma do material, do conteúdo e do arranjo no composto.

2.2.1. Pré tratamentos

A melhoria da compatibilidade entre cimento e madeira pode ser obtida por meio de tratamentos dados à madeira com a finalidade de reduzir a presença de substâncias inibidoras. Segundo John e Anandjiwala (2008), o tratamento alcalino leva ao aumento da quantidade de celulose amorfa a custo da celulose cristalina, além de promover a remoção parcial de constituintes amorfos como a hemicelulose, lignina e óleos solúveis em soluções alcalinas (TROEDEC et al., 2008). Uma importante modificação ocorre com a remoção da ponte de hidrogênio da estrutura da fibra. Durante o tratamento alcalino, os grupos OH presentes nas fibras reagem com o NaOH conforme a seguinte reação:



O tratamento alcalino em fibra de celulose causa um inchaço, na qual a estrutura cristalina da celulose relaxa. Estudos têm mostrado que o Na⁺ tem um diâmetro favorável, capaz de aumentar o menor dos poros (JOHN; ANANDJIWALA, 2008). Alberto et al. (2000), estudando a compatibilidade entre espécies de madeira originárias de Moçambique e cimento, por meio do calorímetro e calvet, observaram que o tratamento com solução de NaOH foi o que obteve melhores resultados para duas de três espécies estudadas (Figura 2.2).

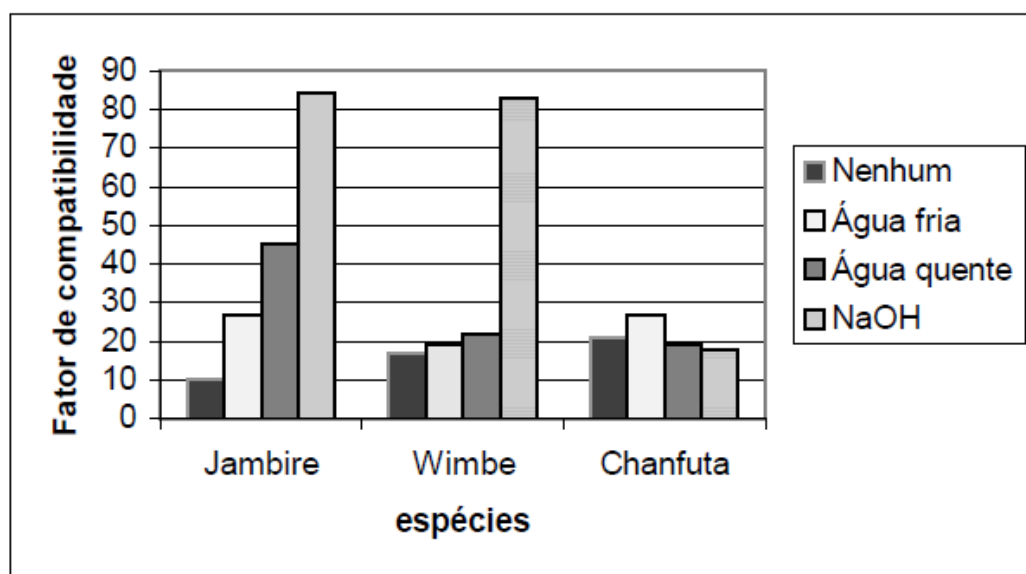


Figura 2.2: Efeito do tratamento dado às partículas de três espécies de madeira (ALBERTO et al., 2000)

Asasutjarit et al. (2007), estudando o melhor tratamento (fibras in natura, lavadas em água corrente e imersas em água quente por duas horas) para as fibras de coco e as melhores relações de cimento:coco:água (1:1:1, 1:2:1 e 2:1:2) e tamanho ótimo das fibras (1–13 cm, 1–6 cm e 0,1–0,4 cm), verificaram que o tratamento imersão das fibras de coco em água quente foi suficiente para reduzir os compostos químicos inibidores da cura do cimento – açúcares, taninos, resina, fenóis, melhorando algumas propriedades físicas e mecânicas da fibra de coco. Os painéis que obtiveram, em geral, melhores propriedades foram os que tinham a relação (cimento:coco:água) de 2:1:2 e tamanho de fibra de 1-6 cm.

Moslemi et al. (1983), estudando o impacto de vários tratamentos (sem tratamento, imersão em água quente, imersão em solução 1% de NaOH e adição de aditivos químicos) na compatibilidade entre as madeiras de *Pinus contorta* e *Larix lyallii* e o cimento, verificaram que nos tratamentos de imersão em água quente e em solução de NaOH, o índice de inibição da madeira da espécie *Larix lyallii* com o cimento passou de inibição extrema para baixa inibição. Já a adição de CaCl_2 melhorou a formação cristalina do cimento e aumentou a ligação entre o cimento e as partículas de madeira. Santiago e Selvam (2007) estudaram diversos tratamentos para a fibra de coco e verificaram que o tratamento imersão em água quente a 80°C por uma hora sob agitação foi mais efetivo com relação a lixiviação da camada superficial.

Gnanaharan e Dhamodaran (1985), estudando a compatibilidade de 13 espécies de madeira tropical para serem incorporadas a uma matriz cimentícia, verificaram que houve

uma melhora em sua compatibilidade apenas com a imersão do material em água fria (48 horas) e em água quente (três horas). Observações semelhantes foram feitas por Sutigno (2000), quando avaliou o efeito da extração aquosa (três dias em água fria e três horas em água quente) da madeira de teca (*Tectona grandis*) para a produção de painéis minerais. Os tratamentos foram suficientes para reduzir os teores de extrativos e aumentar as temperaturas de hidratação, conseqüentemente melhorar a compatibilidade da teca com o cimento.

2.2.2. Aditivos aceleradores de cura

A adição de algumas substâncias químicas aos painéis de cimento-madeira durante a sua produção tem como finalidade melhorar a adesão das partículas da madeira ao cimento, reduzir o tempo de cura do cimento, acelerar a pega, etc. (LATORRACA, 2003). O uso de aditivos aceleradores provoca o endurecimento rápido da mistura, por meio do aumento na formação da estrutura cristalina do cimento, as substâncias inibidoras solúveis em água contidas na madeira não são liberadas imediatamente em quantidades que impeçam a reação exotérmica do cimento (ZUCCO, 1999).

Os aditivos aceleradores têm função de eliminar os efeitos desfavoráveis das substâncias da madeira solúveis em água, sobre o endurecimento, além de reduzir o longo período de tempo de cura dos painéis (LATORRACA, 2000). A adição de aceleradores da cura do cimento também influencia fortemente a resistência dos compostos de cimento-madeira. Simples eletrólitos inorgânicos, como CaCl_2 e MgCl_2 estão entre os aditivos mais eficazes para neutralizar os efeitos inibitórios de muitas espécies de madeira durante a fabricação dos compostos (WEI et al., 2000).

Wei et al. (2000), analisando a utilização de 30 diferentes tipos de aditivos aceleradores da cura em painéis de cimento-madeira, mostraram que 11 aditivos químicos, dentre eles os cloretos de cálcio (CaCl_2), de ferro (FeCl_3) e de estanho (SnCl_2), produziram elevada temperatura de hidratação com adição de 4% desses aditivos baseado na massa de cimento. Esses aditivos foram eficientes na melhora da compatibilidade entre o cimento e *Betula platyphylla*. A Tabela 2.1 apresenta o efeito positivo desses aditivos sobre o módulo de ruptura e a ligação interna desses compostos.

Tabela 2.1: Efeito dos aditivos na pega do cimento em compostos

Aditivo Químico	Temperatura (°C)	Tempo Pega (h)	MOR (MPa)	Ligação interna (MPa)
CaCl ₂	54,3	8,70	13,26	0,69
FeCl ₃	54,0	15,70	12,09	0,62
SnCl ₂	50,0	17,80	7,63	0,52
AlCl ₃	47,2	8,30	6,78	0,56
Al ₂ (SO ₄) ₃	44,3	14,00	7,65	0,58
MgCl ₂	41,5	13,00	6,59	0,43
Cimento+ madeira	40,8	10,20	3,53	0,26

Fonte: Wei et al. (2000).

Okino et al. (2004), analisando a espécie *Hevea brasiliensis*, verificaram que o teste de inibição classificou a seringueira como “extrema inibição”, no entanto a adição de CaCl₂ alterou a compatibilidade das partículas, que passaram a ser classificadas como de “baixa inibição”, ou seja, adequadas para o uso como reforço em painéis minerais.

Olorunnisola (2007), estudando o efeito da geometria das partículas e de aditivo químico acelerador da cura do cimento (CaCl₂) sobre as propriedades do painel, constataram que a adição de CaCl₂ foi benéfica ao painel de cimento/rattan (*Laccoperma secundiflorum*), uma vez que houve uma redução no tempo de cura, uma melhora na densidade e na sua aparência.

Lee e Short (1989), estudando tratamentos em madeiras folhosas para serem usadas como reforço em painéis cimento-madeira, verificaram que os tratamentos com Na₂SiO₃ e CaCl₂ melhoraram as propriedades de flexão estática dos painéis.

Aditivos minerais, como a sílica ativa, também são empregados em painéis minerais. A sílica ativa é um material extraído a partir da escória na fabricação de ligas metálicas, de cinzas de cascas de arroz ou de material restante das colheitas de grão (SILVA et al., 2006). A substituição do cimento por várias porções de sílica ativa tem um efeito surpreendente sobre as propriedades de resistência dos painéis feitos com espécies de baixa compatibilidade (LATORRACA, 2003).

Silva et al. (2006), estudando a adição de diferentes relações de casca e sílica ativa em compostos minerais de cimento, observaram que a inclusão da casca pode ser viabilizada com a adição de 20% de sílica ativa na composição dos painéis, que melhoraram as propriedades físicas e mecânicas dos painéis. Já Del Menezzi et al. (2007), estudando a confecção de

painéis minerais do tipo OSB, verificaram que a substituição de 10% do cimento por sílica ativa melhorou as propriedades mecânicas do painel.

A injeção de dióxido de cálcio (CO₂) à mistura de cimento e madeira é um método que reduz o tempo de prensagem do material. A exposição do cimento ao CO₂ reduz a duração do estágio inicial de endurecimento da mistura (JORGE et al., 2004). Isso é resultado da reação química do CO₂ com carbonato de cálcio e água. Geimer et al. (1992), estudando a injeção de CO₂ em painéis de cimento-madeira, verificaram um aumento no MOE e no MOR, além de afirmarem que essa injeção melhorou a compatibilidade entre a madeira e o cimento.

3. MATERIAL E MÉTODOS

No delineamento experimental deste capítulo (Tabela 3.1) foram incluídos: o estudo da compatibilidade da fibra do coco in natura (sem tratamento), tratada (água fria, água quente e NaOH) e com adição de CaCl₂ com o cimento e o estudo da composição química das fibras de coco in natura e tratadas (água fria, água quente e NaOH). No ensaio de inibição, mediu-se a evolução da temperatura de hidratação do cimento na ausência e na presença da fibra para determinar o índice de inibição da pega do cimento pelo coco verde (*Cocos nucifera* L.) e o estudo da composição química compreendeu nos ensaios de teor de extrativos e teor de lignina, além do cálculo da holocelulose.

Tabela 3.1: Delineamento experimental

Ensaio	Amostra	Repetições
Ensaio de Inibição	Cimento	4
	Sem tratamento	4
	Água Fria	4
	Água quente	4
	NaOH	4
	CaCl ₂	4
Composição química	Teor de extrativos	3
	Teor de Lignina	3
	Holocelulose	-

3.1. Teste de inibição

O método utilizado para avaliar a compatibilidade entre a fibra de coco e o cimento foi baseado em estudos prévios feitos por Weatherwax e Tarkow (1964) e Hofstrand et al. (1984). Os ensaios foram feitos, em quatro repetições cada um, em uma sala de climatização com temperatura $(20\pm 3)^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa $(60\pm 5)\%$ controladas.

Para o teste de inibição, as fibras tratadas e picadas (Material e Métodos geral) foram classificadas por um sistema de peneiras metálicas. O material selecionado para o ensaio foi aquele que passou pela peneira de 40 mesh e ficou retido na de 60 mesh (-40+60). Em sacos plásticos foram colocados 200 g de cimento Portland CP-II-Z-32 (marca Votorantim), 15 g de fibra de coco seca e 90,5 g de água destilada. Em seguida, o cabo termopar tipo “K” (instrumento de medição de temperatura) foi introduzido na mistura. Cada saco plástico com uma mistura foi colocado em um recipiente térmico (Figura 3.1a). O cabo termopar foi conectado a um receptor de sinais (*datalogger*), e os dados foram lidos e convertidos em valores de temperatura por um programa de computador (Lynx) (Figura 3.1b). As leituras das temperaturas foram feitas em intervalos de dez segundos por um período de 22 horas.

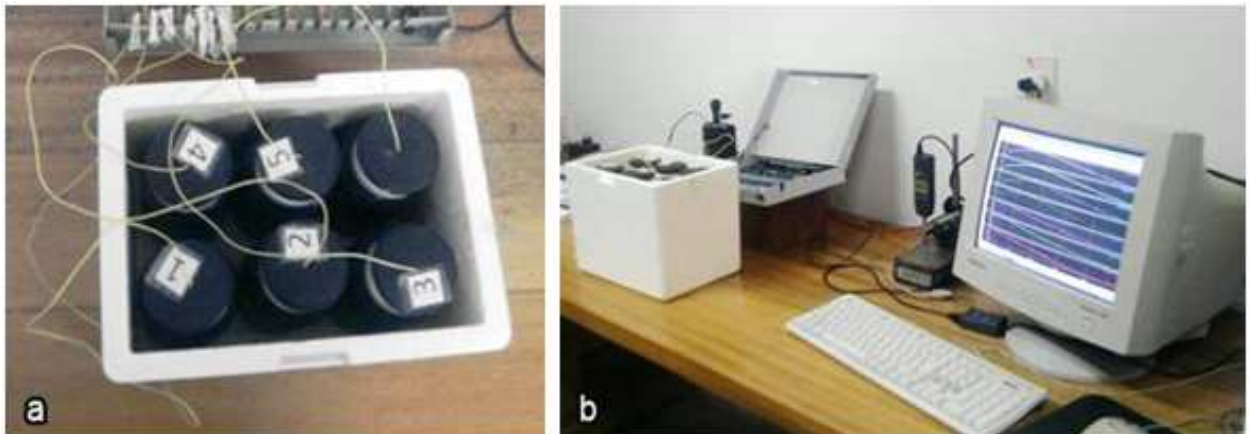


Figura 3.1: Ensaio de inibição do coco com o cimento Portland

O índice de inibição (I) foi calculado conforme a equação 1 (HOFSTRAND; MOSLEMI; GARCIA, 1984):

$$I(\%) = \left[\frac{(T_{cim} - T_m)}{T_{cim}} \times \frac{(H_m - H_{cim})}{H_{cim}} \times \frac{(S_{cim} - S_m)}{S_{cim}} \right] \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Onde: T_{cim} = Temperatura máxima da mistura cimento/água ($^{\circ}C$); T_m = Temperatura máxima da mistura fibra de coco/cimento/água ($^{\circ}C$); H_{cim} = Tempo para atingir a temperatura máxima de hidratação do cimento na mistura cimento/água (h); H_m = Tempo para atingir a temperatura máxima da mistura de hidratação do cimento na mistura fibra de coco/cimento/água (h); S_{cim} = Máximo incremento de temperatura da curva na mistura cimento/água ($^{\circ}C/h$); S_m = Máximo incremento de temperatura da curva na mistura fibra de coco/cimento/água ($^{\circ}C/h$).

A compatibilidade entre a fibra do coco verde e o cimento foi classificada de acordo com a Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Classificação do material lignocelulósico de acordo com o índice de inibição

Índice de inibição (%)	Classificação
$I \leq 10$	Baixa inibição
$10 < I \leq 50$	Média inibição
$50 < I \leq 100$	Alta inibição
$I > 100$	Inibição extrema

Fonte: Okino et al. (2004).

3.2. Caracterização química das partículas tratadas e não tratadas

3.2.1. Determinação dos extrativos

Os extrativos são compostos solúveis em solventes orgânicos. A extração em etanol:tolueno (1:2 v/v) permite remover carboidratos de baixo peso molecular, como, por exemplo, sais, ácidos graxos, hidrocarbonetos não voláteis, etc. (TAPPI, 1997). A determinação do teor de extrativos foi feita de acordo com a norma TAPPI T 204 (TAPPI, 1997). Para essa determinação, as fibras do coco in natura e tratadas (água fria, água quente e NaOH) foram moídas e classificadas por um sistema de peneiras vibratórias. O material selecionado foi aquele classificado nas peneiras -40/+60 mesh.

Pesou-se 1 g de amostra – em duplicata – da fibra do coco in natura e tratada (água fria, água quente e NaOH) em um tubo de celulose. Cada tubo de celulose foi colocado em um extrator de Soxhlet, a extração foi feita, primeiramente, com etanol:tolueno (1:2) por um período de 8 horas após o primeiro refluxo. Na sequência, realizou-se a extração por etanol por um período de 6 horas após o primeiro refluxo, deixando as amostras secarem a

cada extração. Posteriormente, colocou-se o balão na estufa a 115°C por uma hora para eliminar o excesso de solvente e pesada. Com isso calculou-se a percentagem de extrativos totais (ET, %) conforme a equação 2:

$$ET (\%) = \frac{P_a}{P_s} \times 100 \quad (\text{Equação 2})$$

Onde: Pa - peso seco do extrativo; Ps – peso seco da amostra (g)

3.2.2. Determinação dos teores de lignina solúvel e insolúvel

Os teores de lignina solúvel e insolúvel em ácido foram determinados de acordo com as normas de procedimento de análise em laboratórios LAP 003 (TEMPLETON; EHRMAN, 1996) e LAP 004 (EHRMAN, 1996). As amostras livres de extrativos foram submetidas à análise somativa para determinação da lignina.

Lignina insolúvel: Colocou-se 0,3 g da amostra em tubo de ensaio, que foi submetido à hidrólise com ácido sulfúrico a $(30,0 \pm 1)^\circ\text{C}$, posteriormente as amostras ficaram por duas horas em banho maria (30°C) sob agitação a cada 15 min. Em seguida, a amostra foi autoclavada - por uma hora a 121°C - e filtrada. Posteriormente o sólido retido foi levado à estufa a 105°C por 4 horas. Com isso se considerou lignina insolúvel o sólido retido. O conteúdo lignina insolúvel (L_i , %) foi determinado pela equação 3:

$$L_i(\%) = \frac{m_1}{m_2} \times 100 \quad (\text{Equação 3})$$

Onde: m_1 - massa de resíduo, base seca (g); e m_2 - massa da amostra, base seca(g).

Lignina solúvel: o líquido remanescente da filtração da lignina insolúvel continha lignina solúvel. O filtrado foi analisado em um espectrofotômetro Femto 700 plus, cuja absorvância foi medida a 205 nm, tendo o ácido sulfúrico a 4% como branco. A concentração de lignina solúvel (L_s , %) foi calculada conforme a equação 4.

$$L_s(\%) = \left(\frac{L_{sol} \times V \times \frac{1000 \text{ mL}}{100}}{W \times T_{final}} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 4})$$

Onde: L_{sol} - lignina solúvel (g/L); V - volume do filtrado (87 mL); W - massa inicial (g); T_{final} - teor de sólidos da amostra (%).

A lignina solúvel (L_{sol} , g/L) foi determinada conforme a equação 5:

$$L_{sol}(\text{g/L}) = \frac{A}{b \times a} \times df \quad (\text{Equação 5})$$

Onde: A - absorvância a 205 nm; df - fator de diluição; b - percurso ótico da cubeta (10mm); a - absorvidade igual a 110 L/g-cm.

O teor de lignina total (L_t , %) consistiu na soma das frações de lignina solúvel (L_s , %) e lignina insolúvel (L_i , %).

3.2.3. Determinação do teor de cinzas

O teor de cinzas foi determinado de acordo com a norma ASTM D 1102 – 84 (2007). Colocou-se em cadinhos esterilizados 2 g de uma amostra da fibra de coco verde in natura e tratada (água fria, água quente e NaOH). Determinou-se o peso do cadinho mais amostra, e colocou-se em estufa a 100-105°C, para determinar o teor de umidade.

A amostra seca foi colocada, sem tampa, na mufla. Aqueceu-se até atingir temperatura final de 580°C a 600°C. Em períodos de 30 minutos foram pesados os cadinhos mais as amostras até que o peso, após o resfriamento, fosse constante com variação menor que 0,2 mg.

O teor de cinzas (TC, %) foi calculado conforme equação 6:

$$TC(\%) = \frac{W_1}{W_2} \times 100 \quad (\text{Equação 6})$$

Onde: W_1 - peso das cinzas (g) e W_2 - peso da amostra seca em estufa (g).

3.2.4. Determinação da Holocelulose

A percentagem de holocelulose (Hol, %) foi calculada conforme a equação 7 (ANDRADE et al., 2010):

$$\text{Hol (\%)} = 100 - (\text{ET} + \text{L}_t) \quad (\text{Equação 7})$$

3.3. Análise estatística

A compatibilidade da fibra do coco com o cimento e a análise da composição química do coco verde (teor de lignina, extrativos e teor de cinzas) foram analisadas por meio da análise de variância (ANOVA). Quando houve rejeição da hipótese de nulidade foi aplicado o teste de média LSD (*Least Significant Difference*) ao nível de significância de 5%.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores obtidos no ensaio de inibição podem ser observados na Tabela 4.1. A mistura do material ideal deve atingir a temperatura máxima (T_m) em menor tempo (t), com um máximo incremento (S_m). O índice de inibição (I) da mistura cimento-fibra de coco in natura (sem tratamento) foi de 186,28 sendo considerada “inibição extrema” de acordo com a tabela 3.2. Observação semelhante foi feita por Olorunnisola (2008) ao estudar fibra de coco para a confecção de painéis de cimento.

Segundo Toledo Filho et al. (2003), esse resultado já era esperado uma vez que um dos principais problemas das fibras naturais está relacionado à incompatibilidade entre os seus componentes e a matriz. Vários componentes presentes nas fibras - tais como hemicelulose, lignina, açúcares, fenóis e taninos - interferem na pega do cimento.

Segundo o teste de media LSD (Tabela A.1 – Apêndice), os índices de inibição dos tratamentos água fria e água quente foram, respectivamente, 20,85 e 14,07, sendo classificados como “média inibição” de acordo com a Tabela 3.2, no entanto, não houve diferença estatística significativa entre esses tratamentos. Já a adição do CaCl_2 e o tratamento com NaOH alteraram a compatibilidade das fibras com o cimento, que passaram a ser classificadas – segundo a Tabela 3.2 – como “baixa inibição”, indicando a eficiência dos tratamentos químicos nas fibras de coco, não havendo diferença estatisticamente significativa entre estes tratamentos.

Asasutjarit et al. (2009) – estudando as propriedades mecânicas e materiais de painéis reforçados com coco tratado – observaram que com os tratamentos (imersão em água fria e água quente) houve um aumento na eficiência da fibra de coco como reforço em compostos, aumentando a adesão interfacial entre o coco e a matriz.

As temperaturas máximas (T_m) das diferentes misturas de cimento-coco podem ser observadas na Tabela 4.1. Os valores de T_m variaram de 30,47°C para a mistura com coco in natura (sem tratamento) a 55,06°C para a argamassa de cimento puro. O valor encontrado de T_m para a sem tratamento foi inferior a 39°C, relatado por Olorunnisola (2008) para as mesmas condições. Um aumento da T_m foi observado para todas as misturas com fibras tratadas.

Tabela 4.3: Índice de inibição da fibra de coco

Tratamento	Tempo para se alcançar a temperatura máxima (h)	Temperatura máx (°C)	S máx. (°C/h)	I (%)
Cimento Sem tratamento	11,00	55,06	-	-
Água fria	1,08	30,47	28,21	186,28 ^a
Água 80°C	20,02	32,92	1,64	20,85 ^b
CaCl ₂	17,56	34,15	1,94	14,07 ^b
NaOH	14,86	42,88	2,89	2,97 ^c
	12,87	46,96	3,65	2,24 ^c

NOTA: Letras distintas numa mesma coluna indicam diferença significativa pelo teste dos LSD ao nível de $\alpha = 0,05$.

As curvas de hidratação, ao longo do tempo, da argamassa padrão de cimento Portland e de suas misturas com fibra de coco verde – in natura (sem tratamento) e tratada (água fria, água quente e NaOH)) são apresentadas na Figura 4.1. Esses perfis avaliam qualitativamente, de maneira simples, o comportamento de pega do cimento com a adição da fibra do coco.

Verifica-se o efeito inibitório desta fibra em relação às reações de hidratação do cimento, uma vez que a argamassa padrão atingiu o pico de temperatura - próxima a 60°C - em onze horas, já a fibra do coco in natura (sem tratamento) atingiu sua temperatura máxima - 30,5°C – em torno de 1 hora (Tabela 4.1). Segundo Zhou e Kamem (2002), a diminuição da T_m pode ser causada por um menor valor de endurecimento do cimento, ou pela presença de uma determinada massa de material lignocelulósico que não contribua para a geração de calor, mas, ao contrário, o absorva.

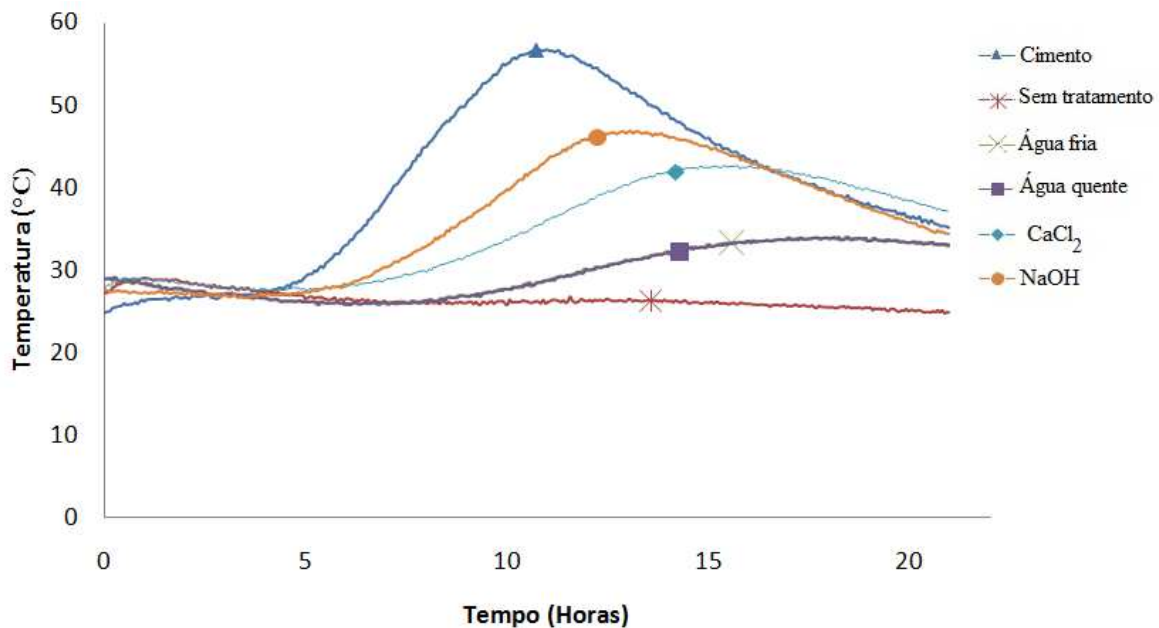


Figura 4.1: Curva de hidratação do cimento na presença do coco e apenas cimento-água

Podem ser observados na Tabela 4.2, os teores de extrativos, lignina e holocelulose para a fibra do coco verde com diferentes tratamentos. Nota-se que a análise da composição química da fibra de coco confirmou o alto teor de lignina presente nesta fibra, observação semelhante foi feita por van Dam et al. (2004), quando analisaram o coco verde para a produção de painéis.

Verificou-se que, em relação aos extrativos, a fibra sem tratamento e o tratamento água fria apresentaram teores de extrativos próximos (4,86% e 4,82%, respectivamente) e sem diferença estatística significativa entre si, enquanto que os tratamentos água quente e NaOH apresentaram teores de extrativos menores e diferentes estatisticamente entre si (3,68% e 2,48%, respectivamente).

Pode-se observar que todos os tratamentos reduziram a percentagem de extrativos presentes na fibra e paralelamente a isso, a compatibilidade dessa fibra com o cimento melhorou com os tratamentos. Segundo Hachmi e Moslemi (1989), Sutigno (2000) e Vaickelionis e Vaickelioniene (2006), esse fenômeno ocorre, pois, em geral, há uma relação inversa entre o teor de extrativos da madeira e a temperatura de hidratação da mistura de cimento-madeira. Sutigno (2000) verificou que após a imersão da madeira da espécie *Tectona grandis* em água fria e água quente, os taninos e os açúcares de madeira, que inibem a hidratação do cimento, diminuíram de modo que a temperatura de hidratação aumentou.

Segundo o teste de média LSD (Tabela A.2 – Apêndice) pode-se observar que entre os tratamentos, a composição química apresentou variações. As fibras - sem tratamento; água fria, água quente e NaOH – apresentaram, respectivamente, os seguintes teores de lignina: 34,24%; 30,80%; 29,73% e 27,23%. No entanto, como pode ser verificado, não houve diferença estatisticamente significativa entre a fibra sem tratamento e o tratamento água fria e entre os tratamentos água fria, água quente e NaOH.

O teor de lignina da fibra de coco in natura (sem tratamento) pode ser comparado aos resultados apresentados por Asasutjarit et al. (2007) e Abdul Khalil et al. (2006). Os autores estudaram a produção de painéis reforçados com a fibra do coco e sua composição química, respectivamente. Os valores obtidos foram 32,1% e 32,8%, respectivamente, valores inferiores ao apresentado nessa pesquisa. Já Corradini et al. (2009), estudando a composição química de diversas variedades de coco, observaram que a lignina variou de 36-43%, dependendo da procedência, valores superiores ao apresentado nesse estudo.

Tabela 4.2: Composição química da fibra do coco (%)

Tratamento	Extrativos	Lignina total	Holocelulose
Sem tratamento	4,86 ^a	34,24 ^a	60,9
Água fria	4,82 ^a	30,80 ^{ab}	64,38
Água quente	3,68 ^b	29,73 ^b	66,59
NaOH	2,48 ^c	27,23 ^b	70,29

NOTA: Letras distintas na mesma coluna indicam diferença significativa pelo teste dos LSD ao nível de $\alpha = 0,05$.

Os valores médios de teor de cinzas para os diferentes tratamentos (sem tratamento, água fria, água quente e NaOH) (Tabela A.2 – Apêndice) foram, respectivamente, 1,15%; 1,69%; 1,10% e 7,85%. Em termos de teor de cinzas, a fibra de coco verde in natura (sem tratamento) apresentou valor superior ao encontrado (0,86%) por Kruse e Frühwald (2001), próximo ao encontrado (1,25%) por Ramirez et al. (2010) e inferior aos valores encontrados (2,2%; 2,8% e 3,8%) por Abdul Khalil et al. (2006), Asasutjarit et al. (2007) e Vale et al. (2004), respectivamente.

Verificou-se que os valores de holocelulose (celulose+hemicelulose), nos diferentes tratamentos, aumentaram com a redução dos outros constituintes químicos como a lignina e os extrativos. A fibra de coco sem tratamento apresentou menor percentagem de holocelulose (60,90%) enquanto o tratamento NaOH obteve o maior valor de holocelulose (70,29%). O valor encontrado de holocelulose para a fibra de coco verde in natura (sem tratamento) é superior ao valor observado por Abdul Khalil et al. (2006), que foi de 56,3% e inferior ao

observado Asasutjarit et al. (2007), que foi de 68,9%. O teor de holocelulose encontrado para o tratamento com água quente pode ser parcialmente comparado aos resultados apresentados por Asasutjarit et al. (2007). Os autores observaram um valor de holocelulose de 73,9%, valor superior ao apresentado nesse estudo.

Este comportamento - aumentar o teor de holocelulose com a redução dos extrativos e da lignina – também foi observado por Asasutjarit et al. (2007), no entanto, deve-se levar em consideração que não se pode estabelecer uma relação de causalidade, ou seja, a holocelulose não aumentará em termos absolutos, apenas percentualmente. Não há produção de holocelulose com a redução de outros constituintes por meio de diferentes tratamentos.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos neste capítulo, foi possível concluir que:

- A fibra do coco in natura é extremamente inibidora da pega do cimento, confirmando a necessidade de se fazer um tratamento;
- Os tratamentos água quente e NaOH e a adição de CaCl_2 reduziram o efeito inibitório das fibras de coco na pega do cimento Portland CP II-Z-32, permitindo a introdução dessas fibras na produção de painéis minerais;

CAPÍTULO 2

EFEITO DO TRATAMENTO E DA RELAÇÃO CIMENTO:FIBRA DE COCO SOBRE AS PROPRIEDADES DE PAINÉIS À BASE DE CIMENTO PORTLAND

1. INTRODUÇÃO

Uma grande quantidade de resíduos agrícolas é produzida todos os anos no mundo todo. Esses resíduos podem ser eliminados de diversas formas, porém a técnica mais eficiente é reutilizá-los, produzindo um novo produto (KHEDARI et al., 2001). O uso desses resíduos como material a ser adicionado ao ligante mineral, como o cimento, fornece uma alternativa interessante para enfrentar o desafio da eliminação desses resíduos e apoio a sustentabilidade ambiental (ABDEL-KADER; DARWEESH, 2010).

A utilização de materiais de construção à base de cimento reforçado por fibras vem aumentando rapidamente nos últimos anos, principalmente em países desenvolvidos, que têm investido de forma significativa nessa área. Estima-se que atualmente a produção mundial desses materiais seja de aproximadamente 30 milhões de toneladas por ano, se concentrando, principalmente, nos países asiáticos (CAMPELLO et al., 2007).

Os painéis reconstituídos estão na classe de produtos que auxiliam a construção civil, uma vez que são utilizados como paredes, pisos e coberturas, podendo ser utilizados de forma modulada, o que implica em uma redução do tempo e custo da mão de obra (QUINTANA, 2009). Os compostos de cimento-madeira oferecem vantagens sobre alguns materiais de construção convencionais. Estes satisfazem as necessidades de segurança e saúde, pois sendo materiais à base de cimento, são mais resistentes aos ataques de fungos e insetos, além de serem resistentes ao fogo, o que aumenta a sensação de segurança. O isolamento térmico e acústico proporcionado por esse tipo de painel, também deve ser considerado (RAMIREZ CORETTI et al., 1998; ARO, 2008).

Segundo Matoski e Iwakiri (2007), as características físicas e mecânicas são indicadores para a empregabilidade dos painéis de cimento-madeira, pois esses podem ser serrados, pregados, colados, permitindo assim, uma ampla utilização. Essas mesmas características permitem que sejam pintados, chapiscados e revestidos por outros tipos de materiais. A versatilidade desses painéis permite que o fabricante agregue valor ao produto na medida em que, em vez de brutos, esses podem ser entregues lixados, pintados ou revestidos, permitindo que sejam utilizados diretamente com material de acabamento.

Estas características físicas e mecânicas do painel de cimento-madeira são propriedades importantes e são afetadas, principalmente, por: espécies de material lignocelulósico, geometria da partícula, tipo de matriz mineral, tipos de aditivos, relações cimento:madeira, etc.

1.1. Objetivos

Os principais objetivos desse estudo foram: comprovar a eficácia do ensaio de inibição com relação às propriedades físicas e mecânicas do painel, avaliar a viabilidade técnica de se produzir painéis minerais de cimento reforçados com fibra de coco com diferentes tratamentos e verificar o efeito da variação da relação cimento:fibra de coco sobre as propriedades físicas e mecânicas do painel.

1.2. Hipótese

- Reduzindo-se a inibição, tem-se um painel com propriedades mais adequadas;
- Essa melhora pode ser mais significativa com o aumento da relação cimento:fibra de coco.

2. REVISÃO DE BIBLIOGRAFIA

2.1. Produção de painéis de cimento-material lignocelulósico

Os painéis minerais de cimento são produzidos em plantas industriais relativamente pequenas e com tecnologia obsoleta. A capacidade das plantas industriais varia de 1,39 a 10,22 milhões de m², essa pequena capacidade se dá, principalmente, pela cura lenta do material. A tecnologia de produção dos painéis particulados de cimento-madeira é muito similar ao processo de produção de aglomerados com resina sintética (MOSLEMI, 1999).

Em geral, os painéis Bison de cimento-madeira da indústria NCL LTDA são produzidos a partir da mistura de 62% de cimento, 28% de madeira e 10% de água e produtos químicos. As espécies de madeira usadas são as de rápido crescimento, como o eucalipto e a casuarina. O painel é produzido com 9±3% de umidade, tem densidade de 1250 kg/m³, MOE de 3000 MPa e MOR de 9 MPa (NCL, SD).

A Figura 2.1 ilustra um processo típico de produção de painéis de cimento-madeira. A seleção de espécies compatíveis ao cimento é fundamental para sucesso da produção desses compostos. Segundo Aro (2008), algumas espécies de madeira como *Alnus glutinosa* e *Larix decidua*, por exemplo, têm mostrado uma compatibilidade limitada com o cimento, devido a presença de substâncias - como taninos e açúcares - que retardam a cura de cimento. Portanto, é importante escolher espécies adequadas ou remover essas substâncias inibidoras antes de iniciar a confecção do painel.

No processo de produção desses painéis observa-se, primeiramente, que a madeira é reduzida a partículas, essas são classificadas em sistema de peneiras. Logo após a mistura dos componentes básicos desse produto - madeira, água e cimento - são formados os colchões que serão prensados. Após a prensagem, esses colchões são depositados em aparatos onde são grampeados e passam pelo o processo de cura - em sala de climatização - cuja duração varia segundo o fabricante. Concluído o processo de cura, os grampos são retirados e o material é estocado, durante um período pré-determinado. Na sequência os painéis passam pelo processo de secagem, corte, acabamento e expedição (MOSLEMI, 1999).

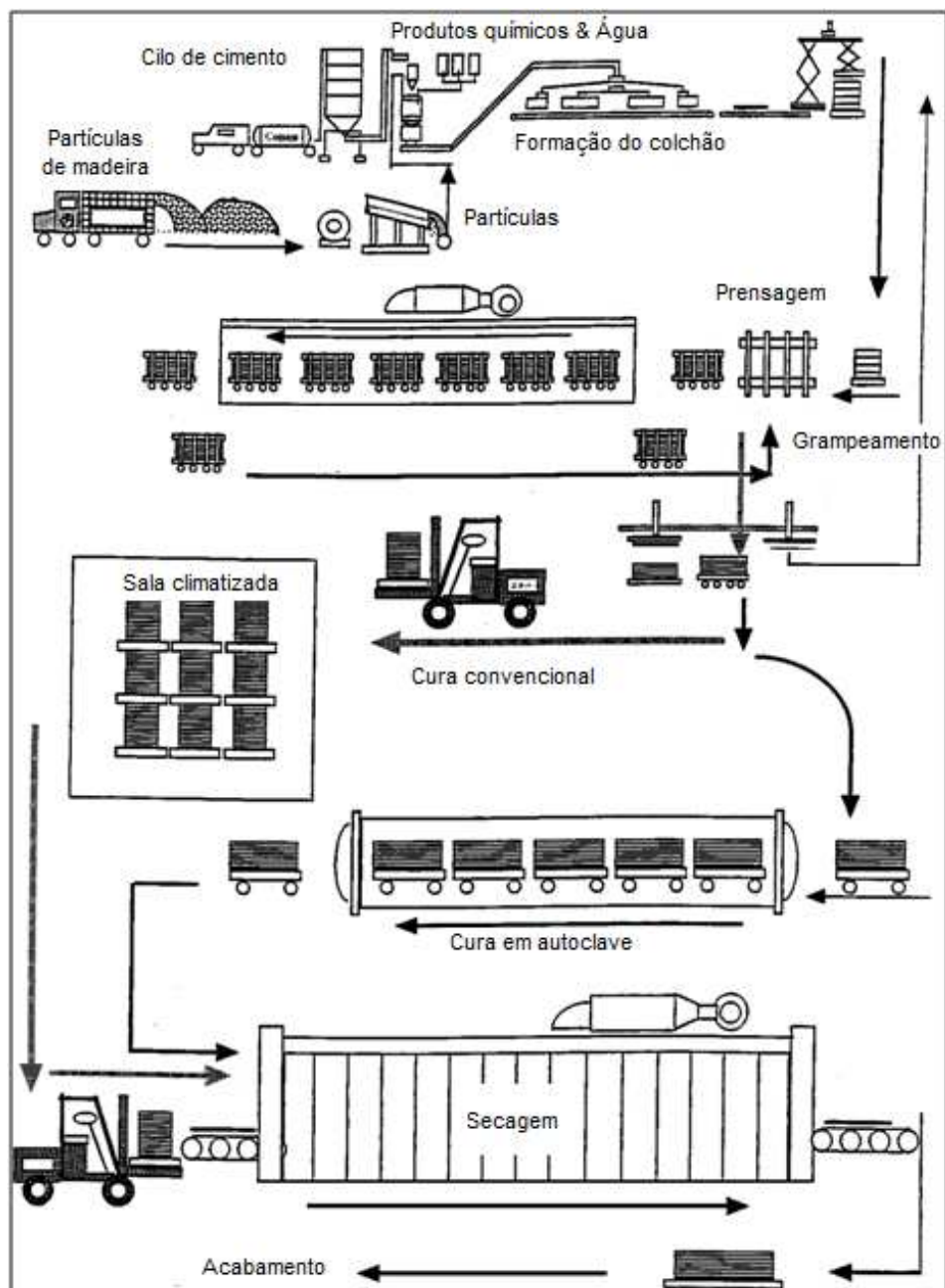


Figura 2.1: Planta esquemática do lay-out de produção de cimento-madeira

Fonte: modificado de Moslemi (1999)

2.2. Fatores que afetam as propriedades dos painéis de cimento/material lignocelulósico

Segundo Jorge et al. (2004), identifica-se facilmente uma série de variáveis que poderiam influenciar as propriedades do produto final, como: as espécies de madeira/material lignocelulósico e suas características químicas e físicas, a granulometria e a geometria da

partícula, o tipo de cimento, os aditivos – em geral são aceleradores de cura, mas também há retardadores de cura - as relações de cimento:madeira:água, a temperatura do ambiente, etc.

O termo “partícula” é definido como o componente agregado de um painel de partículas de madeira ou outro material com elementos lignocelulósicos, incluindo todas as menores subdivisões da madeira fabricadas por meios mecânicos (HASELEIN et al., 2002). O objetivo de se adicionar partículas ao cimento é, principalmente, aumentar o módulo de ruptura e melhorar a propriedade de isolamento térmico do composto.

As propriedades mecânicas, como a resistência mecânica, a flexão estática e as tensões paralela e perpendicular, são propriedades importantes do painel e são afetadas diretamente pela geometria da partícula. A mesma também influi nas propriedades físicas dos painéis, como absorção de umidade, mudanças correspondentes em dimensões e características da superfície (MOSLEMI, 1974).

Nos estudos de Semple e Evans (2004) foram avaliadas as propriedades de compostos de cimento produzidos com diferentes espécies de madeira (*E. biscotata*, *E. polybractea* e *P. radiata*), diferentes geometrias (*flakes* e partículas) e diferentes tratamentos (sem tratamento, imersão em água quente por 8 horas e adição de 2% de CaCl_2). Os resultados mostraram que, ao contrário de estudos anteriores, os painéis de cimento podem exigir partículas de tamanhos maiores que as usadas em painéis produzidos com resina. Como pode ser observado na Figura 2.2, o efeito da interação dos tratamentos das espécies estudadas e o tamanho das partículas no MOR dos painéis sugere que as partículas foram menos eficientes que os *flakes* na produção dos painéis de cimento.

Análise similar foi feita por Olorunnisola (2007), quando estudaram o efeito da geometria das partículas (0,6 mm e 0,85 mm) e da adição de 3% de CaCl_2 sobre as propriedades do painel de cimento-rattan (*L. secundiflorum*), e constataram que os painéis produzidos com partículas maiores (0,85 mm) apresentaram menor densidade e propriedades mecânicas melhores.

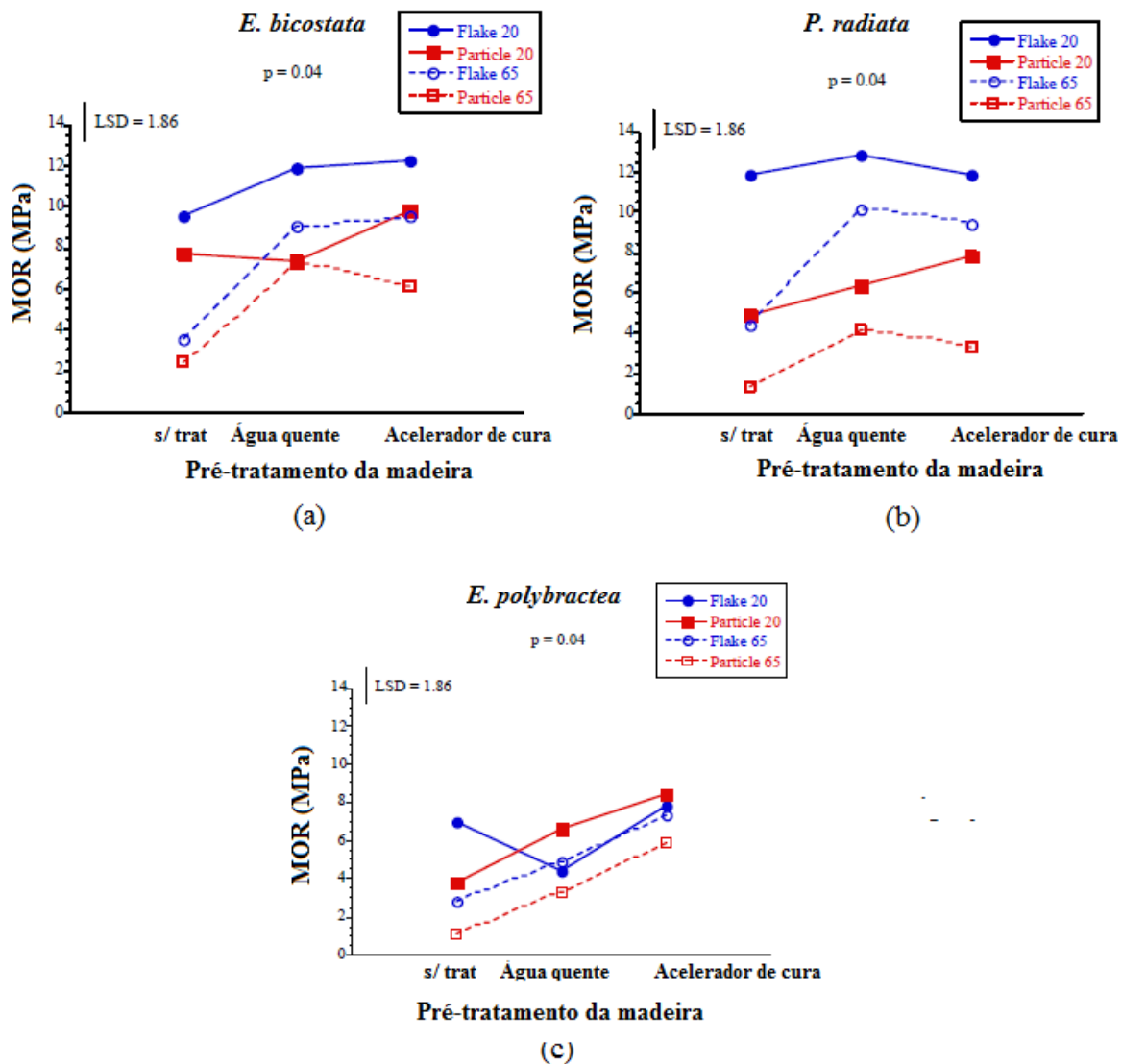


Figura 2.2: Efeito da interação dos tratamentos das espécies de madeira e do tamanho das partículas sobre o MOR (modificado de SEMPLE; EVANS, 2004).

As dimensões das partículas exercem influência marcante sobre as propriedades dos painéis, sobretudo quando se referem à flexão estática, por isso deve-se tomar cuidado ao se misturar as partículas com o cimento. As dimensões adequadas das partículas no processo industrial de produção do painel de cimento-madeira devem estar entre 2 – 20 mm de comprimento, 0,2 a 2,5 mm de largura e 0,3 a 0,9 mm de espessura. Outro fator importante no qual o tamanho das partículas exerce influência é o consumo de cimento, pois quanto maior a superfície específica das partículas, maior deve ser a quantidade de pasta de cimento a envolvê-las e, conseqüentemente, maior a quantidade de água necessária para a formação dessa pasta (LATORRACA; IWAKIRI, 2005).

A relação de cimento:madeira é um parâmetro que tem uma grande influência tanto sobre as propriedades físicas e mecânicas, como na condutividade térmica e no isolamento sonoro. No que diz respeito às propriedades mecânicas, os estudos de Moslemi e Pfister (1987), Latorraca e Iwakiri (2000), bem como Papadopoulos (2008), indicam que os valores de MOR são inversamente proporcionais a essa relação, ou seja, o aumento de MOR ocorre quando essa relação é reduzida.

Segundo Frybort (2008), as características de rigidez estão em função da relação cimento-madeira. Moslemi e Pfister (1987) mostraram uma correlação linear entre MOE e a relação de cimento:madeira (Figura 2.3), essa relação é baseada no fato de que o cimento é um material inerentemente mais rígido que a madeira, portanto, nesse estudo, razões maiores resultaram em valores mais altos de MOE. Já o inchamento em espessura diminuiu com o aumento dessa razão.

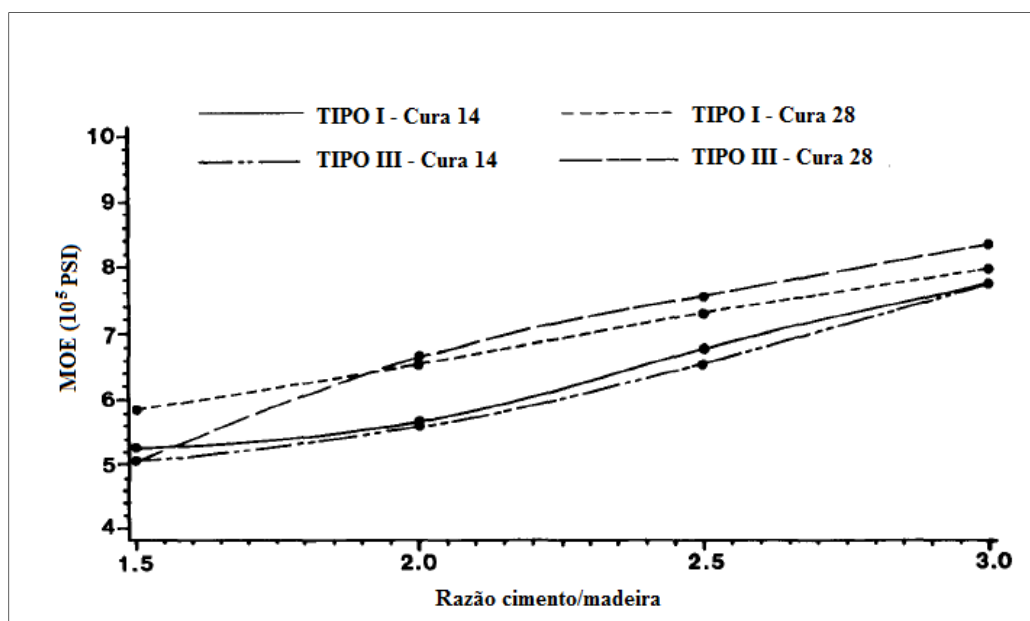


Figura 2.3: Correlação do MOE com a razão de cimento:madeira para diferentes tipos de cimento e tempo de cura (modificado de MOSLEMI; PFISTER, 1987).

Em geral, esta relação cimento:madeira depende do produto final e das partículas usadas. Por exemplo, a relação de cimento:madeira para produzir um painel tipo OSB com propriedades de flexão estática - MOR em particular - aceitáveis tem que ser menor que 2:1 (FRYBORT, 2008), já para painéis de cimento e partículas essa relação tem que ser maior. Zhou e Kamem (2002), estudando o efeito da relação de cimento:madeira (1:1; 1:1,5; 2:1; 2,5:1; 3:1; 3,5:1 e 4:1) nas propriedades do composto produzido com madeira tratada com

CCA, observaram que a relação 3:1 foi a que ofereceu maiores valores de resistência a flexão estática (MOE e MOR), com o aumento dessa relação houve uma queda nas propriedades do painel, exceto para a ligação interna, que apresentou melhor resultado na relação 3,5:1.

Latorraca e Iwakiri (2000), estudando o efeito dos tratamentos das partículas de *E. dunnii* (sem tratamento, imersão em água quente - a 80°C - por 1 hora e imersão em solução aquosa de NaOH a 1%, por 24 hora), da relação cimento:madeira (2,5:1 e 3:1) e da adição de aceleradores de cura (CaCl_2 e MgCl_2) sobre as propriedades físicas e mecânicas de compostos de cimento-madeira, verificaram que a variação na relação cimento:madeira de 2,5:1 para 3:1 implicou em uma redução significativa dos valores médios de MOE, MOR, compressão paralela e de todas as propriedades físicas, enquanto que para a ligação interna ocorreu um aumento.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Produção do painel de cimento reforçado com fibras de coco

No delineamento experimental (Tabela 3.1) foram incluídos dois tratamentos de partículas (imersão em água quente a 80°C por 90 minutos e imersão em solução aquosa de NaOH a 5%, por 72h) e a adição de 4% CaCl_2 , que obtiveram melhores índices de inibição (Capítulo I) e duas relações de cimento:fibra de coco (3:1 e 4:1). A relação de cimento:água foi constante e igual a 2,5:1. A combinação desses fatores gerou um total de seis tratamentos, para cada tratamento foram confeccionados quatro painéis, totalizando 24 painéis com dimensões de 35 cm x 35 cm x 1,25 cm (comprimento, largura e espessura) e densidade nominal de 1,20 g/cm³.

Tabela 3.4: Delineamento experimental

Tratamento	Relação cimento/fibra	Tratamento	Nº de painéis
1	3:1	T1	4
	4:1	T2	4
2	3:1	T3	4
	4:1	T4	4
3	3:1	T5	4
	4:1	T6	4

Nota: 1 – adição de 4% de CaCl_2 ; 2 - imersão em solução aquosa de NaOH a 5%; 3 - Imersão em água a 80°C por 90 minutos.

A mistura foi feita em um misturador mecânico (Figura 3.1a), no qual inicialmente adicionou-se a fibra do coco previamente tratada, triturada e classificada (1,50 e 1,00 mm). Posteriormente, por uma abertura na tampa do misturador, adicionou-se água com o auxílio de uma pistola de ar comprimido. O aditivo químico CaCl_2 foi misturado à água e adicionado à mistura com fibra de coco in natura, apenas. Com a fibra umedecida, adicionou-se o cimento Portland tipo CP-II-Z-32.

Com a mistura preparada (Figura 3.1b), foi iniciada a montagem dos colchões (Figura 3.1c). Foram utilizadas duas placas de metal de superfícies lisas, nas dimensões 50 cm x 50 cm, para cada colchão. A montagem dos colchões foi realizada sobre estas placas, com o auxílio de uma caixa formadora, com dimensões 35 cm x 35 cm, que foi colocada sobre a chapa de metal com um plástico, com o propósito de se evitar a adesão da massa à mesma.



Figura 3.1: Montagem do painel

Em seguida, foi feita uma pré-prensagem manual para reduzir a espessura do colchão (Figura 3.1d). Após a pré-prensagem, o colchão foi prensado à temperatura ambiente e pressão constante de 3,55 MPa por 24 horas (Figura 3.1e). Após a prensagem, os painéis foram retirados da prensa (Figura 3.1f) e colocados em uma sala de climatização por 27 dias - a temperatura (20 ± 3)°C, e umidade relativa de (65 ± 5)% controladas - para finalizar o processo de cura.

3.2. Ensaios físicos e mecânicos

Após 28 dias de cura, foram retirados de cada painel cinco corpos de prova (CP) para a determinação de cada propriedade física e mecânica (Figura 3.2). Esta caracterização foi feita por meio dos ensaios de flexão estática (módulo de elasticidade (MOE), módulo de ruptura (MOR)), compressão paralela (COMP), ligação interna (LI), inchamento em espessura (IE), absorção de água (ABS) em 2 e 24 horas de imersão em água. Primeiramente, foram cortados os CPs do ensaio de flexão estática (FE). Após esse ensaio, foram retirados, dos CPs de FE, cinco CPs para os ensaios de COMP, IE e LI.



Figura 3.2: Esquema de distribuição dos corpos de prova nos painéis para avaliação das propriedades físicas e mecânicas

A avaliação das propriedades dos painéis de cimento/fibra de coco em estudo, para flexão estática (MOR e MOE), COMP, LI, IE e ABS, foi realizada de acordo com a norma NBR 14810-3 (ABNT, 2002) (Tabela 3.2).

Tabela 5.2: Propriedades físicas e mecânicas analisadas nos painéis de cimento/coco

Propriedades físicas e mecânicas	Norma
Flexão estática	NBR 14810-3/02
Compressão Paralela	
Ligação interna	
Inchamento em espessura e absorção de água 2 e 24 horas*	

Nota: * - No ensaio de IE e ABS utilizou-se CP's de 5,0x5,0x1,25cm³ de acordo com norma NBR 14.810-3 (ABNT, 2002) adaptada.

Antes do ensaio de flexão estática, o equipamento *Metriguard 239A Stress Wave Timer* (Figura 3.3) foi utilizado para determinar o módulo de elasticidade dinâmico (E_d) na posição *flatwise* dos corpos de prova (CPs) de flexão estática do painel. Os CPs possuíam dimensões de 30 x 5 x 1,25 cm³ ($c \times l \times e$), com vão de 20cm. Esse equipamento mediu o tempo de propagação da onda longitudinal através dos CPs.



Figura 3.3: Stress Wave Timer utilizado para determinar o E_d .

Por meio do tempo de propagação da onda, massa específica do painel e distância percorrida pela onda foi possível determinar o módulo de elasticidade dinâmico (E_d , kgf/cm²), conforme a equação 7.

$$E_d = \frac{v^2 \times m_e}{g} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde: v - velocidade de propagação da onda (cm/s); m_e - massa específica (kgf/cm³); g - aceleração da gravidade (cm/s²).

A velocidade de propagação da onda (v , cm/s) foi determinada conforme a equação 8:

$$v = \frac{d}{t} \quad (\text{Equação 8})$$

Onde: d - distância entre os sensores (cm); t - tempo de propagação da onda (μs).

3.3. Análise das fibras em microscópio eletrônico de varredura

As fibras de coco in natura, tratadas com água quente e NaOH foram analisadas em um microscópio eletrônico de varredura a baixo vácuo - (marca FEI, modelo QUANTA 200 3D – Dual Beam) no Departamento de Balística da Polícia Federal – no intuito de auxiliar a interpretação dos resultados.

3.4. Análise estatística

A verificação de diferenças reais entre as densidades dos painéis com diferentes tratamentos foi feita mediante a análise de variância (ANOVA). Caso as variâncias apresentassem diferenças estatisticamente significativas, o teste de média de Tukey ao nível de 5% de significância seria aplicado. A análise do efeito de três tratamentos (imersão em água quente, imersão em solução de NaOH e adição de CaCl_2) e de duas relações de cimento:fibra de coco (3:1 e 4:1) e de sua respectiva interação sobre as propriedades físicas e mecânicas dos painéis foi feita a partir da análise de variância fatorial completa (3 x 2). Quando houve diferença estatística significativa foi aplicado, para a comparação das médias, o teste de média LSD (*Least Significant Difference*) ao nível de 5% de significância.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Densidade da fibra do coco verde e do painel de cimento reforçado com fibra de coco

Os resultados obtidos para a densidade da fibra de coco, para a densidade a granel do coco verde e para densidade básica dos painéis cimento/coco com três tratamentos e duas

relações podem ser observados na Tabela 4.1. As densidades da fibra do coco - determinadas com o teor de umidade de 7,6% - variaram de 0,97 g/cm³ a 1,25 g/cm³. Valores similares foram encontrados por Agopyan et al. (2005), que variaram de 1,1 g/cm³ a 1,37 g/cm³. As densidades a granel do coco verde - determinadas com o teor de umidade de 8,9% - variaram entre 47,86 e 74,23 kg/m³. Valores de densidade superiores aos encontrados por Olorunnisola (2009), que variaram de 35,2 a 53,3 kg/m³. No entanto, estas variações entre as densidades das fibras de coco e as densidades a granel das fibras in natura e tratadas não afetaram as densidades dos painéis.

As densidades básicas dos painéis variaram de 0,99 g/cm³ a 1,15 g/cm³, resultados similares aos obtidos por Asasutjarit et al. (2007), quando estudaram a produção de compostos de cimento/coco com diferentes tratamentos e geometrias das partículas. Os autores observaram que a densidade variou de 0,71 a 1,12 g/cm³. No entanto, os resultados obtidos neste estudo e pelos autores foram inferiores ao valor especificado por Bison para painel estrutural de cimento-madeira tipo HZ (NCL, SD).

Tabela 4.6: Variação de densidade no material fibroso do coco e do painel de cimento/coco

Tratamentos	Densidade da fibra de coco (g/cm ³)	Densidade a granel das fibras (kg/m ³)	Densidade média do painel (g/cm ³)	
			Relação	
			3:1	4:1
Sem tratamento*	0,97 (11,35)	57,94 (16,30)	0,99 ^a (6,31)	1,15 ^b (4,1)
Água quente	1,09 (25,42)	47,86 (16,68)	1,01 ^a (4,20)	1,04 ^{ac} (5,8)
NaOH	1,25 (24,77)	74,23 (5,21)	1,09 ^c (4,20)	1,09 ^c (4,8)
Bison			1,2	

NOTA: Letras distintas indicam diferença significativa pelo teste de Tukey ao nível de $\alpha = 0,05$. Números entre parênteses são os coeficientes de variação (%).

* - adicionou-se 4% de CaCl₂ na produção do painel.

O teste de média Tukey dos dados referentes às densidades dos painéis (Tabela A.4, Apêndice) demonstrou que houve diferença estatística significativa entre as densidades dos tratamentos, ao nível de $\alpha=0,05$. Dadas as diferenças entre as densidades dos painéis foi estimado um valor médio para a densidade de 1,05 g/cm³. Este valor estimado de densidade

foi usado para determinar os valores estimados das propriedades físicas e mecânicas dos painéis.

4.2. Análise fatorial

Inicialmente foi feita uma análise de variância fatorial (Tabela A.5, Apêndice) para analisar, isoladamente, o efeito do tratamento, da relação e da interação entre o tratamento e a relação. Por meio desta análise foi possível constatar que as variáveis analisadas isoladamente interferiram nas propriedades físicas e mecânicas do painel. Adicionalmente, constatou-se que as propriedades MOE, MOR, E_d e LI, exceto para o tratamento NaOH, foram afetadas de forma combinada pelo tratamento e a relação.

4.2.1. Efeito do tratamento

Os valores médios das propriedades mecânicas e seus desvios padrão sob o efeito do tratamento estão representados na Figura 4.1. Com base nos resultados, pode-se notar que, o tratamento água quente apresentou valores médios de MOE e COMP consideravelmente superiores em comparação aos valores obtidos para os demais tratamentos. Esse resultado pode ter acontecido devido ao fato de que o tratamento com água quente reduziu a porcentagem de extrativos presentes na fibra para 3,68%. Esta remoção dos extrativos pode ter grande efeito na formação das ligações cimento-cimento e fibra-cimento, melhorando, assim, as propriedades do painel. Já o tratamento CaCl_2 apresentou valor médio de LI interna superior aos demais tratamentos, este resultado já era esperado, pois o CaCl_2 melhora a ligação do cimento com o material lignocelulósico.

Comparando-se com a literatura, pode-se ressaltar que os painéis, em estudo, confeccionados com fibras tratadas com água quente apresentam boas propriedades mecânicas. Uma vez que este tratamento mostrou resultados satisfatórios, pois apresentou valor de MOE superior e de MOR próximo ao encontrado por Asasutjarit et al. (2007), que variaram de 169 a 498 MPa para MOE e de 1,53 a 4,04 MPa, para MOR.

Os valores de MOE e MOR encontrados para todos os tratamentos neste trabalho foram similares aos encontrados por Olorunnisola (2009) para painéis de cimento/coco com CaCl_2 , onde o MOE variou de 478,9 a 1013 MPa e o MOR variou de 1,2 a 2,2 MPa. Todavia, tanto o resultado de MOE e MOR deste trabalho, quanto os obtidos pelo autor foram

inferiores aos valores especificados por Bison para painel estrutural de cimento-madeira (NCL, SD).

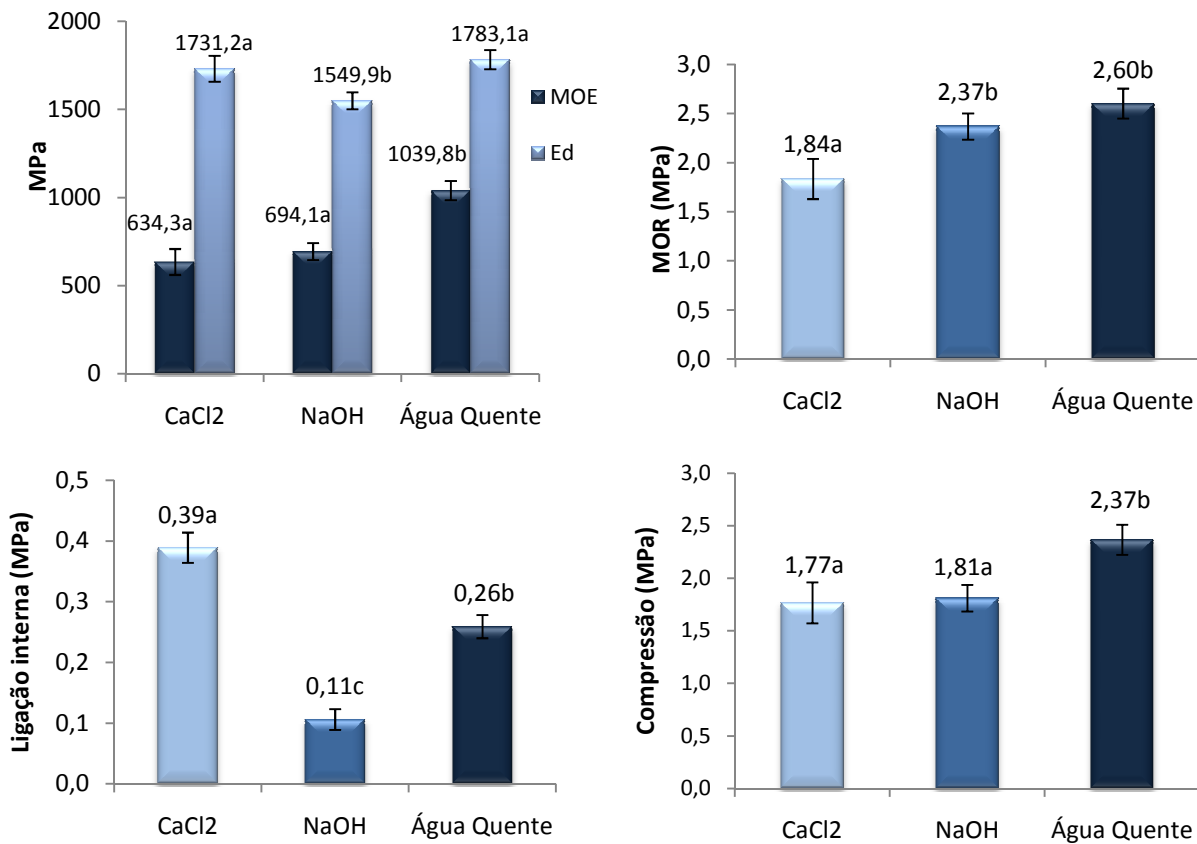


Figura 4.1: Efeito dos tratamentos sobre as propriedades mecânicas dos painéis

Nota: os valores das propriedades físicas e mecânicas foram estimados para a densidade 1,05 g/cm³. Letras distintas indicam diferença significativa pelo teste do LSD ao nível de $\alpha = 0,05$. As barras são os desvios padrão.

Os valores médios das propriedades físicas e seus desvios padrão sob o efeito do tratamento estão representados na Figura 4.2. O tratamento CaCl₂ apresentou valores médios ABS 2 e 24 h melhores aos obtidos para os outros tratamentos. Esse resultado já era esperado, uma vez que compostos tratados com CaCl₂, geralmente, absorvem menos água em 2 e 24 h. Segundo Ahn e Moslemi (1980) e Dow (2006), a adição de CaCl₂ à mistura tende a reduzir o tempo de endurecimento do cimento e aumentar a resistência à água desses painéis. No entanto, ao contrário do esperado, o tratamento água quente apresentou valores menos pronunciados de I.E 2 e 24 horas.

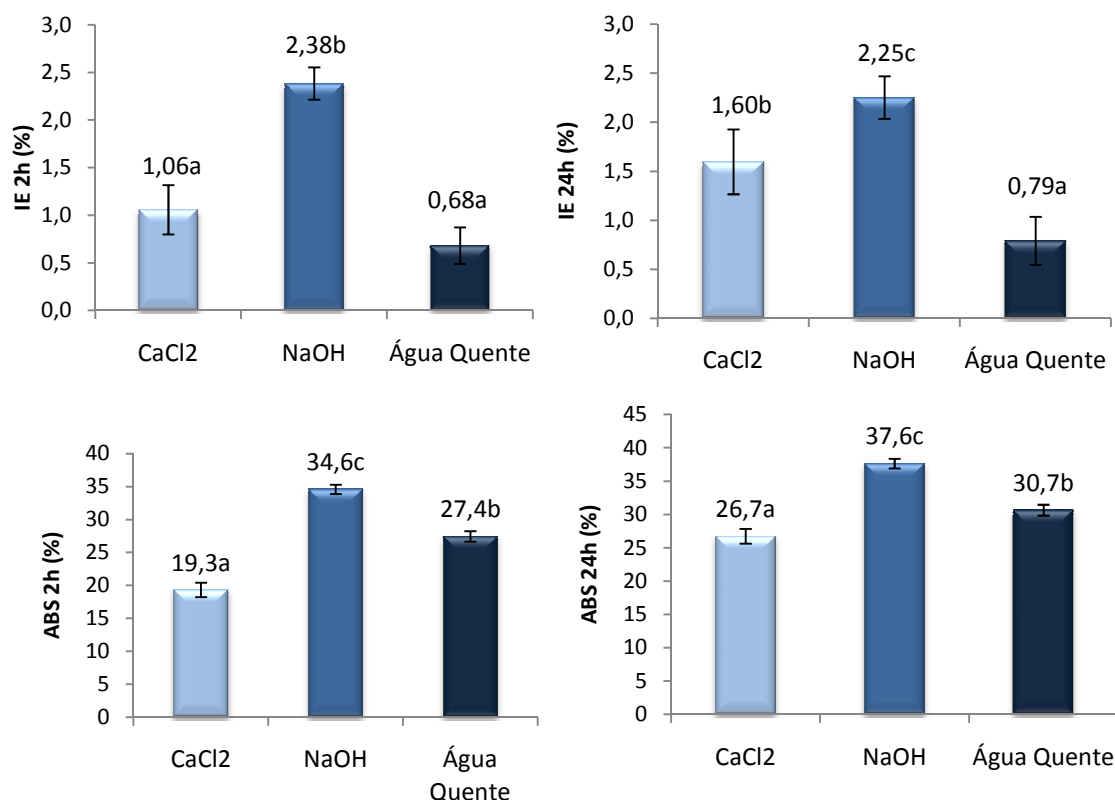


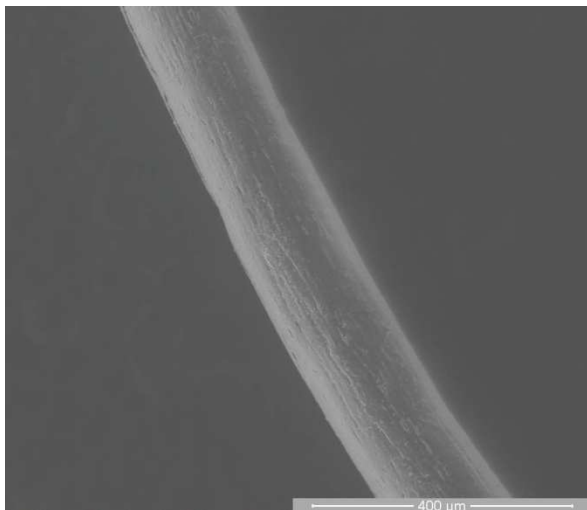
Figura 4.2: Efeito dos tratamentos sobre as propriedades físicas dos painéis

Nota: os valores das propriedades físicas e mecânicas foram estimados para a densidade 1,05 g/cm³. Letras distintas indicam diferença significativa pelo teste do LSD ao nível de $\alpha = 0,05$. As barras são os desvios padrão.

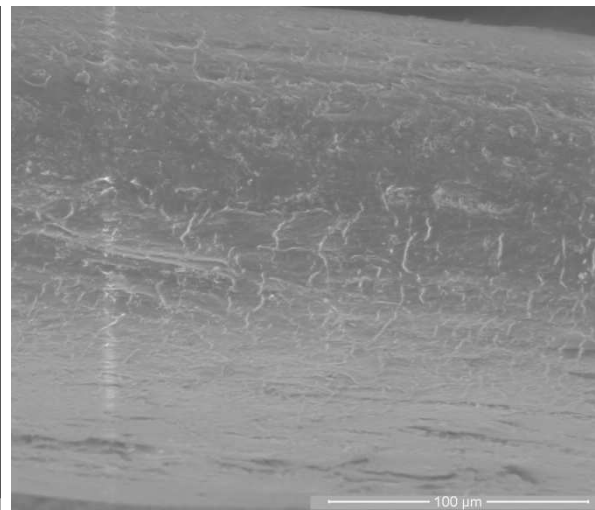
O efeito dos tratamentos na superfície das fibras foi analisado em um microscópio eletrônico de varredura (MEV). A Figura 4.3 compara as fotomicrografias das fibras de coco in natura, tratadas com água quente e com NaOH. As fotomicrografias das fibras in natura (4.3a e 4.3b) mostram que a superfície da fibra é coberta por uma camada de óleos, cera e extrativos. Carvalho et al. (2010), em seus estudos, também observaram esta camada na superfície da fibra do coco. A presença destas substâncias na superfície da fibra confirma os resultados obtidos no ensaio de inibição, na qual a fibra in natura foi classificada como “extrema inibição”.

As Figuras 4.3c e 4.3d mostram a superfície das fibras tratadas com água quente. Verifica-se a eliminação de parte da camada superficial. Este tratamento foi benéfico, pois com a remoção de parte desta camada, houve uma redução na percentagem dos extrativos e, conseqüentemente, uma melhora na compatibilidade entre a fibra tratada com água quente e o cimento, que passou a ser classificada como “média inibição”.

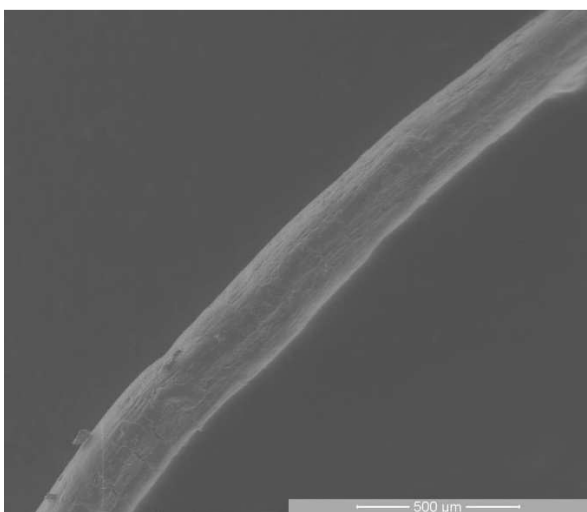
As Figuras 4.3e e 4.3f mostram as fibras de coco tratadas com NaOH. Pode-se verificar a remoção total da camada superficial e a presença de erosões na superfície da fibra, o que levou a uma redução de 51% no teor de extrativos destas fibras e, conseqüentemente, uma melhora na compatibilidade da fibra com o cimento, que passou a ser classificada como “Baixa inibição”. No entanto, ao contrário do esperado, houve uma redução nos valores médios de MOE, E_d e LI. Este tratamento também influenciou negativamente as propriedades físicas, acarretando em valores médios maiores tanto para IE 2 e 24h quanto para ABS 2 e 24h, resultados estes que podem ser explicados pelas erosões presentes na superfície da fibra, causadas pela degradação destas fibras. Sendo assim, não é recomendada a produção de painéis de cimento/fibra de coco com este tratamento.



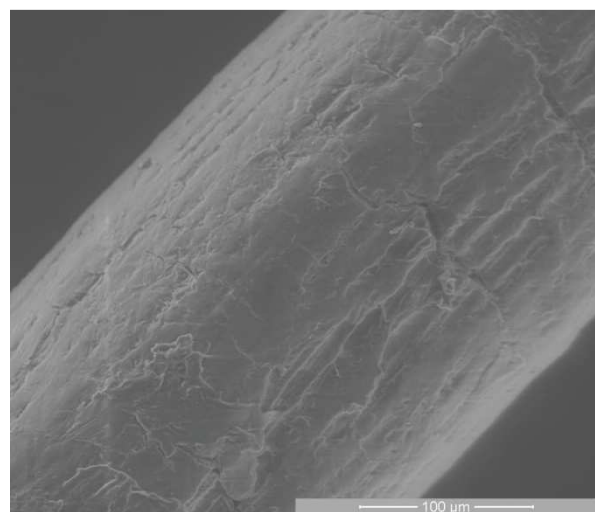
(a)



(b)



(c)



(d)

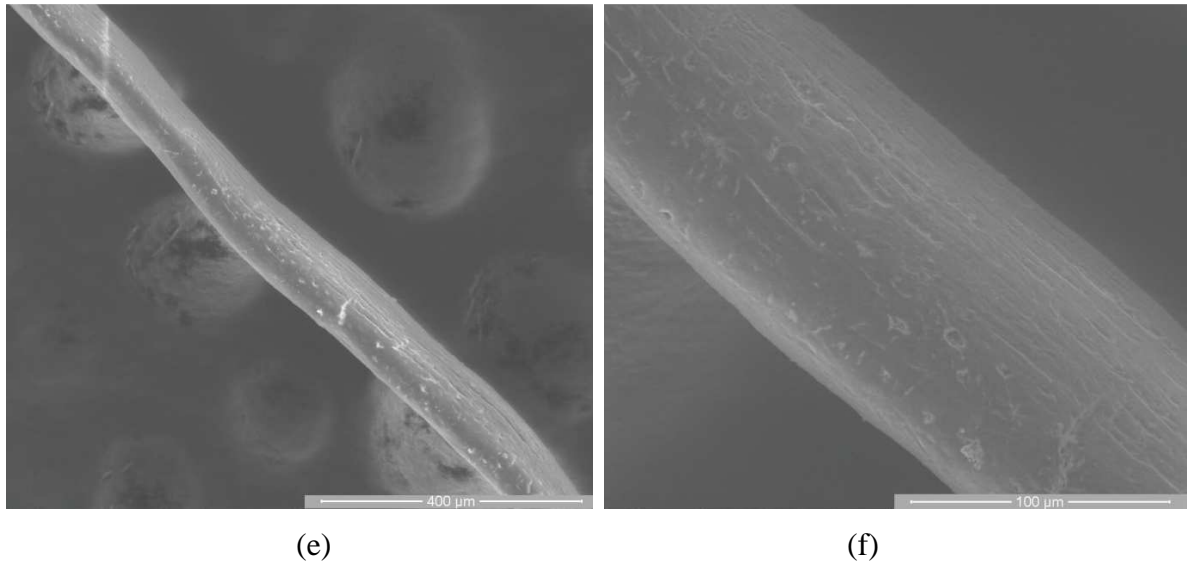


Figura 4.3: Fotomicrografias, obtidas em MEV, das fibras de coco in natura (a e b), após tratamento com água quente (c e d) e com NaOH (e e f).

4.2.2. Efeito da relação

Na Figura 4.4 podem ser observados os valores médios das propriedades mecânicas sobre o efeito da relação cimento:fibra de coco. A relação 3:1 apresentou-se melhor para MOR e COMP. O valor de MOE da relação 3:1 foi superior ao encontrado para a relação 4:1, no entanto, essa diferença não foi estatisticamente significativa. Observa-se uma tendência ao aumento do MOR com a redução da relação cimento:coco de 4:1 para 3:1. Os valores encontrados para MOR condizem com a literatura. Moslemi e Pfister (1987), Latorraca e Iwakiri (2000), Zhou e Kamem (2002) verificaram uma redução no MOR com o aumento da relação de cimento:madeira.

A LI foi influenciada pelo aumento da relação cimento:fibra de coco, ou seja, aumentando-se a proporção de cimento em relação à fibra de coco, obteve-se resultado melhor em LI. Análise semelhante foi feita por Latorraca e Iwakiri (2000) e Zhou e Kamem (2002). Os autores observaram que com o aumento relação cimento:madeira houve queda nas propriedades do painel, exceto para a ligação interna, que foi altamente influenciada por este fator.

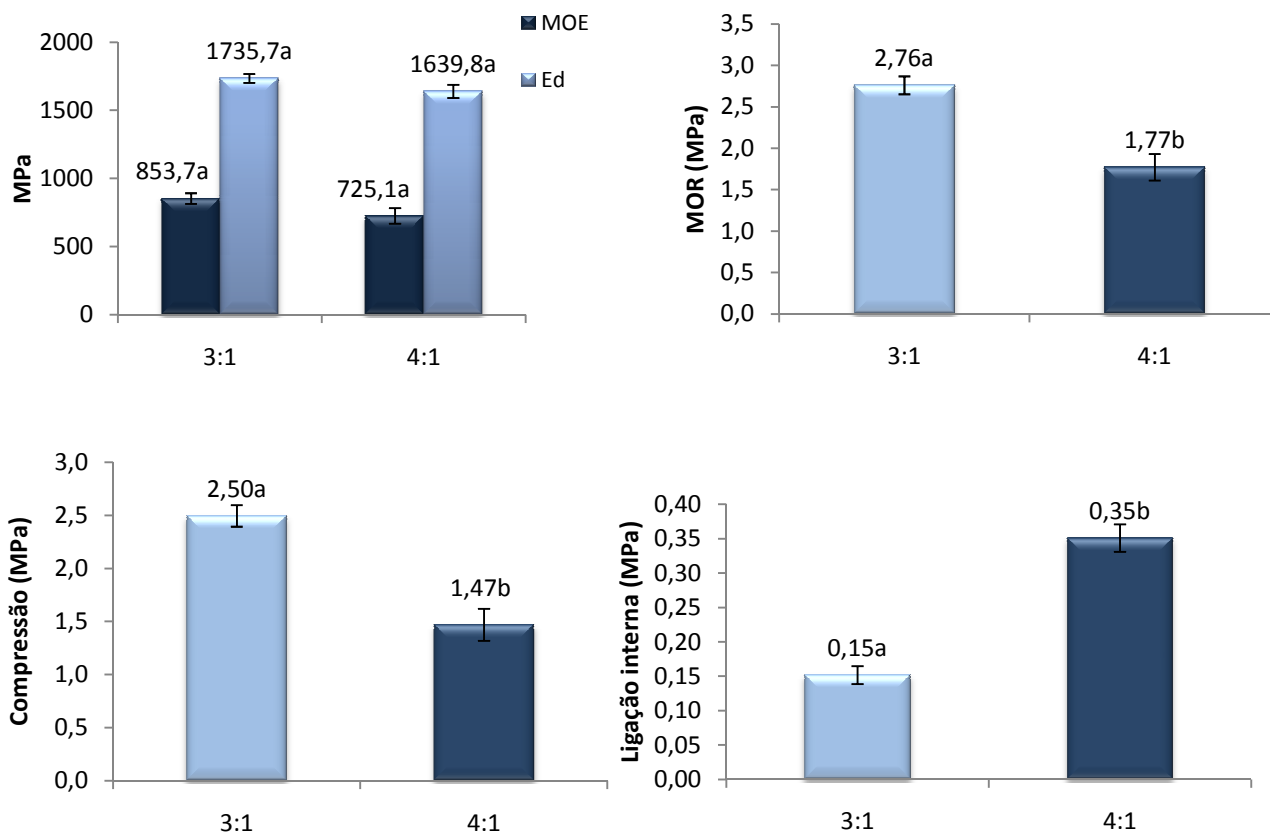


Figura 4.4: Efeito da relação sobre as propriedades mecânicas dos painéis

Nota: os valores médios das propriedades físicas e mecânicas foram estimados para a densidade 1,05 g/cm³. Letras distintas indicam diferença significativa pelo teste do LSD ao nível de $\alpha = 0,05$. As barras são os desvios padrão.

Na Figura 4.5 podem ser observados os valores médios das propriedades físicas sobre o efeito da relação. Para as propriedades físicas foi possível observar, que o IE, após o período de 2 e 24 horas, foram menos pronunciados naqueles painéis com relação de cimento:coco 4:1. Segundo Moslemi e Pfister (1987), este resultado aconteceu, possivelmente, devido a uma maior quantidade de cimento envolvendo as fibras, o que restringiu a expansão volumétrica destas.

Já para ABS, os valores médios, depois de 2 e 24 horas imersos em água, não foram afetados pela relação, não existindo, para estes, diferenças estatisticamente significativas entre as relações. Análise semelhante foi feita por Moslemi e Pfister (1987), quando estudaram a influência da relação cimento:madeira e o tipo de cimento nas propriedades do painel de cimento-madeira. Os autores observaram que a propriedade absorção de água não sofreu efeito da variação da relação de cimento:madeira de 2:1 para 3:1. Mas quando essa relação foi reduzida para 1,5:1, a absorção de água aumentou substancialmente.

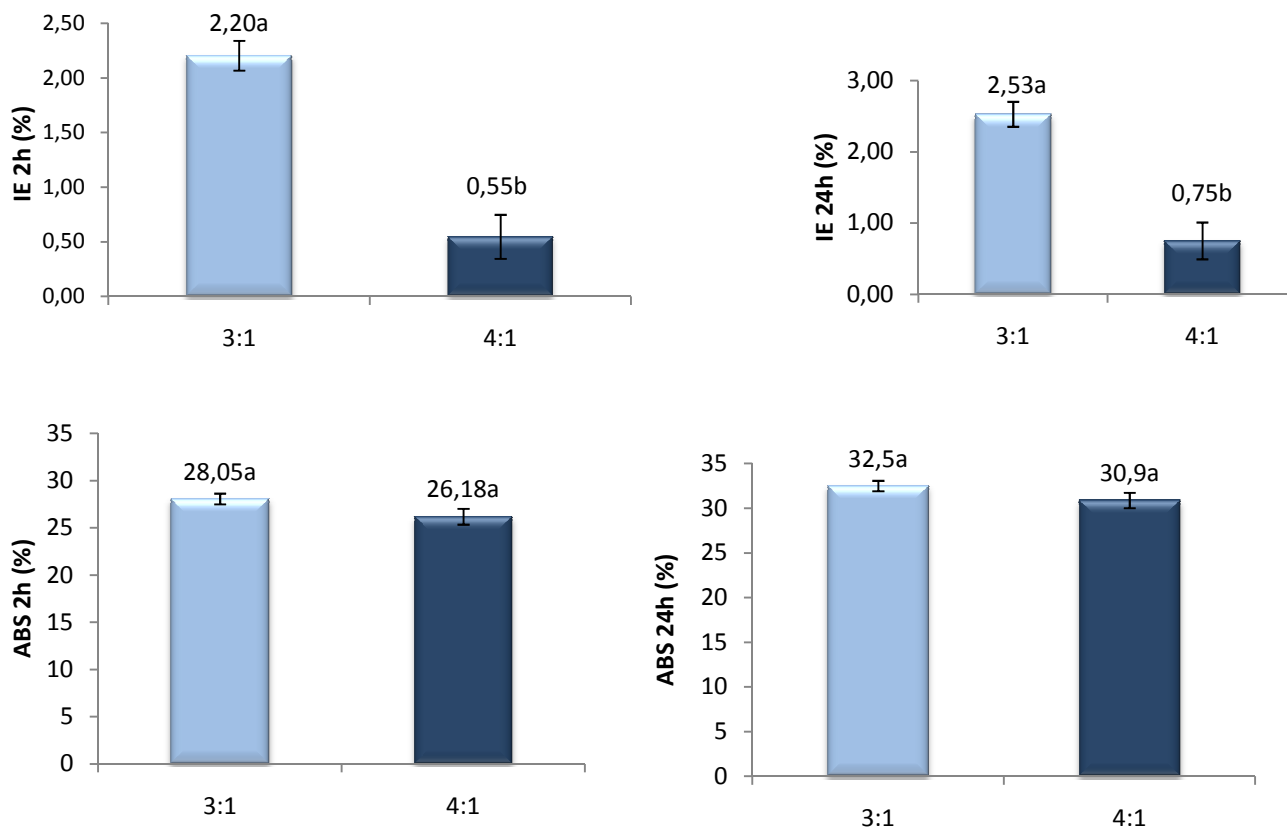


Figura 4.5: Efeito da relação cimento:fibra de coco sobre as propriedades físicas dos painéis

Nota: os valores médios das propriedades físicas e mecânicas foram estimados para a densidade 1,05 g/cm³. Letras distintas indicam diferença significativa pelo teste do LSD ao nível de $\alpha = 0,05$. As barras são os desvios padrão

4.2.3. Interação dos tratamentos com as relações

A interação tratamento x relação foi significativa, conforme a Tabela A.5 – Apêndice – para as propriedades de MOE, E_d , MOR e LI. Os valores médios encontrados para as propriedades mecânicas nas Figuras 4.6 e 4.7 são diferentes, pois estes foram estimados com diferentes densidades, de acordo as Tabelas A.6 e A.7, Apêndice.

A análise da Figura 4.6 aponta um comportamento diferente entre as relações - 3:1 e 4:1 - frente a diferentes tratamentos usados no trabalho. A relação 3:1 é mais sensível aos tratamentos, todas as propriedades foram afetadas. O tratamento água quente obteve os melhores resultados, sendo que esse apresentou efeito benéfico sobre as propriedades MOE, E_d e MOR. Já a relação 4:1, no geral, não foi afetada pelos tratamentos, apenas a LI para o tratamento CaCl_2 foi afetada.

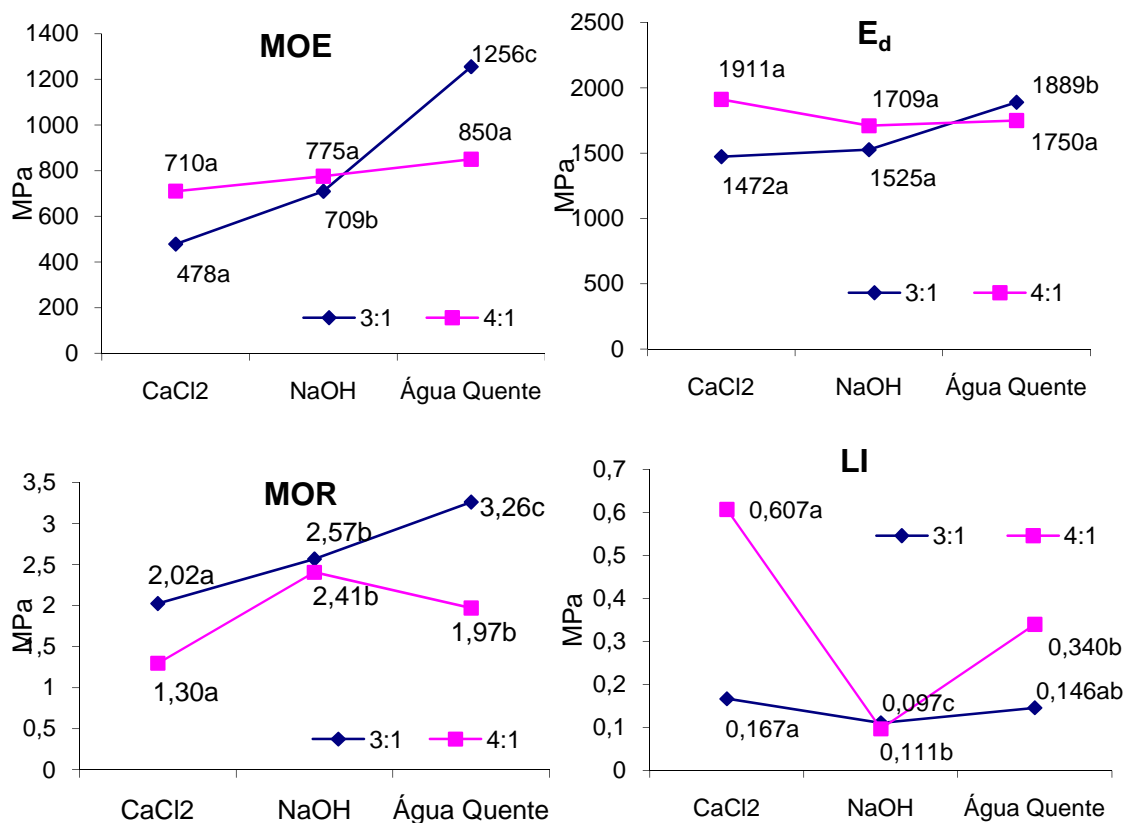


Figura 4.6: Efeito dos tratamentos sobre cada relação nas Propriedades Mecânicas

Letras distintas dentro de cada relação indicam diferença significativa pelo teste de média LSD ao nível de $\alpha = 0,05$. Valores estimados pela covariância.

A análise da Figura 4.7 mostra um comportamento diferente entre os tratamentos – CaCl₂, NaOH e Água quente - frente às relações usadas neste trabalho. Nota-se que o aumento da relação do cimento em relação à fibra do coco de 3:1 para 4:1 – com exceção ao tratamento CaCl₂ que foi beneficiado pelo aumento na relação – só proporcionou melhores resultados na LI, que foi altamente influenciada por este fator. Análise similar foi feita por Latorraca e Iwakiri (2000) que observaram uma redução nos valores médios das propriedades MOE, MOR e COMP e um aumento da LI do painel com o aumento da relação de cimento:madeira de 2,5:1 para 3:1.

Por meio do teste de médias LSD, verificou-se que para o tratamento com NaOH, as propriedades tendem a não serem afetadas com a variação da relação, exceto MOR que foi maior para a relação 3:1. Já o tratamento água quente foi beneficiado pela redução da relação, as propriedades tendem a melhorar com a redução da relação.

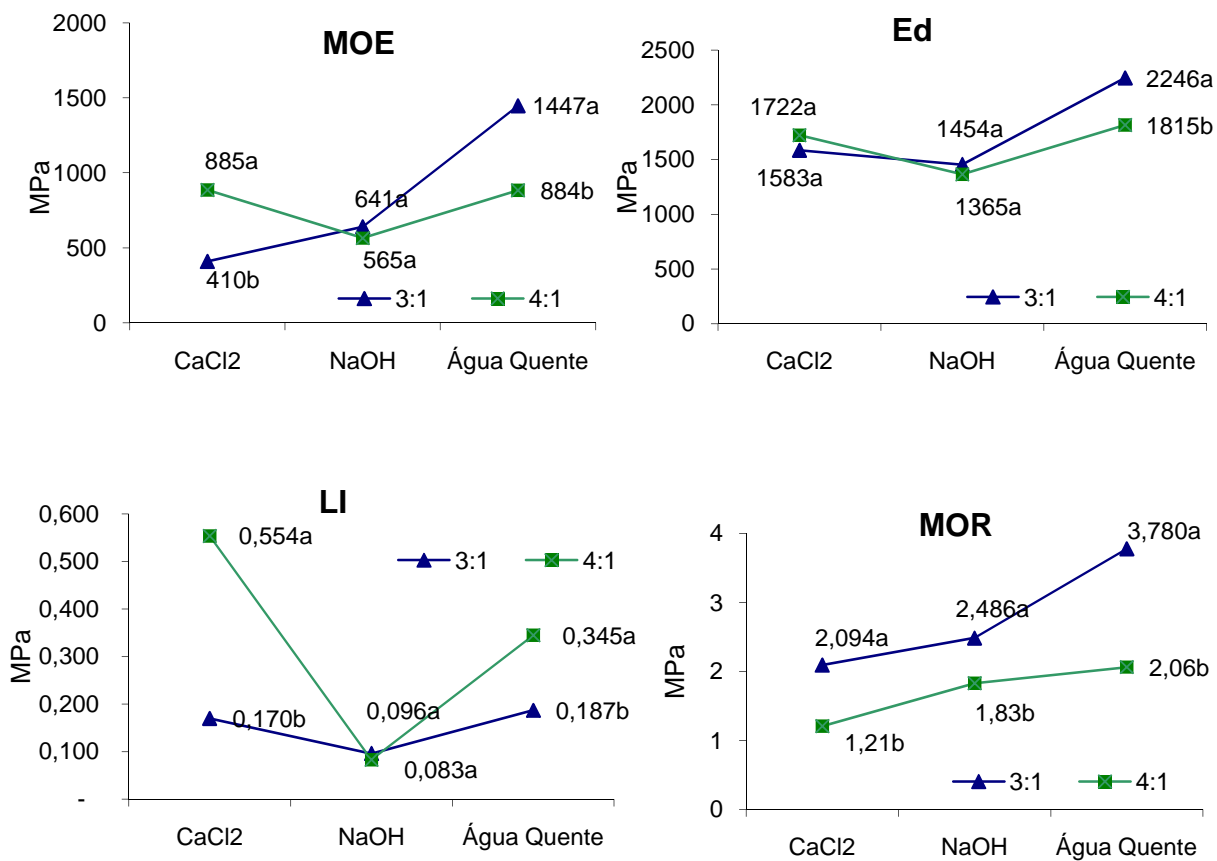


Figura 4.7: Efeito da relação sobre cada tratamento nas Propriedades Mecânicas
 Nota: Letras distintas dentro de cada tratamento indicam diferença significativa pelo teste do LSD ao nível de $\alpha = 0,05$. Valores estimados pela covariância.

5. CONCLUSÕES

Baseando-se nos resultados deste estudo e considerando as análises e discussões, pode-se concluir que:

A – Quanto ao ensaio de inibição:

- Analisando os resultados de propriedades físicas e mecânicas obtidos neste capítulo, pode-se observar que o ensaio de inibição não se confirmou com relação às propriedades dos painéis, pois a fibra de coco tratada com NaOH apresentou-se altamente compatível ao cimento, no entanto, produziu um painel com propriedades físicas e mecânicas insatisfatórias. Já, a fibra tratada com água quente – que foi classificada como de “média inibição” – produziu painéis com boas propriedades.

B - Quanto ao efeito do tratamento físico sobre as propriedades do painel:

- Houve efeito isolado de todas as variáveis sobre as propriedades físicas e mecânicas;
- Tratar as fibras de coco com água quente proporciona um aumento nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis. Este tratamento apresentou melhores resultados de MOE, E_d , MOR, COMP, IE 2 e 24 h;
- O CaCl_2 aumentou a resistência a LI de painéis de cimento:fibra de coco;
- O tratamento com NaOH obteve valores inferiores de propriedades físicas e mecânicas. O uso de NaOH para o tratamento das fibras não é recomendado.

C - Quanto ao efeito da relação sobre as propriedades do painel:

- O aumento da relação cimento:fibra de coco prejudica as propriedades mecânicas dos painéis.

- O aumento da relação cimento:fibra de coco influencia diretamente a LI, ou seja, aumentando-se esta relação, obteve-se melhores resultados em LI;
- O IE 2 e 24 h foram menos pronunciados com o aumento da relação cimento:fibra de coco;
- O aumento da relação cimento:fibra de coco não afetou a ABS 2 e 24 h;

D - Quanto à interação entre os tratamentos e as relações:

- Para o tratamento água quente, os resultados foram melhores quando se utilizou a relação 3:1;
- Para o tratamento CaCl_2 , os resultados melhoraram com o aumento da relação;
- Para o tratamento NaOH, a variação da relação não teve efeito, exceto para o MOR.

CONCLUSÕES GERAIS E RECOMENDAÇÕES

Pode-se concluir, por meio deste trabalho, que a fibra de coco verde necessita de um tratamento prévio para poder ser introduzida à produção de painéis de cimento. As fibras tratadas com água quente – classificadas como “média inibição” – produziram painéis resistentes, assim como os painéis produzidos com a adição de CaCl_2 – o que mostra que estes tratamentos são recomendados para a produção de painéis não-estruturais de cimento:fibra de coco. No entanto, o uso das fibras tratadas com NaOH não é recomendado.

O estudo foi importante para esclarecer algumas dúvidas sobre o comportamento da fibra de coco perante o cimento Portland, mas ao mesmo tempo, fez com que surgissem incertezas, que podem ser estudadas e aprofundadas em estudos futuros, como:

- Analisar a viabilidade econômica de se produzir este tipo de painel no Brasil;
- Investigar o efeito aditivo de CaCl_2 e fibras de coco tratada com água quente;
- Avaliar a resistência dos painéis à intempéries;
- Avaliar a resistência biológica dos painéis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDUL KHALIL, H. P. S.; SITI ALWANI, M. e MOHD OMAR, A. K. Chemical composition, anatomy, lignin distribution, and cell wall structure of malasian plant waste fiber. **BioResources**, v.1, n. 2, p.220-232, 2006.
- ABDEL-KADER, A. H.; DARWEESH, H. H. Setting and hardening of agro/cement composites. **BioResources**, v. 5, n. 1, p. 43-54, 2010.
- AGOPYAN, V. A.; SAVASTANO H. JR. B.; JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A. Developments on vegetable fibre–cement based materials in São Paulo, Brazil: an overview. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, p.527–536, 2005.
- AHN, W. Y.; MOSLEMI, A. A. SEM Examination of Wood- Portland Cement Bonds. **Wood Science**, v. 13, n.2, p.77-82, 1980.
- AJAYI, B. Properties of maize-stalk-based cement-bonded composites. **Forest Products Journal**, v.56, n.6, p.51-55, 2006.
- ALBERTO, M. M. MOUGEL, E. ZOULALIAN, A. Compatibility of some tropical hardwoods species with Portland cement using isothermal calorimetry. **Forest Products Journal**, v. 50, n. 9, p.83-88, 2000.
- ALMEIDA, R. R.; DEL MENEZZI, C. H. S.; TEXEIRA, D. E. Utilization of the coconut shell of babaçu (*Orbignya* sp.) to produce cement-bonded particleboard. **BioResource Technology**, v. 85, p. 159–163, 2002.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.** Standard test method for ash in wood. ASTM D 1102 – 84. West Conshohocken, Pennsylvania, United States. 2007. 2p.
- ANDRADE, M. C. N.; MINHONI, M. T. A.; SANSÍGOLO, C. A.; ZIED, D. C. Análise química da madeira e casca de diferentes tipos de eucalipto antes e durante o cultivo de shiitake em toras. **Árvore**, v. 34, n.1, p.165-175, 2010.
- ARAÚJO, P. C. **Adequação tecnológica do bambu *Guadua magna* Londoño & Filg. para a produção de compostos estruturais à base de cimento e gesso.** 2009. Trabalho de conclusão de curso. Engenharia Florestal. Universidade de Brasília. 60p.
- ARO, M. Wood strand cement board. In: 11th INTERNATIONAL INORGANIC-BONDED FIBER COMPOSITES CONFERENCE. Madrid, Spain, 2008. **Proceedings**, p. 169-179.
- ASASUTJARIT, C.; HIRUNLABH, J.; KHEDARI, J.; CHAROENVAI, S.; ZEGHMATI, B.; CHEUL, U. S. Development of coconut coir-based lightweight cement board. **Construction and Building Materials**, v. 21, n.2, p. 277–288, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Guia básico de utilização do cimento Portland. **Boletim técnico**, 7ª ed. São Paulo, 2002. 28p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT)** - Chapas de Madeira Aglomerada - parte 3: Métodos de ensaio, NBR 14.810-3. Rio de Janeiro, 2002. 39p.

- BEJÓ, L.; TAKÁTAS, P.; VASS, N. Development of cement bonded composite beams. **Acta Silvatica et Lignaria Hungarica**, v. 1, p. 111-119, 2006.
- BERALDO, A. L.; CARVALHO, J. V. Compósitos *Eucalyptus grandis* – cimento Portland. **Scientia Florestalis**, n. 65, p. 150-161, 2004.
- BLEDZKI, A. K.; GASSAN, J. Composites reinforced with cellulose based fibres. **Progress in Polymer Science**, v. 24, n.2, p.221–274. 1999.
- BYE, C. G. **Portland cement: composition, production and properties**. London: Thomas Telford, Second edition. 1999. 180p
- CAMPELLO, E. F.; DARWISH, F.A.; PEREIRA, M.V. Comportamento em fadiga de compostos cimentícios reforçados por polpa de bambu. In 8º CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA. Cusco, Peru. **Anais**, 2007. 9p.
- CARVALHO, K. C.C.; MULINARI, D. R.; VOORWALD, H. J. C.; CIOFFI, M. O. H. Chemical modification effect on the mechanical properties of hips coconut fiber composites. **BioResources**, v.5, n. 2, p.1143-1155, 2010.
- COATES, G. R. Product application of wood-cement particleboards including applied finishes. In: INTERNATIONAL INORGANIC-BONDED WOOD AND FIBER COMPOSITE MATERIALS CONFERENCE, Washington, 1994. **Proceedings**, Madison: Forest Products Society, 1994. v.1, p. 189-192.
- CORRADINI, E.; ROSA, M. F.; MACEDO, B. P.; PALADIN, P. D.; MATTOSO, L. H. C. Composição química, propriedades mecânicas e térmicas da fibra de frutos de cultivares de coco verde. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 31, n. 3, p.837-846, 2009.
- DEL MENEZZI, C. H. S.; CASTRO, V. G.; SOUZA, M. R. Production and properties of a medium density wood-cement boards produced with oriented strands and silica fume. **Maderas: Ciencia y Tecnologia**, v.9, n.2, p. 105-115, 2007.
- DOW chemical company. Calcium Chloride in Portland Cement Concrete. **Application information**. 2006. 2p.
- ELTOMOTION. **Plants and services for the production of Wood Cement Boards**. Disponível em <<http://www.eltomotion.nl>> Acesso em: 17 maio, 2010.
- EMBRAPA. Disponível em <<http://www.embrapa.br>>, Acesso em 12 de outubro de 2010.
- EHRMAN, T. Determination of Acid-Soluble Lignin in Biomass. **ASTM-Methods Chemical Analysis and Testing Task Laboratory Analytical Procedure** - LAP-004, 1996, 7 p.
- FAN, M.Z.; BONFIELD, P.W.; DINWOODIE, J.M.; BOXALL, J.; BREESEB, M.C. Dimensional instability of cement-bonded particleboard: The effect of surface coating. **Cement and Concrete Research**. v. 34, p. 1189–1197, 2004.
- FRYBORT, S.; MAURITZ, R.; TEISCHINGER, A.; MULLER, ULRICH. Cement bonded composites – a mechanical review. **BioResources**, v.3, n.2, p.602-626, 2008.

- GNANAHARAN, R.; DHAMODARAN, T.K. Suitability of some tropical hardwoods for cement-bonded wood-wool board manufacture. **Holzforschung**, Berlin, v. 39, n. 6, p. 337-340, 1985.
- GEETHAMMA, V. G.; K. MATHEW, T.; LAKSHMINARAYNAN, R. THOMAS, S. Composite of short coir fibres and natural rubber: effect of chemical modification, loading and orientation of fibre. **Polymer**, v. 39, n. 6-7, p. 483-1491, 1998.
- GEIMER, R. L.; SOUZA, M. R.; MOSLEMI, A. A.; SIMATUPANG, M. H. Carbon Dioxide Application for Rapid Production of Cement Particleboard. In: LNORGANIC BONDED WOOD AND FIBER COMPOSITE MATERIALS CONFERENCE, Spokane, WA, **Proceedings**. Sept 27-30, 1992. p.1-40.
- HACHMI, M.H.; MOSLEMI, M.A. Correlation between wood–cement compatibility and wood extractives. **Forest Products Journal**, v. 39, n. 6, p. 55–58, 1989.
- HACHMI, M.; MOSLEMI, A. A.; CAMPBELL, A. G. A new technique to classify the compatibility of wood with cement. **Wood Science and Technology**, v. 24, n° 4. p.345-354. 1990.
- HASELEIN, C. R.; CALEGARI, L.; ALBERTI, L. F.; MINELLO, A. L.; SILVA, P. A.; PINTOS, R. G. F. Fabricação de chapas de partículas aglomeradas usando gesso como material cimentante. **Ciência Florestal**, v. 12, n. 1, p. 81-88, 2002.
- HERRERA-FRANCO P. J.; VALADEZ-GONZÁLEZ A. A study of the mechanical properties of short natural-fiber reinforced composites. **Composites Part B: Engineering**. v.36. n° 8. p.597–608. 2005.
- 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**, v. 34, n. 2, p. 57-61, 1984.
- JOHN, M. J.; ANANDJIWALA, A. D. Recent developments in chemical modification and characterization of natural fiber-reinforced composites. **Polymer Composites**. v.29. n.2. p.187-207. 2008.
- JORGE, F. C.; PEREIRA, C.; FERREIRA, J. M. F. Wood-cement composites: a review. **Holz als Roh - und Werkstoff**, v.62, p.370-377, 2004.
- KARADE, S. R. Cement-bonded composites from lignocellulosic wastes. **Construction and Building Materials** v. 24, n.8, p.1323–1330, 2010.
- KHEDARI, J.; SUTTISONK, B.; PRATINTHONG, N.; HIRUNLAH, J. New lightweight composite construction materials with low thermal conductivity. **Cement and Concrete Composites**, v. 23, p. 65-70, 2001.
- KRUSE, K.; FRUHWALD, A. Properties of nipa – and coconut fibers and production and properties of particle - and MDF-boards made from nipa and coconut. **Bundesforschungsanstalt fur Forst – und Holzwirtschaft**, n.4, 47p, 2001.
- LATORRACA, J. V. F. **Eucalyptus spp. na produção de painéis de cimento-madeira**. 191f. 2000. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2000.

LATORRACA, J. V. F. Painéis de cimento-madeira. **Revista da Madeira**, Curitiba, Ed. 71, p.104-106, Maio, 2003.

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

LATORRACA, J. V. F.; IWAKIRI, S. Painéis de cimento-madeira. In: IWAKIRI, S. (Org.) **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: FUPEF, 2005. v. 1, p. 213-239.

LEE, A. W. C.; SHORT, P. H. Pretreating hardwood for cement-bonded excelsior board. **Forest Products Journal**, v. 39, n.10, p.68-70, 1989.

LI, Z.; WANG, L.; WANG, X. Cement composites reinforced with surface modified coir fibers. **Journal of Composites Materials**, v. 41, n. 12, p.1445-1457, 2007.

LORENZI, H. **Árvores Brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas do Brasil**. 4ed. v.1. Nova Odessa, São Paulo, 2002. p.293.

MATOSKI, A. **Utilização de pó de madeira com granulometria controlada na produção de painéis de cimento-madeira**. 2005. 202f. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

MATOSKI, A.; IWAKIRI, S. Avaliação das propriedades físico-mecânicas de painéis de cimento-madeira utilizando farinha de madeira com granulometria controlada. **Árvore**, v. 37. n.2. p. 149-158, 2007.

MOSLEMI, A. A. **Particleboard. Volume 1: Materials**. Southern Illinois. University Press: Carbondale, 1974. v. 1, 244p.

MOSLEMI, A.A. Emerging Technologies in Mineral-Bonded Wood and Fiber Composites. **Advanced Performance Materials**. v. 6, p.161–179, 1999.

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.

MOSLEMI, A.A.; GARCIA, F. J.; HOFSTRAND, A. D. Effect of various treatments and additives on wood-Portland cementwater systems. **Wood and Fiber Science**, v. 15. n.2. p.164-176. 1983.

MOSLEMI, A. A.; LIM, Y. T. Compatibility of southern hardwoods with Portland cement. **Forest Products Journal**, v. 34, n. 7/8, p.22-26, 1984.

NCL-Technical Cell. Bison panel: cement bonded particle board. **Technical handbook**. 51p. SD.

NETO, F. L.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. 1ª ed. – Ed. Edgard Blucher, São Paulo, 2006. p. 98-100.

OKINO, E. Y. A.; SOUZA, M. R. S.; SANTANA, M. A. E.; SOUSA, M. E.; TEIXEIRA, D. E. Chapa aglomerada de cimento-madeira de *Hevea brasiliensis* Müll. **Árvore**, v.28, n.3, p. 451-457, 2004.

OLORUNNISOLA, A. O. Effects of particle geometry and chemical accelerator on strength properties of rattan-cement composites. **African Journal of Science and Technology: science and engineering Series**, v. 8, n. 1, p. 22 – 27, 2007.

OLORUNNISOLA, A. O. Effects of pre-treatment of rattan (*Laccosperma secundiflorum*) on the hydration of Portland cement and the development of a new compatibility index. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, p.37–43, 2008.

OLORUNNISOLA, A. O. Effects of husk particle size and calcium chloride on strength and sorption properties of coconut husk–cement composites. **Industrial Crops and Products**, v. 29, p.495–501, 2009.

PAPADOPOULOS, A. N. Natural durability and performance of hornbeam cement bonded particleboard. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, v. 10, n. 2, p. 93-98, 2008.

PASSOS, P. R. A. **Destinação sustentável de cascas de coco (*Cocos nucifera*) verde: obtenção de telhas e chapas de partículas**. 2005. 166f. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

PRASAD, S. V.; PAVITHRAM, C.; Rohatgi P. K. Alkali treatment of coir fibers for coir – polyester composites. **Journal of Material Science**, v.18, p. 1443- 1454, 1983.

QUINTANA, N. M. G. **Produção e avaliação das propriedades físico mecânica do compósito cimento-escória madeira**. 2009. 80p. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Estadual Paulista, Itapeva, 2009.

RAJAN, A.; SENAN, C. R.; PAVITHRAM, C.; ABRAHAM, T. E. Biosoftening of coir fiber using selected microorganisms. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, v.28, p. 165–173. 2005.

RAMÍREZ, M. G. L.; MUNIZ, G. I. B.; SATYANARAYANA, K. G.; TANOBE, V.; IWAKIRI, S. Preparation and characterization of biodegradable composites based on brazilian cassava starch, corn starch and green coconut fibers. **Revista Matéria**, v. 15, n. 2, p.370 – 377. 2010.

RAMIREZ-CORETTI, A.; ECKELMAN, C.A.; WOLFE, R. W. Inorganic-Bonded composite wood panel systems for low-cost housing: a Central American Perspective. **Composites and Manufacture Products**, v. 4, n. 48, p. 62-68, 1998.

SANTIAGO, B. H.; SELVAM, P. V. P. Tratamento superficial da fibra do coco: estudo de caso baseado numa alternativa econômica para fabricação de materiais compostos. **Revista Analytica**, n.26. p.42-45. 2006/2007.

SANTOS, A. M. **Estudo de compósitos híbridos polipropileno/fibras de vidro e de coco para aplicações em Engenharia**. 2006, 90f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

SAVASTANO, JR. H. **Sistemas de cobertura para construções de baixo custo: uso de fibras vegetais e de outros resíduos agroindustriais.** Coletânea Habitare. v.4. Utilização de resíduos na construção habitacional. 2000. 30p.

SAVASTANO, JR. H.; PIMENTEL, L. L. Viabilidade do aproveitamento de resíduos de fibras vegetais para fins de obtenção de material de construção. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.4, n.1, p.103-110, 2000.

SEMPLE K. E.; CUNNINGHAM R.B.; EVANS P. D. The suitability of Five Western Australian mallee eucalypt species for wood–cement composites. **Industrial Crops and Products**, v.16. p.89-100. 2002.

SEMPLE, K. E.; EVANS, P. D. The manufacture of cement-bonded particleboard (CBPs) from Field-chipped mallee eucalypt residues. **Wood-cement composites: suitability of western Australian mallee eucalypt, blue gum and melaleuca.** 2004. p.17-24.

SEMPLE, K. E. e EVANS, P. D. **Wood-cement composites— Suitability of Western Australian mallee eucalypt, blue gum and melaleucas.** RIRDC: Kingston. 2004. 64p.

SENHORAS, E. M. Oportunidades da Cadeia Agroindustrial do Coco Verde: do coco verde nada se perde, tudo se desfruta. **Revista Urutágua**, n. 5, Dezembro, 2004. Disponível em: <<http://www.urutagua.uem.br>>, acesso em: 22 de novembro de 2010.

SILVA, G. C. S.; LATORRACA, J. V. F.; CARMO, J. F.; FERREIRA, E. S. Efeito de aditivos minerais sobre as propriedades de chapas de cimento-madeira. **Árvore**, v. 30, n.3, p.451-456, 2006.

SPARNIAŠ, E. **Mechanical properties of flax fibers and their composites.** Licentiate Thesis. Sweden, 2006. 84p.

SUTIGNO, P. Effect of aqueous extraction of wood-wool on the properties of wood-wool cement board manufactured from teak (*Tectona grandis*). In: **WOOD–CEMENT COMPOSITES IN THE ASIA–PACIFIC REGION. Proceedings.** n. 107, 2000. Canberra, Australia. p. 24-28.

TAVARES, M. F. F. **Pós-coco: agregação de valor na cadeia produtiva do coco verde.** Disponível em <www.espm.br/centraldecases>, acesso em 21 de novembro de 2010.

THAKUR, V. K.; SINGHA, A. S. Natural fibres-based polymers: Part I—Mechanical analysis of Pine needles reinforced biocomposites. **Bulletin of Material Science**, v. 33, n. 3, p. 257–264, 2010.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. Solvent extractives of wood and pulp. TAPPI test methods T 204. Atlanta, Tappi Technology Park, 1997. 4p.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. Water solubility of wood and pulp. TAPPI test methods T 207. Atlanta, Tappi Technology Park, 1999. 3p.

TEMPLETON, D., EHRMAN, T. Determination of Acid-Insoluble Lignin in Biomass. **ASTM-Chemical Analysis and Testing Task Laboratory Analytical Procedure Methods. LAP-003**, 1995, 14 p.

TOLEDO FILHO, R. D.; GHAVAMI, K.; ENGLAND, G. L.; SCRIVENER, K. Development of vegetable fibre–mortar composites of improved durability. **Cement and Concrete Composites**, v.25. p.185–196. 2003.

TROEDEC, M. L.; SEDAN, D.; PEYRATOUT, C.; BONNET, J. P.; SMITH, A.; GUINEBRETIERE, R.; GLOAGUEN, V.; KRAUSZ, P. Influence of various chemical treatments on the composition and structure of hemp fibres. **Composites: Part A**. v.39, p. 514–522, 2008.

van DAM, J. E. G.; VAN DEN OEVER, M. J. A.; KEIJERS, E.; R. P. VAN DER PUTTEN, J. ANAYRON, C.; JOSOL, F.; PERALTA, A. G. Process for production of high density/high performance binderless boards from whole coconut husk Part 2: Coconut husk morphology, composition and properties. **Industrial Crops and Products**. v.24, p.96–104. 2006.

VAICKELIONIS, G.; VAICKELIONIENE, R. Cement hydration in the presence of wood extractives and pozzolan mineral additives. **Ceramics – Silikáty** v. 50, n.2, p. 115-122, 2006.

VALE, A. T.; BARROSO, R. A.; QUIRINO, W. F. Caracterização da biomassa e do carvão vegetal do coco da baía (*Cocos nucifera* L.) para uso energético. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 4, p.365-370, 2004.

VAN ELTEN, I. G. J. Production of wood wool cement board and wood strand cement board (eltboard) on one plant and applications of the products. In: 11th INTERNATIONAL INORGANIC-BONDED FIBER COMPOSITES CONFERENCE. **Anais**. p. 1-11. Brasil, 2006.

VENTURA, O. S. P.; PASSOS, O. S.; LOBO, J. B. A.; FUJIYAMA, R. T. Caracterização mecânica em flexão de compósito de argamassa de cimento reforçada por fibras naturais. In: 17° CBECIMAT - CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, **Anais**. Foz do Iguaçu, 2006.

VOTORANTIM, **Cimentos**. Disponível em <<http://www.votorantimcimentos.com.br>>, acesso em: 12 de Fevereiro de 2010.

YOUNGQUIST, J. A – **Wood Based composites and panel products – Wood Handbook - Wood as an engineering material** – Madison WI – USA,1999. p. 10-31.

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

WEI, W.; GU, H. Characterisation and utilization of natural coconut fibres composites. **Materials and Design**, v.30. p.2741–2744. 2009.

WEI, Y. M.; ZHOU, Y. G. e TOMITA, B. Study of hydration behavior of wood cement-based composite II: effect of chemical additives on the hydration characteristics and strengths of wood cement composites . **Journal of Wood Science**, v.46, p.296-302, 2000.

WOLFE, R.; GJINOLLI, A. E. Assessment of Cement-Bonded Wood Composites as Means of Using Low-Valued Wood for Engineered Applications. In: INTERNATIONAL WOOD ENGINEERING CONFERENCE. New Orleans LA. **Proceedings**. ed. Proceedings of the international wood engineering conference: 1996. v. 3, p74-81.

ZHOU, Y.; KAMDEM, D. P. Effect of cement/wood ratio on the properties of cement-bonded particleboard using CCA-treated wood removed from service. **Forest Products Journal**, v. 52, n. 3, p.77-81, 2002.

ZUCCO, L. L. **Estudo da viabilidade da fabricação de placas de compostos à base de cimento e casca de arroz**. 133f. 1999. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1999.

APÊNDICES

A. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Tabela A.1: Teste de média LSD para os índices de inibição dos tratamentos

(I) Tratamento	(J) Tratamento	Diferença média (I-J)	Erro padrão	Sig.	Intervalo de confiança - 95%		
					Limite inferior	Limite superior	
LSD	sem tratamento	Água fria	171,3000*	6,55530	,000	157,3277	185,2723
		Água quente	171,3950*	6,55530	,000	157,4227	185,3673
		CaCl ₂	189,5750*	6,55530	,000	175,6027	203,5473
		NaOH	189,7650*	6,55530	,000	175,7927	203,7373
	Água fria	sem tratamento	-171,3000*	6,55530	,000	-185,2723	-157,3277
		Água quente	,0950	6,55530	,989	-13,8773	14,0673
		CaCl ₂	18,2750*	6,55530	,014	4,3027	32,2473
		NaOH	18,4650*	6,55530	,013	4,4927	32,4373
	Água quente	sem tratamento	-171,3950*	6,55530	,000	-185,3673	-157,4227
		Água fria	-,0950	6,55530	,989	-14,0673	13,8773
		CaCl ₂	18,1800*	6,55530	,014	4,2077	32,1523
		NaOH	18,3700*	6,55530	,013	4,3977	32,3423
	CaCl ₂	sem tratamento	-189,5750*	6,55530	,000	-203,5473	-175,6027
		Água fria	-18,2750*	6,55530	,014	-32,2473	-4,3027
		Água quente	-18,1800*	6,55530	,014	-32,1523	-4,2077
		NaOH	,1900	6,55530	,977	-13,7823	14,1623
NaOH	sem tratamento	-189,7650*	6,55530	,000	-203,7373	-175,7927	
	Água fria	-18,4650*	6,55530	,013	-32,4373	-4,4927	
	Água quente	-18,3700*	6,55530	,013	-32,3423	-4,3977	
	CaCl ₂	-,1900	6,55530	,977	-14,1623	13,7823	

Baseado nas médias observadas; * - a diferença média é significativa ao nível de $\alpha = 0,05$.

Tabela A.2: Teste de média LSD para os componentes químicos da fibra do coco

Variável dependente	tratamento (I)	tratamento (J)	Diferença média	Erro padrão	Sig.	Intervalo de confiança 95%	
						Limite inferior	Limite superior
Lignina							
LSD	sem tratamento	água fria	3,44500	1,31351	,025	,5183	6,3717
		água quente	4,64750*	1,41875	,008	1,4863	7,8087
		NaOH	7,01750*	1,41875	,001	3,8563	10,1787
	água fria	sem tratamento	-3,44500	1,31351	,025	-6,3717	-,5183
		água quente	1,20250	1,41875	,416	-1,9587	4,3637
		NaOH	3,57250	1,41875	,030	,4113	6,7337
	água quente	sem tratamento	-4,64750*	1,41875	,008	-7,8087	-1,4863
		água fria	-1,20250	1,41875	,416	-4,3637	1,9587
		NaOH	2,37000	1,51671	,149	-1,0094	5,7494
	NaOH	sem tratamento	-7,01750*	1,41875	,001	-10,1787	-3,8563
		água fria	-3,57250	1,41875	,030	-6,7337	-,4113
		água quente	-2,37000	1,51671	,149	-5,7494	1,0094
Cinzas							
LSD	sem tratamento	água fria	-,54333*	,12832	,003	-,8392	-,2474
		água quente	,05333	,12832	,689	-,2426	,3492
		NaOH	-6,70333*	,12832	,000	-6,9992	-6,4074
	água fria	sem tratamento	,54333*	,12832	,003	,2474	,8392
		água quente	,59667*	,12832	,002	,3008	,8926
		NaOH	-6,16000*	,12832	,000	-6,4559	-5,8641
	água quente	sem tratamento	-,05333	,12832	,689	-,3492	,2426
		água fria	-,59667*	,12832	,002	-,8926	-,3008
		NaOH	-6,75667*	,12832	,000	-7,0526	-6,4608
	NaOH	sem tratamento	6,70333*	,12832	,000	6,4074	6,9992
		água fria	6,16000*	,12832	,000	5,8641	6,4559
		água quente	6,75667*	,12832	,000	6,4608	7,0526
extrativos							
LSD	sem tratamento	água fria	,05000	,28158	,868	-,7318	,8318
		água quente	1,18000*	,28158	,014	,3982	1,9618
		NaOH	2,38500*	,28158	,001	1,6032	3,1668
	água fria	-,05000	,28158	,868	-,8318	,7318	
		água quente	1,13000*	,28158	,016	,3482	1,9118

	NaOH	2,33500*	,28158	,001	1,5532	3,1168
água quente	sem tratamento	-1,18000*	,28158	,014	-1,9618	-,3982
	água fria	-1,13000*	,28158	,016	-1,9118	-,3482
	NaOH	1,20500*	,28158	,013	,4232	1,9868
NaOH	sem tratamento	-2,38500*	,28158	,001	-3,1668	-1,6032
	água fria	-2,33500*	,28158	,001	-3,1168	-1,5532
	água quente	-1,20500*	,28158	,013	-1,9868	-,4232

* - A diferença média é significativa ao nível de 0,05.

Tabela A.3: Valores médios das Propriedades físicas e mecânicas dos painéis de cimento/coco

Tratamento	Relação	MOR (MPa)	MOE (MPa)	Ed (MPa)	COMP (MPa)	IE 2h (%)	IE 24h (%)	ABS 2h (%)	ABS 24h (%)	LI (MPa)	Densidade (g/cm ³)
CaCl ₂	(3:1)	1,79	309,68	1388,20	2,10	2,22	2,54	23,61	31,72	0,152	0,991
	(4:1)	1,97	963,65	1702,06	2,99	1,39	2,21	19,93	20,69	0,380	1,147
NaOH	(3:1)	2,32	538,58	1540,35	1,82	3,18	2,63	32,50	40,04	0,196	1,009
	(4:1)	2,05	664,82	1456,80	1,25	1,78	1,53	33,58	37,13	0,087	1,039
Água quente	(3:1)	3,72	1441,39	2007,25	3,04	1,39	1,40	27,82	28,75	0,152	1,089
	(4:1)	2,12	929,90	1877,93	2,29	0,75	0,67	25,40	27,27	0,305	1,087

Tabela A.4: Teste de média Tukey para as densidades dos painéis

Tukey HSD	tratamento(I)	tratamento(J)	Diferença média (I-J)	Erro padrão	Sig.	95% Intervalo de confiança	
						Limite inferior	
CaCl2 3:1	CaCl2 4:1	CaCl2 3:1	-,155822 [*]	,022028	,000	-,21987	-,09178
		água quente 3:1	-,016981	,017845	,932	-,06886	,03490
		água quente 4:1	-,046495	,017845	,106	-,09838	,00539
		NaOH 3:1	-,097243 [*]	,017845	,000	-,14913	-,04536
		NaOH 4:1	-,097263 [*]	,018045	,000	-,14973	-,04480
CaCl2 4:1	CaCl2 3:1	CaCl2 3:1	,155822 [*]	,022028	,000	,09178	,21987
		água quente 3:1	,138842 [*]	,020970	,000	,07787	,19981
		água quente 4:1	,109328 [*]	,020970	,000	,04836	,17030
		NaOH 3:1	,058580	,020970	,067	-,00239	,11955
		NaOH 4:1	,058560	,021141	,071	-,00291	,12003
água quente 3:1	CaCl2 3:1	CaCl2 3:1	,016981	,017845	,932	-,03490	,06886
		CaCl2 4:1	-,138842 [*]	,020970	,000	-,19981	-,07787
		água quente 4:1	-,029514	,016521	,479	-,07755	,01852
		NaOH 3:1	-,080262 [*]	,016521	,000	-,12830	-,03223
		NaOH 4:1	-,080282 [*]	,016737	,000	-,12895	-,03162
água quente 4:1	CaCl2 3:1	CaCl2 3:1	,046495	,017845	,106	-,00539	,09838
		CaCl2 4:1	-,109328 [*]	,020970	,000	-,17030	-,04836
		água quente 3:1	,029514	,016521	,479	-,01852	,07755
		NaOH 3:1	-,050748 [*]	,016521	,032	-,09878	-,00271
		NaOH 4:1	-,050768 [*]	,016737	,036	-,09943	-,00210
NaOH 3:1	CaCl2 3:1	CaCl2 3:1	,097243 [*]	,017845	,000	,04536	,14913
		CaCl2 4:1	-,058580	,020970	,067	-,11955	,00239
		água quente 3:1	,080262 [*]	,016521	,000	,03223	,12830
		água quente 4:1	,050748 [*]	,016521	,032	,00271	,09878
		NaOH 4:1	-,000020	,016737	1,000	-,04868	,04864
NaOH 4:1	CaCl2 3:1	CaCl2 3:1	,097263 [*]	,018045	,000	,04480	,14973
		CaCl2 4:1	-,058560	,021141	,071	-,12003	,00291
		água quente 3:1	,080282 [*]	,016737	,000	,03162	,12895
		água quente 4:1	,050768 [*]	,016737	,036	,00210	,09943
		NaOH 3:1	,000020	,016737	1,000	-,04864	,04868

* - A diferença média é significativa ao nível de 0,05.

Tabela A.5: Análise de variância fatorial das propriedades físicas e mecânicas do painel

	Variável dependente	Soma dos quadrados	df	Quadrado médio	F	Sig.
Modelo corrigido	MOR	57,742 ^a	6	9,624	19,223	,000
	MOE	1,454E7	6	2423174,997	37,443	,000
	Ed	1,889E7	6	3148230,728	68,985	,000
	COMP	53,825 ^d	6	8,971	20,023	,000
	IE2h	84,116 ^e	6	14,019	17,673	,000
	IE24h	102,748 ^f	6	17,125	13,071	,000
	ABS2h	3717,820 ^g	6	619,637	44,191	,000
	ABS24h	3175,969 ^h	6	529,328	36,355	,000
	LI	1,683 ⁱ	6	,281	36,664	,000
Intercepto	MOR	8,218	1	8,218	16,416	,000
	MOE	1493402,410	1	1493402,410	23,076	,000
	Ed	3138648,110	1	3138648,110	68,775	,000
	COMP	10,981	1	10,981	24,511	,000
	IE2h	,031	1	,031	,040	,843
	IE24h	,140	1	,140	,107	,745
	ABS2h	835,487	1	835,487	59,584	,000
	ABS24h	1170,623	1	1170,623	80,400	,000
	LI	,015	1	,015	1,922	,170
densidade	MOR	14,346	1	14,346	28,655	,000
	MOE	2386480,241	1	2386480,241	36,876	,000
	Ed	6013572,557	1	6013572,557	131,770	,000
	COMP	17,032	1	17,032	38,017	,000
	IE2h	,129	1	,129	,162	,688
	IE24h	,069	1	,069	,053	,819
	ABS2h	346,514	1	346,514	24,712	,000
	ABS24h	492,783	1	492,783	33,845	,000
	LI	,049	1	,049	6,380	,014
tratamento	MOR	4,940	2	2,470	4,934	,010
	MOE	1828347,543	2	914173,772	14,126	,000
	Ed	587859,574	2	293929,787	6,441	,003
	COMP	4,359	2	2,179	4,865	,010
	IE2h	31,546	2	15,773	19,883	,000
	IE24h	30,926	2	15,463	11,802	,000
	ABS2h	1851,899	2	925,950	66,036	,000
	ABS24h	1022,328	2	511,164	35,107	,000
	LI	,655	2	,328	42,826	,000
relação	MOR	12,012	1	12,012	23,993	,000
	MOE	204531,295	1	204531,295	3,160	,080
	Ed	113995,750	1	113995,750	2,498	,118
	COMP	13,007	1	13,007	29,033	,000
	IE2h	34,027	1	34,027	42,895	,000
	IE24h	39,030	1	39,030	29,790	,000
	ABS2h	43,212	1	43,212	3,082	,083
	ABS24h	32,257	1	32,257	2,215	,141

	LI	,490	1	,490	64,016	,000
tratamento * relação	MOR	4,085	2	2,043	4,080*	,021
	MOE	1274252,193	2	637126,097	9,845*	,000
	Ed	1023068,513	2	511534,256	11,209*	,000
	COMP	,538	2	,269	,600	,551
	IE2h	3,627	2	1,813	2,286	,109
	IE24h	5,413	2	2,706	2,066	,134
	ABS2h	62,094	2	31,047	2,214	,117
	ABS24h	58,333	2	29,166	2,003	,142
	LI	,477	2	,238	31,158*	,000
Erro	MOR	36,046	72	,501		
	MOE	4659528,953	72	64715,680		
	Ed	3285848,355	72	45636,783		
	COMP	32,257	72	,448		
	IE2h	57,116	72	,793		
	IE24h	94,333	72	1,310		
	ABS2h	1009,578	72	14,022		
	ABS24h	1048,321	72	14,560		
	LI	,551	72	,008		
Total	MOR	554,964	79			
	MOE	7,051E7	79			
	Ed	2,417E8	79			
	COMP	436,123	79			
	IE2h	352,815	79			
	IE24h	466,914	79			
	ABS2h	71092,206	79			
	ABS24h	90332,467	79			
	LI	5,224	79			
Total corrigido	MOR	93,787	78			
	MOE	1,920E7	78			
	Ed	2,218E7	78			
	COMP	86,082	78			
	IE2h	141,232	78			
	IE24h	197,081	78			
	ABS2h	4727,399	78			
	ABS24h	4224,290	78			
	LI	2,234	78			

a. R quadrado = ,616 (R quadrado ajustado = ,584); b. R quadrado = ,757 (R quadrado ajustado = ,737); c. R quadrado = ,852 (R quadrado ajustado = ,839); d. R quadrado = ,625 (R quadrado ajustado = ,594); e. R quadrado = ,596 (R quadrado ajustado = ,562); f. R quadrado = ,521 (R quadrado ajustado = ,481); g. R quadrado = ,786 (R quadrado ajustado = ,769); h. R quadrado = ,752 (R quadrado ajustado = ,731); i. R quadrado = ,753 (R quadrado ajustado = ,733); * - a diferença média é significativa ao nível de 0,05.

Tabela A.6: Teste de média LSD para o efeito dos tratamentos em cada relação

Propriedade	Relação	Tratamento	Média	erro padrão	Intervalo de confiança 95%		Fator covariante
					Limite inferior	Limite superior	Densidade (g/cm ³)
MOE	3:1	CaCl ₂	478,427	74,048	329,622	627,233	1,04
		NaOH	709,36	60,628	587,524	831,197	
		Água quente	1255,586	68,249	1118,434	1392,737	
	4:1	CaCl ₂	710,286	106,417	495,527	925,044	1,08
		NaOH	775,283	73,692	626,566	924	
		Água quente	849,844	64,466	719,747	979,941	
MOR	3:1	CaCl ₂	2,024	0,21	1,602	2,447	1,033
		NaOH	2,565	0,174	2,216	2,914	
		Água quente	3,26	0,202	2,854	3,667	
	4:1	CaCl ₂	1,297	0,236	0,821	1,773	1,08
		NaOH	2,405	0,158	2,086	2,724	
		Água quente	1,971	0,143	1,683	2,26	
Ed	3:1	CaCl ₂	1472,237	57,413	1356,921	1587,554	1,03
		NaOH	1525,231	47,434	1429,956	1620,506	
		Água quente	1888,981	57,115	1774,261	2003,7	
	4:1	CaCl ₂	1910,797	85,618	1738,132	2083,462	1,08
		NaOH	1709,408	57,419	1593,611	1825,205	
		Água quente	1750,141	51,937	1645,399	1854,882	
LI	3:1	CaCl ₂	0,167	0,016	0,135	0,198	1,03
		NaOH	0,111	0,013	0,084	0,138	
		Água quente	0,146	0,015	0,115	0,176	
	4:1	CaCl ₂	0,607	0,043	0,521	0,694	1,07
		NaOH	0,097	0,028	0,041	0,153	
		Água quente	0,34	0,026	0,287	0,393	

Tabela A.7: Teste de média LSD para o efeito das relações em cada tratamento

Propriedade	Tratamento	Relação	Média	erro padrão	Intervalo de confiança 95%		Fator covariante	
					Limite inferior	Limite superior	Densidade (g/cm ³)	
MOE	CaCl ₂	3:1	410,497	69,55	264,927	556,067	1,06	
		4:1	885,166	91,596	693,454	1076,877		
	NaOH	3:1	640,706	47,364	544,552	736,859	1,02	
		4:1	564,826	50,042	463,235	666,417		
	Água quente	3:1	1446,76	69,334	1306,146	1587,378	1,09	
		4:1	883,895	71,135	739,627	1028,164		
	MOR	CaCl ₂	3:1	2,094	0,174	1,732	2,456	1,05
			4:1	1,208	0,254	0,68	1,736	
NaOH		3:1	2,486	0,155	2,172	2,8	1,02	
		4:1	1,832	0,159	1,51	2,155		
Água quente		3:1	3,785	0,176	3,427	4,142	1,09	
		4:1	2,063	0,181	1,695	2,43		
Ed		CaCl ₂	3:1	1583,36	85,664	1405,207	1761,505	1,05
			4:1	1721,73	124,924	1461,936	1981,522	
	NaOH	3:1	1453,8	40,426	1371,814	1535,789	1,02	
		4:1	1365,29	41,531	1281,064	1449,521		
	Água quente	3:1	2245,55	50,308	2143,414	2347,675	1,09	
		4:1	1814,72	50,308	1712,584	1916,845		
	LI	CaCl ₂	3:1	0,17	0,022	0,124	0,217	1,04
			4:1	0,554	0,035	0,481	0,628	
NaOH		3:1	0,096	0,007	0,081	0,11	1,02	
		4:1	0,083	0,007	0,069	0,098		
Água quente		3:1	0,187	0,027	0,133	0,241	1,09	
		4:1	0,345	0,029	0,286	0,404		