# UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO FACULDADE DE ZOOTECNIA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência de Materiais

## MATHEUS ROBERTO CABRAL

Painéis OSB-cimento-madeira residual curados por carbonatação acelerada

Pirassununga 2019

## MATHEUS ROBERTO CABRAL

Painéis OSB cimento-madeira residual curados por carbonatação acelerada

### VERSÃO CORRIGIDA

Tese apresentada à Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências do programa de pós-graduação em Engenharia e Ciência de Materiais

Área de Concentração: Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais Voltados à Agroindústria

Orientador: Prof. Dr. Juliano Fiorelli Coorientador: Prof. Dr. Sérgio Francisco dos Santos

Pirassununga 2019

Ficha catalográfica elaborada pelo Serviço de Biblioteca e Informação, FZEA/USP, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Cabral, Matheus Roberto

 Painéis OSB-cimento-madeira residual curados por carbonatação acelerada / Matheus Roberto Cabral ; orientador Juliano Fiorelli ; coorientador Sérgio Francisco dos Santos. -- Pirassununga, 2019.
 178 f.
 Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais) -- Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo.

 Eucalipto; Pinus. 2. Pinus. 3. Oriented Strand Board. 4. Painel. 5. Cimento-madeira. I. Fiorelli, Juliano , orient. III. Santos, Sérgio Francisco dos , coorient. III. Título.

Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte - o autor

#### MATHEUS ROBERTO CABRAL

Painéis OSB-cimento-madeira residual curados por carbonatação acelerada

Banca Examinadora:

Juliano Fiorelli – Presidente da Banca Examinadora Prof. Dr. FZEA/USP – Orientador

Cristiane Inácio de Campos Prof. Dra. UNESP/Itapeva

Gonzalo Mármol de Los Dolores Dr. FZEA/USP

João Adriano Rossignolo Prof. Dr. FZEA/USP

Marília da Silva Bertolini Prof. Dra. UNESP/Itapeva

Mauro Mitsuuchi Tashima Prof. Dr. UNESP/Ilha Solteira

Pirassununga, 27 de março de 2019

"Dedico este trabalho à memória de meus pais Antonio e Maria... Sei que, de algum lugar, vocês olham por mim..."

#### AGRADECIMENTOS

À Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo e ao programa de Pós-graduação em Engenharia de Ciência de Materiais, pela formação que me proporcionou durante os anos do curso de doutorado.

Aos Professores Juliano Fiorelli e Sérgio Francisco dos Santos pela orientação, ensinamentos, apoio e paciência ao longo destes quase 9 anos de trabalho...

À Erika por todo o auxílio durante a realização deste projeto, além do apoio, estímulo, paciência, compreensão, amor e carinho ofertados, incondicionalmente.

À aluna de iniciação científica Mayara Salvador Rodrigues Franco por colaborar com a realização deste projeto.

Aos Professores Holmer Savastano Junior e Francisco Antonio Rocco Lahr pela confiança e apoio ao longo da realização do trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela concessão da bolsa de doutorado.

À Empresa Santa Rosa Pallets pela doação dos resíduos de madeira.

#### RESUMO

CABRAL, M. R. **Painéis OSB-cimento-madeira residual curados por carbonatação acelerada.** 2019. 178 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, 2019.

O presente estudo teve como objetivo desenvolver, produzir e caracterizar painéis OSBcimento-madeira residual com as espécies de eucalipto (Eucaliptus spp.) e pinus (Pinus spp.) com densidade 1250 kg/m<sup>3</sup>, bem como avaliar o efeito da cura com carbonatação acelerada nas propriedades dos painéis. O projeto foi desenvolvido em quatro etapas. Na Etapa 1 (Tratamentos nos strands de eucalipto e pinus) foi realizada a produção e a avaliação do efeito dos tratamentos de água fria, água quente e solução 2,5% de hidróxido de sódio, nas propriedades dos *strands*, bem como o estudo do efeito dos *strands* de eucalipto e pinus (sem e com tratamentos) na hidratação do cimento Portland aos 28 dias de idade. Após a avaliação dos strands, foi constatado que os que não receberam tratamento apresentaram melhor desempenho em comparação aos strands tratados. A etapa 2 (Determinação do teor ótimo de strands de madeira para painéis OSB cimento-madeira residual) visou produzir painéis OSB-cimentomadeira residual contendo os teores de 25%, 30% e 35% de strands em massa, seguindo a metodologia convencional de produção de painéis cimento-madeira (OSB-cimento-madeira) e avaliá-los por meio das propriedades, físicas, mecânicas e microestruturais. Os painéis OSBcimento-madeira com os teores de 25%, 30% e 35% de strands apresentaram propriedades físicas próximas ao valor recomendado pela norma ISO 8335 como também para propriedades mecânicas de módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE). Na etapa 3 (Painéis OSB-cimento-madeira residual otimizados) foram ajustados os parâmetros de produção (teor de *strands*, teor de água, processo de mistura e pressão) e avaliadas as propriedades térmicas, físicas e mecânicas dos painéis OSB-cimento-madeira residual com 35% e 45% de strands (em massa). Foi observado que após o ajuste da água não evaporável (Wn), os valores de densidade aparente foram próximos ao valor proposto nos parâmetros produtivos. O teor de strands de 45% resultou em um aumento de aproximadamente 31% no MOR paralelo e de 93% no MOE perpendicular ao strand em comparação com painéis fabricados com teores de 35%. A pressão empregada foi efetiva uma vez que proporcionou uma compressão adequada para ambos os painéis (eucalipto e pinus), não sendo evidenciado o "efeito mola". Na Etapa 4 (Cura com carbonatação acelerada em painéis OSB-cimento-madeira residual) em que foram avaliados os painéis OSB-cimento-madeira residual com 45% de strands submetidos a cura com carbonatação acelerada, durante 12 h foi observada uma redução do inchamento em espessura e da absorção de água. Os valores médios do MOR na direção paralela do strand e do MOE foram próximos aos requisitos mínimos estabelecidos pela EN300: 2006 – classe OSB/1. Para os painéis avaliados após o ensaio de envelhecimento acelerado de 100 ciclos de imersão e secagem, foi observado que o desempenho mecânico dos painéis carbonatados foi significativamente superior aos não carbonatados. Portanto, pode-se concluir que os painéis OSB-cimento-madeira residual produzidos com strands de eucalipto e pinus no teor de massa de 45% e curados com carbonatação acelerada apresentaram potencial como um novo material, visto que as propriedades físicas e mecânicas atendem ao estabelecido pela norma EN300:2006 para painel cimento-madeira convencional.

**Palavras-chave**: Eucalipto; Pinus; *Oriented Strand Board;* Painel; Cimento-madeira; Durabilidade.

#### ABSTRACT

CABRAL, M. R. **OSB-cement-residual-wood particleboards cured by accelerated carbonation.** 2019. 178 p. Doctoral Thesis – Faculty of Animal Science and Food Engineering, University of São Paulo, 2019.

This project aims the development, production and characterization of OSB-cement-residualwood particleboards using the wood species of eucalyptus (Eucalyptus spp.) and pine (Pinus spp.) with a density of 1250 kg/m<sup>3</sup>, as well as to evaluate the accelerated carbonation effects on the particleboard's properties. This project was conducted into four steps. In the step 1 (Tratamentos nos strands de eucalipto e pinus) it was realized the strands production and characterization. In this step, the study of the strands (eucalyptus and pine) on the Portland cement hydration at 28 days age was also investigated. The results shown that the strands without treatment perform better than those treated. In the step 2 (Determinação do teor ótimo de strands de madeira para painéis OSB cimento-madeira residual) a physical, mechanical and microstructural properties evaluation was conducted on the OSB-cement-residual-wood particleboards with strand contents of 25%, 30% and 35% (by weight) produced with the conventional cement-wood production method. The OSB-cement-residual-wood with all strand contents shown physical and mechanical (MOR and MOE) properties close to those recommend by ISO 8335. In the step 3 (Painéis OSB-cimento-madeira residual otimizados) production parameters were adjusted (strand contents, water content, mixture procedure and pressure) and the particleboards with 35% and 45% of strands thermal, physical and mechanical properties were assessed. The results of this step shown that after once adjusted the non-evaporable water (Wn) in the production, the apparent density values were close to those proposed in the production methods. The particleboards with a strand content of 45% shown an increase of approximately 31% in the parallel MOR and 93% in the MOE perpendicular to the strand compared to those particleboards made with 35%s strand content. It was also found that the pressure used to produce the particleboards (eucalyptus and pine) was effective once it was not evidenced the spring effect. In the step 4 (Cura com carbonatação acelerada em painéis OSBcimento-madeira residual) the OSB-cement-residual wood with 45% of strands were subjected to accelerated carbonation cure for 12 h and the materials were evaluated. It was found a reduction in thickness welling and water absorption for the carbonated particleboard. The mean values of MOR in the parallel direction of the strand and the MOE were close to the minimum requirements established by the EN300: 2006 - OSB/1 class. For the particleboards evaluated after the accelerated aging test of 100 wetting and drying cycles, it was found that the mechanical performance of the carbonated particleboards was significantly higher than those non-carbonated. Therefore, it can be concluded that the OSB-cement-residual-wood particleboards produced with eucalyptus with 45% of strand and cured by accelerated carbonation presented potential as a new material, since the physical and mechanical properties meet the EN300: 2006 standard requirements for conventional cement-wood panel.

**Key words**: Eucalyptus; Pine; Oriented Strand Board; Particleboard; Cement-wood; Durability.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Levantamento da produção de madeira residual realizado pela FAO para o Brasil e
para o mundo24
Figura 2 – Esquema de classificação dos produtos derivados da madeira
Figura 3 – Camadas de orientação painéis OSB modificada27
Figura 4 - Estrutura anatômica de madeira de baixa densidade (softwood) e de alta densidade
(hardwood)
Figura 5 – Processo industrial de produção de painéis OSB
Figura 6 – Benefícios dos constituintes dos painéis cimento-madeira modificado36
Figura 7 - Esquema do fluxo de produção industrial dos painéis cimento madeira38
Figura 8 – Amostra painel cimento-madeira
Figura 9 - Micrografia material vegetal mineralizado
Figura 10 – Tendência de CO2 atmosférico em partes por milhão (ppm) ao longo dos anos46
Figura 11 – Fluxograma do plano de trabalho48
Figura 12 – Esquema resumido do processamento dos strands: (a) eucalipto (b) pinus50
Figura 13 - Aparência final dos strands após os tratamentos (a) eucalipto (b) pinus52
Figura 14 - Esquema do ângulo de contato formado pelo liquido em contato com superfícies
hidrofóbica e hidrofílica
Figura 15 – Ilustração da medida de ângulo de contato: (a) medidor de ângulo de contato
dinâmico (b) sistema de câmera (c) porta amostras (d) amostra após ensaio54
Figura 16 – Microscópios utilizados para avaliação microestrutural: (a) Microscopia
Eletrônica de Varredura (MEV) (b) Microscopia de Varredura Confocal a Laser (MVCL)57
Figura 17 – Caracterização mecânica strands: (a) amostra (b) máquina servo-hidráulica de
ensaios mecânicos (c) amostra inserida entre as garras
Figura 18 – Distribuição discreta e acumulada de tamanho de partículas do cimento Portland
CP V-ARI
Figura 19 – Sequência de preparo corpos de prova cilíndricos por método convencional
(mistura de todos os componentes juntos)61
Figura 20 – Preparo corpos de prova cilíndricos modificado
Figura 21 - Desenho esquemático do processo de produção dos painéis OSB-cimento-madeira
residual
Figura 22 – Desenho esquemático dos corpos de prova preparados para o ensaio de flexão69

Figura 23 – Modelo de flexão estática 3 pontos: (a) Máquina universal de ensaios (b) corpo de
prova acomodado para ensaio de flexão 3 pontos69
Figura 24 - Matérias primas após processo de mistura (a) mistura = strand: água: cimento (b)
mistura = strand: cimento: água74
Figura 25 – Desenho esquemático da ordem de mistura da produção dos painéis OSB-
cimento-madeira residual otimizados74
Figura 26 – Condutividade térmica OSB-cimento-madeira residual
Figura 27 – Dispositivos de ensaio de adesão interna (a) Corpo de prova colado no bloco de
tração (b) Sistema corpo de prova e blocos de tração que foi acoplado nas garras78
Figura 28 - Equipamento e etapas da carbonatação acelerada dos painéis OSB-cimento-
madeira residual. (a) câmara de carbonatação (b) OSB-cimento-madeira residual acomodados
na câmara (c) OSB-cimento-madeira residual selados em sacos plásticos após carbonatação
(d) OSB-cimento-madeira residual com 28 dias de idade80
Figura 29 – Equipamento e as amostras utilizados no ensaio de envelhecimento acelerado por
imersão e secagem: (a) equipamento de imersão e secagem (b) amostras imersas em água (c)
amostras em processo de secagem
Figura 30 – Fotos do microscópio eletrônico de varredura (MEV) para caracterização
microestrutural dos OSB-cimento-madeira residual: (a) MEV Philips XL-30 FEG (b) amostra
no porta amostra para realização da análise
Figura 31 – Gráficos e imagens das gotas sobre a respectiva superfície tratada do strand no
ensaio de ângulo de contato: (a) eucalipto e (b) pinus
Figura 32 – Espectros de infravermelho FTIR: (a) eucalipto (b) pinus
Figura 33 – Análise diferencial termogravimétrica (DTG): (A) Eucalipto (B) Pinus95
Figura 34 – Análise cristalográfica após os tratamentos nos strands: (A) difratogramas do
eucalipto (B) e do pinus96
Figura 35 – Micrografias dos strands de eucalipto submetidos aos tratamentos: (a) sem
tratamento; (b) água fria; (c) água quente; (d) NaOH99
Figura 36 - Micrografias dos strands de pinus submetidos aos tratamentos: (a) sem
tratamento; (b) água fria; (c) água quente; (d) NaOH100
Figura 37 - Imagens topográficas de superfície dos strands de eucalipto (a) e pinus (b) 102
Figura 38 – Curva típicas obtidas do ensaio mecânico de tração dos strands de eucalipto (a) e
pinus (b)104

Figura 39 – Termogramas de TG/DTG das amostras extraídas dos corpos de prova cilíndricos
com 28 dias de eucalipto (a) e pinus (b)107
Figura 40 – Difratogramas das amostras extraídas dos corpos de prova cilíndricos com 28 dias
com strands de eucalipto (a) e pinus (b)109
Figura 41 – Micrografias de MEV dos painéis OSB-cimento-madeira residual120
Figura 42 – Avaliação visual do procedimento de cura (a) painel não carbonatado, (b) painel
carbonatado 12 h132
Figura 43 – Termogramas de TG/DTG das amostras dos painéis de eucalipto e pinus com 28
dias de idade
Figura 44 – Difratogramas (DRX) das amostras dos painéis não carbonatados e carbonatados
com 28 dias: (a) eucalipto (b) pinus135
Figura 45 – Micrografias dos painéis OSB-cimento-madeira residual com 28 dias145
Figura 46 – Termogramas de TG/DTG das amostras dos painéis OSB-cimento-madeira
residual de eucalipto e pinus com 100 ciclos de envelhecimento147
Figura 47 – Difratogramas (DRX) das amostras dos painéis não carbonatados e carbonatados
com 28 dias e 100 ciclos: (a) eucalipto (b) pinus148
Figura 48 – Micrografias dos painéis OSB-cimento-madeira residual com 100 ciclos154

### LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fontes e tipos de resíduo de origem madeireira    23
Tabela 2 – Propriedades requeridas para paineis OSB/1
Tabela 3 - Propriedades requeridas para paineis OSB/2    32
Tabela 4 - Propriedades requeridas para paineis OSB/3    32
Tabela 5 - Propriedades requeridas para paineis OSB/4    33
Tabela 6 – Tratamentos nos strands de eucalipto e pinus
Tabela 7 – Composição química do cimento CP V-ARI (% em massa de óxidos)59
Tabela 8 – Parâmetros de produção em escala de laboratório dos painéis OSB-cimento-
madeira residual experimentais
Tabela 9 – Parâmetros de produção dos painéis OSB-cimento-madeira residual72
Tabela 10 – Valores médios e desvio padrão da densidade aparente da madeira em estudo 85
Tabela 11 – Valores médios do teor de umidade dos strands de acordo com os tratamentos
aplicados
Tabela 12 - Valores médios e desvio padrão da densidade aparente dos strands de acordo com
os tratamentos aplicados
Tabela 13 – Valores médios e os desvios padrão da absorção de água dos strands de eucalipto
e pinus após 2 h de imersão90
Tabela 14 – Valores médios e os desvios padrão da absorção de água dos strands de eucalipto
e pinus após 24 h de imersão91
Tabela 15 – Composição química dos strands de eucalipto e pinus92
Tabela 16 – Índice de cristalinidade dos strands de eucalipto e pinus de acordo com os
respectivos tratamentos aplicados97
Tabela 17 – Valores médios e desvios padrão da rugosidade superficial (Sa) dos strands101
Tabela 18 – Valores médios e os respectivos desvios padrão da tensão de ruptura ( $\sigma$ ) dos
strands de eucalipto e pinus
Tabela 19 – Valores médios e desvios padrão da tensão máxima (TMax) obtida do ensaio de
compressão axial aos 28 dias106
Tabela 20 – Valores médios e desvios padrão da densidade aparente dos painéis OSB-
cimento-madeira residual e painéis não orientados112
Tabela 21 – Valores médios e desvios padrão do inchamento em espessura após 24 h imersos
dos painéis o OSB-cimento-madeira residual e não orientados

Tabela 22 – Valores médios e desvio padrão da absorção de água dos painéis OSB-cimento- madeira residual e não orientados
Tabela 23 – Valores médios e desvio padrão do módulo de ruptura dos painéis de eucalipto
Tabela 24 – Valores médios e desvio padrão do módulo de ruptura dos painéis de pinus 116 Tabela 25 – Valores médios e desvio padrão do módulo de elasticidade dos painéis de
eucalipto
Tabela 26 – Valores médios e desvio padrão do módulo de elasticidade dos painéis de pinus
Tabela 27 – Valores médios e desvio padrão da condutividade térmica dos OSB-cimento-
madeira residual
Tabela 28 – Valores médios e desvios padrão para a densidade aparente OSB-cimento-
madeira
Tabela 29 – Valores médios e desvio padrão para o inchamento em espessura OSB-cimento-
madeira residual
Tabela 30 – Valores médios e desvio padrão para a absorção de água dos OSB-cimento-
madeira residual
Tabela 31 – Valores médios e desvio padrão do módulo de ruptura dos painéis OSB-cimento-
madeira residual de eucalipto e pinus testados na direção paralela do strand125
Tabela 32 – Valores médios e desvio padrão do módulo de ruptura dos painéis OSB-cimento-
madeira residual eucalipto e pinus testados na direção perpendicular do strand126
Tabela 33 – Valores médios e desvio padrão do módulo de elasticidade dos painéis OSB-
cimento-madeira residual de eucalipto e pinus testados na direção paralela do strand126
Tabela 34 – Valores médios e desvio padrão do módulo de elasticidade dos painéis OSB-
cimento-madeira residual de eucalipto e pinus testados na direção perpendicular do strand 127
Tabela 35 – Valores médios e desvio padrão para o ensaio de arrancamento de parafuso topo
Tabela 36 – Valores médios e desvio padrão para o ensaio de arrancamento de parafuso
superfície
Tabela 37 – Valores médios e desvio padrão da adesão interna dos painéis OSB-cimento-
madeira residual de eucalipto e pinus
Tabela 38 – Estimativa do hidróxido de cálcio e do carbonato de cálcio

Tabela 39 – Valores médios e desvios padrão da condutividade térmica dos painéis OSB-
cimento-madeira residual não carbonatados e carbonatados136
Tabela 40 – Valores médios e desvios padrão para a densidade aparente dos OSB-cimento-
madeira residual não carbonatados e carbonatados137
Tabela 41 – Valores médios e desvios padrão para o inchamento em espessura dos painéis
OSB-cimento-madeira residual não carbonatados e carbonatados138
Tabela 42 – Valores médios e desvios padrão para de absorção de água dos painéis OSB-
cimento-madeira residual não carbonatados e carbonatados139
Tabela 43 – Valores médios e desvios padrão para o módulo de ruptura dos painéis OSB-
cimento-madeira residual não carbonatados e carbonatados testados na direção paralela do
strand
Tabela 44 – Valores médios e desvios padrão para o módulo de ruptura dos painéis OSB-
cimento-madeira residual não carbonatados e carbonatados testados na direção perpendicular
do strand140
Tabela 45 – Valores médios e desvios padrão para o módulo de elasticidade dos painéis OSB-
cimento-madeira residual não carbonatados e carbonatados testados na direção paralela do
strand141
Tabela 46 – Valores médios e desvios padrão para o módulo de elasticidade os painéis não
carbonatados e carbonatados testados na direção perpendicular do strand141
Tabela 47 – Valores médios e desvios padrão do arrancamento de parafuso topo dos painéis
não carbonatados e carbonatados142
Tabela 48 – Valores médios e desvios padrão do arrancamento de parafuso topo dos painéis
OSB-cimento-madeira residual não carbonatados e carbonatados143
Tabela 49 – Valores médios e desvios padrão da adesão interna dos painéis OSB-cimento-
madeira residual não carbonatados e carbonatados144
Tabela 50 – Estimativa do carbonato de cálcio e hidróxido de cálcio após 100 ciclos de
envelhecimento147
Tabela 51 – Valores médios e desvios padrão de densidade aparente painéis não carbonatados
e carbonatados 100 ciclos149
Tabela 52 – Valores médios e desvios padrão para o inchamento em espessura dos painéis não
carbonatados e carbonatados 100 ciclos149
Tabela 53 – Valores médios e desvios padrão para a absorção de água dos painéis não
carbonatados e carbonatados 100 ciclos150

Tabela 54 – Valores médios e desvios padrão para o módulo de ruptura e módulo de	
elasticidade dos painéis não carbonatados e carbonatados 100 ciclos testados na direção	
paralela do strand	151
Tabela 55 – Valores médios e desvios padrão para o módulo de ruptura dos painéis OSB-	
cimento-madeira residual não carbonatados e carbonatados 100 ciclos testados na direção	
perpendicular do strand	152

## LISTA DE ABREVIAÇÕES E SIGLAS

AA	Absorção de água
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AI	Adesão interna
C <sub>2</sub> S	Belita
C <sub>3</sub> S	Alita
Ca(OH)2	Hidróxido de cálcio
CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de cálcio
<b>CO</b> <sub>2</sub>	Gás carbônico
CSH	Silicato de cálcio hidratado
DA	Densidade aparente
DRX	Difração de raios-X
DTG	Derivada da TG
EN	European Normative
FAO	Food and Agriculture Organization
FF	Fenol-formaldeído
FTIR	Espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier
IC	Índice de cristalinidade
IE	Inchamento em espessura
MDF	Medium Density Fiberboard
MDI	Methylene diphenyl diisocyanate
MDP	Medium Density Particleboard
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MF	Melamina-formaldeído
MOE	Módulo de elasticidade
MOR	Módulo de ruptura
MPa	Mega Pascal
MultMat	Laboratório Multiusuários de Caracterização de Materiais
MVCL	Microscopia de Varredura Confocal a Laser
NaOH	Hidróxido de sódio
OSB	Oriented Strand Board
ppm	Partes por milhão

TG	Termogravimetria
UF	Uréia-formaldeído
Wn	Água não evaporável

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	20
2. OBJETIVOS	22
2.1. Objetivo geral	22
2.2. Objetivos específicos	22
3. REVISÃO DE LITERATURA	23
3.1. Madeira residual	23
3.2. Produtos derivados de madeira	26
3.3. Oriented Strand Board - OSB	27
3.3.1. Composição	28
3.3.2. Produção	30
3.3.3. Características do OSB	31
3.4. Painel cimento-madeira	34
3.4.1. Composição	35
3.4.2. Produção	37
3.4.3. Características do painel cimento-madeira	39
3.5. Painel cimento-madeira strand (Wood Strand Cement	Board) 40
3.6. Interação: madeira versus cimento	41
3.7. Cura da matriz cimentícia com carbonatação acelerada	a 43
3.8. Considerações da revisão bibliográfica	46
4. PLANO DE TRABALHO	
5. MATERIAL E MÉTODOS	49
5.1. Etapa 1: Tratamentos nos strands de eucalipto e pinus	49
5.1.1. Materiais	49
5.1.2. Preparo dos strands	50
5.1.3. Tratamentos dos strands	50
5.1.4. Caracterização dos strands	52
5.1.4.1. Teor de umidade	52
5.1.4.2. Densidade aparente	52
5.1.4.3. Molhabilidade	53
5.1.4.3.1. Ângulo de contato	53
5.1.4.3.2. Absorção de água por imersão	55

5.1.4.4. Análise química	55
5.1.4.5. Caracterização microestrutural	56
5.1.4.5.1. Termogravimetria	56
5.1.4.5.2. Difração de raios X	56
5.1.4.5.3. Caracterização morfológica	57
5.1.4.6. Caracterização mecânica	58
5.1.5. Efeito dos tratamentos nos strands na hidratação do cimento Portland	59
5.1.5.1. Resistência à compressão axial	61
5.1.5.2. Termogravimetria (TG/DTG) e difratometria de Raios X (DRX)	63
5.1.6. Análise estatística - ANOVA	64
5.2. Etapa 2: Determinação do teor ótimo de strands de madeira para painéis OSB	
cimento-madeira residual	64
5.2.1. Produção laboratorial dos painéis OSB-cimento-madeira residual	65
5.2.2. Caracterização dos Painéis OSB-cimento-madeira residual	67
5.2.2.1. Caracterização física	67
5.2.2.2. Caracterização mecânica	68
5.2.2.3. Caracterização microestrutural	70
5.2.3. Análise estatística	71
5.3. Etapa 3: Painéis OSB-cimento-madeira residual otimizados	71
5.3.1. Produção dos painéis OSB-cimento-madeira residual otimizados	72
5.3.2. Caracterização OSB-cimento-madeira residual otimizados	75
5.3.2.1. Caracterização térmica	75
5.3.2.2. Caracterização física	76
5.3.2.3. Caracterização mecânica	76
5.3.2.3.1. Flexão estática	77
5.3.2.3.2. Arrancamento de parafuso	77
5.3.2.3.3. Adesão interna	77
5.3.3. Análise estatística	78
5.4. Etapa 4: Cura com carbonatação acelerada em painéis OSB-cimento-madeira	
residual	79
5.4.1. Fabricação dos painéis OSB-cimento-madeira residual	79
5.4.2. Cura com carbonatação acelerada em painéis OSB	79
5.4.3. Ensaio de envelhecimento acelerado por imersão e secagem	80

5.4.4. Caracterização OSB-cimento-madeira residual carbonatados	81
5.4.4.1. Análise da carbonatação	81
5.4.4.1.1. Análise visual por fenolftaleína	81
5.4.4.1.2. Caracterização termogravimétrica e mineralógica	82
5.4.4.2. Caracterização térmica	82
5.4.4.3. Caracterização física	83
5.4.4.4. Caracterização mecânica	83
5.4.4.5. Caracterização microestrutural	83
5.4.5. Analise estatística	84
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	85
6.1. Etapa 1: Tratamentos nos strands de eucalipto e pinus	85
6.1.1. Caracterização das madeiras	85
6.1.2. Caracterização dos strands	86
6.1.2.1. Teor de umidade	86
6.1.2.2. Densidade aparente	87
6.1.2.3. Molhabilidade	88
6.1.2.3.1. Resultados do ensaio de ângulo de contato	88
6.1.2.3.2. Absorção de água	90
6.1.2.4. Caracterização química	91
6.1.2.5. Caracterização microestrutural	94
6.1.2.5.1. Termogravimetria	94
6.1.2.5.2. Difratometria de raios X (DRX)	95
6.1.2.5.3. Caracterização morfológica	98
6.1.2.5.3.1. Microscopia eletrônica de varredura	98
6.1.2.5.3.2. Microscópio de Varredura Confocal a Laser	100
6.1.2.6. Caracterização mecânica	103
6.1.3. Efeito dos strands na hidratação do cimento	105
6.1.3.1. Resistência à compressão	105
6.1.3.2. Termogravimetria (TG) e difratometria de raios X (DRX)	106
6.1.4. Considerações parciais da etapa 1	110
6.2. Etapa 2: Determinação do teor ótimo de strands de madeira para painéis	111
6.2.1. Propriedades físicas	111
6.2.2. Propriedades mecânicas	115

6.2.3. Caracterização microestrutural	119
6.2.4. Considerações parciais da etapa 2	120
6.3. Etapa 3: Painéis OSB-cimento-madeira residual otimizados	122
6.3.1. Condutividade térmica	122
6.3.2. Propriedades físicas	123
6.3.3. Propriedades mecânicas	125
6.3.3.1. Flexão estática	125
6.3.3.2. Arrancamento de parafuso	128
6.3.3.3. Adesão interna	129
6.3.4. Considerações parciais da etapa 3	130
6.4. Etapa 4: Cura com carbonatação acelerada em painéis OSB-cimento-madeira	
residual	131
6.4.1. Avaliação visual da eficiência da carbonatação por fenolftaleína	131
6.4.2. Painéis avaliados com 28 dias de idade	132
6.4.2.1. Avaliação do efeito da carbonatação por TG e DRX	132
6.4.2.2. Condutividade térmica	136
6.4.2.3. Propriedades físicas	137
6.4.2.4. Propriedades mecânicas	139
6.4.2.5. Efeito da carbonatação na microestrutura dos painéis	144
6.4.3. Painéis avaliados com 100 ciclos de envelhecimento	146
6.4.3.1. Termogravimetria (TG/DTG) difratometria (DRX)	146
6.4.3.2. Desempenho físico e mecânico	149
6.4.3.3. Caracterização microestrutural	153
6.4.4. Considerações parciais etapa 4	154
7. CONCLUSÕES	156
REFERÊNCIAS	158

#### 1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

As pesquisas referentes aos painéis aglomerados de madeira remetem aos anos 1900. No entanto, a primeira planta para a produção destes materiais foi criada somente em 1940, durante a segunda guerra, devido à dificuldade de obtenção de madeiras de boa qualidade para produção de painéis compensados (NASCIMENTO; LAHR; CHRISTOFORO, 2015).

Os painéis aglomerados de madeira podem ser classificados em dois grupos de agente ligante ou matriz, sendo o primeiro grupo composto por matrizes orgânicas, composto pelas resinas poliméricas, tais como: fenol-formaldeído (FF), uréia-formaldeído (UF), melamina-formaldeído (MF) e isocianato, utilizados na fabricação dos painéis MDF (*Medium Density Fiberboard*), MDP (*Medium Density Particleboard*) e OSB (*Oriented Strand Board*).

O segundo grupo composto pelas matrizes inorgânicas, tais como gesso, cimento magnésio e cimento Portland, conhecidos comumente como painéis cimento-madeira. Os painéis cimento-madeira são materiais conformados por prensagem a frio, com massa de partículas de madeira variando de 10% e 70% (STARK; CAI; CARLL, 2010).

O cimento Portland apresenta propriedades que o qualificam como material ligante adequado para a produção desse tipo de material, a saber: alta resistência à compressão, resistência ao fogo e resistência ao desgaste. No entanto, o cimento possui baixa resistência à tração, e para usá-lo de maneira efetiva para a produção de materiais de construção, as forças de tração na flexão devem ser transferidas para um material de reforço.

A madeira é uma matéria prima de fonte natural e renovável que requer processamento mínimo, e de acordo com Leborgne e Gutkowski (2010), a introdução da madeira em materiais de construção concede a vantagem de reduzir parcialmente o conteúdo de cimento. O uso da madeira em materiais cimentícios pode também otimizar as propriedades mecânicas na flexão e o comportamento de pós-fissuração, sendo uma matéria prima alternativa aos reforços convencionalmente utilizados, tais como, fibra de vidro, fibra de polipropileno e fibra de aço (PAGE et al., 2017).

O painel cimento-madeira é um material atrativo para a construção civil, uma vez que este material possui propriedades físicas, acústicas, térmicas, resistência ao fogo, resistência à degradação biológica e durabilidade que atendem as diretrizes mínimas estabelecidas pelos documentos normativos internacionais e superiores aos painéis produzidos com matriz orgânica, além de ser um produto de baixo custo (QUIROGA; MARZOCCHI; RINTOUL, 2016).

Entretanto, embora os painéis cimento-madeira apresentem diversos aspectos vantajosos frente aos painéis produzidos com matriz orgânica, um dos desafios enfrentados por estes materiais é a sua baixa durabilidade, e a principal razão para isto está atrelada a mineralização da madeira quando exposta ao meio alcalino da matriz cimentícia (pH~13) (AMZIANE; SONEBI, 2016).

De forma simplificada, a mineralização consiste na reprecipitação dos produtos de hidratação do cimento no interior das partículas da madeira. Pois, a região da matriz ao redor da partícula é caracterizada pela porosidade elevada, permitindo assim o acúmulo da solução de água com produtos alcalinos, tal como o hidróxido de cálcio Ca(OH)<sub>2</sub>, que por sua vez, degrada as partículas de madeira e compromete o seu desempenho como agente de reforço nos painéis (AMZIANE; SONEBI, 2016).

Devido a redução da alcalinidade e densificação da matriz cimentícia, a cura por meio da carbonatação acelerada é uma estratégia que tem mostrado potencial para minimizar os efeitos do cimento e tornar o meio menos agressivo para as partículas de madeira.

O processo de carbonatação pode ser descrito como a difusão do gás carbônico (CO<sub>2</sub>), por meio dos poros insaturados de matriz cimentícia. O CO<sub>2</sub> é dissolvido na fase aquosa presente nos poros e se transforma em ácido carbônico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), sendo estes dissociados em íons de bicarbonato (HCO<sub>3</sub>-) e carbonato (CO<sub>3</sub>-), juntamente com a dissolução da hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>), liberando íons de cálcio (Ca<sub>2</sub>+) e hidróxido (OH), que precipitam e formam o carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) (PETER et al., 2008).

Além disso, outro ponto a ser destacado, são as propriedades mecânicas na flexão inferiores dos painéis cimento-madeira quando comparados, por exemplo, aos painéis comerciais de OSB (*Oriented Strand Board*) produzidos com resina polimérica. O OSB é um painel estrutural amplamente utilizado na América do Norte. A geometria das partículas do tipo *strand* (finas e longas) dos painéis OSB, bem como sua estrutura de camadas cruzadas são responsáveis pelas propriedades mecânicas deste material (BOARDMAN; GLASS; LEBOW, 2017; ZERBE; CAI; HARPOLE, 2015).

Há décadas, muitos estudos têm sido conduzidos no campo dos painéis cimentomadeira, especialmente os painéis produzidos com partículas de madeira dispostas aleatoriamente nos compósitos, no entanto, atualmente, estudos referentes a painéis cimentomadeira orientados não são encontrados facilmente em literatura técnica-cientifica. Portanto, diante deste cenário, a maior contribuição técnico-cientifica deste trabalho está relacionada com hipótese: "é possível produzir painel OSB-cimento-madeira residual de Pinus e Eucalipto com propriedades térmicas, físicas e mecânicas similares aos painéis cimento-madeira comerciais".

#### 2. OBJETIVOS

#### 2.1. Objetivo geral

O presente estudo teve como objetivo desenvolver painéis OSB-cimento-madeira residual de eucalipto (*Eucaliptus spp.*) e pinus (*Pinus spp.*) e avaliar o desempenho térmico, físico e mecânico antes e após cura com carbonatação acelerada.

#### 2.2. Objetivos específicos

**1.** Avaliar as propriedades físicas, químicas, mecânicas, cristalográficas, morfológicas e termogravimétricas de *strands* de eucalipto e pinus antes e após o tratamento com água fria, água quente e solução NaOH.

2. Estudar o efeito dos *strands* de eucalipto e pinus (sem e com tratamentos) na hidratação do cimento Portland aos 28 dias de idade.

**3.** Avaliar o desempenho físico e mecânico de painéis OSB-cimento-madeira residual com diferentes teores de *strands* produzidos pela metodologia convencional de fabricação de painéis cimento-madeira.

**4.** Determinar o teor ótimo de *strands* (35 ou 45%) por meio da avaliação das propriedades térmicas, físicas, mecânicas e microestruturais de painéis OSB-cimento-madeira residual.

5. Estudar o efeito da cura com carbonatação acelerada nas propriedades térmicas, físicas, mecânicas, microestruturais e de durabilidade dos painéis OSB-cimento-madeira residual.

#### 3. REVISÃO DE LITERATURA

#### **3.1.** Madeira residual

A madeira residual pode ser definida como o material vegetal gerado a partir da indústria de produtos florestais, resultantes das operações de manejo florestal, bem como dos processos da indústria madeireira, tais como: serrarias, fábricas de compensados e aglomerados, indústria da celulose, carpintarias, fábricas de móveis. Além disso, resíduos de madeira também podem ser provenientes de outras atividades industriais, como por exemplo as embalagens e o resíduos urbanos gerados na construção civil (SILVA PLUS, 2017).

Na Tabela 1, estão apresentados alguns tipos de resíduos gerados a partir de operações florestais, serrarias e da indústria de compensados e aglomerados (FAO, 1990). De acordo com a base de dados online fornecida pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO), o levantamento de produção de madeira residual Brasileira no ano de 2017 foi de aproximadamente 19 milhões de m<sup>3</sup>, no qual este montante representa 8,5% da produção mundial, que foi de aproximadamente 225 milhões de m<sup>3</sup> para o mesmo ano. Apesar de o Brasil apresentar uma baixa produção comparada ao montante mundial, observar-se que a tendência dos últimos 10 anos foi de crescimento (Figura 1), e espera-se que haja um aumento ainda maior nos próximos anos, em virtude da crescente utilização de outras fontes renováveis.

Fonte	Tipo de resíduo
Operação	Galhos, folhas, cepos, raízes, madeira de baixa qualidade, desbastes
florestal	e serragem
Serraria	Cascas, aparas, madeira de baixa qualidade, cavacos de plaina, pó
	de serragem
Madeira	Casca, núcleo, serragem, recortes das lâminas, bordas, pó de
compensada	serragem
Painéis	Casca, triagem de finos, bordas, pó de serragem
Embalagem	Pallets

Tabela 1 - Fontes e tipos de resíduo de origem madeireira

Fonte: Adaptado de Food and Agriculture Organization of the United Nations 1990, **Energy conservation in the mechanical forest industries**, Roma. Ao comparar-se com outros países, tais como os EUA, o Canadá e a União Europeia, o Brasil produz e consome produtos madeireiros em menor quantidade, principalmente no setor da construção civil, que utiliza principalmente materiais a base de cimento. Contudo, isto não diminui o fato de haver mundialmente uma grande produção e excedente de madeira residual, o que faz com que destino deste subproduto seja discutido em diversos trabalhos científicos, os quais propõem a utilização da madeira residual para a cogeração de energia (FOURNEL et al., 2015; GERÇEL, 2002; GHAFFAR & FAN, 2013; GOLDEMBERG, 2009).

Figura 1 – Levantamento da produção de madeira residual realizado pela FAO para o Brasil



e para o mundo

Fonte: Adaptado de Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). FAOSTAT - Database Forestry Production and trade. 2018 <u>http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO</u>. Acessado em 11 de dezembro de 2018.

Entretanto, aplicações com maior valor agregado podem ser exploradas para a utilização e valorização da madeira residual, sendo assim, alguns estudos vêm sendo realizados com o intuito de utilizar este subproduto na manufatura tanto de painéis aglomerados como também na produção de painéis cimento-madeira, os quais têm demonstrado resultados satisfatórios (FAN et al., 2012; NASSER et al., 2016; OKINO et al., 2004; PAPADOPOULOS, 2008; SEMPLE & CUNNINGHAM, 2002).

Dentre os constituintes da madeira residual, 70% são considerados como polissacarídeos (celulose e hemicelulose), enquanto que 20% – 30% é composto pelo polímero fenólico (lignina), podendo este percentual sofrer variações de acordo com a espécie da madeira (YOUNG, 2008).

A celulose é um polímero natural com alto grau de polimerização, que é unido a partir de ligações  $\beta$ –1.4, sendo a celulose a principal componente da parede celular e maior contribuinte das propriedades mecânicas dos materiais de origem vegetal (MAZIAD et al., 2016). No que diz respeito a sua estrutura, a celulose é o mais simples dentre os componentes da parede celular, constituindo-se como uma cadeia linear de moléculas de glucose anelada, cujo o grau de polimerização encontra-se por volta de 10.000, podendo variar de acordo com a origem do material vegetal (JOHN; THOMAS, 2008).

As potenciais aplicações da celulose estão em áreas que requerem baixa toxicidade, biodegradabilidade, biocompatibilidade e baixo custo. Além disto, a celulose representa uma matéria prima importante para a indústria de produção de papel (CAO et al., 2016; LAVOINE et al., 2012; MAZIAD et al., 2016).

A hemicelulose é composta basicamente por polissacarídeos de menor peso molecular, muitas vezes copolímeros de glucose, ácido glucurônico, manose, arabinose e xilose, ligadas às microfibrilas de celulose através de ligações de hidrogênio, que pode formar uma rede de hemicelulose e celulose, onde o principal elemento estrutural é a celulose, enquanto a lignina se encontra dispersa nos espaços entre as microfibrilas, atuando como agente aglutinante das microfibrilas e fibrilas (XU, 2010).

A lignina é um polímero natural fenólico, não carboidrato que está presente na parede celular da madeira, atuando como uma espécie de adesivo natural. A lignina é responsável pela rigidez e proteção microbiológica das paredes celulares, e é caracterizada por um complexo composto de moléculas amorfas, formadas majoritariamente por três monômeros fenilpropanos, guaiacila, siringila e p-hidroxifenila, cujo polímero é formado principalmente por unidades aromáticas de fenilpropano (LIU; JIANG; YU, 2015).

A lignina é considerada uma substância incrustante que exerce a função de adesivo ou matriz natural entre os tecidos da madeira (WINANDY; ROWELL, 2005). Devido a sua estrutura , a lignina é relativamente estável se comparada à celulose e hemicelulose (BOERJAN; RALPH; BAUCHER, 2003).

Embora não sejam elementos estruturais, os extrativos compõem uma importante fração da madeira, responsáveis por determinadas características como a coloração, o cheiro, e a resistência natural ao ataque de organismos destruidores (YOUNG, 2008). Os extrativos não

apresentam nenhum impacto sobre as propriedades mecânicas da madeira, e podem variar entre 1 – 20%, dependendo da espécie e posição dentro da árvore, são constituídos por resinas (terpenos e outros compostos aromáticos), ácidos graxos, álcoois, taninos, flavonoides, entre outros (FENGEL; WEGENER, 1984).

#### 3.2. Produtos derivados de madeira

Os produtos derivados de madeira são classificados em dois grandes grupos: os laminados e os compósitos de madeira (Figura 2). Os laminados podem ser definidos como painéis produzidos a partir de lâminas de madeira coladas fortemente entre si. Enquanto que os compósitos de madeira são aqueles manufaturados a partir de partículas ou fibras e aglomerados por um adesivo orgânico ou inorgânico (CAI et al., 2010).



Figura 2 – Esquema de classificação dos produtos derivados da madeira

Fonte: Própria autoria

Segundo Nascimento, Lahr e Christoforo (2015) *apud* Kollmann et al. (1975) os compósitos de madeira surgiram no início da década de 1940, frente as dificuldades para a obtenção de madeiras com boa qualidade para a laminação, durante a Segunda Guerra Mundial.

A literatura relata que estes materiais apresentam inúmeras vantagens quando comparados aos laminados e a madeira sólida, podendo ser citada, a eliminação dos efeitos de anisotropia, a eliminação dos fatores redutores de resistência mecânica, como os nós, e a inclinação de grã da madeira, que está relacionada com a orientação das fibras em relação ao eixo longitudinal da árvore (MENDES, 2011a; NASCIMENTO et al., 2015).

Para este trabalho, dentre o grupo dos compósitos de madeira apresentados Figura 2, serão destacados os painéis *Oriented Strand Board* (OSB) e os cimento-madeira.

#### 3.3. Oriented Strand Board - OSB

O OSB é um painel fabricado a partir de partículas de madeira do tipo *strand* (fina e longa) unidas com resina polimérica (orgânica) sob temperatura e pressão. Os *strands* são orientados em número ímpar de camadas, no entanto, usualmente o OSB é fabricado com três camadas, sendo os *strands* das camadas externas (faces) alinhados e dispostos no sentido paralelo ao comprimento do painel, enquanto que os *strands* da camada interna (miolo) são dispostos na direção perpendicular aos *strands* das camadas externas, conforme ilustra a Figura 3 (STARK; CAI; CARLL, 2010).



Figura 3 - Camadas de orientação painéis OSB modificada

A produção dos painéis OSB com resina polimérica foi iniciada na década de 1970 nos EUA e Canadá, como um subproduto dos painéis estruturais *waferboard*. Na década de 1980, esta modalidade de painéis foi largamente difundida, o que resultou no expressivo aumento de unidades produtoras em todas as regiões do mundo. Sendo que no fim do ano de 1996 a indústria do OSB possuía cerca de 57 plantas na América do Norte, responsáveis por produzir cerca de 13,3 milhões de m<sup>3</sup>/ano (MENDES, 2011b). Contudo, a primeira empresa a produzir painéis OSB instalada no Brasil foi a Masisa, no ano de 2002, no Paraná, com uma produção anual de 350.000 m<sup>3</sup>, a qual a partir do ano 2008, passou a ser operada pela Lousiana Pacific (LP), maior fabricante de OSB no mundo (VIDAL; BARROS, 2014). Segundo Trianoski, Iwakiri e Chies (2016) o início da produção brasileira do OSB sanou uma defasagem histórica do país, porém o mercado brasileiro de OSB apresenta patamares menores se comparados aos maiores produtores mundiais, tais como os EUA e Canadá.

#### 3.3.1. Composição

Os principais componentes para a produção do OSB são a madeira e a resina (matriz), podendo também ser adicionados aditivos. Como matriz, diferentes resinas podem ser empregadas, no entanto, no Brasil, a principal é o MDI (*methylene diphenyl diisocyanate*), enquanto que na América do Norte as resinas utilizadas são o fenol formaldeído e o MDI. O Brasil emprega também na sua produção a termiticide, com o objetivo de aumentar a resistência ao ataque de micro-organismos. Outro elemento comumente empregado na produção do OSB é a parafina, que confere maior hidrofobicidade aos materiais (FERRO et al., 2018).

A espécie da madeira é um dos fatores mais importantes para produção do OSB, pois tal fator interage com todas as outras variáveis presentes no processo de produtivo (FEBRIANTO et al., 2010). Além de determinar a densidade dos painéis, a espécie escolhida também influencia na formulação da resina, visto que os extrativos podem interferir na cura da resina e diminuir a eficiência na colagem entre os *strands*. Sendo assim, no processo de produção, espécies com baixo teor de extrativos são preferidas (MENDES, 2011a).

Madeiras de alta densidade (*hardwood*) apresentam uma anatomia composta por diversos tipos de estruturas, como, fibras, vasos e parênquimas, que podem variar de tamanho e forma, dependo da espécie de madeira (LUBE, 2016). Em contrapartida, madeiras de baixa densidade (*softwood*) apresentam em sua maioria células de traqueídeos (CONNERS, 2015) (Figura 4).





Fonte: Adaptação Lube V.M. Effects of moisture-induced thickness swelling on the microstructure of oriented strand board. 2016. 134f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), University of British Columbia 2016 e Conners, T. Distinguishing Softwoods from Hardwoods. 2015. Relatório, Agriculture and Natural Resources Publications. University of Kentucky. <u>https://uknowledge.uky.edu/anr\_reports/105</u>. Acessado em 15 de dezembro de 2018.

No Brasil, a produção de painéis OSB utiliza principalmente o *Pinus elliottii* e o *Pinus taeda (softwood)* (FERRO et al., 2018). Segundo Mendes (2001) o pinus confere ao OSB brasileiro propriedades semelhantes à dos painéis produzidos na América do norte pelas indústrias americanas e canadenses, que utilizam majoritariamente a espécie Aspen (*softwood*) em sua produção (STARK; CAI; CARLL, 2010).

Outro aspecto positivo da utilização da espécie de madeira Pinus na produção de painéis é a flexibilidade e a planicidade das partículas, principalmente quando produzidas em dimensões maiores, como é o caso da partícula do tipo *strand*, favorecendo assim o processo de aplicação da resina, formação do colchão, bem como a área de contato entre os *strands* (SALDANHA, 2004).

Maloney (1993) sugere a utilização de espécies com densidade até 550 kg/m<sup>3</sup>, na manufatura do OSB, pois até esta faixa de densidade é possível obter altas taxas de compactação e maior contato entre as superfícies dos *strands* durante a prensagem, resultando assim em melhores propriedades mecânicas na flexão estática e maior adesão interna.

O teor de umidade dos strands também tem grande influência sobre o processo produtivo do OSB, principalmente sobre a cura da resina, o tempo e a pressão de prensagem, por isso, é indicado o uso de *strands* com teor de umidade entre 6-8% (MENDES, 2011a). Além disso, o uso de *strands* com alto teor de umidade, podem acarretar na delaminação das camadas do OSB após o alívio da pressão durante o processo de produção, devido à pressão interna (OZSAHIN, 2013).

#### 3.3.2. Produção

O processo industrial de produção do OSB é composto por onze etapas, conforme apresentado na Figura 5: (1) toragem e acondicionamento das toras; (2) descascamento das toras; (3) preparo dos *strands*; (4) armazenamento dos strands úmidos; (5) secagem dos *strands*; (6) classificação e peneiramento; (7) mistura dos *strands* com a resina polimérica; (8) formação do colchão; (9) prensagem à quente;(10) acabamento e esquadrejamento e (11) despacho (STARK; CAI; CARLL, 2010).

De acordo com Maloney (1993) o processo de produção bem como as propriedades dos painéis OSB são influenciados por diversos fatores. No entanto, dois podem ser destacados, que são aqueles referentes à matéria-prima (i) que incluem: espécie de madeira, estrutura anatômica, densidade, teor de umidade e extrativos e aqueles referentes aos parâmetros de processo (ii) que incluem: densidade, razão de compactação, formulação do painel, tipo e quantidade de resina, umidade e geometria dos *strands*, tempo, temperatura e pressão aplicada durante a prensagem.



Figura 5 - Processo industrial de produção de painéis OSB

Fonte: MENDES, L. M. *Pinus spp.* na produção de painéis de partículas orientadas (OSB). 2001. 103f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

#### 3.3.3. Características do OSB

A norma European Normative – EN300: 2006 Oriented Strand Boards (OSB) – Definitions, classification and specification classifica os painéis OSB em 4 classes de uso e indica recomendações mínimas para as propriedades físicas e mecânicas, como apresentado a seguir:

 OSB/1: painéis para usos gerais e para componentes interiores (incluindo mobiliário) utilizados em ambiente seco;

- OSB/2: painéis para fins estruturais utilizados em ambiente seco;
- OSB/3: painéis para fins estruturais utilizados em ambiente úmido;
- OSB/4: painéis para fins estruturais especiais utilizados em ambiente úmidos.

Tabela 2, Tabela 3, Tabela 4 e Tabela 5 apresentam as propriedades requeridas pela EN300: 2006 para as 4 classes de OSB.

Espessura do painel (mm)	6 a 10	>10 a <18	18 a 25
Módulo de ruptura (MPa) – direção paralela do strand	20	18	16
Módulo de ruptura (MPa) - direção perpendicular do strand	10	9	8
Módulo de elasticidade (MPa) – direção paralela do strand	2500	2500	2500
Módulo de elasticidade (MPa) – direção perpendicular do strand	1200	1200	1200
Adesão interna (MPa)	0,30	0,28	0,26
Inchamento em espessura - 24 h em água (%)	25	25	25

Tabela 2 - Propriedades requeridas para paineis OSB/1

Fonte: Adaptado de European Normative – EN300: 2006 Oriented Strand Boards (OSB) – Definitions, classification and specification, Belgium

Espessura do painel (mm)		>10 a <18	18 a 25
Módulo de ruptura (MPa) – direção paralela do strand	22	20	18
Módulo de ruptura (MPa) – direção perpendicular do strand	11	10	9
Módulo de elasticidade (MPa) – direção paralela do strand	3500	3500	3500
Módulo de elasticidade (MPa) – direção perpendicular do strand	1400	1400	1400
Adesão interna (MPa)	0,34	0,32	0,30
Inchamento em espessura - 24 h em água (%)	20	20	20

Tabela 3 - Propriedades requeridas para paineis OSB/2

Fonte: Adaptado de European Normative – EN300: 2006 Oriented Strand Boards (OSB) – Definitions, classification and specification, Belgium.

Espessura do painel (mm)	6 a 10	>10 a <18	18 a 25
Módulo de ruptura (MPa) – direção paralela do strand	22	20	18
Módulo de ruptura (MPa) – direção perpendicular do strand	11	10	9
Módulo de elasticidade (MPa) – direção paralela do strand	3500	3500	3500
Módulo de elasticidade (MPa) – direção perpendicular do strand	1400	1400	1400
Adesão interna (MPa)	0,34	0,32	0,30
Inchamento em espessura - 24 h em água (%)	15	15	15

Tabela 4 - Propriedades requeridas para paineis OSB/3

Fonte: Adaptado de European Normative – EN300: 2006 Oriented Strand Boards (OSB) – Definitions, classification and specification, Belgium.

Espessura do painel (mm)	6 a 10	>10 a <18	18 a 25
Módulo de ruptura (MPa) – direção paralela do strand	30	28	26
Módulo de ruptura (MPa) – direção perpendicular do strand	16	15	14
Módulo de elasticidade (MPa) – direção paralela do strand	4800	4800	4800
Módulo de elasticidade (MPa) – direção perpendicular do strand	1900	1900	1900
Adesão interna (MPa)	0,50	0,45	0,40
Inchamento em espessura - 24 h em água (%)	12	12	12

Tabela 5 - Propriedades requeridas para paineis OSB/4

Fonte: Adaptado de European Normative – EN300: 2006 Oriented Strand Boards (OSB) – Definitions, classification and specification, Belgium.

A orientação dos *strands* na estrutura em camadas cruzadas dos painéis OSB faz com que suas propriedades mecânicas sejam superiores quando comparadas aos painéis com partículas não orientadas. Tal característica faz com que o OSB possa ser empregados nas mais variadas aplicações, podendo ser destacadas as estruturais, tais como componentes de vigas em "I", suportes para pisos e forros, paredes, estrutura de móveis, embalagens e tapumes (APA – THE ENGINEERED WOOD ASSOCIATION, 2011; CHIROMITO et al., 2016)

A produção do OSB possuí inúmeros benefícios frente a outras modalidades de painéis de partículas, sendo as principais vantagens: (i) possibilidade de produção com toras de qualidade inferior, de menor comprimento e diâmetro, podendo ser provenientes de desbastes e de troncos finos; (ii) alto grau de aproveitamento dessas toras e (iii) possibilidade de utilizar espécies de rápido crescimento e de menor valor comercial (FERRO et al., 2018; NASCIMENTO et al., 2015).

Tendo em vista estes benefícios, surge a possibilidade de se empregar outras espécies para a fabricação do OSB, desse modo diversas pesquisas vêm sendo realizadas com diferentes espécies de madeira como o Marmeleiro (*Croton sonderianus Muell. Arg.*), aJurema-Branca (*Piptadenia stipulacea (Benth.) Ducke*), a Catanduva (*Piptadenia moniliformis Benth.*) (NASCIMENTO; LAHR; CHRISTOFORO, 2015) e o Eucalipto (*Eucaliptus spp.*) (CÉSAR et al., 2014; GORSKI, 2014).

Iwakiri et al. (2004) avaliaram as propriedades físicas e mecânicas de OSB produzidos com seis espécies de eucalipto, sendo elas: *E. maculata, E. dunnii, E. grandis, E. citriodora, E. tereticornis e E. saligna*. Os autores constataram que os resultados das propriedades físicas e mecânicas indicaram potencial de utilização do *E. grandis e E. saligna* na produção de painéis OSB.

Estudo conduzido por Rosa et al. (2017) avaliou a viabilidade técnica da utilização de cinco espécies de eucalipto (*E. benthamii, E. dunni, E. grandis, E. saligna, e E. urograndis*) para a produção de OSB, adicionalmente, como testemunha foram produzidos painéis OSB com pinus (*Pinus taeda*). Os autores concluíram que o OSB produzido com as espécies de eucaliptos apresentaram, propriedades superiores em relação aos painéis produzidos com a testemunha de pinus, espécie tradicionalmente utilizada pela indústria brasileira. Contudo, embora os resultados do eucalipto sejam satisfatórios para a produção do OSB, apenas 4,3% do total de florestas plantadas dessa espécie é destinada para a produção de painéis (ABRAF, 2013).

Outro aspecto vantajoso na produção de OSB, neste caso, independente da espécie de madeira, é o rendimento da matéria prima para a produção, que gira em torno de 85-90% (SHMULSKY; JONES, 2011). Enquanto que o rendimento da matéria prima para a produção do painel compensado é de aproximadamente 40%, visto que este é um material manufaturado com toras que requerem alta qualidade (PLINKE et al., 2010, BORTOLETTO JÚNIOR; GARCIA, 2004).

Apesar dos inúmeros benefícios, o OSB apresenta algumas desvantagens, como por exemplo, a maior instabilidade dimensional quando comparado aos painéis não orientados, ocasionada pela absorção de água e a pela presença de altas tensões internas resultantes do processo de prensagem a quente (OKINO; TEIXEIRA; DEL MENEZZI, 2007).

Outro problema dos produtos à base de aglutinantes orgânicos, em especial as resinas a base de formaldeído, é a liberação do formaldeído, um gás incolor com forte odor que provoca sérios problemas ambientais e a saúde humana, por ser tóxico e cancerígeno (NAKANISHI et al., 2018).

#### 3.4. Painel cimento-madeira

Por definição, o painel cimento-madeira é um compósito constituído pela mistura de partículas de madeira em uma matriz inorgânica. Estes painéis começaram a ser produzidos comercialmente em 1914 na Áustria. Hoje, a indústria do painel cimento-madeira está consolida em diversos países no mundo, tais como o EUA, Canadá, Alemanha, Japão, França, Holanda, Dinamarca, Áustria, Suíça, Bélgica, Reino Unido, México, entre outros. O potencial de expansão desta indústria está ligado as matérias primas que estão disponíveis localmente e que proporcionam produtos de construção duráveis (STARK; CAI; CARLL, 2010).

Devido as propriedades físicas e mecânicas, os painéis cimento-madeira podem ser utilizados em uma ampla gama de aplicações, tais como revestimento de paredes, divisórias,
pisos, forros, telhados, membros de construções pré-fabricadas entre outros (EZERSKIY; KUZNETSOVA; SELEZNEV, 2018).

#### 3.4.1. Composição

Os painéis cimento-madeira são compostos por partículas ou fibras de madeira, misturadas com cimento, água e aditivos (FRYBORT et al., 2008). De acordo com a empresa NCL Group, uma das maiores desse segmento industrial e que fabrica e comercializa o *Bison panel*, para a produção dos painéis é utilizado em torno de 28% de madeira, 62% de cimento e 10% de aditivos químicos, e as espécies empregadas na produção são o eucalipto e o álamo, pelo rápido crescimento (NCL INDUSTRIES LIMITED, 2018). Entretanto, estudo conduzido por Nasser et al. (2016) afirma que a composição dos painéis cimento-madeira pode variar de 10% a 70% em peso, de material vegetal (madeira) e de 30% a 90% da matriz inorgânica.

Para produzir os painéis cimento-madeira podem ser utilizadas partículas de diversos tamanhos e formas, como por exemplo: *strands*, flocos, fibras e chips (CABRAL, 2016). Devido a tal característica, podem ser empregados na produção dos painéis, diversos materiais vegetais, como por exemplo, fibras de Curauá (BILCATI et al., 2018), serragem de madeira *"red iron wood" (Lophira alata)* (ATOYEBI; AWOLUSI; DAVIES, 2018), partícula da madeira *Schizolobium amazonicum* (IWAKIRI et al., 2012a), partículas de madeira de Seringueira (*Hevea brasiliensis*) (OKINO et al., 2004), partículas de bagaço de cana-de-açúcar (CABRAL; NAKANISHI; FIORIELLI 2018), partículas de alcachofra de Jerusalém (*Helianthus tuberosus L.*) (CABRAL et al., 2018c), partículas de madeira balsa (*Ochroma pyramidale*) (CABRAL et al., 2018a).

Dentre as matrizes inorgânicas utilizadas para a produção dos painéis cimento-madeira, podem ser destacadas o gesso, o cimento de magnésio e o cimento Portland. No entanto, o gesso e o cimento magnésio apresentam vulnerabilidade quando expostos à umidade, fazendo com que as aplicações sejam restritas a ambientes interiores. Por outro lado, o painel fabricado com cimento Portland é mais durável e não apresenta problemas quando expostos a ambientes úmidos, podendo então ser utilizado tanto em ambiente interno como externo (MATOSKI, 2005).

O cimento Portland (composto por silicatos e aluminatos de cálcio) passou a ser a matriz inorgânica mais empregada, em virtude dos melhores resultados sobre as propriedades físicas e mecânica desses painéis (FRYBORT et al., 2008). Portanto, os painéis cimento-madeira apresentaram boa aceitação mundial, devido à junção das propriedades satisfatórias do cimento e da madeira, conforme ilustrado na Figura 6.

O cimento Portland é um material inorgânico conhecido como aglomerante, sendo este, um material hidráulico, ou seja, o seu endurecimento somente ocorre na presença de água (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Os principais componentes anidros do cimento Portland são: 50-70% de alita (C<sub>3</sub>S) ou silicato tricálcico (3CaO.SiO<sub>2</sub>), 15-30% de belita (C<sub>2</sub>S) ou silicato dicálcico (2CaO.SiO<sub>2</sub>) e 5-10% de aluminato (C<sub>3</sub>A) ou aluminato tricálcico (3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e de ferrita (C<sub>4</sub>AF) ou ferroaluminato tetracálcico (4CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (TAYLOR, 1998).

Figura 6 - Benefícios dos constituintes dos painéis cimento-madeira modificado



Fonte: LIPINSKI, E. Potential technologies for effectively bonding wood with inorganic binders. In.: International Inorganic-Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference, 1994, Washington. **Proceedings...** Washington: Spokane, 1994, p. 53 – 58

Em presença de água ocorre a hidratação do cimento, termo que indica a reação de um composto anidro com a água que será convertido em um produto hidratado (RIDI et al., 2011; TAYLOR, 1998). Onde os principais produtos hidratados formados no cimento são: silicato de cálcio hidratado (CSH), cristais de hidróxido de cálcio, etringita (AFt), aluminatos de cálcio hidratados (CAH) e monossulfoaluminato de cálcio hidratado (AFm) (TAYLOR, 1998).

Mehta e Monteiro (2014) descrevem que no estágio inicial de hidratação, cada partícula do cimento atua como um núcleo de formação de cristais hidratados. Esta concentração de

cristais aumenta e, com isso, dificulta a passagem da água até as frações de cimento não hidratadas. Sendo assim, mais água no processo não significa, necessariamente, maior hidratação do cimento. Portanto, a relação água/cimento (a/c) é um fator que possui grande importância no estudo da pasta de cimentícia, pois o excesso de água compromete as propriedades mecânicas e reológicas do material.

Para a produção dos painéis cimento madeira, há também a utilização de aditivos químicos, que atuam no endurecimento rápido do cimento, facilitando a formação dos produtos hidratados, e impedindo a ação dos agentes de inibidores de hidratação presentes na madeira (SILVA et al., 2006; ZUCCO, 1999).

Entre os diversos aditivos empregados, podem ser destacados o cloreto de cálcio, o cloreto de magnésio, o sulfato de alumínio, o silicato de potássio e o silicato de sódio (CASTRO et al., 2014; IWAKIRI et al., 2012b). O cloreto de cálcio tem sido o acelerador de pega mais utilizado, devido a sua eficiência na aceleração da hidratação dos silicatos de cálcio, principalmente a alita (C<sub>3</sub>S), e por possuir baixo custo (AGGARWAL et al., 2007; ATOYEBI; AWOLUSI; DAVIES, 2018; IWAKIRI et al., 2012b).

#### 3.4.2. Produção

A produção dos painéis cimento-madeira pode ser realizada por meio de dois sistemas diferentes: (i) o painel é produzido com três ou quatro camadas, sendo duas camadas constituídas de partículas finas posicionadas na superfície e uma ou duas camadas com partículas maiores no meio; ou (ii) o painel é produzido com gradação de partículas, ou seja, na superfície as partículas são mais finas e gradativamente o tamanho das partículas vai aumentando na direção do meio do painel, não apresentando distinção de camadas (VAN ELTEN, 2006).

O processo de produção dos painéis cimento-madeira segue a mesma concepção adotada para a produção dos painéis aglomerados de matriz orgânica (CABRAL, 2016). A Figura 7 apresenta o fluxograma de produção adaptado do processo industrial da empresa Eltomation BV (VAN ELTEN, 2006).



Figura 7 - Esquema do fluxo de produção industrial dos painéis cimento madeira.

Fonte: Adaptação de VAN ELTEN, G. J. Production of wood wool cement board and wood strand cement board (Eltoboard) on one plant and applications of the products. 10th International Inorganic-Bonded Fiber Composites, 2006, São Paulo, **Proceedings...**, 2006 p. 1–12.

De forma simplificada, o processo de fabricação consiste na mistura das partículas com a água, na qual, pode haver aditivos aceleradores da hidratação do cimento (LOPES et al., 2005). Em seguida, o cimento Portland é adicionado aos componentes, que são misturados até a completa homogeneização. Após essa etapa, é realizada a formação do colchão de partículas sobre uma base de aço, esse colchão é pesado, para garantir qualidade e uniformidade do produto.

Um determinado número de colchões de partículas é empilhado. Em seguida, o aparato é movido para prensa hidráulica, sendo prensados por 10 min., com pressão que pode variar de 1,5 MPa a 3,0 MPa (CASTRO et al., 2014). A pilha então é prensada em uma estrutura de aço por 24 horas. Os painéis são levados para uma câmara de cura sendo posteriormente esquadrejados (VAN ELTEN, 2006). Na Figura 8 está apresentada uma amostra do painel cimento-madeira produzido pela empresa Binos.



Figura 8 – Amostra painel cimento-madeira

Fonte: Própria autoria

#### 3.4.3. Características do painel cimento-madeira

De acordo Frybort et al. (2008) o principal objetivo da utilização da madeira junto a matriz inorgânica é obter o aumento no módulo de ruptura (MOR) e ganho nas propriedades de isolamento acústico e térmico do painel. No entanto, propriedades aceitáveis para os painéis cimento-madeira somente são obtidas quando há homogeneidade na dispersão e empacotamento entre as partículas de madeira e a matriz inorgânica.

Os benefícios da combinação do cimento com a madeira apresentados na Figura 6 também foram revisados no trabalho de Cabral (2016), onde o autor descreve que as características que tornam os painéis cimento-madeira vantajosos, são:

- A madeira não precisa atingir baixos teores de umidade;
- Substitui as chapas de cimento amianto (TEIXEIRA, 2012);
- Disponibilidade de matéria-prima renovável, possibilitando o aproveitamento de subprodutos vegetais (IWAKIRI et al., 2015);
- Excelente trabalhabilidade, podendo ser serrado e furado (SÁ et al., 2010);
- Não emissão de resíduos tóxicos durante a produção, além do emprego de material ligante inerte e com menores riscos à saúde dos trabalhadores da linha de produção (VAN ELTEN, 2006);
- Alta resistência ao fogo (FAN et al., 2012);
- Propriedades de isolamento térmico e acústico de acordo com documentos normativos (LI et al., 2019);
- Melhor estabilidade dimensional, quando comparado a outros compostos de madeira unidos por matriz orgânica, além disso, a absorção de água é muito pequena (AIGBOMIAN; FAN, 2014).

No entanto, apesar das vantagens apresentadas, existem desvantagens que tem impedido a difusão dos painéis cimento-madeira, tais como:

- Processo de cura lento do cimento, que leva a redução da capacidade produtiva e exige um grande estoque de painéis durante a cura (MOSLEMI, 1999);
- Variação de compatibilidade química da madeira com o cimento (IWAKIRI et al., 2015);
- Meio alcalino do cimento pode causar a mineralização do material vegetal (madeira e/ou fibras) e resultar na perda de resistência (CABRAL; NAKANISHI; FIORELLI, 2017).

Além disto, Wolfe e Gjinolli (1999) sugerem que os painéis cimento-madeira apresentam resistência mecânica 10% inferior em comparação com painéis de uso estrutural, tais como o OSB.

# 3.5. Painel cimento-madeira strand (Wood Strand Cement Board)

Apesar da possibilidade de utilização de diferentes formas e tamanhos de partículas na produção dos painéis cimento-madeira, o uso das partículas na forma de *strands* é pouco investigado, e uma evidência disso é a pouca literatura disponível até o presente momento neste tema. Com exceção da empresa Eltomation BV, que atualmente possui uma linha de produção cimento-madeira *strands* (*Wood Strand Cement Board* – ELTOBOARD), onde os *strands* são posicionados paralelos ao plano (de forma aleatória) (VAN ELTEN, 2006).

De acordo com a empresa, os painéis cimento-madeira *strands* utilizam 20% menos madeira em sua formulação e apresentam maiores propriedades de resistência a flexão (módulo de ruptura e módulo de elasticidade). Além de apresentar valores de tensão no ensaio de arrancamento de parafuso duas vezes maior que os painéis cimento-madeira, que utilizam partículas. Esses painéis ainda podem ou não possuir uma ou duas superfícies lisas de partículas finas como os painéis cimento-madeira.

### 3.6. Interação: madeira versus cimento

Dois pontos devem ser considerados quando é feita a junção da madeira ao cimento para produção dos painéis: (A) Interferência da madeira na hidratação do cimento e, (B) Degradação da madeira no meio cimentício.

#### A. Interferência da madeira na hidratação do cimento

A composição do cimento é basicamente representada por  $C_3S$ ,  $C_2S$ , aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) e ferrita ( $C_4AF$ ). Após a adição de água ao cimento em pó, a fase mais reativa ( $C_3A$ ) reage formando um aluminato rico em géis. Em seguida, o gel reage com a solução rica em sulfato formando a etringita, com uma estrutura semelhante a agulhas (HEWLETT & MASSAZZA, 2003). Subsequentemente, as fases  $C_3S$  e  $C_2S$  reagem para formar o gel de hidróxido de cálcio e o gel de silicato de cálcio (CSH).

Sendo o hidróxido de cálcio e o CSH as fases contribuintes principais para a solidificação e integridade físico-mecânica do cimento nas idades inicias (FAN et al., 2012). Entretanto, a adição do material vegetal, tal como a madeira, pode interferir nas reações de hidratação do cimento Portland, causando a desaceleração do tempo de solidificação. Devido, principalmente a capacidade de absorção de água da madeira, que pode afetar o equilíbrio da reação, resultando em painéis cimento-madeira de baixa qualidade (DIQUÉLOU et al., 2016; FAN et al., 2012). Isto é, há a diminuição da temperatura de hidratação, pois as partículas de madeira absorvem a água de hidratação, antes que o cimento seja hidratado, como reportado por Chakraborty et al. (2013).

Outro aspecto que pode interferir na hidratação do cimento, em conjunto com a madeira está relacionado a dissolução da hemicelulose e extrativos. Quando dissolvidos estes componentes podem formar uma camada protetora nos grãos de cimento parcialmente hidratados, e esta camada forma uma barreira temporária sobre a partícula de cimento,

dificultando a posterior hidratação, resultando então na redução da formação dos produtos de hidratação, atuando como um inibidor do crescimento do C-S-H e hidróxido de cálcio (GARCI JUENGER; JENNINGS, 2002; SEDAN et al., 2008).

Portanto, considerando os aspectos negativos causados pela madeira na hidratação do cimento Portland, a literatura sugere o uso de tratamentos para diminuir a absorção de água, bem como os teores de hemicelulose e extrativos do material vegetal (BILCATI et al., 2018; FERRAZ et al., 2011b; MOSLEMI; GARCIA; HOFSTRAND, 1983; QUIROGA; MARZOCCHI; RINTOUL, 2016). Dentre os tratamentos utilizados para melhorar a interação da madeira com o cimento, podem ser destacados os tratamentos com: água fria, água quente e solução de hidróxido de sódio (NaOH) (JORGE; PEREIRA; FERREIRA, 2004).

#### B. Degradação da madeira em meio cimentício

Além dos aspectos relacionados aos efeitos da madeira na hidratação do cimento Portland, outro fator que a ser levando em consideração no estudo dos painéis cimento-madeira, está relacionado com a baixa durabilidade e instabilidade dimensional da madeira quando exposta ao ambiente alcalino, típico da matriz cimentícia (pH 12~13) (AMZIANE; SONEBI, 2016; TONOLI et al., 2009). Quando em contato com o meio alcalino, o material vegetal sofre um fenômeno denominado como mineralização, ou seja, ocorre a precipitação dos produtos de hidratação do cimento no interior (lúmen) bem como na sua superfície do material vegetal, como mostra a Figura 9.

Tal processo é caracterizado primeiramente por dissolver os componentes amorfos da madeira (ALMEIDA et al., 2013b; WEI; MEYER, 2014). Dentre os três componentes majoritários da madeira a hemicelulose e a lignina, são amorfas e possuem grau de polimerização relativamente baixo, e por isto apresentam maior propensão a hidrólise e solubilização ao serem expostas ao meio alcalino, quando comparadas por exemplo, com a celulose. Este processo afeta a estrutura do material vegetal, pois enfraquece a ligação entre células (WEI; MEYER, 2014).

Posteriormente, ocorre o preenchimento dos "vazios" do material vegetal por produtos de hidratação do cimento, sendo este fenômeno apontado por estudiosos como o principal motivo da fragilização dos compósitos e redução da tenacidade (KUNDU et al., 2018; TONOLI et al., 2009; WEI; MEYER, 2014; ZUKOWSKI et al., 2018). Nesse contexto, a carbonatação acelerada representa uma alternativa para o aumento da durabilidade da madeira no meio

alcalino (ALMEIDA et al., 2013; BERTOS et al., 2004; SAVASTANO; WARDEN; COUTTS, 2000).



Figura 9 - Micrografia material vegetal mineralizado

Fonte: ARDANUY, M.; CLARAMUNT, J.; TOLEDO FILHO, R. D. 2015. Cellulosic fiber reinforced cementbased composites: a review of recent research. **Construction and Building Materials** v. 79, p. 115 - 128.

# 3.7. Cura da matriz cimentícia com carbonatação acelerada

A normativa ABNT NBR 14931:2004 - Execução de estruturas de concreto -Procedimento, define a cura do material cimentício, como um processo em que a matriz cimentícia deve atingir o endurecimento satisfatório, ou seja, as propriedades mecânicas adequadas para o uso, protegida com finalidade de evitar a perda de água. Podendo o endurecimento da matriz de cimentícia ser acelerado por meio do tratamento térmico ou pelo uso de aditivos.

Entretanto, os mecanismos cinéticos da hidratação do cimento Portland intercepta interesses acadêmicos e práticos. De um ponto de vista acadêmico, os fenômenos químicos e microestruturais que caracterizam a hidratação do cimento são bastante complexos e interdependentes, dificultando a resolução dos mecanismos individuais ou dos parâmetros que determinam suas taxas. O estudo fundamental da hidratação, portanto, oferece desafios

científicos significativos em técnicas experimentais e métodos de modelagem teórica em várias escalas (AÏTCIN, 2000).

A hidratação de cimento envolve uma coleção de produtos químicos e acoplados processos, cada um dos quais ocorre a uma taxa de reação que é determinada tanto a natureza do processo e pelo estado do sistema naquele instante. Esses processos se enquadram em uma das seguintes categorias: 1. Dissolução que envolve o descolamento de unidades moleculares da superfície de um sólido em contato com a água. 2. Difusão que descreve o transporte de componentes da solução através do volume de poros da pasta de cimento ou ao longo das superfícies dos sólidos na camada de adsorção. 3. O crescimento que envolve fixação superfícial, a incorporação de moléculas na estrutura de um sólido cristalino ou amorfo dentro de sua camada de auto-adsorção. 4. A nucleação que inicia a precipitação de sólidos de forma heterogênea em superfícies sólidas ou homogeneamente em solução, quando a energia livre volumétrica promove a força motriz para formar o sólido e formar uma nova interface sólido-líquido. 5. Complexação, reações entre íons simples para formar complexos iônicos ou complexos moleculares adsorvidos em superfícies. 6. Adsorção, acumulação de íons ou outras unidades moleculares a uma interface, como a superfície de uma partícula sólida em um líquido (BULLARD et al., 2011).

A carbonatação é uma etapa natural e lenta que ocorre ao longo dos anos na matriz cimentícia, por conta do  $CO_2$  presente na atmosfera, onde a consequência deste processo é a queda do pH de valores por volta de 13 para um valor por volta de 8 nas zonas totalmente carbonatadas. Contudo, esta etapa pode ter seu processo acelerado, através da exposição do compósito cimentício em ambiente controlado contendo elevada concentração de  $CO_2$  (ALMEIDA et al., 2013; AUROY et al., 2018).

A carbonatação pode ser descrita pela difusão do  $CO_2$  presente na atmosfera, através dos poros da matriz de cimento. O  $CO_2$  é dissolvido na fase aquosa presente nos poros, transformado em ácido carbônico [(H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)], que são dissociados em íons  $HCO^{3-}$  e  $CO^{3-}$ , juntamente com a dissolução do hidróxido de cálcio, que libera íons  $Ca^{2+}$  e  $OH^-$ , os quais precipitam e formam o carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) (PETER et al., 2008).

Desse modo, surgiram trabalhos com a proposta de unir o processo de hidratação do cimento com a carbonatação acelerada para obter matriz mais densas e de menor alcalinidade para garantir a durabilidade de reforços orgânicos, tais como madeiras, em matrizes cimentícias (ALMEIDA et al. 2013).

Para os painéis cimento-madeira, o endurecimento satisfatório da matriz pode ser otimizado através do processo de cura com a carbonatação acelerada nas idades iniciais, ou

seja, de acordo Latorraca (2000) e Matoski (2005) painéis cimento-madeira curados com carbonatação acelerada são endurecidos em aproximadamente cinco minutos, enquanto que para os painéis não curados com carbonatação acelerada, isso ocorre, geralmente, durante semanas. A carbonatação acelerada nas primeiras idades possibilita a reação do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) com os silicatos, principalmente o silicato dicálcico e o silicato tricálcico para a formação do CSH, que é a fase que atua como "binder" da pasta de cimento. A formação do CSH logo nas primeiras idades da matriz cimentícia contribui para o aumento da resistência mecânica e na diminuição da porosidade (SHAO; MORSHED 2015; BORGES et al. 2012).

Com isso, a cura com carbonatação acelerada é uma alternativa que pode ser empregada para melhorar a durabilidade dos compósitos, devido à modificação provocada na matriz cimentícia, reduzindo a alcalinidade, tornando-o menos agressivo para a madeira (ALMEIDA et al., 2013). Além do que a carbonatação acelerada também torna os materiais mais densos, devido ao volume ocupado pelo CaCO<sub>3</sub> ser 11,8% maior que o volume ocupado pelo hidróxido de cálcio, proporcionando assim melhoras nas propriedades físicas e mecânicas dos compósitos (FERNÁNDEZ BERTOS et al., 2004).

Segundo Cabral (2016), painéis cimentícios carbonatados apresentaram maior módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) tanto antes como após a simulação do processo de envelhecimento, quando comparados àqueles curados em ambiente saturado, sem o processo de carbonatação acelerada. Almeida et al. (2013) constataram que a carbonatação nas idades iniciais de hidratação proporcionou melhores propriedades mecânicas aos compósitos cimentícios.

Além dos benefícios proporcionados aos compósitos, como melhoria nas propriedades físicas, mecânicas e na durabilidade, o processo de carbonatação pode representar também ganhos ambientais, por ser uma maneira de armazenar CO<sub>2</sub> em materiais compósitos (KAZULIS et al., 2017). Como ilustrado na Figura 10, durante milhões de anos o nível de CO<sub>2</sub> atmosférico nunca esteve acima de 300 partes por milhão (ppm). Contudo, no século XVIII, quando ocorreu o início da Revolução Industrial, este valor era de 280 ppm, e desde então, aumentou de maneira constante, e como consequência disto, em 2016 foi o primeiro ano com concentrações atmosféricas de CO<sub>2</sub> acima de 400 ppm (VIJAYAVENKATARAMAN; INIYAN; GOIC, 2012).



Figura 10 – Tendência de CO<sub>2</sub> atmosférico em partes por milhão (ppm) ao longo dos anos.

Fonte: VIJAYAVENKATARAMAN, S., INIYAN, S., GOIC, R., 2012. A review of climate change, mitigation and adaptation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** v. 16, p. 878 - 897

## 3.8. Considerações da revisão bibliográfica

As informações até aqui apresentadas contextualizam o estado da arte objeto dessa pesquisa. A apresentação do potencial de utilização da madeira residual como uma matéria prima para a produção de produtos derivados de madeira, como temática central dessa tese esta contextualizado. Variáveis inerentes a produção de painéis híbrido (cimento-madeira + OSB) estão elencadas.

O detalhamento da durabilidade e mineralização da madeira no meio alcalino da matriz inorgânica (cimento Portland) também foi abordado nos parágrafos anteriores e a cura com carbonatação acelerada se apresenta como uma técnica potencial para minimizar os efeitos da alcalinidade do cimento Portland nas partículas de madeira.

#### 4. PLANO DE TRABALHO

O presente trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Construções & Ambiência do Núcleo de Apoio à Pesquisa em Materiais para Biossistemas da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos – FZEA da Universidade de São Paulo (USP), Pirassununga. E o projeto foi delineado em quatro etapas, como descrito abaixo, e no fluxograma de trabalho apresentado na Figura 11.

1. Etapa 1: *Tratamentos nos strands de eucalipto e pinus*: Produção e caracterização dos *strands* de eucalipto e pinus. Avaliação do efeito dos tratamentos (água fria, água quente e solução 2,5% de hidróxido de sódio) nas propriedades físicas, químicas, mecânicas, cristalográficas, morfológicas e termogravimétricas dos *strands* em comparação a testemunha sem tratamento. Estudar a hidratação do cimento Portland com adição de *strands* de eucalipto e pinus (sem e com tratamentos) por meio do ensaio de compressão axial, análises termogravimétricas e cristalográficas da matriz cimentícia aos 28 dias de idade a fim de identificar o melhor tratamento para os *strands*.

2. Etapa 2: Determinação do teor ótimo de strands de madeira para painéis OSB cimento-madeira residual: Produzir painéis OSB-cimento-madeira residual contendo teores de 25%, 30% e 35% de strands (em massa) com densidade de 1250 kg/m<sup>3</sup>, seguindo a metodologia convencional de produção de painéis cimento-madeira e avaliar o efeito da orientação dos strands nesses painéis.

3. Etapa 3: *Painéis OSB-cimento-madeira residual otimizados:* Ajustar os parâmetros de produção de painéis OSB-cimento-madeira residual (teor de *strands*, teor de água, processo de mistura, pressão de prensagem) e avaliar seu desempenho, por meio das caracterizações térmicas, físicas e mecânicas.

# 4. Etapa 4: Cura com carbonatação acelerada em painéis OSB-cimento-madeira residual:

Avaliar as propriedades térmicas, físicas, mecânicas, microestruturais e de durabilidade de painéis OSB-cimento-madeira residual otimizados submetidos à cura com carbonatação acelerada, por um período de 12 h em ambiente com concentração de 15% de CO<sub>2</sub>.



Figura 11 – Fluxograma do plano de trabalho.

\* Foi inserido o teor de 45% na etapa 3 visando atender os requisitos prescritos pela EN300:2006 para o OSB/1, como também, devido a menor utilização de cimento na formulação. Fonte: Própria autoria.

## 5. MATERIAL E MÉTODOS

#### 5.1. Etapa 1: Tratamentos nos strands de eucalipto e pinus

Nesta seção (etapa 1) são apresentadas as matérias primas e métodos utilizados na preparação dos *strands* das madeiras de eucalipto e pinus, como também a descrição dos tratamentos realizados e das técnicas de caracterização dos *strands*. Além disso, nesta etapa também foram avaliados os efeitos dos *strands* de eucalipto e pinus (sem e com tratamentos) na hidratação do cimento Portland por meio do ensaio de compressão axial aos 28 dias, e das análises termogravimétricas e cristalográficas da matriz cimentícia com 28 dias de idade.

Esta etapa teve como objetivo caracterizar e avaliar os efeitos dos tratamentos nas propriedades dos *strands* e na hidratação do cimento, visando à escolha do melhor tratamento a ser utilizado nos *strands* para a produção dos painéis OSB-cimento-madeira residual.

#### 5.1.1. Materiais

Neste estudo duas madeiras de reflorestamento foram utilizadas como matéria prima, sendo o eucalipto (*Eucaliptus spp.*) e pinus (*Pinus spp.*), obtidas de descarte da produção de *pallets*, doados pela empresa *Santa Rosa Pallets* em Suzano-SP. As madeiras foram cortadas em blocos de aproximadamente 80 mm  $\times$  30 mm, dimensão necessária para a inserção das madeiras na boca de alimentação do gerador de partículas e produção dos *strands*.

Com o objetivo de avaliar a densidade dos resíduos das madeiras de *Eucalipto spp*. e *Pinus spp*. (teor de umidade de 12%) a serem empregados neste estudo, foram conduzidas as determinações da densidade aparente (DA) seguindo com procedimento da norma ABNT NBR 7190:1997 - Projeto de estruturas de madeira.

Para este ensaio, 10 corpos de prova com dimensões de 50 mm  $\times$  30 mm  $\times$  20 foram preparados para cada espécie. Para determinar as dimensões dos corpos de prova (comprimento x largura x espessura) e assim calcular o volume foi utilizado paquímetro digital com sensibilidade 0,01 mm (modelo Absolute, da fabricante Mitutoyo). No entanto, a massa dos corpos de prova foi aferida com auxílio de uma balança digital eletrônica (modelo AY220, fabricante Shimadzu). Com os dados da massa e volume dos corpos de prova foi determinada a DA utilizando da Equação (1).

$$DA = \frac{M}{V} \qquad Equação (1)$$

Onde: DA= densidade aparente; M= massa do corpo de prova 12% de umidade em gramas; V= volume do corpo de prova 12% umidade em cm<sup>3</sup>

#### 5.1.2. Preparo dos strands

Como já mencionado, as peças das madeiras de eucalipto e pinus foram cortadas nas dimensões de 80 mm  $\times$  20 mm, e os *strands* foram separadamente produzidos nas dimensões de 80 mm  $\times$  20 mm  $\times$  1 mm utilizando um gerador de partículas de madeiras (modelo MA 685, fabricante Marconi) munido de motor de indução de 5 c.v., operado com 346 RPM. Devido a espessura desejada para os *strands* (1 mm), os blocos de madeira não foram previamente imersos em água. Na Figura 12 é apresentado o processo resumido de produção dos *strands* de eucalipto e pinus.

Figura 12 – Esquema resumido do processamento dos strands: (a) eucalipto (b) pinus



Fonte: Própria autoria.

#### 5.1.3. Tratamentos dos strands

Após a obtenção dos *strands* ( $80 \times 20 \times 1$  mm) foram realizados 3 tratamentos para cada madeira estudada, água fria, água quente e solução NaOH 2,5% com o intuito de remover a hemicelulose e extrativos e assim melhorar a interação da madeira com o cimento, seguindo a metodologia de Castro e Iwakiri (2014) e Latorraca et al. (2000) com adaptações.

Na Tabela 6 são apresentadas as fases de cada um dos 3 tratamentos. Para os tratamentos água fria e água quente foi adotada a relação de 16 L de água para cada 500 g de *strand*. Para o tratamento NaOH, a solução foi preparada em concentração de 2,5% para 16 L de água para cada 500 g de *strand*. A Figura 13 ilustra a aparência final dos *strands* após os tratamentos.

Tratamentos	1º Fase	2º Fase	3º Fase
Sem tratamento			Estufa 72 h 60°C
Água fria	Água fria por 24 h	Lavagem água corrente	Estufa 72 h 60°C
Água quente	Água 80°C por 120 min	Lavagem água corrente	Estufa 72 h 60°C
NaOH	Solução NaOH por 24 h	Lavagem água corrente	Estufa 72 h 60°C

Tabela 6 – Tratamentos nos strands de eucalipto e pinus

Fonte: Própria autoria.

Detalhadamente os tratamentos foram realizados como descrito a seguir:

Sem tratamento: os *strands* foram somente mantidos em estufa 60 °C por 72 h.

Água fria: 16 L de água corrente com temperatura ambiente foram inseridos em uma bandeja plástica com capacidade de 30 l. Posteriormente os *strands* (500 g) foram inseridos e mantidos na água por 24 h, finalizado este período, os *strands* foram lavados em água corrente, até obter uma coloração clara da água. Após a lavagem, os *strands* foram mantidos em estufa 60 °C por 72h.

Água quente: inicialmente a água (16 L) foi inserida em um caldeirão com capacidade de 32 L e aquecida até 80 °C, com auxílio de um agitador magnético (modelo C-MAG HS10, da fabricante Ika). Uma vez atingida a temperatura desejada da água, os *strands* (500 g) foram inseridos e mantidos por 120 min, finalizada esta etapa, foi realizada a lavagem em com água corrente, até obter uma coloração clara da água e os *strands* foram mantidos em estufa 60 °C por 72 h.

NaOH: primeiramente a solução foi preparada (concentração de 2,5% para 16 L de água) em uma bandeja plástica com capacidade de 30 L, posteriormente os *strands* (500 g) foram inseridos e mantidos na água por 24 h, finalizado este período os *strands* foram lavados em água corrente, até obter uma coloração clara da água e mantidos em estufa 60 °C por 72 h.



Figura 13 - Aparência final dos strands após os tratamentos (a) eucalipto (b) pinus

Fonte: Própria autoria.

#### 5.1.4. Caracterização dos strands

## 5.1.4.1. Teor de umidade

Visto que a umidade dos *strands* pode influenciar diretamente na relação água: cimento, no processo de produção dos painéis e também, nas propriedades físicas e mecânicas dos compósitos, o teor de umidade dos *strands* foi determinado por meio do método por diferença de massa proposto pela Embrapa (2010) após a permanência dos materiais em estufa 60 °C por 72 h. Para a realização da análise, foi utilizada uma balança semi-analítica (0,001 g) com capacidade de 160 g, da marca BEL.

#### 5.1.4.2. Densidade aparente

A densidade aparente dos *strands* com umidade  $\approx 8\%$  foi determinada de acordo com a metodologia prescrita na norma ABNT NBR 7190:1997 - Projeto de estruturas de madeira adaptada com o intuito de avaliar variações na densidade dos *strands* após os tratamentos. Para cada tratamento, foram aferidas 20 amostras com uso de um paquímetro digital com sensibilidade 0,01 mm (modelo Absolute, da fabricante Mitutoyo) para determinar as dimensões (comprimento × largura × espessura) e então calcular o volume. Posteriormente, para determinar a massa, os *strands* foram pesados em uma balança digital eletrônica (modelo

AY220, fabricante Shimadzu). A partir dos valores de volume e massa foi determinada a densidade dos *strands* utilizando a Equação (2)

$$DA = \frac{M}{V}$$
 Equação (2)

Onde: DA= densidade aparente; M= massa do corpo do *strand* em gramas; V= volume do *strand* umidade em cm<sup>3</sup>

#### 5.1.4.3. Molhabilidade

Com o objetivo de avaliar a capacidade de absorver água dos *strands* tratados foram utilizados dois métodos: (i) o ângulo de contato e (ii) a absorção de água. Os testes foram realizados com o intuito de avaliar os efeitos dos tratamentos na capacidade de absorção de água.

#### 5.1.4.3.1. Ângulo de contato

O teste de molhabilidade por ângulo de contato é uma técnica amplamente utilizada para medir o grau de interação entre um sólido e um liquido, por meio do ângulo formado entre a superfície do sólido e o líquido sobre o mesmo (TRAN et al., 2011). O resultado dessa interação permite conhecer o grau de molhabilidade da superfície do material estudado. O ângulo de contato dos materiais indica que ângulos menores do que 90° representam uma superfície altamente susceptível à molhabilidade (hidrofílica), enquanto que ângulos maiores do que 90° indicam baixa molhabilidade (hidrofóbica), conforme esquematizado na Figura 14 (YUAN; LEE, 2013).

O teste de ângulo de contato foi realizado para avaliar a influência dos tratamentos na capacidade de absorção de água dos *strands*. A medição consistiu em depositar gotas de água deionizada sobre a superfície das amostras. Foi utilizado para medição dos ângulos o equipamento de ângulo de contato dinâmico, CAM 101, marca KSV Instruments, equipado com câmera para registro das imagens e *software* KSV Constact Angle Meansurement system (Figura 15).



O *strand* foi fixado no porta amostra e uma gota (5  $\mu$ L) foi depositada sobre sua superfície e com auxílio do *software* a imagem da gota foi captada por uma câmera digital a

Figura 15 – Ilustração da medida de ângulo de contato: (a) medidor de ângulo de contato

cada 1 s, durante 30 s. Os resultados de ângulo de contato foram obtidos em triplicata.

dinâmico (b) sistema de câmera (c) porta amostras (d) amostra após ensaio



Fonte: Própria autoria.

#### 5.1.4.3.2. Absorção de água por imersão

O teste de absorção de água dos *strands* foi avaliado com 2 h e 24 h de imersão e para cada tratamento foram utilizados 20 *strands*. Após a determinação das massas das amostras, os *strands* foram inseridos e mantidos submersos em um recipiente com água ( $\approx 23$  °C). Em cada tempo de avaliação (2 e 24 h), as amostras foram removidas da água e com auxílio de um papel absorvente, o excesso de água foi removido e a massa foi aferida com auxílio de uma balança digital eletrônica (modelo AY220, fabricante Shimadzu). O cálculo da absorção de água (AA) foi realizado através da Equação (3)

$$AA = \frac{m_f - m_i}{m_i} * 100 \qquad \qquad Equação (3)$$

Onde:  $AA = absorção de água (\%); m_f = massa$ *strand*após imersão, em g; m<sub>i</sub> = massa*strand*antes da imersão, em g.

#### 5.1.4.4. Análise química

Para avaliar os efeitos dos tratamentos na composição química dos *strands* de eucalipto e pinus foram utilizados dois métodos: (i) determinação química do teor celulose; hemicelulose; e lignina e (ii) espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). Como etapa preliminar de ambas as análises mencionadas acima, inicialmente, os *strands* foram secos em estufa 60 °C durante 72 h e posteriormente picados em um moinho de facas com peneira contendo abertura de 1 mm de diâmetro.

A análise química para a determinar os teores de celulose, hemicelulose e lignina foi realizada no Laboratório de Nutrição da FZEA/USP, utilizando a metodologia proposta por Van Soest (1994), que pressupõe que os constituintes do material vegetal podem ser divididos em celulares (lipídios, compostos nitrogenados, gorduras, amido e outros compostos solúveis em água) e em teores das paredes celulares (proteína insolúvel, hemicelulose, celulose e lignina).

O FTIR é uma técnica qualitativa amplamente utilizada na análise de materiais vegetais, que possibilita a identificação e elucidação estrutural de substâncias orgânicas. Bem como na determinação da pureza, quantificação de substâncias orgânicas e verificação de mudanças estruturais e interações entre os materiais (LOPES; FASCIO, 2004). A análise de FTIR das amostras em pó previamente picadas em um moinho de facas (dimensão de 1 mm) foi realizada no Laboratório de Tecnologia de Alimentos, FZEA/USP, com o equipamento modelo Spectrum One, da fabricante Perkin Elmer, munido do programa Spectrum V5.3.1. Para esta análise, foram analisados 128 scans na faixa de 4000 a 650 cm<sup>-1</sup>, com uma resolução espectral de 4 cm<sup>-1</sup>.

#### 5.1.4.5. Caracterização microestrutural

### 5.1.4.5.1. Termogravimetria

Com o intuito de avaliar alterações na estabilidade térmica dos *strands* de eucalipto e pinus em detrimento dos tratamentos realizados, foram conduzidas analises de termogravimetria (TG) e derivada da termogravimetria (DTG). As análises foram conduzidas no Laboratório Multiusuários de Caracterização de Materiais (MultMat) (FZEA/USP), utilizando o analisador térmico simultâneo (TG-DTG) modelo STA 449 F3 Jupiter®.

As amostras dos *strands* foram preparadas da seguinte maneira, secagem em estufa 60 °C durante 72 h e processo de moagem em um moinho de facas com peneira contendo abertura de 1 mm de diâmetro. As análises foram realizadas com os seguintes parâmetros: taxa de aquecimento de 10 °C/min., intervalo de temperatura de 25 °C a 1000 °C.

## 5.1.4.5.2. Difração de raios X

A técnica de difratometria de raios X (DRX) foi utilizada para determinar o índice de cristalinidade (IC) dos *strands* e com isso avaliar modificações cristalográficas resultantes dos tratamentos. O preparo das amostras para a análise de DRX consistiu em inicialmente secar os *strands* em estufa 60 °C durante 72 h e posteriormente pica-los em um moinho de facas com peneira contendo abertura de 1 mm de diâmetro.

A análise de DRX foi realizada no laboratório MultMat da FZEA/USP com auxílio de um difratômetro (modelo MiniFlex 600, fabricante Rigaku), operado com os seguintes parâmetros: 40 kV e 15 mA, com radiação Cu-K<sub> $\alpha$ </sub> ( $\lambda$  = 1,54056° Å), 2theta entre 5° e 50° e com velocidade de varredura de 10°/min. O índice de cristalinidade (*IC*) das amostras foi determinado por meio do procedimento empírico proposto por Segal et al. (1959) por meio da Equação (4).

$$IC = \frac{I_{002} - I_{am}}{I_{002}} \times 100$$
 Equação (4)

Onde:  $l_{002} = o$  valor da intensidade no plano (002) correspondendo às reflexões  $22^{\circ} - 23^{\circ}$  (2 $\theta$ ); Iam = intensidade de difração correspondente a  $18^{\circ} - 19^{\circ}$  (2 $\theta$ ).

### 5.1.4.5.3. Caracterização morfológica

A caracterização morfológica dos *strands* de eucalipto e pinus (sem e com tratamentos) foi realizada por meio de técnicas de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e de Microscopia de Varredura Confocal a Laser (MVCL).

Para a análise de MEV foi utilizado o microscópio tipo Tabletop (modelo TM3000, da fabricante Hitachi) com 15 kV de tensão de aceleração, acoplado a um sistema de microanálise de raios X por espectroscopia de energia dispersiva (Figura 16a), no Laboratório de Tecnologia de Alimentos, da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, FZEA da USP.

A análise de MVCL foi conduzida no Laboratório de Caracterização Estrutural do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) no microscópio Lext 3D Measuring Laser Microscope (modelo OL-S 4.100, fabricante Olympus,) equipado com o *software* OL-S 4.100 (Figura 16b).

Figura 16 – Microscópios utilizados para avaliação microestrutural: (a) Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) (b) Microscopia de Varredura Confocal a Laser (MVCL)



Fonte: Própria autoria.

### 5.1.4.6. Caracterização mecânica

O efeito dos tratamentos na tensão de ruptura dos *strands* de eucalipto e pinus foi avaliado por meio do ensaio de tração longitudinal as fibras. Este ensaio foi conduzido no Laboratório de Construções e Ambiência (FZEA/USP) com auxílio da máquina universal servo-hidráulica de ensaios mecânicos com capacidade de 15 kN (modelo 370.02, fabricante da fabricante MTS), munida de um sistema de refrigeração modelo SAT.005AR da fabricante Refrisat).

Os ensaios foram realizados de acordo com os procedimentos indicados pela normativa ASTM D 828:2016 - *Standard Test Method for Tensile Properties of Paper and Paperboard Using Constant-Rate-of-Elongation Apparatus* com adaptações. A Figura 17 ilustra algumas etapas do ensaio mecânico dos *strands*. Previamente, as amostras ( $80 \times mm \times 20 mm \times 1 mm$ ) foram recobertas na região superior e posterior com fita adesiva (Figura 17a), a fim de evitar o esmagamento da amostra e ruptura nas regiões que estão presas nas garras durante o ensaio (Figura 17b).





Fonte: Própria autoria

A velocidade de ensaio foi de 4 mm/min e a célula de carga de 15kN foi utilizada. A pressão de grampeamento das garras superior e posterior utilizadas no momento dos ensaios foi de 2 MPa e distância útil adotada entre as garras foi de 30 mm (Figura 17c).

#### 5.1.5. Efeito dos tratamentos nos strands na hidratação do cimento Portland

Na avaliação do efeito dos *strands* de eucalipto e pinus (sem e com tratamentos) na hidratação do cimento foi utilizado o cimento CP V-ARI (Cimento Portland de Alta Resistência Inicial - 34 MPa aos 7 dias de idade), da marca Itaú, da Votorantim Cimentos (NBR 5733, 1991). A escolha por esse cimento se deve ao fato deste conter de 0 a 5% de adições minerais (escória de alto forno ou pozolanas), visto que a ausência de adições minerais permite a melhor compreensão do efeito dos *strands* na hidratação da matriz. Como também, pela sua elevada resistência inicial, o que favorece a redução do tempo de manipulação de elementos prémoldados.

A composição química do cimento (% em massa de óxidos) foi determinada por meio do espectrômetro de fluorescência de raios X por Energia Dispersiva, modelo EDX-720 da fabricante Shimadzu, do Laboratório de Caracterização Estrutural do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). A composição química está listada na Tabela 7.

Óxidos	Cimento
CaO	78.73
Sio <sub>2</sub>	6.72
SO <sub>3</sub>	4.75
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.9
$Al_2O_3$	2.3
K <sub>2</sub> O	1.8
MgO	0.9
Tio <sub>2</sub>	0.25
MnO	0.10
ZnO	0.07

Tabela 7 – Composição química do cimento CP V-ARI (% em massa de óxidos)

Fonte: Própria autoria.

Além da composição química, foi determinada a distribuição do tamanho de partículas pela técnica de granulometria a laser, utilizando a difração a laser e dispersão de partículas em álcool isopropílico, utilizando o analisador de partículas de alto desempenho da modelo LA-950 da fabricante Horiba, localizado no MultMat da FZEA/USP. Na Figura 18 são apresentadas as distribuições discreta e acumulada de partículas do cimento Portland.





Fonte: Própria autoria

A fim de avaliar os efeitos dos *strands* de eucalipto e pinus (sem e com tratamentos) na hidratação do cimento foram realizados os ensaios de resistência à compressão axial, as análises termogravimétricas (TG/DTG) e as análises cristalográficas (DRX).

Para o preparo dos corpos de prova cilíndricos do ensaio de resistência à compressão axial foi utilizada a relação cimento: *strands* de 13,3:1, conforme sugerido por Lee e Hong (1986), e a relação a/c de 0,5:1 conforme indicado por diversos por diversos pesquisadores (MOSLEMI & PFISTER, 1987; WOLFE & GJINOLLI, 1999; LATORRACA, 2000). Além disso, foram fabricadas amostras controle contendo apenas cimento, com relação a/c de 0,5.

Para os corpos de prova contento os *strands*, 20% do montante total de água foi utilizado para umedecer a madeira previamente, seguindo a recomendação de produção dos painéis cimento-madeira (MOSLEMI & PFISTER, 1987).

#### 5.1.5.1. Resistência à compressão axial

Com o objetivo de verificar a compatibilidade da madeira com o cimento bem como os efeitos de tratamentos nesta, um indicador amplamente utilizado é o ensaio de resistência à compressão axial da mistura cimento-madeira-água (CASTRO, VINICIUS; ARAÚJO, ROBERTO DANIEL; PARCHEN, CARLOS; IWAKIRI, 2014; LATORRACA, 2000; MACÊDO; SOUZA; NETO, 2012).

No preparo das amostras cimento-madeira os pesquisadores sugerem a homogeneização conjunta dos componentes da mistura (cimento-madeira-água) em misturador (modelo AG-5 da fabricante Metal Cairo) durante 5 min, e a posterior inserção desta mistura em moldes de aço, com posterior compactação dos corpos de prova em mesa vibratória por 5 min (LATORRACA, 2000; MACÊDO; SOUZA; POMPEU NETO, 2012; MOSLEMI; PFISTER, 1987b). Entretanto, neste estudo, após testes preliminares foi constatado que o método de preparo convencional dos corpos de prova, consistido na mistura conjunta dos componentes seguidos de compactação em mesa vibratória não foi efetivo na homogeneização das matérias primas, majoritariamente devido à dimensão dos *strands*, conforme ilustra a Figura 19.

Figura 19 – Sequência de preparo corpos de prova cilíndricos por método convencional (mistura de todos os componentes juntos)



Após 28 dias de cura saturada Fonte: Própria autoria.

Com isso, devido à dimensão dos *strands* a metodologia de preparo dos corpos de prova foi adaptada a sequência de preparo após alguns testes experimentais baseando-se na metodologia descrita em literatura CASTRO, VINICIUS; ARAÚJO, ROBERTO DANIEL; PARCHEN, CARLOS; IWAKIRI, 2014; LATORRACA, 2000; MACÊDO; SOUZA; NETO, 2012). Primeiramente, as matérias primas foram separadas, o montante 15 g de *strands* para cada corpo de prova foi inserido no molde de aço. Então a pasta de cimento Portland foi misturada por 5 min em misturador eletromecânico. Finalizada a homogeneização da pasta, esta foi inserida dentro dos moldes de aço contendo os *strands*, conforme ilustrado na Figura 20.

# Figura 20 - Preparo corpos de prova cilíndricos modificado



**Após 28 dias de cura saturada** Fonte: Própria autoria.

Por fim, foi feita a compactação dos corpos de prova em mesa vibratória (por 5 min, que foram mantidos a  $23^{\circ}C \pm 2^{\circ}C$  em ambiente saturado ao ar (ou seja, selados em sacos plásticos) até os 28 dias de idade.

Antes da realização dos ensaios de compressão axial, visando evitar a aplicação de carga fora do eixo axial durante o ensaio, foi feito o acabamento nas superfícies superior e inferior das amostras (28 dias de idade) para deixa-las paralelas uma em relação à outra, utilizando uma serra com disco diamantado.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Construções e Ambiência (FZEA/USP) em uma máquina universal eletromecânica de ensaios mecânicos da marca EMIC, modelo DL 30.000, de acordo com a normativa NBR 7215/1996 - Cimento Portland: Resistência à Compressão. Foram utilizadas a velocidade de deslocamento do atuador de 1 mm/min e a célula de carga de 300 kN.

## 5.1.5.2. Termogravimetria (TG/DTG) e difratometria de Raios X (DRX)

Com o objetivo de avaliar o efeito dos *strands* nos produtos de hidratação do cimento Portland, análises de TG/DTG e DRX foram conduzidas extraindo somente a matriz cimentícia, com 28 dias de idade, dos cilindros utilizados nos ensaios de compressão axial. Para tal, porções de cimento Portland foram extraídas de forma aleatória dos corpos de prova cilíndricos após os ensaios de compressão axial.

O preparo das amostras foi realizado conforme descrito por Lothenbach et al. (2016), em que sugere que inicialmente as porções de cimento Portland sejam moídas manualmente em um almofariz de ágata, e em seguida seja realizado o peneiramento manual. Para o peneiramento, foi utilizada uma peneira redonda para análises granulométricas (Ø 8" x 2") com aro e tela em aço inoxidável com malha 0,106 mm.

Posteriormente, para remoção da água livre nos poros e interrupção do processo de hidratação do cimento, o material preparado foi mergulhado em um Becker com álcool isopropílico. Para tanto, a amostra em pó foi introduzida em um Becker (100 ml) em mistura de aproximadamente 5 g de amostra da matriz em pó para cada 50 ml de álcool isopropílico durante 10 min. Finalizada esta etapa, a suspensão foi filtrada em funil Büchner com auxílio de um sistema a vácuo para remover o excesso de álcool isopropílico e mantida sobre uma placa de Petri em estufa 40 °C por 10 min. Por fim, as amostras foram armazenadas em microtubos (2 ml) vedadas com parafilme até o momento das análises.

A análise de TG/DTG foi realizada em analisador térmico TG/DSC Netzch, modelo STA449 F3 Jupiter® operado com atmosfera com nitrogênio (50 mL/min). Ensaio padrão de 25 °C a 1000 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C/min (SANTOS et al., 2015).

A análise de DRX foi realizada a fim de identificar a composição mineralógica das amostras. O DRX foi conduzido em um difratômetro Rigaku, modelo MiniFlex 600, Rigaku, operado com os seguintes parâmetros: 40 kV e 15 mA, com radiação Cu-K<sub>a</sub> ( $\lambda = 1,54056$  Å), 2theta entre 5° e 60° e com velocidade de varredura de 10°/min. A indexação dos produtos de hidratação foi realizada utilizando o software Highscore © 3.0, Panalytical.

## 5.1.6. Análise estatística - ANOVA

Para analisar o efeito dos tratamentos (sem tratamento; água fria; água quente e solução NaOH 2,5%) nas propriedades dos *strands*, bem como seu efeito na hidratação do cimento Portland foi realizado uma análise de variância (ANOVA) para verificar se havia diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos para cada espécie de madeira. Constatando diferença foi realizada uma comparação entre as médias com o teste de Tukey ao nível de 5% de significância. Não foi feita comparação entre as espécies de madeira.

# 5.2. Etapa 2: Determinação do teor ótimo de *strands* de madeira para painéis OSB cimento-madeira residual

Na etapa 2 foram utilizados para produção dos painéis OSB-cimento-madeira residual os *strands* de eucalipto e pinus sem tratamento, visto os melhores resultados obtidos a partir das caracterizações da etapa 1.

Esta etapa teve como objetivo a produção e a caracterização de painéis OSB-cimentomadeira residual contendo 25%, 30% e 35% de madeira (em massa), seguindo a metodologia convencional de produção de painéis cimento-madeira.

Excepcionalmente a fim de avaliar o efeito da orientação dos *strands* nas propriedades físicas e mecânicas, painéis cimento-madeira com *strands* não-orientados foram produzidos como controle.

#### 5.2.1. Produção laboratorial dos painéis OSB-cimento-madeira residual

Na Tabela 8 são listados os parâmetros utilizados para produzir os painéis OSBcimento-madeira residual. Para o cálculo das formulações dos painéis foram considerados os seguintes parâmetros: comprimento, largura, espessura e densidade alvo. Os painéis foram produzidos nas dimensões de 400 mm × 400 mm × 10 mm com densidade alvo de 1250 kg/m<sup>3</sup>, e contendo 3 camadas de *strands* com conteúdo de 33% da formulação para cada camada. Os painéis OSB-cimento-madeira residual foram produzidos contendo 25%, 30% e 35% de *strands* (em massa) para as duas espécies de madeira (eucalipto e pinus), totalizando seis tratamentos. A quantidade de água adicionada foi calculada por meio da Equação (5), estabelecida por Moslemi e Pfister (1987).

### Água (litros) = 0,35 C + (0,30 - UM) x W Equação (5)

Onde: C = peso do cimento Portland (kg); UM = teor de umidade da madeira; W = peso da madeira seca (kg).

Parâmetro	Valor
Largura	400 mm
Comprimento	400 mm
Espessura	10 mm
Densidade alvo	1250 kg/m <sup>3.</sup>
Número de camadas	3
Conteúdo de material por camada	33% em massa
Pressão de prensagem	5 MPa
Temperatura de prensagem	23 °C ± 2 °C
Tempo de prensagem	24 h

Tabela 8 – Parâmetros de produção em escala de laboratório dos painéis OSB-cimentomadeira residual experimentais

Fonte: Própria autoria.

A Figura 21 sumariza do processo de produção dos painéis OSB-cimento-madeira residual. Para produzir os painéis, inicialmente, foram adicionados os *strands* em uma betoneira

com capacidade de 250 L (fabricante Sorrag) munida de motor de indução de 1 c.v., operada rotação do tambor de 30 RPM, e em seguida com o equipamento em movimento, a água foi introduzida e foi realizada a mistura durante 2 min. Concluída esta etapa, o cimento Portland foi adicionado e a mistura homogeneizada por 3 min. (LATORRACA, 2000).



Figura 21 - Desenho esquemático do processo de produção dos painéis OSB-cimento-

Fonte: Própria autoria.

Após esse processo, a mistura foi retirada da betoneira e o colchão foi formado em aparato orientador com a composição em camadas cruzadas face: miolo: face nas proporções de 33:33:33% em massa. Posteriormente, utilizando espaçadores de 10 mm para o controle da

espessura final do painel, foi aplicada uma pressão de 5 MPa por 10 min, até atingir a espessura desejada, sendo o painel mantido prensado durante 24 h. Após o alívio da pressão do material, o painel foi condicionado a 23 °C  $\pm$  2 °C em ar ambiente saturado (ou seja, selado em saco de plástico) durante 27 dias. Ao final do 28° dia após a produção, os materiais foram caracterizados.

Para os painéis cimento-madeira não orientados (controle), foram utilizadas as mesmas formulações bem como os métodos produtivos, com a exceção da composição em camadas cruzadas face: miolo: face. (33:33:33% em massa). Para estes materiais, a formulação (*strands*-cimento-água) foi retirada da betoneira e o colchão foi formado aleatoriamente na caixa formadora de painel.

#### 5.2.2. Caracterização dos Painéis OSB-cimento-madeira residual

Neste item estão apresentadas as caracterizações que foram empregadas para avaliar a influência dos teores de *strands* nas propriedades dos painéis OSB-cimento-madeirar residual, com objetivo de nortear a escolha da formulação a ser empregada para a etapa 3.

## 5.2.2.1. Caracterização física

A caracterização física dos painéis foi realiza por meio dos ensaios de densidade aparente (DA), inchamento em espessura (IE) e absorção de água (AA) seguindo as recomendações das normativas europeias - *European Normative* EN 323 (1993) *Wood–based* –*Determination of density* e EN-317 (1993) – *Particleboards and Fibreboards - Determination of Swelling in Thickness After Immersion in Water*, respectivamente.

Para determinar a DA foram utilizados 10 corpos de prova com dimensões de 50 mm x 50 mm, extraídos dos painéis. Foram determinadas as dimensões (comprimento, largura e espessura) utilizando um paquímetro digital, com resolução de 0,01 mm (modelo Absolute, fabricante Mitutoyo) e, para a determinação da massa foi utilizada balança digital eletrônica (modelo AY220, fabricante Shimadzu), com resolução de 0,01 g. O cálculo da DA foi realizado pela Equação (6):

$$DA = \frac{m}{b1 \times b2 \times t} \times 1000000 \qquad Equação (6)$$

Onde: DA = densidade aparente (kg/m<sup>3</sup>); m = Massa do corpo de prova; b1 = Largura do corpo de prova; b2 = Comprimento do corpo de prova; t = Altura do corpo de prova.

Para determinar o IE e AA foram preparados 10 corpos de prova com dimensões de 50 mm x 50 mm. Inicialmente com as amostras em condição seca, foram determinadas as espessuras com auxílio de um paquímetro digital (resolução de 0,01 mm) (modelo Absolute, da fabricante Mitutoyo) e as massas com auxílio de uma balança analítica (resolução de 0,01 g) (modelo AY220, fabricante Shimadzu).

Após realizar as medições, os corpos de prova foram introduzidos em um recipiente com água, e os materiais permaneçam submersos por um período total de 24 h. Finalizadas as 24 h de imersão, os corpos de prova foram retirados do recipiente, e o excesso de água foi removido com papel absorvente e foram mensuradas a espessura e a massa de cada corpo de prova. O IE e AA foram determinados por meio da Equação (7) e Equação (8), respectivamente.

$$IE = \frac{E_1 - E_0}{E_0} \times 100 \qquad Equação (7)$$

Onde: IE = inchamento em espessura do corpo de prova (%);  $E_1$  = espessura do corpo de prova após o período de imersão, em mm;  $E_0$  = espessura do corpo de prova antes da imersão, em mm.

$$AA = \frac{M_1 - M_0}{M_0} \times 100 \qquad \qquad Equação (8)$$

Onde: AA = absorção de água (%);  $M_1$  = peso do corpo de prova após o período de imersão, em g;  $M_0$  = peso do corpo de prova antes da imersão, em g.

#### 5.2.2.2. Caracterização mecânica

Para a determinação da resistência mecânica ou módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE), foram realizados ensaios de flexão estática de três pontos na direção paralela e perpendicular aos *strands* (conforme mostra a desenho esquemático na Figura 22), que foi realizado em máquina universal de ensaios mecânicos da marca EMIC, modelo DL 30.000 (Figura 23a) de acordo com a metodologia descrita pela normativa EN-310 (1993) – *Wood-based panels – determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength* 



Figura 22 - Desenho esquemático dos corpos de prova preparados para o ensaio de flexão

Fonte: Própria autoria

Figura 23 – Modelo de flexão estática 3 pontos: (a) Máquina universal de ensaios (b) corpo de prova acomodado para ensaio de flexão 3 pontos



Fonte: Própria autoria

Foram analisados 10 corpos de prova na direção paralela e 10 corpos de prova na direção perpendicular totalizando 20 corpos de prova nas dimensões de 250 mm x 50 mm x 10 mm para cada amostra, sendo a largura e espessura determinadas precisamente com paquímetro digital (com resolução de 0,01 mm) modelo Absolute, da fabricante Mitutoyo. Para os painéis cimento-madeira não orientados, 10 corpos de prova foram preparados com as dimensões de 250 mm x 50 mm x 50 mm x 50 mm x 10 mm para cada amostra para a determinação das propriedades mecânicas de MOR e MOE.

O ensaio de flexão (3 pontos) foi conduzido posicionando o corpo de prova sobre dois apoios da máquina universal de ensaios, com a distância entre os apoios de 200 mm (Figura 23b). Foram adotadas a velocidade de deslocamento do atuador de 7 mm/min e célula de carga de 5 kN. Um deflectometro com precisão de 0,001 mm foi posicionado no meio do vão, na face interior do corpo de prova, para a coleta dos valores de deflexão. Os valores de MOR e MOE foram determinados pelas Equação (9) e Equação (10), respectivamente.

$$MOR = 1, 5 \times \frac{(P \times D)}{B \times (E)^2} \qquad Equação (9)$$

Onde: MOR = módulo de ruptura, em MPa; P = carga de ruptura, em N; D = distância entre apoios do aparelho, em mm; B = largura do corpo de prova, em mm; E = espessura, em mm.

$$MOE = 1, 5 \times \frac{(P_1 \times D^3)}{d \times 4 \times B \times (E)^3} \qquad Equação (10)$$

Onde: MOE = módulo de elasticidade, em MPa; P1 = carga no limite de proporcionalidade, em N; D = distância entre apoios do aparelho, em mm; d = deflexão, expressa em mm, correspondente à força P; B = largura do corpo de prova, em mm; E = espessura, em mm.

### 5.2.2.3. Caracterização microestrutural

A caracterização microestrutural dos painéis OSB-cimento-madeira residual experimentais foi realizada por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV, modelo TM-3000, Hitachi, Japão), com capacidade de 15 kV (tensão de aceleração). O MEV foi realizado para avaliar a interface *strand*-cimento, bem como para analisar a interação entre as camadas de orientação dos painéis com 28 dias de idade. As imagens de MEV foram geradas via aquisição de detectores de elétrons retroespalhados com ampliação de 50 e 1,0k.

Para a realização das análises de MEV, com auxílio de uma cortadeira de precisão (modelo Miniton, fabricante Struers), foram cortadas amostras dos painéis com dimensões de aproximadamente 20 mm x 20 mm. As amostras foram então imergidas em álcool isopropílico por 10 min para cessar o processo de hidratação do cimento Portland. Em seguida, foi realizada a secagem das amostras em estufa 40 °C, sobre uma placa de Petri por 30 min (SCRIVENER; SNELLINGS; LOTHENBACH, 2016).

Após a finalização do processo de secagem, as amostras foram embutidas em moldes de silicone (25 mm de diâmetro) com impregnação de resina epóxi (marca Akasel), sem a
utilização de vácuo, e curadas por 24 h. Em seguida, as amostras foram lixadas em politriz semiautomática (Modelo TegraPol-1, fabricante Struers), com o auxílio de folha abrasiva de carboneto de silício com granulometria #600 por 10 min, utilizando álcool isopropílico como um lubrificante. Um polimento final foi realizado utilizando suspensões de partículas de diamante com diâmetros médio de 6  $\mu$ m, 4  $\mu$ m e 1  $\mu$ m, da marca Struers por 10 min para cada suspensão.

No intervalo de cada uma das etapas (lixamento para o polimento e troca de suspensão), as amostras eram lavadas de acordo com o seguinte procedimento: as amostras foram inseridas em um Becker de vidro contento 100 ml de álcool isopropílico, e em seguida o Becker foi introduzido em lavadora ultrassônica de amostras (modelo 750, fabricante Unique) por 10 min.

Durante o processo de lixamento e polimento a politriz semiautomática foi operada com os seguintes parâmetros: 10 N de carga aplicada, velocidade de rotação do cabeçote de 50 RPM, velocidade do prato de 50 RPM, cabeçote e prato atuando com rotação em sentidos opostos.

#### 5.2.3. Análise estatística

Nesta etapa foram avaliadas as propriedades físicas e mecânicas dos painéis experimentais OSB-cimento-madeira residual para cada uma das espécies de madeira, eucalipto e pinus. Foi realizado um Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC), em um esquema fatorial 3 x 2, correspondendo ao teor *strands* (25%, 30% e 35% em massa) e orientação do *strand* (não orientado e orientado), totalizando 6 tratamentos. Não foi feita a comparação entre as espécies de madeira.

Foi realizada uma análise de variância (ANOVA) para avaliar se havia diferença estatística significativa entre os tratamentos. Havendo diferença entre os tratamentos, foi realizada uma comparação entre as médias por meio do teste de Tukey ao nível de significância de 5%.

## 5.3. Etapa 3: Painéis OSB-cimento-madeira residual otimizados

De acordo com os resultados observados nos painéis preliminares da etapa 2, na etapa 3 foram ajustados os parâmetros de produção (teor de água, processo de mistura e pressão de prensagem) dos painéis OSB-cimento-madeira residual contendo 35% e 45% de *strands* (em massa).

A principal razão para a produção dos painéis desta etapa com os teores de *strands* mencionados acima, foi motivada pela busca do melhor desempenho mecânico dos materiais na flexão (MOR E MOE), visando atender os requisitos prescritos pela EN300:2006 para o OSB/1,uma vez que os *strands* atuam como material de reforço na flexão, Além disso, a escolha também se deve a menor utilização de cimento na formulação.

#### 5.3.1. Produção dos painéis OSB-cimento-madeira residual otimizados

Os ajustes nos parâmetros utilizados para produzir os painéis OSB-cimento-madeira residual estudados nesta etapa estão listados na Tabela 9. Conforme utilizado previamente para os painéis experimentais (etapa 2), o cálculo das formulações dos painéis otimizados também considerou os seguintes parâmetros: comprimento, largura, espessura e densidade.

Parâmetro	Valor
Largura	400 mm
Comprimento	400 mm
Espessura	10 mm
Densidade alvo	1250 kg/m <sup>3.</sup>
Água Retida no cimento	30%
Número de camadas	3
Conteúdo de material por camada	33% em massa
Pressão de prensagem	12 MPa
Temperatura de prensagem	23 °C ± 2 °C
Tempo de prensagem	24 h

Tabela 9 – Parâmetros de produção dos painéis OSB-cimento-madeira residual

Fonte: Própria autoria.

No entanto, para o cálculo da formulação desta etapa foi considerada a água retida na matriz cimentícia. Ajustes no teor de água da mistura e teor de cimento foram realizados, bem como foi ajustada a pressão de prensagem do painel. Além disso, os painéis foram produzidos contendo 35% e 45% de *strands* (em massa) para as duas espécies de madeira (eucalipto e pinus).

No que diz respeito à água retida, com base nos resultados obtidos nos painéis experimentais, foi constatado que as densidades de todas as formulações foram aproximadamente 30% superiores à densidade estipulada nos parâmetros de produção (1250 kg/m<sup>3</sup>), e a principal razão para este comportamento está associada ao teor de água não evaporável (Wn). Sendo assim, para o cálculo do conteúdo de cimento foi descontado o valor de 30% referente a Wn na formulação.

O teor de água para o cimento da equação da água total Equação (11) foi ajustado de 0,35 para 0,50 no cálculo da água total (Moslemi; Pfister, 1987). A razão para essa modificação foi por conta que o teor convencionalmente utilizado para painéis cimento-madeira não foi suficiente para o recobrimento total das partículas (*strands*).

# Água (litros) = 0, 50 C + (0, 30 - UM)x W Equação (11)

Onde: C = peso do cimento descontada o Wn (kg); UM = teor de umidade da madeira; W = peso da madeira seca (kg).

Conforme mencionado anteriormente, a pressão de prensagem foi outro parâmetro modificado para otimizar o processo de produção dos painéis. Inicialmente, os materiais estudados na etapa 2, seguiram o valor de pressão convencionalmente utilizado para produção de painéis cimento-madeira, como descrito em literatura (aproximadamente 5 MPa) (CABRAL et al., 2018b; DE SÁ et al., 2010; MACÊDO; SOUZA; NETO, 2012; OKINO et al., 2004b).

Foi identificado que a pressão em um primeiro momento foi suficiente para prensar o colchão, contudo, após a cura do painel foi constatado o efeito mola dos materiais, ou seja, houve o aumento da espessura do painel após retirada a pressão (NAKANISHI et al., 2018).

Sendo assim, testes preliminares foram conduzidos em laboratório somente com o objetivo de adequar a pressão de prensagem e sanar o efeito mola dos painéis antes da produção. E, o valor de 12 MPa foi considerado para a pressão de prensagem dos painéis da etapa 3. Houveram ajustes também no processo de produção dos painéis após testes. A ordem de mistura foi alterada, e a razão para tal modificação foi devido a melhor homogeneização das matérias primas com a ordem de mistura *strand*-cimento-água, conforme ilustrado na Figura 24

Figura 24 - Matérias primas após processo de mistura (a) mistura = *strand*: água: cimento (b) mistura = *strand*: cimento: água



Fonte: Própria autoria

A Figura 25 sumariza processo de mistura dos componentes para a produção dos painéis OSB-cimento-madeira residual. Primeiramente, foram adicionados os *strands* e o cimento em uma betoneira com capacidade de 250 L (fabricante Sorrag) munida de motor de indução de 1 c.v., operada rotação do tambor de 30 RPM, e em seguida as matérias primas foram misturas durante 2 min, e com equipamento em movimento, a água foi introduzida e então a mistura foi homogeneizada por mais 3 min.

Figura 25 – Desenho esquemático da ordem de mistura da produção dos painéis OSBcimento-madeira residual otimizados



Após o processo de mistura, a formulação (*strands*-cimento-água) foi retirada da betoneira e o colchão foi formado em aparato orientador com a composição em camadas

cruzadas face: miolo: face nas proporções de 33:33:33% em massa. Posteriormente, utilizando espaçadores de 10 mm para o controle da espessura final do painel, foi aplicada uma pressão de 12 MPa por 10 min., até atingir a espessura desejada, sendo o painel mantido prensado por 24 h. A utilização de *strands* com espessura de 1 mm possibilitou prensagem com a pressão 12 MPa sem ocasionar o esmagamento dos *strands*. Após o alívio da pressão do material, os painéis foram condicionados a 23 °C  $\pm$  2 °C em ambiente saturado ao ar (ou seja, selados em sacos de plástico) durante 27 dias. Ao final do 28° dia após a produção, os materiais foram caracterizados.

# 5.3.2. Caracterização OSB-cimento-madeira residual otimizados

Neste item estão apresentadas as caracterizações que foram utilizadas com o objetivo de avaliar os ajustes de produção realizados para os painéis OSB-cimento-madeira residual. Como também, para avaliar o painel com melhor teor de *strands* a ser empregado para a etapa 4.

### 5.3.2.1. Caracterização térmica

A fim de avaliar o potencial dos painéis OSB-cimento-madeira residual como material isolante, o ensaio de condutividade térmica foi realizado utilizando um analisador de propriedade térmica modelo K2D Pro, da fabricante Decagon Devices, Inc. O sensor para coleta do calor específico volumétrico foi o 30 mm *dual-needle* (SH-1), que possui distância entre as agulhas de 6 mm. Para a realização desta análise foram utilizados corpos de prova com dimensões de 50 mm x 50 mm x 10 mm.

Para a inserção do sensor, foram feitos dois furos com furadeira de bancada com distância de 6 mm para a inserção das agulhas na lateral de cada corpo de prova, a Figura 24 ilustra o equipamento utilizado bem como apresenta desenho esquemático do corpo de prova preparado para a análise. O ensaio foi conduzido em ambiente controlado, utilizando câmara climática (modelo SM-3.5S, fabricante Thermotron) com temperatura de 30 °C.



Figura 26 - Condutividade térmica OSB-cimento-madeira residual

#### 5.3.2.2. Caracterização física

As propriedades de densidade aparente (DA), inchamento em espessura (IE) e absorção de água (AA) dos painéis OSB-cimento-madeira residual foram determinadas, conforme descrito em detalhes na seção 5.2.2.1, de acordo com as recomendações das normativas EN-323 (1993) e EN-317 (1993), respectivamente.

## 5.3.2.3. Caracterização mecânica

Com objetivo de avaliar os ajustes no processo produtivo dos painéis OSB-cimentomadeira residual desta etapa foram realizadas as caracterizações mecânicas descritas a seguir. Para tal, os corpos de prova previamente preparados foram mantidos em câmara com temperatura (23 °C) e umidade (60%) controlada durante 24 h.

#### 5.3.2.3.1. Flexão estática

Para a determinação do módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE), foram realizados ensaios de flexão estática na direção paralela e perpendicular aos *strands*, em três pontos, conduzido em máquina universal de ensaios mecânicos (modelo DL 30.000 fabricante EMIC), de acordo com a metodologia descrita em detalhes na seção 5.2.2.2, baseando-se na normativa EN-310 (1993).

# 5.3.2.3.2. Arrancamento de parafuso

A afim de medir a resistência à retirada de parafuso na direção normal à superfície e topo dos painéis, os ensaios de arrancamento de parafuso (superfície e topo) foram realizados seguindo a normativa ABNT 14.810:2013 – Chapa de Madeiras Aglomeradas, em uma máquina universal de ensaios mecânicos (modelo DL 30000, fabricante EMIC), utilizando célula de carga de 5kN, com velocidade de ensaio de 10 mm/min.

Foram preparados 20 corpos de prova dos painéis em estudo neste trabalho medindo 50 mm x 50 mm, sendo 10 corpos de prova para o ensaio de arrancamento de parafuso de superfície e 10 corpos de prova para o ensaio de arrancamento de parafuso de topo.

Com o auxílio de uma broca (2,7 mm de diâmetro), foi confeccionado um orifício passante no centro para os corpos de prova de superfície e com profundidade de 15 mm para os de topo, centrado em relação as suas faces, que foi utilizado como a guia para a introdução dos parafusos auto-atarraxante para madeira nº10 (com cabeça panela e fenda de 4,2 x 38 mm, passo da rosca de 1,4 mm) nos corpos de prova para condução dos ensaios.

#### 5.3.2.3.3. Adesão interna

Para avaliar a interação entre as camadas dos painéis OSB-cimento-madeira residual, o ensaio de adesão interna (AI) foi realizado com auxílio da máquina universal de ensaios mecânicos (modelo DL 30000, fabricante EMIC). Os corpos de provas foram fixados nos blocos de tração (Figura 27a), e estes foram posicionados no dispositivo de ensaio (Figura 27b). A velocidade de ensaio foi de 4 mm/min, seguindo a normativa ABNT 14.810:2013 ocorrendo a ruptura do corpo de prova no intervalo de 60 s  $\pm$  30 s, após o início do ensaio. Para o cálculo da AI a foi utilizada a Equação (12).

$$AI = \frac{P}{S} \qquad \qquad Equação (12)$$

Onde: AI = resistência à tração perpendicular (N/mm<sup>2</sup>), P = carga de ruptura (N) e, S = área da superfície do corpo de prova (mm<sup>2</sup>)

Figura 27 – Dispositivos de ensaio de adesão interna (a) Corpo de prova colado no bloco de tração (b) Sistema corpo de prova e blocos de tração que foi acoplado nas garras.





#### 5.3.3. Análise estatística

Para avaliar as propriedades térmicas, físicas e mecânicas dos OSB-cimento-madeira residual foi realizado um Delineamento em Inteiramente Casualizado (DIC), em um esquema fatorial 2x2, correspondendo ao tipo de strand (eucalipto pinus) e os formulações (35% e 45% de *strands*), totalizando 4 tratamentos. Foi realizada uma análise de variância (ANOVA) entre os tratamentos. Havendo diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos foi realizada uma comparação entre as médias com o teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

# 5.4. Etapa 4: Cura com carbonatação acelerada em painéis OSB-cimentomadeira residual

Visto que os painéis produzidos com 45% de *strands* (em massa) estudados durante a etapa 3 apresentaram o melhor desempenho nas propriedades térmicas, físicas, mecânicas e microestruturais, optou-se por produzir e caracterizar painéis OSB-cimento-madeira residual otimizados com as espécies de eucalipto e pinus com tal teor de *strands* submetidos ao processo de cura com carbonatação acelerada.

# 5.4.1. Fabricação dos painéis OSB-cimento-madeira residual

Os painéis OSB-cimento-madeira residual foram produzidos conforme descrito no item 5.3.1 contendo 45% de madeira (em massa) para ambas as madeiras (eucalipto e pinus). Finalizadas as 24 h de prensagem, os materiais foram imediatamente removidos da prensa e submetidos a carbonatação acelerada.

#### 5.4.2. Cura com carbonatação acelerada em painéis OSB

A cura carbonatada dos painéis OSB-cimento-madeira residual foi realizada de acordo com os procedimentos descritos por Cabral et al. (2018a), com adaptações, e foi realizada em câmara climática (modelo EPL4H, da fabricante Espec Corporation), com concentração de  $CO_2$  de 15% (± 0.6%) e ambiente controlado (temperatura 60 °C e umidade relativa a 80 % (Figura 28 a).

Logo após o alívio da pressão os painéis foram acomodados na câmara climática (Figura 28 b) e mantidos por 12 h. Posteriormente, os painéis foram condicionados a 23 °C  $\pm$  2 °C em ambiente saturado ao ar (ou seja, selados em sacos de plástico) (Figura 28 c) até os 28 dias de idade. Ao final do 28° dia após a produção (Figura 28 d), os materiais foram caracterizados.

Figura 28 - Equipamento e etapas da carbonatação acelerada dos painéis OSB-cimentomadeira residual. (a) câmara de carbonatação (b) OSB-cimento-madeira residual acomodados na câmara (c) OSB-cimento-madeira residual selados em sacos plásticos após carbonatação (d) OSB-cimento-madeira residual com 28 dias de idade



Fonte: Própria Autoria.

#### 5.4.3. Ensaio de envelhecimento acelerado por imersão e secagem

A fim de avaliar a durabilidade dos painéis OSB-cimento-madeira residual não carbonatados e carbonatados foi realizado o ensaio de envelhecimento acelerado por imersão e secagem, com o intuito de simular em condições de exposição dos compósitos a condições climáticas severas, tais como chuva e exposição ao calor. Esta avaliação foi realizada de acordo com a metodologia aplicada e descrita em Cabral, Nakanishi e Fiorelli (2017) baseando-se na normativa européia *EN 494 – Fibre-cement-profiled sheets and fittings for roofing – Products specification and test methods* (1994), em uma câmara automática de envelhecimento acelerado, modelo MA 035, marca Marconi (Figura 29 a)

As amostras de painéis OSB-cimento-madeira residual com 28 dias de idade foram submetidas a 100 ciclos de imersão e secagem e posteriormente foram avaliadas as propriedades físicas, mecânicas e características microestruturais, termogravimétricas e mineralógicas dos compósitos. Cada ciclo é constituído de um período de imersão completa em água a 20 °C por 170 min (Figura 29 b), seguido por um intervalo de 10 min (para evitar o choque térmico), e exposição à temperatura de 60 °C, por igual período de 170 min (Figura 29 c).

Figura 29 – Equipamento e as amostras utilizados no ensaio de envelhecimento acelerado por imersão e secagem: (a) equipamento de imersão e secagem (b) amostras imersas em água (c) amostras em processo de secagem.



Fonte: Própria autoria.

# 5.4.4. Caracterização OSB-cimento-madeira residual carbonatados

# 5.4.4.1. Análise da carbonatação

O efeito do procedimento da cura com carbonatação acelerada nos painéis OSBcimento-madeira residual foi avaliado por meio de três métodos: (i) análise visual com solução de fenolftaleína 2% (ii) termogravimetria (iii) caracterização mineralógica.

# 5.4.4.1.1. Análise visual por fenolftaleína

Para o preparo da solução foram utilizados 98 g de álcool etílico, da marca Dinâmica e 2 g fenolftaleína, da marca Êxodo científica. Convencionalmente a solução de fenolftaleína é

empregada para aferição do pH, visto que a solução, quando em contato com compostos alcalinos, apresenta coloração violeta ou rosa e na presença de compostos com pH neutro é incolor e indicando assim a ocorrência de carbonatação (ALMEIDA et al., 2013).

#### 5.4.4.1.2. Caracterização termogravimétrica e mineralógica

A técnica de termogravimétrica (TG) consiste em um método que relaciona a perda de massa de uma amostra sujeita a uma taxa de aquecimento constante. A derivada dessa curva, em relação à temperatura (DTG), permite determinar as temperaturas limites das reações de decomposição para cada produto formado na matriz cimentícia, logo, por meio da técnica de TG/DTG a quantidade de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio na amostra pode ser estimada.

A análise de TG foi realizada no analisador térmico TG/DSC, Netzch, modelo STA449 F3 Jupiter® operado com atmosfera com nitrogênio (50 mL/min). Parâmetros da análise térmica: de 25 °C a 1000 °C com taxa de aquecimento de 10 °C/min.

Para estimar a quantidade de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio, a partir dos termogramas (TG/DTG) foram realizados os cálculos de estequiométricos utilizando o método de balanço de massa molar, como sugerido por Borges et al. (2010), considerando que 74 g/mol, 44 g/mol, 100 g/mol e 18 g/mol são as massas molares do hidróxido de cálcio, CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono), carbonato de cálcio e da água, respectivamente.

A técnica de difratometria (DRX) foi utilizada para identificar variações decorrentes da carbonatação nas principais fases cristalinas presentes nas amostras dos painéis. A análise de DRX foi realizada em difratômetro Rigaku, modelo MiniFlex 600, Rigaku, operado com os seguintes parâmetros: 40 kV, 15 mA, com radiação Cu-K<sub> $\alpha$ </sub> ( $\lambda = 1,54056$  Å), 2 theta entre 5° e 65° e velocidade de varredura de 10 °/min. A indexação dos produtos de hidratação foi realizada utilizando o *software* Highscore © 3.0, Panalytical. As amostras para as análises de TG/DTG e DRX (28 dias e 100 ciclos) foram preparadas como descrito na seção 5.1.5.2.

# 5.4.4.2. Caracterização térmica

A caracterização térmica dos painéis OSB-cimento-madeira residual carbonatados foi avaliada por meio da condutividade térmica e foi realizada conforme descrito na seção 5.3.2.1.

#### 5.4.4.3. Caracterização física

As propriedades de densidade aparente (DA), inchamento em espessura (IE) e absorção de água (AA) dos painéis OSB-cimento-madeira residual foram determinadas conforme descritas em detalhes na seção 5.2.2.1, de acordo com as recomendações das normativas EN-323 (1993) e EN-317 (1993), respectivamente.

# 5.4.4.4. Caracterização mecânica

Para determinar o módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE), foram realizados ensaios de flexão estática na direção paralela e perpendicular aos *strands*, em três pontos, conforme metodologia descrita em detalhes na seção 5.2.2.2, de acordo com a normativa EN-310 (1993).

Os ensaios de arrancamento de parafuso na superfície e no topo bem como ensaio de adesão interna (AI) foram conduzidos de acordo o com a normativa ABNT NBR 14.810 (2013) e foram realizados conforme descrito em detalhes nas seções 5.3.2.3.2 (arrancamento de parafuso) e 0 (adesão interna). Previamente a realização de todos os ensaios mecânicos, os corpos de prova previamente preparados foram mantidos em câmara com temperatura (23 °C) e umidade (60%) controlada durante 24 h.

#### 5.4.4.5. Caracterização microestrutural

As análises por meio do microscópio eletrônico de varredura (MEV) dos painéis OSBcimento-madeira residual otimizados foram realizadas com auxílio do MEV Philips XL-30 FEG (Figura 30) acoplado com sistema de microanálise química por Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) locado no Laboratório de Caracterização Estrutural do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

O MEV foi utilizado para avaliar a microestrutura dos painéis OSB-cimento-madeira residual otimizados. As amostras foram preparadas com 28 dias e 100 ciclos, de acordo com a metodologia descrita em detalhes na seção 5.2.2.3. Após o processo de lixamento e polimento, as amostras foram metalizadas com ouro por meio do vaporizador modelo Sputter Coater SCD 004 da marca Balzers.

Figura 30 - Fotos do microscópio eletrônico de varredura (MEV) para caracterização microestrutural dos OSB-cimento-madeira residual: (a) MEV Philips XL-30 FEG (b) amostra no porta amostra para realização da análise.



Fonte: Própria autoria.

#### 5.4.5. Analise estatística

Nesta etapa foi realizada um Delineamento em Inteiramente Casualizado (DIC), em um esquema fatorial 2 x 2, correspondendo ao tipo de cura (carbonatado e não carbonatado) e a espécie de madeira (eucalipto e pinus), totalizando 4 tratamentos. Para avaliar o efeito do processo de carbonatação nas propriedades físicas, mecânicas e térmicas dos painéis OSBcimento-madeira residual aos 28 dias de idade e aos 100 ciclos de envelhecimento foi realizada a análise de variância (ANOVA) entre os tratamentos. Apresentando diferença entre os tratamentos foi realizada uma comparação entre as médias com o teste de Tukey ao nível de 5% de significância. Não foi feita a comparação entre os painéis com 28 dias e com 100 ciclos de envelhecimento.

b

# 6. **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### 6.1. Etapa 1: Tratamentos nos *strands* de eucalipto e pinus

#### 6.1.1. Caracterização das madeiras

Na Tabela 10 está apresentada a densidade aparente para ambas as madeiras residuais em estudo de acordo com a norma ABNT NBR 7190:1997 - Projeto de estruturas de madeira. Para a madeira de eucalipto a densidade média encontrada foi de 628 kg/m<sup>3</sup>, já para a madeira de pinus o valor médio encontrado foi de 490 kg/m<sup>3</sup>. Foi observado que a madeira de eucalipto foi significativamente maior que a densidade encontrada para a de pinus (p < 0,05). O que era esperado, visto que o eucalipto pertence ao grupo das *hardwood* e apresenta uma estrutura anatômica relativamente mais complexa, enquanto que o pinus pertence ao grupo das *softwood* e apresenta uma estrutura relativamente menos complexa (CONNERS, 2015).

Eucalipto (kg/m <sup>3</sup> )	Pinus (kg/m³)
628 (88) A	490 (27) B

Tabela 10 – Valores médios e desvio padrão da densidade aparente da madeira em estudo **Eucalipto** (kg/m<sup>3</sup>) **Pinus** (kg/m<sup>3</sup>)

Letras iguais na linha implicam níveis do fator com médias estatisticamente equivalentes ao nível de 0,05 de significância. Fonte: Própria autoria.

Os valores médios de densidade obtidos para a madeira de eucalipto estão próximos aos valores obtidos por Trianoski et al. (2018) e Cabral et al. (2006), que encontraram valores de densidade para a madeira de eucalipto de aproximadamente 590 kg/m<sup>3</sup> 610 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. De maneira similar, valores equivalentes para a madeira de pinus foram obtidos por Souza (2012) que reportou valor médio de densidade para o pinus de 491 kg/m<sup>3</sup>e Macedo et al. (2016) que obtiveram valor médio do *pinus sp.* de 540 kg/m<sup>3</sup>. Estes resultados indicam que as madeiras residuais de eucalipto e pinus a serem empregadas neste estudo estão próximas a literatura de produtos derivados de madeira.

### 6.1.2. Caracterização dos strands

#### 6.1.2.1. Teor de umidade

Os teores de umidade dos *strands* utilizados neste experimento variaram de 4,87% a 7,50% (Tabela 11). A umidade do material vegetal está relacionada com as propriedades mecânicas do painel cimentício, mais especificamente com a interface *strand*-matriz. A umidade é responsável pela variação dimensional da partícula. Com a variação dimensional a aderência *strand*-matriz é deteriorada, devido ao descolamento do *strand* que consequentemente resulta no decréscimo das propriedades mecânicas dos materiais (EVANS, 2002).

Tabela 11 – Valores médios do teor de umidade dos *strands* de acordo com os tratamentos aplicados

upiteddos		
Tratamento	Eucalipto (%)	Pinus (%)
Sem tratamento	5,20	7,50
Água fria	5,17	6,86
Água quente	5,04	4,87
NaOH	5,35	5,44

Fonte: Própria autoria.

Segundo Musokotwane (1982) o teor de umidade do material vegetal tem efeito significativo nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis cimento-madeira, em seu estudo, o autor avaliou partículas (15 mm x 2,5 mm x 1,55 mm) das madeiras *White Spruce (Picea glauca)* e Jack Pine (*Pinus banksiana*) com 5 níveis de umidade (0 - 6%, 8% - 15%, 25% – 30%, 40 - 50% e 60% - 80%) em três proporções madeira: cimento (50%: 50%, 40%: 60% e 33%: 66%). Os resultados mostraram que o aumento da umidade das partículas de 0 - 6% para 60% - 80% resultou em maiores valores para as propriedades físicas (AA e IE) e menores valores para as propriedades mecânicas (MOR, MOE e AI). Ademais, o estudo mostrou não haver diferenças significativas nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis nos níveis de umidade de 0 - 6% e 8% - 15%. Portanto, recomenda-se para a produção de painéis cimento-madeira o uso de partículas de madeira com umidade na faixa de 0 - 15%.

#### 6.1.2.2. Densidade aparente

Na Tabela 12 estão apresentados os valores médios da densidade aparente dos *strands* de eucalipto e pinus. Foi observado que o valor médio da densidade aparente dos *strands* de eucaliptos variou de 342 a 514 kg/m<sup>3</sup>. A densidade média dos *strands* tratados com NaOH de eucalipto foi significativamente maior do que os outros tratamentos (p < 0.05).

Em relação aos *strands* de pinus, foi verificado que a densidade aparente desta espécie variou de 263 a 278 kg/m<sup>3</sup>. No que corresponde aos efeitos dos tratamentos sobre a densidade aparente dos *strands* de pinus, nenhuma alteração significativa resultante dos tratamentos foi constada (p > 0,05).

Tabela 12 – Valores médios e desvio padrão da densidade aparente dos *strands* de acordo com os tratamentos aplicados

Eucalipto (kg/m <sup>3</sup> )	Pinus (kg/m <sup>3</sup> )
366 (69) B	263 (57) *
342 (66) B	277 (59) *
345 (26) B	278 (48) *
514 (68) A	263 (37) *
	Eucalipto (kg/m <sup>3</sup> ) 366 (69) B 342 (66) B 345 (26) B 514 (68) A

Letras iguais na coluna implicam níveis do fator com médias estatisticamente equivalentes ao nível de 0,05 de significância. \* Não houve interação entre os fatores (tipo de tratamento). Fonte: Própria autoria.

Os valores de densidade apresentados pelos *strands* (Tabela 12) são inferiores quando observadas as densidades das madeiras como recebidas (Tabela 10), tal resultado pode estar atrelado à umidade do material, que é um fator que pode interferir nos valores relacionados à densidade de materiais de origem vegetal (GLASS, S., ZELINKA, 2010), uma vez que as madeiras (peças) foram avaliadas quanto ao teor de umidade que foi aproximadamente 12%, enquanto que as avaliações dos *strands* foram realizadas em condição seca.

Resultados semelhantes inerentes ao fator umidade da madeira como consequência na densidade foram encontrados por Abruzzi et al. (2013), que avaliaram a relação entre a densidade e a estrutura anatômica de amostras com diferentes umidades da madeira de eucaliptos.

### 6.1.2.3. Molhabilidade

#### 6.1.2.3.1. Resultados do ensaio de ângulo de contato

Segundo Hubbe et al. (2015) a molhabilidade é definida como a capacidade de um líquido se espalhar ou ser absorvido por um material sólido, como consequência das interações físicas e químicas. Utilizando a técnica de ângulo de contato, pode-se obter um indicativo dos efeitos dos tratamentos na molhabilidade dos *strands*, sendo considerada hidrofílica aquela superfície cujo ângulo formado pela gota for menor que 90° e hidrofóbica se for maior que 90°(YUAN; LEE, 2013). Na Figura 31 estão apresentadas as medidas do ângulo de contato para cada tratamento dos *strands*.

Baseando-se na classificação descrita por Yuan e Lee (2013) sobre os valores de ângulo de contato, foi notado que para os *strands* da madeira de eucalipto sem tratamento e com tratamento de água fria e água quente (Figura 31a) o ângulo de contato foi maior do que 90°, indicando que as superfícies são hidrofóbicas, contudo para os *strands* tratados com NaOH foi observado o valor do ângulo de contato inferior 90°, ou seja os *strands* apresentaram caráter hidrofílico após este tratamento. Por outro lado, para os *strands* de pinus (Figura 31b) foi possível notar o caráter hidrofílico (ângulo < 90°) para todos os tratamentos estudados ao final dos 30 s de medida.

Os resultados encontrados para os *strands* de eucalipto e pinus, estão próximos a aqueles obtidos por César et al. (2011), que avaliou o ângulo de contato de *strands* produzidos a partir das madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus oocarpa* sem tratamento e tratados com água destilada. Os pesquisadores relataram valores de ângulo de contato para a madeira de *Eucalyptus grandis* de 111° (sem tratamento) e 120° (tratado água fria), enquanto que para a madeira de *Pinus oocarpa* os ângulos obtidos foram de 86° (sem tratamento) e 99° (água fria).

Vale ressaltar que o conceito de molhabilidade por meio do ângulo de contato assume como padrão uma superfície lisa e uniforme, isto é, uma situação bastante diferente da encontrada nas superfícies da madeira, que é um material complexo e que possui poros na superfície com diversas dimensões, tais características podem favorecer a absorção da água durante o teste (LIPTÁKOVÁ; KÚDELA, 1994). Além disso, pode ocorrer o fenômeno de histerese, o qual a alta rugosidade superficial da amostra (*strand*) pode influenciar as bordas da gota formando ângulos de contato maiores ou menores que 90° (HUBBE; GARDNER; SHEN, 2015). Sendo assim, faz-se necessária a utilização de técnicas complementares para a

caracterização da molhabilidade dos *strands*, como por exemplo, a absorção de água por imersão cujos resultados serão apresentados a seguir.





Fonte: Própria autoria.

#### 6.1.2.3.2. Absorção de água

A Tabela 13 e a Tabela 14 apresentam os valores médios de absorção de água dos *strands* de eucaliptos e pinus após 2 h e 24 h de imersão em água. Os resultados obtidos para a madeira de eucalipto após 2 h de imersão, mostraram que os valores de absorção de água variaram de 56,75% (sem tratamento) até 157,78% (NaOH). Sendo que, os valores de absorção de água foram significativamente maiores para os *strands* tratados com NaOH (p < 0,05), enquanto que, dentre os demais tratamentos não houve diferenças significativas (p > 0,05), corroborando com os resultados obtidos pelo ângulo de contato, onde apenas o tratamento com NaOH atingiu ângulos inferiores a 90° (Figura 31a).

No entanto, para a madeira de pinus os valores de absorção de água após 2 h de imersão variaram de 113,04% (água quente) a 174,60% (NaOH). Sendo os maiores valores apresentados pelos strands sem tratamento e NaOH e os menores valores para os *strands* tratados com água fria e água quente (p < 0,05).

1	
Eucalipto (%)	Pinus (%)
56.75 (9,36) B	150,37 (36,20) A
70,32 (22,31) B	120,96 (29,57) B
61,89 (13,65) B	113,04 (23,82) B
157,78 (27,32) A	174,60 (41,20) A
	Eucalipto (%) 56.75 (9,36) B 70,32 (22,31) B 61,89 (13,65) B 157,78 (27,32) A

Tabela 13 – Valores médios e os desvios padrão da absorção de água dos *strands* de eucalipto e pinus após 2 h de imersão

Letras iguais na coluna implicam níveis do fator com médias estatisticamente equivalentes ao nível de 0,05 de significância. Fonte: Própria autoria.

Ao comparar os *strands* sem tratamento com os *strands* tratados, foi observado que não houve diferenças significativas entre aqueles sem tratamento comparados aos tratados com NaOH (p > 0,05). Enquanto que, foram constatadas diferenças significativas para os *strands* tratados com água fria, água quente, comparados àqueles sem tratamento (p < 0,05).

Quanto as análises de absorção de água dos *strands* de eucaliptos após 24 h de imersão (Tabela 14), os valores encontrados foram de 91,89% para as amostras sem tratamento, até 186% para as amostras tratadas com NaOH. A análise estatística não demostrou diferenças significativas entre a absorção de água (24 h) dos *strands* sem tratamento com os tratados com

água fria (p > 0,05). Além disso, não foram inferidas diferenças significativas entre os *strands* tratados com água fria e água quente (p > 0,05).

Tabela 14 – Valores médios e os desvios padrão da absorção de água dos *strands* de eucalipto e pinus após 24 h de imersão

Tratamento	Eucalipto (%)	Pinus (%)
Sem tratamento	91,89 (12,17) C	165,09 (37,83) B
Água fria	108,18 (22,22) BC	150,45 (44,66) B
Água quente	114,23 (18,97) B	138,21 (31,77) B
NaOH	186,97 (30,77) A	210,45 (38,68) A

Letras iguais na coluna implicam níveis do fator com médias estatisticamente equivalentes ao nível de 0,05 de significância. Fonte: Própria autoria.

No entanto, para os *strands* tratados com NaOH os valores de absorção de água mostraram-se significativamente superior aos demais tratamentos (p > 0,05). Em relação à propriedade de absorção de água (24 h) dos *strands* de pinus, com exceção ao tratamento com NaOH, diferenças significativas não foram encontradas entre os demais tratamentos (p > 0,05).

# 6.1.2.4. Caracterização química

A Tabela 15 apresenta os teores qualitativos de celulose, hemicelulose e lignina. A composição química das madeiras utilizadas na produção de painéis cimento-madeira tem estreita relação com as propriedades físicas e mecânicas desses materiais, especialmente a celulose, que determina as propriedades mecânicas dos *strands* (THOMAS et al., 2011).

Foi observado que os *strands* de eucalipto apresentaram maior teor de celulose e menor teor de hemicelulose e lignina em comparação aos *strands* de pinus. Para os *strands* de eucalipto foi constatado que os tratamentos (com água fria, água quente e NaOH) resultaram na diminuição do teor de celulose e hemicelulose. Entretanto, para os *strands* de pinus, observouse que o tratamento com água fria reduziu o teor de celulose e lignina, o tratamento com água quente reduziu o teor de lignina e o tratamento com NaOH reduziu o teor de hemicelulose. Devido a metodologia empregada para a análise química (Tabela 15), que consiste em fechar o somatório em 100% alguns dos componentes apresentaram um aumento. Sendo assim, de forma a garantir maior confiabilidade dos resultados foi empregada a análise de FTIR a fim de complementar a análise química.

		Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)
	Sem tratamento	74,64	7,31	11,09
Eurolinto	Água fria	73,03	6,84	13,90
Eucanpto	Água quente	71,23	5,55	15,00
	NaOH	64,44	6,88	17,00
	Sem tratamento	52,63	12,57	25,62
D:	Água fria	49,53	12,90	23,53
Fillus	Água quente	53,51	13,17	24,83
	NaOH	53,80	10,97	25,79

Tabela 15 – Composição química dos strands de eucalipto e pinus

Fonte: Própria Autoria

A Figura 32 apresenta os espectros obtidos por meio das amostras dos *strands* de eucalipto e pinus (não tratados e tratados) com as bandas de absorção de grupos funcionais características das madeiras: celulose, hemicelulose, lignina e extrativos. Entre todas as bandas e picos de absorção, na banda da região entre 1020–1030 cm<sup>-1</sup> é possível observar vibrações de estiramento da ligação C–O pertencente à celulose e lignina (RODRIGUES et al., 2015). Bem como, a banda entre 1500–1600 cm<sup>-1</sup> correspondente às vibrações do esqueleto aromático referente a lignina (MORÁN et al., 2008).

Outras bandas podem ser identificadas: (I) banda próxima a 1740 cm<sup>-1</sup> correspondente as vibrações de estiramento de grupos carboxílicos (C=O), encontrados nos ácidos e ésteres dos ácidos acético, p-cumérico, ferúlico e urônico, constituintes dos extrativos e principalmente da hemicelulose (GUIMARÃES et al., 2009; SAIN; PANTHAPULAKKAL, 2006); (II) banda de absorção na região 2900 cm<sup>-1</sup> representada pela vibração de estiramento de celulose e hemicelulose (GUIMARÃES et al., 2009); (III) banda a aproximadamente 3300 cm<sup>-1</sup> que se refere à vibração de estiramento dos grupos hidroxilo das moléculas de celulose (OH et al., 2005; POLETTO; ORNAGHI JÚNIOR; ZATTERA, 2014).

Pode ser observado que os *strands* não tratados de eucalipto e pinus apresentaram maior intensidade nas bandas referentes a hemicelulose, a lignina e aos extrativos do que nas medidas realizadas dos *strands* tratados, o que confirma que os tratamentos reduziram estes

componentes nos materiais. No entanto, do mesmo modo que os tratamentos removeram componentes indesejáveis para a hidratação do cimento Portland (hemicelulose e extrativos), é notado que os tratamentos também resultaram na diminuição da banda referente a celulose, componente que confere resistência mecânica ao material de origem vegetal.



Figura 32 - Espectros de infravermelho FTIR: (a) eucalipto (b) pinus

#### 6.1.2.5. Caracterização microestrutural

## 6.1.2.5.1. Termogravimetria

Na Figura 33 são apresentadas as derivadas dos termogramas (DTG) dos *strands* de eucalipto (a) e de pinus (b), que foram conduzidas com o intuito de avaliar alterações na estabilidade térmica dos materiais em virtude dos tratamentos.

A primeira perda de massa evidente está na faixa de temperatura entre 25 °C – 100 °C, relacionada à perda de água dos *strands* (MARTIN et al., 2010). A decomposição dos componentes estruturais dos *strands* em função da temperatura começa por volta dos 200 °C com a degradação da hemicelulose, que apresenta estrutura ramificada, amorfa e com baixo grau de polimerização, seguida pela degradação da celulose amorfa e cristalina (OLIVEIRA et al., 2017).

De acordo Sanchez-Silva et al. (2012), a celulose apresenta faixa de degradação entre 290 – 390 °C, visto que é uma estrutura semicristalina, com alto grau de polimerização, composta por ligações de hidrogênio intra e intermoleculares. No entanto, a lignina, por apresentar uma estrutura complexa, interligada e ramificada, apresenta ampla faixa de decomposição térmica (200 °C – 700 °C) (GALINA et al., 2018).

É visto que os tratamentos nos *strands* de ambas as madeiras, com exceção àquelas submetidas ao tratamento NaOH, não resultaram em mudanças significativas no perfil dos termogramas. Por meio dos termogramas apresentados na Figura 33, observou-se que a decomposição térmica da maior fração dos componentes químicos dos *strands* de eucalipto e de pinus ocorreram entre 200 °C e 400 °C, indicando potencialmente que os materiais em estudo apresentam maior fração de hemicelulose e celulose.



Figura 33 – Análise diferencial termogravimétrica (DTG): (A) Eucalipto (B) Pinus

6.1.2.5.2. Difratometria de raios X (DRX)

A Figura 34 apresenta os difratogramas obtidos dos *strands* não tratados e tratados de eucalipto e pinus. Foi observado que os difratogramas em estudo apresentam picos

característicos e largos, assim como uma linha base (*background*) elevada de estrutura semicristalina de materiais de origem vegetal (LABIDI et al., 2019).





Para o cálculo do índice de cristalinidade (IC) foram observados dois principais picos representados em: (I) ângulo de difração (20) 18° referente a fração não cristalina da madeira (hemicelulose e lignina) e (II) ângulo de difração (20) 22° referente a fração cristalina da madeira, referente aos anéis glicosídeos da estrutura celulósica (GONÇALVES et al., 2015). As setas de cor preta indicam as regiões de intensidade de difração mínima e máxima utilizadas para o cálculo do IC (Equação (4).

O IC da celulose é um parâmetro utilizado para estimar a porção cristalina da celulose em relação a estrutura total. Sendo este um indicador importante da estrutura interna e das propriedades físicas e mecânicas do material vegetal (AGARWAL et al., 2018; GÜMÜSKAYA; USTA; KIRCI, 2003; POLETTO; ORNAGHI JÚNIOR; ZATTERA, 2014). Portanto, a caracterização do índice de cristalinidade dos *strands* pode auxiliar a uma melhor compreensão entre a estrutura interna das *strands* e suas propriedades. Os percentuais calculados do IC são listados na Tabela 16.

O IC para as amostras dos *strands* de eucalipto ficou entre 54% e 59% sendo os menores índices obtidos pelos tratamentos com água fria e água quente e o maior pelo tratamento com NaOH. Para os *strands* de pinus os percentuais de IC obtidos foram de 51% a 46% sendo o maior valor para o tratamento com NaOH, enquanto o menor valor foi visto para o tratamento com água fria.

Tratamento	Eucalipto	Pinus
	IC (%)	IC (%)
Sem tratamento	58	50
Água fria	54	46
Água quente	54	50
NaOH	59	51

Tabela 16 – Índice de cristalinidade dos *strands* de eucalipto e pinus de acordo com os respectivos tratamentos aplicados

Fonte: Própria autoria.

Uma das razões para o ligeiro aumento na cristalinidade do material vegetal para ambas as madeiras (eucalipto e pinus) tratadas NaOH, está relacionada a remoção parcial da estrutura amorfa da celulose, hemicelulose e lignina. A remoção da porção amorfa do material vegetal promove o empacotamento das cadeias de celulose e consequentemente, o aumento da cristalinidade (ROY et al., 2012; SINHA; ROUT, 2008). Para os *strands* de pinus, o tratamento com água quente também propiciou tal efeito, corroborando com os resultados encontrados na análise estrutural, apresentados na Tabela 15, onde foi constada a redução nos teores da porção amorfa (hemicelulose) da madeira e na Figura 32, referente ao FTIR, onde foram observadas reduções nas bandas características da hemicelulose, celulose e lignina.

## 6.1.2.5.3. Caracterização morfológica

### 6.1.2.5.3.1. Microscopia eletrônica de varredura

Neste item estão apresentadas as micrografias representativas (MEV) da superfície dos *strands* de eucalipto (Figura 35) e dos *strands* de pinus (Figura 36) obtidas a partir de uma população de 30 micrografias para cada tratamento. Resultados semelhantes foram observados por diversos estudos (CHOUDHURY; KUMAR; ADHIKARI, 2007; RAHMAN; KHAN, 2007; ROSA et al., 2009), que relataram que tratamentos, tais como aqueles utilizando água quente e NaOH resultaram em uma maior quantidade de celulose exposta na superfície da madeira.

Por meio das micrografias de MEV dos *strands* de eucalipto (Figura 35) foram observadas as estruturas anatômicas identificadas como, poros transversais e fibras (CONNERS, 2015; LUBE, 2016), sendo possível identificar também que parte da parede das fibras encontra-se danificada. E estes danos foram ocasionados provavelmente durante o processo de produção dos *strands*. Nota-se que os tratamentos com água fria e água quente causaram um "encurvamento" nas paredes superficiais danificadas das fibras, possivelmente devido ao processo de molhagem e secagem da madeira.

Contudo, ao avaliar as micrografias de MEV dos *strands* de eucalipto NaOH, observase que as características superficiais são bem diferentes daquelas do *strand* sem tratamento. É possível notar que o tratamento com NaOH "limpou" a superfície do *strand*, além disso, é notado que houve o descolamento das fibras da parede do *strand* devido a remoção parcial da hemicelulose e das impurezas superficiais, tais como os extrativos.

Essa remoção pode ser mais um indicativo do alinhamento e empacotamento da celulose cristalina ao longo do eixo das fibrilas, o rearranjo da celulose cristalina, encontrado como discutido na literatura, corroborando com o aumento significativo da densidade do *strands* apresentado na Tabela 12 (GODA et al., 2006; JÄHN et al., 2002). Como também, este efeito

provavelmente explica os resultados mecânicos de tração do *strand* submetido ao tratamento NaOH terem sido próximos aos dos *strands* sem tratamento (Tabela 18).

Figura 35 – Micrografias dos *strands* de eucalipto submetidos aos tratamentos: (a) sem tratamento; (b) água fria; (c) água quente; (d) NaOH



Fonte: Própria autoria.

As micrografias de MEV dos *strands* de pinus são ilustradas na Figura 36. Foi possível identificar as principais estruturas anatômicas da madeira de pinus: traqueídeos e canal de resina transversal (CONNERS, 2015; LUBE, 2016). Como ocorreu com os *strands* de eucalipto, observa-se o mesmo com os de pinus em que os tratamentos danificaram as células de traqueídeos, sendo os tratamentos com água quente e NaOH foram mais severos.

Os danos provavelmente contribuíram para diminuição da resistência a ruptura obtida do ensaio mecânico de tração (Tabela 18). Pode ser visto que os tratamentos com água quente e NaOH resultaram em descolamento das fibras junto a parede dos *strands*, bem como a ruptura

das fibras na orientação longitudinal. Resultados semelhantes foram observados por diversos estudos (CHOUDHURY; KUMAR; ADHIKARI, 2007; RAHMAN; KHAN, 2007; ROSA et al., 2009), que relataram que tratamentos, tais como aqueles utilizando água quente e NaOH resultaram em uma maior quantidade de celulose exposta na superfície da madeira.

Figura 36 - Micrografias dos *strands* de pinus submetidos aos tratamentos: (a) sem tratamento; (b) água fria; (c) água quente; (d) NaOH



Fonte: Própria autoria.

# 6.1.2.5.3.2. Microscópio de Varredura Confocal a Laser

A Tabela 17 descreve os valores médios da rugosidade superficial (Sa, média aritmética da rugosidade tridimensional) dos *strands* de eucalipto e pinus obtidas pela análise superficial por meio do Microscópio de Varredura Confocal a Laser (MVCL). Foi observado que em

ambos os *strands* (eucalipto e pinus) não houve diferenças das médias de rugosidade superficial entre as amostras tratadas, devido à alta dispersão de valores (p > 0,05).

Tratamento	Eucalipto	Pinus	
	Sa (µm)	Sa (µm)	
Sem tratamento	10,59 (2,66) A	18,03 (7,00) A	
Água fria	7,70 (0,77) A	16, 03 (6,20) A	
Água quente	16,53 (2,89) A	12,40 (0,43) A	
NaOH	18,28 (15,18) A	12,50 (4,5) A	

Tabela 17 - Valores médios e desvios padrão da rugosidade superficial (Sa) dos strands

Letras maiúsculas iguais na coluna implicam níveis do fator com médias estatisticamente equivalentes ao nível de 0,05 de significância. Fonte: Própria autoria.

A complexidade da superfície destes materiais é parte da explicação para não haver diferença estatística nos resultados de rugosidades listados na Tabela 17. A Figura 37 ilustra o quão são complexas e irregulares as superfícies dos *strands*, que demonstra como o fenômeno de histerese pode ter contribuído com os dados de ângulo de contato, na avaliação da molhabilidade (Figura 31).



Figura 37 - Imagens topográficas de superfície dos strands de eucalipto (a) e pinus (b)

#### 6.1.2.6. Caracterização mecânica

A Tabela 18 apresenta os valores médios da tensão de ruptura ( $\sigma$ ) dos *strands* de eucalipto e pinus obtidos pelo ensaio de tração. Para os *strands* de eucaliptos os valores médios de tensão de ruptura indicaram que não houve mudança estrutural nos materiais após os tratamentos, visto que não foi observada diferença estatística significativa entre as médias (p > 0,05).

Para os *strands* de pinus, as amostras tratadas com água fria não apresentaram diferenças significativas ao ser comparadas com as amostras sem tratamento (p > 0,05). No entanto, os valores médios apresentados de tensão de ruptura dos *strands* tratados com água quente e NaOH indicaram que houve mudança estrutural nos materiais após os tratamentos, visto que foi observada uma redução significativa das médias destas amostras ao serem comparadas com as amostras sem tratamento (p < 0,05).

Tratamento	Eucalipto	Pinus
	σ (MPa)	σ (MPa)
Sem tratamento	32,52 (10, 84) *	21,29 (2,98) A
Água fria	22, 43 (8,09) *	20,41 (3,49) A
Água quente	22, 82 (6,84) *	13,21 (3,67) B
NaOH	32,68 (7,00) *	15,12 (2,12) B

Tabela 18 – Valores médios e os respectivos desvios padrão da tensão de ruptura (σ) dos strands de eucalipto e pinus

Letras iguais na coluna implicam níveis do fator com médias estatisticamente equivalentes ao nível de 0,05 de significância. \* Não houve interação entre os fatores (tipo de tratamento). Fonte: Própria autoria

Uma hipótese para explicar o resultado previamente mencionado pode estar atrelada a remoção da lignina conforme foi indicado pela análise estrutural (6.1.2.4), pois de acordo com Johansson (JOHANSSON, 2008), a resistência mecânica da madeira pode ser diminuída conforme há a redução no teor de lignina, uma vez que o conjunto microfibrilas de celulose e lignina permitem a distribuição de carga entre elas (SWEET; WINANDY, 1999), portanto a redução de lignina diminui a possibilidade de distribuir a carga ocasionando assim uma menor resistência a ruptura do material.



.02 0.03 0.04 0.05 0.00 0.07 0.08 Deformação Esp. (mm/mm)

Fonte: Própria autoria

Todavia, embora a lignina assuma papel importante nas propriedades mecânicas da madeira, a literatura estabelece que o desempenho mecânico destes materiais é determinado principalmente pelo teor de celulose e pela inclinação do ângulo das microfibrilas presentes nas camadas que compõem o feixe fibroso (PIETAK et al., 2007; XU, 2010).

Observando-se o comportamento mecânico dos *strands* durante o ensaio de tração, ou seja, as curvas típicas (Figura 38), sugere que os tratamentos resultaram no decréscimo da capacidade de deformação. E isto está relacionado com a remoção parcial da celulose e lignina dos *strands*, corroborando com os resultados obtidos pelas análises estruturais. É observado também que o comportamento mecânico das amostras tratadas apresentou ruptura abrupta, diferente dos *strands* sem tratamento, possivelmente, isso se deva a diminuição da distribuição de carga entre as microfibrilas de celulose e a lignina (SWEET; WINANDY, 1999).

## 6.1.3. Efeito dos strands na hidratação do cimento

#### 6.1.3.1. Resistência à compressão

A Tabela 19 apresenta a tensão máxima de ruptura (TMax) das amostras com 28 dias dos compósitos obtidos através do ensaio de resistência a compressão axial. Por meio do teste de Tukey ao nível de 0,05 de significância, percebe-se que o TMax dos compósitos produzidos utilizando os *strands* de eucalipto não apresentaram diferenças estatísticas significativas entre as amostras sem tratamento comparadas as amostras produzidas somente com cimento Portland (controle). Contudo, a comparação entre as médias mostrou que os compósitos produzidos com *strands* sem e com tratamentos apresentaram valores de TMax significativamente diferente estatisticamente. Nota-se que a comparação entre os materiais fabricados com *strands* tratados com água fria, água quente e NaOH não apresentou diferença estatística (p < 0,05).

Por outro lado, para os compósitos contendo *strands* de pinus, foi constatado não haver diferenças estatísticas significativas entre os valores de TMax encontrados para as amostras sem tratamento em comparação aos materiais fabricados com *strands* tratados com água fria, água quente e NaOH (p > 0,05). Entretanto, a comparação entre as médias mostrou que os valores de TMax dos compósitos produzidos com *strands* de pinus foram significativamente inferiores em comparação aos compósitos de cimento Portland (controle) (p < 0,05).

Tratamento	Eucalipto	Pinus
-	TMax (MPa)	TMax (MPa)
Sem tratamento	22,80 (4,13) A	14,84 (4,08) B
Água fria	19,34 (3,57) B	13,84 (0,83) B
Água quente	13,10 (3,90) B	8,13 (1,74) B
NaOH 2,5%	13,80 (7,90) B	8,87 (0,54) B
Cimento	34,66 (5,00) A	34,66 (5,00) A

Tabela 19 – Valores médios e desvios padrão da tensão máxima (TMax) obtida do ensaio de compressão axial aos 28 dias

Letras maiúsculas iguais na coluna implicam níveis do fator com médias estatisticamente equivalentes ao nível de 0,05 de significância. Fonte: Própria autoria.

Os resultados apresentados nesta seção podem ser explicados devido a geometria dos *strands*, pois, de acordo com Latorraca (2000), o efeito da madeira na hidratação do cimento Portland é fortemente influenciado pela geometria das partículas de madeira. Segundo o pesquisador, existe uma relação quase que linear entre a dimensão das partículas e o efeito na hidratação. Ou seja, à medida que se diminui o tamanho da partícula de madeira o efeito desta na hidratação do cimento se torna maior devido a maior área superficial. Sendo assim, devido ao uso das partículas com maior dimensão (*strands*) em comparação a àquelas usualmente utilizadas em painéis cimento-madeira (por volta de 4 mm x 4 mm), o efeito dos *strands* na hidratação do cimento não foi tão pronunciado.

# 6.1.3.2. Termogravimetria (TG) e difratometria de raios X (DRX)

A Figura 39 ilustra os termogramas de TG/DTG das amostras extraídas dos compósitos com 28 dias com *strands* de eucalipto (a) e pinus (b), em que é possível identificar três picos principais. No primeiro pico (ao redor de 100 °C – 150 °C), é possível identificar por volta de 100 °C a ocorrência de desidratação do silicato de cálcio hidratado (CSH) (ROSTAMI et al., 2012) e por volta de 140 °C a decomposição da etringita (TAYLOR, 1998).
Figura 39 – Termogramas de TG/DTG das amostras extraídas dos corpos de prova cilíndricos com 28 dias de eucalipto (a) e pinus (b)



Ainda no primeiro pico, foi observada uma maior intensidade para as amostras com *strands* em comparação à amostra apenas com cimento, e uma hipótese para este resultado pode estar atrelada ao processo de umedecimento prévio dos *strands*, que liberou água gradativamente durante a análise térmica. No segundo pico, entre 400 °C – 500 °C ocorreu a decomposição térmica do hidróxido de cálcio. No terceiro pico entre 600 °C – 700 °C ocorre a decomposição do carbonato de cálcio (ALMEIDA et al., 2013). Para segundo e terceiro pico foi observado que o perfil das curvas para as amostras com *strands* foram similares ao perfil da amostra de cimento Portland (controle) para ambas as madeiras (Figura 39).

A Figura 40 apresenta os difratogramas (DRX) das amostras extraídas dos compósitos com 28 dias com *strands* de eucalipto (a) e pinus (b). Na identificação das fases cristalinas, notou-se para todas as amostras a presença de presença de etringita, hidróxido de cálcio, calcita, alita e belita. Além disso, os difratogramas das amostras extraídos dos compósitos contendo *strands* foram semelhantes ao difratograma da amostra de cimento Portland (controle).

No que diz respeito a formação dos produtos de hidratação do cimento aos 28 dias de idade, analisando os perfis dos termogramas (Figura 39) e dos difratogramas (Figura 40) foi identificado que os *strands* e os tratamentos nos *strands* não provocaram diferenças expressivas na formação desses produtos.



Ca

CH

25

30

2-theta

35

40

45

50

Et

10

5

Et

15

20

сн сн

Ca

55

60





Et = Etringita; CH = Hidróxido de cálcio; Ca = Calcita; C3S = Alita; C2S = Belita Fonte: Própria autoria.

## 6.1.4. Considerações parciais da etapa 1

Devido à falta de literatura até o presente momento no que se refere ao efeito dos *strands* na hidratação do cimento Portland, visando posterior aplicação em painéis OSB cimento madeira, esta avaliação inicial foi de grande valia para o andamento do trabalho. Assim sendo, foi possível concluir a partir desta etapa:

- O tratamento com NaOH nos *strands* de eucalipto resultaram no aumento da densidade do *strand* (510 kg/m<sup>3</sup>) ao compará-lo ao sem tratamento (360 kg/m<sup>3</sup>), como pode ser observado pelas imagens de MEV, onde foi notado que o tratamento com NaOH "limpou" a superfície da partícula, bem como, densificou a superfície do *strand*, o mesmo efeito não aconteceu com os outros tratamentos aplicados nos *strands* de eucalipto e também nos *strands* de pinus.
- Os *strands* de eucalipto apresentaram superfície com caráter hidrofóbico, com exceção aos *strands* tratados com NaOH, que apresentaram caráter hidrofílico, apresentando os maiores valores de absorção de água após 24 h (286%). Já os *strands* de pinus apresentaram uma superfície com caráter hidrofílico. Isso pode ter sido influenciado pelo fenômeno da histerese, causado pela irregularidade na superfície dos *strands*, como mostrado pela análise de rugosidade por meio da técnica de MVCL.
- Os strands de eucalipto apresentaram maior teor de celulose e menor teor de hemicelulose e lignina em comparação aos strands de pinus. Para os strands de eucalipto foi constatado que os tratamentos (com água fria, água quente e NaOH) resultaram na diminuição do teor de celulose e hemicelulose. Entretanto, para os strands de pinus, observou-se que o tratamento com água fria reduziu o teor de celulose e lignina. O tratamento com água quente reduziu o teor de lignina e o tratamento com NaOH reduziu o teor de hemicelulose. Sendo que essa remoção nos strands tratados com NaOH resultou no aumento do índice de cristalinidade (IC), provavelmente, ocorreu o empacotamento das cadeias de celulose após a remoção da porção amorfa do material vegetal. Além disso, pode-se observar pela análise de FTIR a redução das bandas referentes aos extrativos nos strands tratados.
- Apesar da remoção de parte dos componentes químicos dos *strands*, não houve diferença nas propriedades mecânicas de tração dos *strands* de eucalipto mesmo após os tratamentos, no entanto, foi observado que para os *strands* de pinus houve uma redução significativa quando aplicado os tratamentos de água quente e NaOH. Por meio

desta análise, constatou-se que após os tratamentos, para ambas as madeiras os *strands* apresentaram um comportamento de ruptura abrupta.

Ao avaliar o efeito dos *strands* na hidratação do cimento Portland, contatou-se que para os *strands* de eucalipto o uso de tratamentos resultou em menores propriedades mecânicas na compressão axial, já para os *strands* de pinus não houve diferença. No que diz respeito aos efeitos dos tratamentos na formação dos produtos de hidratação do cimento Portland aos 28 dias de idade, pela análise de termogravimetria e de difratometria de raios X foi identificado que os tratamentos nos *strands* não resultaram em diferenças expressivas nos produtos de hidratação.

Assim sendo, a aplicação dos tratamentos com água fria, água quente e NaOH não resultaram em melhores propriedades mecânicas dos próprios *strands*, pelo ensaio de tração direta, nem resultou em uma diferença no processo de hidratação do cimento. Portanto, para as próximas etapas de produção dos painéis, optou-se por utilizar os *strands* sem tratamento.

## 6.2. Etapa 2: Determinação do teor ótimo de strands de madeira para painéis

Nesta etapa estão apresentados os resultados dos testes iniciais dos painéis produzidos com os *strands* orientados (OSB-cimento-madeira residual) e não orientados, contendo os teores 25%, 30%, e 35% de *strands*. De acordo com os resultados obtidos da etapa 1, os *strands* sem tratamento para ambas as espécies de madeira (eucalipto e pinus) foram adotados na produção dos painéis. Nesta etapa foram avaliados os fatores tais como orientação e teor dos *strands*. A comparação entre as espécies (eucalipto versus pinus) não foi realizada.

#### 6.2.1. Propriedades físicas

A Tabela 20 lista os valores médios e desvios padrão da densidade aparente (DA) dos painéis OSB-cimento-madeira residual e não orientados, produzidos com 25%, 30% e 35% de madeira. Os resultados (p > 0,05) mostraram que não houve interação entre os fatores, teor e orientação dos *strands* e que a avaliação de cada fator também não apresentou diferença estatística significativa (p > 0,05). Isso demonstra que o processo produtivo e os parâmetros adotados conseguiram manter a DA em torno de um valor próximo para todos os painéis, visto que essa propriedade influencia o comportamento das propriedades físicas e mecânicas.

	Densidade aparente (kg/m <sup>3</sup> )			
Teor	Eucalipto       OSB     Não orientado		P	inus
			OSB	Não orientado
25%	1623 (326) *	1538 (109) *	1588 (90) *	1624 (44) *
30%	1513 (373) *	1631 (233) *	1582 (286) *	1602 (125) *
35%	1765 (116) *	1438 (138) *	1628 (110) *	1551 (182) *

Tabela 20 – Valores médios e desvios padrão da densidade aparente dos painéis OSBcimento-madeira residual e painéis não orientados

\* Não houve interação entre os fatores (teor e orientação dos strands). Fonte: Própria autoria.

Contudo, foi observado que a DA dos painéis ficaram acima da densidade planejada inicialmente no processo de produção de 1250 kg/m<sup>3</sup>. A principal razão para esta diferença pode ser explicada pela água não evaporável (Wn), retida no material sólido, ou seja, o constituinte do material sólido, grupos de água e hidroxila presentes no composto de cimento hidratado, que podem ser removidos apenas em determinadas condições: baixa umidade relativa ou altas temperaturas (WANG et al., 2018).

De acordo com Lam, Wong, Poon (2000) a hidratação de 1 g de cimento anidro produz 0,23 g de Wn, ou seja, 23% da água está sendo retida, no entanto, os pesquisadores constaram um aumento do Wn valor com um aumento na relação água/cimento e a idade dos materiais. Sendo assim, para os painéis avaliados nesta etapa, foi visto um aumento de aproximadamente 30% na densidade aparente dos painéis, correspondente ao Wn, que não foi considerado nos parâmetros produtivos.

A Tabela 21 apresenta os valores médios e desvios padrão do inchamento em espessura (IE) após 24 h em água dos painéis OSB-cimento-madeira residual e não orientados, produzidos com teores de 25%, 30% e 35% de madeira. Nos painéis de eucalipto foi observada a interação entre os fatores (teor e orientação dos *strands*) (p < 0.05).

Os painéis OSB-cimento-madeira residual de eucalipto, produzidos com 25% de madeira, apresentaram valores significativamente menores de IE quando comparados com os outros dois teores (30% e 35%) de madeira (p < 0,05). Além disso, observou-se que a orientação dos *strands* de eucalipto promoveu maiores valores de IE ao compara-los com os painéis não orientados. Provavelmente não orientar os *strands* de eucalipto reduziu a formação das tensões internadas durante o processo de prensagem (MENDES, 2011a).

	Inchamento em espessura (%)			
Teor	Eucalipto		Pinus	
	OSB	Não orientado	OSB	Não orientado
25%	0,98 (0,47) Ba	0,44 (0,11) Ab	2,18 (1,87) *	3,04 (1,96) *
30%	1,93 (0,81) Aa	0,42 (0,36) Ab	2,14 (0,73) *	3,67 (0,44) *
35%	2,04 (0,35) Aa	0,46(0,31) Ab	2,11 (0,70) *	3,67 (1,31) *
Média			2,15 (1,27) B	3,43 (1,37) A

Tabela 21 – Valores médios e desvios padrão do inchamento em espessura após 24 h imersos dos painéis o OSB-cimento-madeira residual e não orientados

Letras maiúsculas iguais na coluna e letras minúsculas iguais na linha implicam níveis do fator com médias estatisticamente equivalentes ao nível de 0,05 de significância. \* Não houve interação entre os fatores (teor e orientação dos *strands*). Fonte: Própria autoria.

Todavia para os painéis produzidos com pinus, os resultados mostraram que não houve interação entre os fatores (teor e orientação dos *strands*) (p > 0,05), apresentando apenas diferença ao avaliar o fator orientação do *strand* isoladamente, ou seja, a orientação dos *strands* para a produção dos painéis de pinus reduziu o percentual de IE, comportamento contrário ao observado nos painéis de eucalipto, provavelmente isto se deve as características da própria madeira de pinus, que apresenta a menor densidade.

Os maiores valores de IE dos painéis de pinus em relação ao eucalipto podem estar relacionados ao maior volume de madeira em decorrência da menor densidade do pinus, resultando em maiores tensões internas no painel (MENDES, 2011a). Foi observado que somente os painéis não orientados de eucalipto e o painel OSB-cimento-madeira residual com 25% de eucalipto apresentaram valores inferiores aos requeridos pela normativa de painéis cimento-madeira ISO 8335 (STANDARDIZATION, 1987), que estabelece valores máximos de 1,8% para o IE após 24 h indicando o melhor desempenho físico deste painel. Entretanto, os valores de IE encontrados para todos os painéis OSB-cimento-madeira residual avaliados são muito inferiores ao valor mínimo requerido pela EN300: 2006 para os painéis OSB/1, que estabelece valor máximo de IE de 25% após 24 h de imersão em água.

A Tabela 22 apresenta os valores médios e desvios padrão da absorção de água (AA) após 24 h em água dos painéis OSB-cimento-madeira residual e não orientados, produzidos com teores de 25%, 30% e 35% de madeira. Para ambas as madeiras em estudo, os valores de AA mostraram que não houve interação entre os fatores (teor e orientação dos *strands*) (p >

0,05). No entanto, ao avaliar o fator orientação dos *strands* isoladamente, foi constatado diferenças significativas para ambas as madeiras, ou seja, os *strands* orientados promoveram um valor de AA maior do que os painéis com os *strands* não orientados (p < 0,05). Provavelmente, a orientação promoveu maior espaços vazios e poros no painel, causado pelo aumento da espessura final do painel, também chamado efeito mola (*spring efect*), isto é, aumento da espessura após ser aliviada a pressão do painel (NAKANISHI et al., 2018). Pois, provavelmente a pressão adotada para a produção dos painéis não foi suficiente para manter o material coeso.

	Absorção de água (%)			
Teor	Euca	alipto	Pi	nus
	OSB	Não orientado	OSB	Não orientado
25%	14,28 (5,48) *	5,68 (1,38) *	15,72 (5,21) *	7,60 (1,26) *
30%	14,21 (5,29) *	6,39 (1,19) *	15,23 (3,96) *	6,35 (1,28) *
35%	15, 44 (2,51) *	6,19 (2,08) *	20,16 (8,64) *	6,05 (1,14) *
Média	14,65 (4,46) A	6,08 (1,53) B	16,69 (6,03) A	6,72 (1,34) B

Tabela 22 – Valores médios e desvio padrão da absorção de água dos painéis OSB-cimentomadeira residual e não orientados

Letras iguais na linha implicam níveis do fator com médias estatisticamente equivalentes ao nível de 0,05 de significância. \* Não houve interação entre os fatores (teor e orientação dos *strands*) Fonte: Própria autoria.

Os valores para as propriedades físicas avaliadas nesta etapa estão próximos aos painéis cimento-madeira produzidos com três camadas utilizando papel reciclado e serragem (*Triplochiton scleroxylon*) avaliados por Fuwape et al. (2007), os quais os pesquisadores obtiveram valores médios de IE variando de 4,38% a 12,13%, enquanto que os valores de AA variaram de 18,18% a 40,49% após 24 h. Além disso, os valores médios de absorção de água, apresentados na Tabela 22 estão próximos da faixa de 15% a 22%, encontrada por Latorraca (2000) para painéis cimento-madeira produzidos com quatro espécies de eucalipto (*E. pellita, E. robusta, E. urophylla e E. citríodora*) e Iwakiri e Prata (2008) para painéis cimento-madeira produzidos com eucalipto (*E. grandis e E. dunnii*) e pinus (*P. taeda*). Além disso,

#### 6.2.2. Propriedades mecânicas

A Tabela 23 apresenta os valores médios e desvios padrão do módulo de ruptura (MOR), obtidos no ensaio de flexão, dos painéis manufaturados com eucalipto. O MOR das amostras dos painéis OSB-cimento-madeira residual testadas na direção paralela do *strand* foi significativamente superior às amostras do OSB testadas na direção perpendicular do *strand* bem como das amostras dos painéis com *strands* não orientados (p< 0,05).

Entretanto, ao comparar o MOR das amostras na direção perpendicular do *strand* com os valores do MOR das amostras com *strands* não orientados não foram observadas diferenças estatísticas significativas, conforme apresentado na Tabela 23 (p > 0.05).

	Módu	Módulo de ruptura (MPa)		
Teor	OSB – na direção paralela	OSB – na direção	Não orientado	
	do strand	perpendicular do strand	Nao orientado	
25%	9,38 (3,00) Ba	6,23 (2,80) Ab	4,96 (1,48) Ab	
30%	13, 09 (3,70) ABa	5,64 (2,60) Ab	5,72 (0,61) Ab	
35%	14,99 (4,34) Aa	4,83 (2,90) Ab	4,28 (0,91) Ab	

Tabela 23 – Valores médios e desvio padrão do módulo de ruptura dos painéis de eucalipto

Letras maiúsculas iguais na coluna e letras minúsculas iguais na linha implicam níveis do fator com médias estatisticamente equivalentes ao nível de 0,05 de significância. Fonte: Própria autoria.

Em relação ao MOR, a avaliação do teor de *strands* das amostras testadas na direção paralela mostrou que os painéis com teor de 30% e 35% de strands foram significativamente superior que os painéis com 25% (p < 0,05), contudo, teor de *strands* não apresentou diferença significativa ao avaliar o painel OSB-cimento-madeira residual testado na direção perpendicular do *strand* e o painel com *strands* não orientado (p > 0,05).

Na Tabela 24 estão apresentados os valores médios e desvios padrão do MOR dos painéis manufaturados com pinus obtidos no ensaio de flexão. Foi observado que não houve interação entre os fatores (teor e orientação do *strand*). No entanto, somente foram encontradas diferenças significativas no fator orientação dos *strands* (p < 0.05).

	Módulo de ruptura (MPa)			
Teor	OSB – na direção paralela do <i>strand</i>	OSB - na direção perpendicular do <i>strand</i>	Não orientado	
25%	8,92 (3,82) *	4,15 (2,10) *	2,68 (0,35) *	
30%	9,12 (0,70) *	4,50 (2,06) *	1,27 (0,63) *	
35%	9,77 (1,41) *	4,94 (1,73) *	1,72 (0,76) *	
Média	9,25 (2,15) A	4,52 (1,18) B	1,89 (0,83) C	

Tabela 24 - Valores médios e desvio padrão do módulo de ruptura dos painéis de pinus

Letras iguais na linha implicam níveis do fator com médias estatisticamente equivalentes ao nível de 0,05 de significância. \* Não houve interação entre os fatores (teor e orientação dos *strands*). Fonte: Própria autoria.

O MOR dos painéis OSB-cimento-madeira residual de pinus testados na direção paralela do *strand* foi significativamente superior em relação demais amostras (na direção perpendicular do *strand* e não orientados). Enquanto que os valores de MOR obtidos pelos painéis OSB-cimento-madeira residual na direção perpendicular do *strand* foram significativamente superiores aos painéis com *strands* não orientados (p < 0.05).

As médias e os desvios padrão para o módulo de elasticidade (MOE) dos painéis produzidos com eucalipto obtidos no ensaio de flexão estão apresentados na Tabela 25. Os resultados indicam que não houve interações entre os fatores (teor e orientação dos *strands*) (p > 0,05), contudo, diferenças significativas no fator orientação dos *strands* foram observadas (p < 0,05).

É visto que similarmente aos resultados de MOR, o valor médio do MOE das amostras do OSB-cimento-madeira residual testadas na direção paralela do *strand* é significativamente maior que o valor médio do MOE amostras avaliadas na direção perpendicular do *strand* bem como das amostras com *strands* não orientados (p < 0,05). No entanto, a comparação entre o MOE das amostras avaliadas na direção perpendicular do *strands* não orientados não apresentou diferenças estatísticas significativas (p > 0,05).

eucalipto				
	Módulo de elasticidade (MPa)			
Teor	OSB_ na direção	OSB – na direção		
1001	norololo do strond	perpendicular do	Não orientado	
	paraicia do strand	strand		
25%	6482 (1328) *	2875 (0,344) *	2249 (0,726) *	
30%	6907 (2083) *	2612 (0,674) *	2086 (0,567) *	
35%	7072 (1450) *	2755 (0,747) *	1194 (0,507) *	
Média	6820 (1615) A	2740 (0,695) B	1875 (0,741) B	

Tabela 25 - Valores médios e desvio padrão do módulo de elasticidade dos painéis de

Letras iguais na linha implicam níveis do fator com médias estatisticamente equivalentes ao nível de 0,05 de significância. \* Não houve interação entre os fatores (teor e orientação dos *strands*). Fonte: Própria autoria.

A Tabela 26 apresenta os valores médios e desvios padrão do MOE dos painéis manufaturados com pinus obtidos no ensaio de flexão. Foi constatado que a incorporação de maiores teores de *strands* reduziu significativamente os valores de módulo de elasticidade (p < 0,05), ou seja, o material se tornou menos rígido. O MOE das amostras dos painéis OSB-cimento-madeira residual ensaiados na direção paralela do *strand*, os resultados mostram que o painel com 25% de *strand* apresentou valor médio significativamente superior as amostras dos painéis com teores de 30% e 35%.

	Módulo de elasticidade (MPa)		
Teor	OSB - na direção paralela do strand	OSB - na direção perpendicular do strand	Não orientado
25%	4242 (1419) Aa	2153 (0,594) Ab	0,504 (0,178) Ac
30%	2775 (1002) Ba	2060 (0, 674) Aa	0,193 (0,173) Bb
35%	2453 (0,578) Ba	1730 (0,747) Aa	0,300 (0,071) ABb

Tabela 26 - Valores médios e desvio padrão do módulo de elasticidade dos painéis de pinus

Letras maiúsculas iguais na coluna e letras minúsculas iguais na linha implicam níveis do fator com médias estatisticamente equivalentes ao nível de 0,05 de significância.

Entretanto, diferenças estatísticas significativas entre as amostras dos painéis com teores de 30% e 35% de *strands* não foram constatadas (p < 0.05). No que diz respeito ao valor médio de MOE dos painéis OSB-cimento-madeira residual testados na direção perpendicular do *strand*, diferenças significativas entre os teores de madeira não foram encontradas, como apresenta a Tabela 26 (p < 0.05). De acordo com a orientação do *strand*, observou que os painéis orientados na direção paralela dos *strands* apresentaram valores superiores de MOE ao compará-los com os demais (orientados contra a *strand* e não orientados) (p < 0.05).

Com relação às propriedades mecânicas apresentadas nesta seção, observa-se que para as amostras dos painéis OSB-cimento-madeira residual testadas na direção paralela dos *strands*, as propriedades mecânicas: MOR e MOE para todos os materiais, foram superiores aos requeridos pela norma ISO 8335 (STANDARDIZATION, 1987), que estabelece valores mínimos de 9,0 MPa para o valor de MOR e 3000 MPa para o valor de MOE. No entanto, em relação às propriedades mecânicas testadas na direção perpendicular do strand, foi observado que os materiais não atingiram os requisitos mínimos de valores de MOR e de MOE requeridos pela ISO 8335 (STANDARDIZATION, 1987).

Além disso, para o MOR (na direção paralela e perpendicular do *strand*) dos painéis OSB-cimento-madeira residual, constatou-se que os valores encontrados não atingiram os requisitos mínimos prescritos pela EN300: 2006 para os painéis OSB/1, que estabelece valor mínimo de MOR na direção paralela do *strand* igual a 20 MPa e valor de MOR na direção perpendicular do *strand* igual a 10 MPa. Contudo, para a propriedade mecânica, MOE, foi observado que os painéis OSB-cimento-madeira residual atingiram os requisitos mínimos de MOE igual a 2500 MPa (direção paralela do *strand*) e 1200 MPa (na direção perpendicular do *strand*) requeridos para os painéis OSB/1 (EN300: 2006).

A principal razão para o comportamento mecânico inferior das amostras testadas na direção perpendicular dos *strands* em comparação com as propriedades mecânicas testadas na direção paralela dos *strands* pode estar associado à orientação da aplicação da carga no corpo de prova. Uma vez que os painéis testados na direção paralela têm os *strands* alinhados em seu como também, têm as fibras da madeira em maior comprimento (80 mm) atuando como reforço da matriz cimentícia no momento do ensaio de flexão. De acordo com Semple e Evans (2004) a geometria, o tamanho e o arranjo das *strands* empregados na produção dos painéis cimento-madeira, influenciam diretamente as propriedades mecânicas: MOR e MOE.

No entanto, os painéis OSB-cimento-madeira residual avaliados na direção perpendicular do *strand* apresentaram valores de MOR e MOE compatíveis e em alguns casos superiores aos painéis com *strands* não orientados, portanto, a orientação dos *strands* 

proporcionou melhores propriedades mecânicas no material. Além disso, as propriedades mecânicas: MOR e MOE testadas na direção perpendicular do *strand* foram superiores as encontradas para painéis cimentícios produzidos com fibra de coco (MOR= 1,81 MPa e MOE = 634 MPa) (FERRAZ et al., 2011), bagaço de cana (MOR = 3,99 MPa e MOE = 1630 MPa) (CABRAL; NAKANISHI; FIORELLI, 2018) e talos de milho (MOR = 3,14 MPa e MOE = 2160 MPa) (BABATUNDE, 2011).

Os valores mais baixos para o MOR e MOE dos painéis OSB-cimento-madeira residual produzidos com a madeira de pinus provavelmente podem estar correlacionado à pressão utilizada na fabricação, bem como com a resistência mecânica inferior dos *strands* de pinus (vide Tabela 18). Durante a fabricação dos painéis de pinus, observou-se que os colchões foram cerca de 40% mais altos que os de eucalipto devido à menor densidade do pinus (Tabela 10 e Tabela 12), ou seja, apresentando maior volume. Porém, para ambas as madeiras, a mesma pressão foi empregada durante o processo produtivo (5 MPa).Assim, além da resistência inferior dos *strands* de pinus, as menores propriedades de resistência à flexão destes painéis podem ser atribuídas à pressão de prensagem utilizada durante a fabricação, uma vez que para os painéis produzidos com pinus a pressão não foi suficiente para criar uma taxa de compressão tão boa quanto para os painéis de eucalipto, o que resultou no efeito mola dos materiais, ou seja, houve um leve aumento da espessura (entre 1 e 2 mm) após a cura do painel.

#### 6.2.3. Caracterização microestrutural

O estudo da microestrutura na zona de transição entre a madeira e o cimento Portland hidratado desempenham um papel importante para a compreensão das propriedades dos painéis cimento-madeira. O sucesso da aderência entre o cimento Portland e a madeira está diretamente associada à qualidade da interação entre a matriz (cimento Portland) e o material de reforço (madeira). Esta interação influencia as propriedades físicas e mecânicas do compósito (WEI et al., 2004). Na Figura 41 estão apresentadas as micrografias de MEV das amostras polidas dos painéis OSB-cimento-madeira residual. A partir das micrografias, observa-se a orientação dos *strands* nos painéis, bem como, a interface entre a matriz (cimento) e a madeira (Figura 41).



Figura 41 – Micrografias de MEV dos painéis OSB-cimento-madeira residual



Segundo Wei et al. (2004) a aderência cimento-madeira ocorre por natureza física ou química, ou uma combinação de ambos. Os pesquisadores também afirmam que a ancoragem mecânica, causada pelos vários cristais, gerados a partir dos produtos de hidratação, interagem com a superfície da madeira e pode potencialmente melhorar a interface entre madeira e cimento Portland. Observando-se as micrografias, a interface mostrou-se coesa entre o cimento e a madeira (Figura 41).

## 6.2.4. Considerações parciais da etapa 2

De acordo com os resultados obtidos nesta etapa, pode-se concluir que:

- A densidade aparente dos painéis ficaram acima da densidade estipulada inicialmente de 1250 kg/m<sup>3</sup>. A principal razão para este resultado pode ser explicada pela água não evaporável (Wn).
- Os painéis OSB-cimento-madeira residual de eucalipto apresentaram valores superiores de inchamento em espessura em comparação aos painéis com *strands* não orientados. Provavelmente a não orientação dos *strands* reduziu a formação das tensões interna das partículas durante o processo de prensagem. De maneira contrária, os painéis OSBcimento-madeira residual de pinus apresentaram valores de inchamento em espessura menor do que os não orientados. Contudo, observou-se que o inchamento em espessura dos painéis OSB-cimento-madeira residual (eucalipto e pinus) foram próximos aos requeridos pela norma ISO 8335.
- As propriedades mecânicas, módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE), dos painéis OSB-cimento-madeira residual testados na direção paralela dos *strands* foram superiores que os painéis não orientados. Os painéis OSB-cimentomadeira residual na direção paralela dos *strands* para ambas madeiras utilizadas apresentaram valores de MOR e MOE superiores aos requeridos pela norma ISO 8335.
- Os valores menores das propriedades mecânica: MOR e MOE dos painéis produzidos com pinus podem ser atribuídas à pressão de prensagem utilizada durante a fabricação, uma vez que para os painéis produzidos com pinus a pressão não foi suficiente para criar uma taxa de compressão tão boa quanto para os painéis de eucalipto o que resultou no efeito mola dos materiais, ou seja, houve um leve aumento da espessura (entre 1 e 2 mm) do painel após a cura do painel..

Assim sendo, com base nos resultados apresentados na etapa 2, constatou-se que os painéis com *strands* orientados (OSB-cimento-madeira residual), apresentaram propriedades físicas próximas ao valor recomendado pela norma ISO 8335 e propriedades mecânicas (MOR e MOE) superiores em comparação aos painéis não orientados. Portanto, para a etapa seguinte, optou-se por continuar a produção dos painéis com *strands* orientados (OSB-cimento-madeira residual), e de acordo com o observado nesta etapa, foram realizadas algumas alterações no processo produtivo para melhorar o painel final.

#### 6.3. Etapa 3: Painéis OSB-cimento-madeira residual otimizados

#### 6.3.1. Condutividade térmica

As médias e os desvios padrão da condutividade térmica dos painéis OSB-cimentomadeira residual produzidos com eucalipto e pinus são apresentados na Tabela 27. Os resultados mostram que não houve interações entre os fatores (teor e espécie de madeira) (p > 0,05). Contudo, foram observadas diferenças estatísticas significativas (p < 0,05) apenas no fator espécie de madeira, sendo o valor da condutividade térmica menor nos painéis de pinus (0,17 W/mK) do que nos painéis de eucalipto (0,23 W/mK). Isto se deve ao maior volume de madeira de pinus utilizada, visto que este é menos denso, que resulta em mais espaços vazios, portanto, menor condutividade térmica (TANGJUANK; KUMFU, 2011).

madeira residual			
	Condutividade térmica (W/mk)		
Teor	Eucalipto	Pinus	
35%	0,24 (0,01) *	0,18 (0,02) *	
45%	0,22 (0,01) *	0,17 (0, 03) *	
Média	0,23 (0,02) A	0,17 (0,01) B	

Tabela 27 – Valores médios e desvio padrão da condutividade térmica dos OSB-cimentomadeira residual

Letras maiúsculas iguais na linha implicam níveis do fator com médias estatisticamente equivalentes ao nível de 0,05 de significância. \* Não houve interação entre os fatores (teor e espécie de madeira). Fonte: Própria autoria.

Apesar da diferença, os resultados permitem classificar todos os painéis em estudo como isolante térmicos, uma vez que a condutividade térmica obtida foi inferior a 0,25 W/mK indicada por Wang (1988). De acordo com a normativa europeia BS 13986:2004 os valores de condutividade térmica foram abaixo ou próximo do valor de 0,23 W/mK indicados para painéis cimentícios com densidade de 1200 kg/m<sup>3</sup>.

Os valores de condutividade térmica dos painéis apresentados na Tabela 27 também são inferiores àqueles encontrados por Khedari et al. (2001) para painéis produzidos com fibras de coco (0,59 W/mK), com densidade de 1297 kg/m<sup>3</sup>, bem como, são inferiores aos resultados obtidos por Wang et al. (2016) para painéis cimento-madeira produzidos com madeira reciclada, que obtiveram valores médios de condutividade térmica de 0,29 W/mK em materiais com densidade 1540 kg/m<sup>3</sup>.

#### 6.3.2. Propriedades físicas

Na Tabela 28 estão apresentados os valores médios e desvio padrão da densidade aparente (DA) dos OSB-cimento-madeira residual. Os resultados mostraram que não houve interação entre os fatores (teor e espécie de madeira), indicando homogeneidade entre os painéis durante a confecção (p > 0,05). Foi observado que após o ajuste da água não evaporável (Wn) nos painéis, os valores de DA obtidos nesta etapa foram próximos ao valor proposto nos parâmetros de produção de 1250 kg/m<sup>3</sup>.

madeira			
	ente (kg/m <sup>3</sup> )		
Teor	Eucalipto	Pinus	
35%	1.239 (97) *	1.261 (104) *	
45%	1.301 (108) *	1.289 (125) *	

Tabela 28 - Valores médios e desvios padrão para a densidade aparente OSB-cimento-

\* Não houve interação entre os fatores (teor e espécie de madeira). Fonte: Própria autoria.

A Tabela 29 apresenta os valores médios e desvios padrão do inchamento em espessura (IE) dos painéis OSB-cimento-madeira residual após 24 h em água. Os resultados obtidos mostraram que não houve interações entre os fatores: teor de *strands* e espécie de madeira (p > 0,05).

 madeira residual

 Inchamento em espessura (%)

 Teor
 Eucalipto
 Pinus
 Média

 35%
 2,71 (1,20) \*
 3,60 (0,88) \*
 3,15 (1,47) B

 45%
 6,54 (1,24) \*
 6,48 (1,77) \*
 6,51 (1,11) A

Tabela 29 - Valores médios e desvio padrão para o inchamento em espessura OSB-cimento-

Letras maiúsculas iguais na coluna implicam níveis do fator com médias estatisticamente equivalentes ao nível de 0,05 de significância. \* Não houve interação entre os fatores (teor e espécie de madeira). Fonte: Própria autoria.

No entanto, ao avaliar o somente o fator teor, constatou-se que ao utilizar teor de 45% de madeira nos painéis, o valor de IE foi significativamente superior aos painéis produzidos

com 35% de madeira (p < 0,05). Uma hipótese para este comportamento pode estar correlacionada a razão cimento: madeira do painel com 45% de *strands*. O aumento no conteúdo de *strands* nos painéis acarretou maiores tensões internas (MENDES, 2011a), e uma vez que os materiais foram imersos em água, houve a liberação dessas tensões, e com isso, consequentemente, maiores valores de IE (IWAKIRI et al., 2001).

Foi observado que todos os painéis apresentaram valores superiores aos requeridos pela ISO 8335 (STANDARDIZATION, 1987), que estabelece valores máximos de 1,8% para o IE após 24 h em água. Contudo, o IE após 24 h em água dos painéis foram inferiores ao valor máximo 25% requerido para painéis OSB/1 (EN300: 2006). Os resultados encontrados para o IE após 24 h dos OSB-cimento-madeira residual são próximos aos relatados por Semple et al. (2002), que estudaram painéis cimento-madeira confeccionados com resíduo de eucalipto e obtiveram valor médio entre 4,4% – 6,5 %.

Outro aspecto a ser levado em consideração no que tange as propriedades físicas dos painéis cimento-madeira, é a dimensão dos *strands* empregados em sua produção, o uso de partículas com maiores dimensões, tais como os *strands*, resulta em maior heterogeneidade em toda a superfície do painel, e, consequentemente, maiores espaços "vazios", o que possibilita penetração da água (EVANS, 2002).

A Tabela 30 apresenta os valores médios e desvios padrão para absorção de água (AA) OSB-cimento-madeira residual. Os resultados obtidos mostraram que não houve interações entre os fatores: teor e espécie de madeira (p>0,05).

madeira residual			
Absorção de água (%)			
Teor	Eucalipto	Pinus	
35%	22,83 (1,20) *	29,39 (4,16) *	
45%	31,18 (1,24) *	28,30 (4,57) *	

Tabela 30 - Valores médios e desvio padrão para a absorção de água dos OSB-cimento-

\* Não houve interação entre os fatores (teor e espécie de madeira). Fonte: Própria autoria.

A normativa ISO 8335 (STANDARDIZATION, 1987) não estabelece valores mínimos para a propriedade de AA, no entanto, os valores de AA dos painéis OSB-cimento-madeira residual foi próxima a àquela encontrada na literatura para painéis cimento-madeira. Macedo et al. (2012) avaliaram as propriedades físicas de painéis cimento-madeira produzidos com espécies tropicais de Cedro, Jatobá e Quaruba, e encontraram valores médios de AA de 26,7% 26,7% e 30,7%, respectivamente. Iwakiri et al. (2012) avaliando painéis cimento-madeira produzidos, com as espécies *Schizolobium amazonicum* e *Cecropia hololeuca*, encontraram valores de AA na faixa de 23,22% a 25,27% e de 17,64% a 20,86%, respectivamente.

#### 6.3.3. Propriedades mecânicas

#### 6.3.3.1. Flexão estática

Os valores médios e desvios padrão do módulo de ruptura (MOR) dos painéis OSBcimento-madeira residual (eucalipto e pinus) testados na direção paralela do *strand* (Tabela 31) e na direção perpendicular do *strand* (Tabela 32) são apresentados a seguir. Foi observado que para ambas avaliações, na direção paralela e na direção perpendicular do *strand*, os valores de MOR não apresentaram interações entre os fatores: teor e espécie de madeira (p > 0,05).

No entanto, a avaliação somente do fator teor através do teste de Tukey ao nível de 0,05 de significância constatou diferenças entre as amostras dos painéis com teores de 35% e 45%.

Teor _	Módulo de ruptura (MPa) – na direção paralela do <i>strand</i>		
	Eucalipto	Pinus	Média
35%	9,77 (2,44) *	8,53 (2,23) *	9,15 (2,24) B
45%	11,26 (2,06) *	12,44 (1,41) *	11,84 (1,80) A

Tabela 31 – Valores médios e desvio padrão do módulo de ruptura dos painéis OSB-cimentomadeira residual de eucalipto e pinus testados na direção paralela do *strand* 

Letras maiúsculas iguais na coluna implicam níveis do fator com médias estatisticamente equivalentes ao nível de 0,05 de significância. \* Não houve interação entre os fatores (teor e espécie de madeira). Fonte: Própria autoria

A propriedade mecânica de MOR para ambas as avaliações (na direção paralela e contra) dos painéis OSB-cimento-madeira residual foi maior quando se utilizou o teor de *strands* de 45% de *strand* em comparação ao teor de *strands* de 35%, ou seja, o aumento de *strands* resultou em um aumento de aproximadamente de 31% na resistência mecânica dos painéis.

Teor	e ruptura (MPa) – na pendicular do <i>stran</i>	a direção d	
1001	Eucalipto	Pinus	Média
35%	3,89 (1,84) *	5,23 (1,57) *	4,50 (1,78) B
45%	5,48 (1,58) *	6,45 (1,10) *	5,96 (1,39) A

Tabela 32 – Valores médios e desvio padrão do módulo de ruptura dos painéis OSB-cimentomadeira residual eucalipto e pinus testados na direção perpendicular do *strand* 

Letras maiúsculas iguais na coluna implicam níveis do fator com médias estatisticamente equivalentes ao nível de 0,05 de significância. \* Não houve interação entre os fatores (teor e espécie de madeira). Fonte: Própria autoria.

Os valores médios e desvios padrão do módulo de elasticidade (MOE) dos painéis OSBcimento-madeira residual (eucalipto e pinus) testados na direção paralela *strand* (Tabela 33) e na direção perpendicular do *strand* (Tabela 34) estão apresentados a seguir. Para ambas as avaliações, na direção paralela e na direção perpendicular do *strand* foi identificado que não houve interações entre os fatores, teor e espécie de madeira (p > 0,05).

Tabela 33 – Valores médios e desvio padrão do módulo de elasticidade dos painéis OSBcimento-madeira residual de eucalipto e pinus testados na direção paralela do *strand* 

Teor	Módulo de elasticidade (MPa) - na direção paralela do <i>strand</i>	
1001	Eucalipto	Pinus
35%	3806 (1524) *	2294 (800) *
45%	3826 (911) *	3913 (1095) *

\* Não houve interação entre os fatores (teor e espécie de madeira). Fonte: Própria autoria

Entretanto, ao avaliar o MOE dos painéis testados na direção perpendicular do *strand*, foi observado que a conteúdo de *strands* utilizado resultou em diferenças significativas nos valores (p < 0.05), como mostra a Tabela 34. O aumento de 35% para 45% de *strands* representou um aumento de aproximadamente 93% no valor de MOE.

Teor	Módulo de elasticidade (MPa) - na direção perpendicular do <i>strand</i>		
1001	Eucalipto	Pinus	Media
35%	659 (644) *	725 (458) *	689 (541) B
45%	979 (530) *	1676 (512) *	1328 (616) A

Tabela 34 – Valores médios e desvio padrão do módulo de elasticidade dos painéis OSBcimento-madeira residual de eucalipto e pinus testados na direção perpendicular do *strand* 

Letras maiúsculas iguais na coluna implicam níveis do fator com médias estatisticamente equivalentes ao nível de 0,05 de significância. \* Não houve interação entre os fatores (teor e espécie de madeira). Fonte: Própria autoria

De acordo com os resultados obtidos para as propriedades mecânicas MOR e MOE avaliadas na condição na direção paralela dos *strands*, observou-se que os painéis OSBcimento-madeira residual produzidos com eucalipto, com teores de 35% e 45% e pinus com 45 % atingiram os valores mínimos de 9,0 MPa para o MOR e 3000 MPa para o MOE preestabelecidos pela norma ISO 8335 (STANDARDIZATION, 1987). No entanto, a comparação dos valores encontrados com os valores mínimos requeridos pela EN300: 2006 para o OSB/1 mostrou que somente o MOE na condição na direção paralela do *strand* superou o valor 2500 MPa.

Foi observado para as propriedades MOR e MOE dos painéis OSB-cimento-madeira residual testados com carregamento na direção perpendicular do *strand*, assim como nos painéis OSB-cimento-madeira residual experimentais, os requisitos mínimos acima mencionados padronizados pela ISO 8335 não foram atingidos (STANDARDIZATION, 1987). Bem como, observou-se que somente o MOE avaliado na condição de na direção perpendicular do *strand* do painel de pinus 45% atingiu o requisito mínimo estabelecido pela EN300: 2006 para painéis OSB/1.

Na produção de OSB a espécie de madeira é um dos fatores mais importante por interagir com as outras variáveis do processo, além de determinar a densidade do painel e da quantidade de resina utilizada (FEBRIANTO et al., 2010; MENDES, 2011a).

Contudo, neste trabalho foi constatado que em painéis OSB-cimento-madeira residual a espécie de madeira não influenciou nas propriedades físicas (DA, AA e IE), bem como nas propriedades mecânicas obtidas no ensaio de flexão, como apresentado pelos valores de MOR e MOE, semelhantes para ambas as espécies.

Portanto, isso mostra que a pressão empregada para produzir os OSB-cimento-madeira residual desta etapa foi efetiva para criar uma taxa de compressão boa para ambos os painéis (eucalipto e pinus). Também foi visto que após o alívio da pressão dos materiais não houve o efeito mola, ou seja, os painéis se mantiveram com a espessura desejada de 10 mm.

#### 6.3.3.2. Arrancamento de parafuso

A Tabela 35 e a Tabela 36 apresentam os valores médios e desvios padrão para o ensaio de arrancamento de parafuso no topo e na superfície, respectivamente. Para ambos os ensaios de arrancamento não houve interações entre os fatores (teor e espécie de madeira) (p > 0,05). Entretanto, foi observada diferença no fator espécie de madeira no ensaio de arrancamento de parafuso no topo, sendo os painéis OSB-cimento-madeira residual de eucalipto significativamente superior aos de pinus (p < 0,05).

	Arrancamento	parafuso topo (N)
Teor	Eucalipto	Pinus
35%	499 (110) *	385 (48) *
45%	569 (131) *	388 (111) *
Media	533 (121) A	386 (82) B

Tabela 35 – Valores médios e desvio padrão para o ensaio de arrancamento de parafuso topo

Letras maiúsculas iguais na linha implicam níveis do fator com médias estatisticamente equivalentes ao nível de 0,05 de significância. \* Não houve interação entre os fatores (teor e espécie de madeira). Fonte: Própria autoria.

Tabela 36 – Valores médios e desvio padrão para o ensaio de arrancamento de parafuso superfície

	Arrancamento para	afuso superfície (N)
Teor	Eucalipto	Pinus
35%	392 (123) *	410 (118) *
45%	398 (124) *	547 (72) *

\* Não houve interação entre os fatores (fteor e espécie de madeira) Fonte: Própria autoria.

Em relação a requisitos propriedades de arrancamento de parafuso (topo e superfície) de painéis cimentícios, a normativa ISO 8335 (1987) não estabelece nenhum valor mínimo. No

entanto, os valores encontrados para os painéis OSB cimento-madeira estão consistentes com os resultados apresentados por Donahue e Aro (2010), que reportaram valores de arrancamento de parafuso superfície de aproximadamente 700 N para painéis de fibras aglutinadas com fosfato (*phosphate-bonded fiber*). Assim como, com os resultados obtidos por Tittelein et al. (2012), que encontraram valores médios de arrancamento de parafuso superfície para painéis de gesso igual a 330 N e valor médio de 570 N para painéis cimento-madeira.

## 6.3.3.3. Adesão interna

Os valores médios e desvios padrão da propriedade de adesão interna (AI) dos painéis OSB-cimento-madeira residual, produzidos com teores de 35% e 45%, estão apresentados na Tabela 37. Para tal propriedade não houve interação entre os fatores (teor e espécie de madeira) (p > 0,05). Contudo, a avaliação individual do fator espécie de madeira mostrou que os painéis produzidos utilizando eucalipto foram significativamente superiores aos painéis produzidos com a madeira de pinus (p < 0,05).

	Adesão inte	erna (MPa)
Teor	Eucalipto	Pinus
35%	0,16 (0,02) *	0, 12 (0,05) *
45%	0,22 (0,08) *	0,10 (0,03) *
Media	0,19 (0,06) A	0,11 (0,04) B

Tabela 37 – Valores médios e desvio padrão da adesão interna dos painéis OSB-cimentomadeira residual de eucalipto e pinus

Letras maiúsculas iguais na linha implicam níveis do fator com médias estatisticamente equivalentes ao nível de 0,05 de significância. Fonte: Própria autoria.

Tendo em vista que o que o requisito mínimo para a propriedade de AI para painéis cimento-madeira é de 0,40 MPa (STANDARDIZATION, 1987) e para painéis OSB/1 é de 0,30 nenhum dos painéis atendeu às normativas. A principal hipótese para este resultado pode estar atrelada a dimensão dos *strands*, pois de acordo com Castro (2015) a utilização de partículas com maior dimensão (*strands*) pode não proporcionar a coesão (entrelaçamento) entre as partículas tal como é evidenciado para partículas de menor dimensão. Além disso, o cimento apresenta comportamento frágil quando submetido a esforços de tração, e neste caso, não atua de maneira significativa no ensaio de AI.

De acordo com Sotannde et al. (2012) o tipo de partícula bem como a relação cimento: madeira apresentam efeito significativo na propriedade de AI de painéis cimento-madeira. Os autores avaliaram a AI de painéis cimentícios fabricados com a madeira *Afzelia africana*, utilizando partículas de madeira, madeira em pó e a mistura de partículas junto a madeira em pó, e concluíram que a mistura de diferentes granulometrias (partículas + pó), ocasionou a diminuição dos espaços vazios na microestrutura dos materiais e consequentemente melhorou a AI.

## 6.3.4. Considerações parciais da etapa 3

Com base nos resultados da avaliação dos painéis OSB-cimento-madeira residual com os parâmetros otimizados, ou seja, dos materiais produzidos com os cálculos de água considerando a água não evaporável (Wn), alteração no teor de *strands*, alteração na pressão de prensagem, bem como alteração no processo de mistura dos componentes, pode-se concluir que:

- O valor da condutividade térmica foi menor nos painéis de pinus (0,17 W/mK) do que nos painéis de eucalipto (0,23 W/mK). Isto se deve ao maior volume de madeira de pinus utilizada. Entretanto, apesar da diferença, os resultados permitem classificar todos os painéis OSB-cimento-madeira residual em estudo como materiais isolantes térmicos.
- Após o ajuste da água não evaporável (Wn) nos painéis, os valores de densidade aparente (DA) obtidos nesta etapa foram próximos ao valor proposto nos parâmetros de produção de 1250 kg/m<sup>3</sup>, não havendo diferença entre os teores de *strands* ou a espécie de madeira.
- O valor de inchamento em espessura (IE) foi significativamente superior nos painéis com 45% de madeira (6,51 %) do que aos painéis produzidos com 35% de madeira (3,15%).
- O aumento nos *strands* de 35% para 45% resultou em um aumento de aproximadamente de 31% no módulo de ruptura (MOR na direção paralela e contra) e de 93% no módulo de elasticidade (MOE) quando este foi aferido na direção perpendicular do *strand*.
- A pressão empregada (12 MPa) para produzir os painéis OSB-cimento-madeira residual desta etapa foi efetiva para criar uma taxa de compressão adequada para

ambos os materiais (eucalipto e pinus). Também foi visto que após o alívio da pressão dos materiais não houve o efeito mola, ou seja, os painéis se mantiveram com a espessura desejada de 10 mm.

Assim sendo, optou-se em avaliar a cura com carbonatação acelerada nos painéis OSBcimento-madeira residual produzidos com 45% de *strands* para ambas as madeiras.

# 6.4. Etapa 4: Cura com carbonatação acelerada em painéis OSB-cimentomadeira residual

Para realização da carbonatação acelerada, foi escolhido o painel contendo teor de *strands* de 45%, devido ao melhor desempenho mecânico e físico em comparação aos painéis OSB-cimento-madeira residual produzidos com teor de *strands* de 35%.

Dessa forma, nesta etapa foram comparados o efeito da carbonatação no cimento nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis OSB-cimento-madeira residual, bem como foi avaliado o efeito da carbonatação no desempenho físico, mecânico e microestrutural dos painéis e após envelhecimento acelerado por 100 ciclos de imersão e secagem.

## 6.4.1. Avaliação visual da eficiência da carbonatação por fenolftaleína

A Figura 42 ilustra a coloração resultante após a aspersão da solução de fenolftaleína 2% nos painéis. É evidente para o painel OSB-cimento-madeira residual não carbonatado (Figura 42a) há a coloração violeta após a análise. A alta intensidade da cor é dada como resultado do pH próximo de 13, ou seja, a fenolftaleína reage em presença de hidróxido de cálcio dissolvido no meio aquoso, resultando na coloração violeta (HEWLETT, 2013).

Por outro lado, para a imagem do painel OSB-cimento-madeira residual carbonatado, é visto que após a aspersão da fenolftaleína 2%, o material manteve-se incolor (Figura 42b), demonstrando que o processo de carbonatação consumiu grande parte do hidróxido de cálcio dissolvido no meio aquoso. Isso ocorreu devido a reação do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) com o hidróxido de cálcio para a formação de carbonato de cálcio.

O consumo de hidróxido de cálcio resulta na diminuição do pH da matriz cimentícia de 13 para um valor de 8 nas zonas totalmente carbonatadas, tornando o meio menos agressivo para os materiais vegetais, neste caso, os *strands*. Promovendo assim, a preservação dos *strands* na matriz cimentício (ALMEIDA et al., 2013; AUROY et al., 2018).

Figura 42 – Avaliação visual do procedimento de cura (a) painel não carbonatado, (b) painel carbonatado 12 h



Fonte: própria autoria

## 6.4.2. Painéis avaliados com 28 dias de idade

## 6.4.2.1. Avaliação do efeito da carbonatação por TG e DRX

A Figura 43 ilustra os termogramas TG/DTG das amostras dos painéis OSB-cimentomadeira residual de eucalipto e pinus aos 28 dias de idade não carbonatadas e carbonatadas. E a Tabela 38 apresenta as porcentagens estimadas de carbonato de cálcio e hidróxido de cálcios dos painéis não carbonatados e carbonatados obtido através de cálculos estequiométricos (BORGES et al., 2010).

A partir dos termogramas é possível identificar três picos principais, no primeiro pico, entre 90 °C e 200 °C, foi observada a decomposição térmica do silicato de cálcio hidratado (CSH) e etringita (TAYLOR, 1998; PIPILIKAKI et al., 2008). O segundo pico, entre 400 °C e 500 °C, indica a decomposição térmica do hidróxido de cálcio.

Foi observado que as amostras carbonatadas apresentaram um pico menor referente ao hidróxido de cálcio aos 28 dias (Figura 43) devido ao consumo deste para a formação do carbonato de cálcio durante o processo de carbonatação.



Figura 43 – Termogramas de TG/DTG das amostras dos painéis de eucalipto e pinus com 28 dias de idade

Fonte: Própria autoria.

De acordo com a Tabela 38, notou-se o decréscimo de 9,62% para 5,84% na amostra do painel de pinus e de 10,24 para 6,17 na amostra do painel de eucalipto. O terceiro pico, na faixa de temperatura entre 700 °C e 800 °C, está relacionado a decomposição térmica do carbonatado de cálcio. Para as amostras não carbonatadas, foi evidente que a decomposição térmica do carbonato de cálcio semicristalino (por volta de 700 °C), representado pelo pico em formato de "W", enquanto que para as amostras carbonatadas foi vista a decomposição térmica do carbonato de cálcio cristalino (por volta de 750°C) (CABRAL et al., 2018a).

Além disso, foi observado um aumento do teor de carbonato de cálcio dos painéis carbonatados aos 28 dias de 13,18% para 31,98% na amostra do painel de eucalipto e de 11,73% para 25,66% na amostra do painel de (Tabela 38).

Cura	Hidróxido de cálcio (%)		Carbonatado de cálcio (%)	
Curu	Eucalipto	Pinus	Eucalipto	Pinus
Não carbonatado	10,24	9,62	13,18	11,73
Carbonatado	6,17	5,84	31,98	25,66

Tabela 38 – Estimativa do hidróxido de cálcio e do carbonato de cálcio

#### Fonte: Própria autoria.

Visto que os painéis foram submetidos imediatamente a carbonatação acelerada, vários tipos de produtos de hidratação foram afetados pela carbonatação, principalmente hidróxido de cálcio, conforme indicado Figura 43 e na Tabela 38. Durante a cura com carbonatação acelerada, o CO<sub>2</sub> é difundido e dissolvido na fase aquosa, promovendo a dissolução do CO<sub>2</sub> (g) para o CO<sub>2</sub> (aq), que reage com a água ou vapor de água para produzir H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Em seguida ocorre a ionização de H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> para H<sup>+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>. A reação entre o HCO<sup>3-</sup> e a hidróxido de cálcio resulta em nucleação e precipitação do carbonatado de cálcio ou também chamado calcita. Além da calcita, outras fases polimorfas do carbonato de cálcio podem ser formadas como resultado da carbonatação acelerada, como por exemplo, a vaterite e a aragonite. Porém, a calcita é caraterizada pela sua maior estabilidade é o produto principal (TONOLI et al., 2016).

A vaterite e a aragonita são polimorfos termodinamicamente menos estáveis e revertem para a calcita. Esta reação química cíclica explica a maior quantidade de carbonato de cálcio do que de hidróxido de cálcio para os painéis carbonatados em comparação com os painéis não carbonatados (FERNÁNDEZ BERTOS et al., 2004). De acordo com Mohr et al. (2007) compósitos cimentícios carbonatados possuem maior estabilidade química e com isso maior durabilidade, considerando que o carbonato de cálcio é um composto mais estável que o hidróxido de cálcio, que apresenta baixa resistência à solubilização.

A Figura 47 apresenta os difratogramas das amostras dos painéis OSB-cimento-madeira residual não carbonatados e carbonatados com 28 dias: (a) eucalipto (b) pinus, no intervalo de 10° a 60° (2-theta). Foi observado que a presença do CO<sub>2</sub>, durante o período de cura com carbonatação acelerada levou a mudanças mineralógicas importantes, principalmente no hidróxido de cálcio, visto que nos painéis carbonatados, os picos referentes a esta fase diminuíram, o que indica que o hidróxido de cálcio foi convertido em carbonato de cálcio, como observado no pico por volta de 29°, referente ao principal pico de carbonato de cálcio na forma de calcita (HUNNICUTT; STRUBLE; MONDAL, 2017; TONOLI et al., 2016).

Figura 44 – Difratogramas (DRX) das amostras dos painéis não carbonatados e carbonatados com 28 dias: (a) eucalipto (b) pinus







Combinando os resultados obtidos por meio da avaliação por aspersão da solução de fenolftaleína (Figura 42) e TG/DTG (Figura 43) e DRX (Figura 44) é possível constatar que o processo de carbonatação ocorreu nos painéis e que o hidróxido de cálcio foi transformado principalmente em carbonatado de cálcio.

## 6.4.2.2. Condutividade térmica

Na Tabela 39 estão apresentados os valores médios e desvio padrão de condutividade térmica dos painéis OSB-cimento-madeira residual não carbonatados e carbonatados. Os painéis não carbonatados apresentaram diferenças significativas entre as espécies de madeiras, nos quais os painéis produzidos com eucalipto apresentaram os maiores valores de condutividade (0,22 W/mK) (p < 0,05).

Tabela 39 – Valores médios e desvios padrão da condutividade térmica dos painéis OSBcimento-madeira residual não carbonatados e carbonatados

9	Condutividade térmica (W/mK)		
Cura	Eucalipto	Pinus	
Não carbonatado	0,22 (0,005) Aa	0,17 (0,02) Ab	
Carbonatado	0,19 (0,01) Ba	0,21 (0,02) Aa	

Letras maiúsculas iguais na coluna e letras minúsculas iguais na linha implicam níveis do fator com médias estatisticamente equivalentes ao nível de 0,05 de significância. Fonte: Própria autoria.

Tal resultado pode ser explicado pelo maior volume de pinus em comparação ao eucalipto, devido ao pinus apresentar menor densidade que o eucalipto. Contudo, não há diferença entre os painéis produzidos com eucalipto ou pinus quando aplicado o processo de carbonatação (p > 0.05).

Ao analisar os painéis produzidos com eucalipto, foi observado que o processo de carbonatação promoveu uma redução significativa nos valores de condutividade térmica (p < 0,05), devido provavelmente, a preservação dos *strands* dentro da matriz cimentícia e a redução do processo de mineralização dos mesmos, que ocasionou maior presença de vazios, resultado em um valor menor de condutividade. No entanto, o mesmo não foi observado para os painéis produzidos com pinus (p > 0,05), e provavelmente isto se deva a maior ao volume de madeira.

#### 6.4.2.3. Propriedades físicas

A Tabela 40 apresenta os valores médios e desvios padrão da densidade aparente (DA) dos painéis OSB-cimento-madeira residual não carbonatados e carbonatados. A avaliação do efeito da carbonatação na DA nos painéis produzidos com eucalipto mostrou que o painel carbonatado foi significativamente maior (1475 kg/m<sup>3</sup>) que o painel não carbonatado (1301 kg/m<sup>3</sup>) (p < 0,05).

Isto se deve ao fato de a reação de carbonatação acelerada proporcionar o aumento do volume de material no interior do compósito, ou seja, para cada mol de hidróxido de cálcio portlandita (volume molar 33 mL) consumido, um mol de carbonato de cálcio (volume molar de 36,9 mL) é gerado, o que consequente corresponde a um aumento de volume de 11,8% de sólidos (FERNÁNDEZ BERTOS et al., 2004). Como observado pelo aumento no teor de carbonato de cálcio na análise termogravimétrica, indicado na Tabela 38. Por outro lado, para os painéis produzidos com pinus, não foi observada diferença nos valores de densidade aparente quando realizado o processo de carbonatação (p > 0,05).

	Densidade aparente (kg/m <sup>3</sup> )		
Cura	Eucalipto	Pinus	
Não carbonatado	1301 (108) Ba	1289 (125) Aa	
Carbonatado	1475 (116) Aa	1277 (91) Ab	

Tabela 40 – Valores médios e desvios padrão para a densidade aparente dos OSB-cimentomadeira residual não carbonatados e carbonatados

Letras maiúsculas iguais na coluna e letras minúsculas iguais na linha implicam níveis do fator com médias estatisticamente equivalentes ao nível de 0,05 de significância. Fonte: Própria autoria.

Inicialmente ao comparar as espécies de madeira (eucalipto e pinus) não carbonatadas, não foram constatadas diferenças significativas nos valores de DA (p > 0,05), contudo, o processo de carbonatação ocasionou uma diferença significativa na DA dos painéis, sendo maior a densidade dos painéis produzidos com eucalipto quando comparado com os painéis produzidos com pinus (p < 0,05).

Na Tabela 41 estão apresentados os valores médios e desvios padrão de inchamento em espessura (IE) após 24 h em água, dos painéis carbonatados e carbonatados. Foi observado que para os painéis produzidos com eucalipto a carbonatação resultou em valores de IE

significativamente (p < 0,05) inferiores (1,85%) quando comparados aos painéis não carbonatados (6,54%). E isso se deve a densificação da matriz, (FERNÁNDEZ BERTOS et al., 2004) que diminuiu a entrada de água, e consequentemente os valores de IE. Além disso, como já mencionado anteriormente, o carbonato de cálcio é mais estável quimicamente, não se solubilizando com facilidade ao ser exposto em água (MOHR et al. 2007)

Entretanto, para o painel de pinus, em contrapartida, apesar de ser observada uma diminuição no valor de IE nos painéis carbonatados, este não apresentou diferença com os valores dos painéis não carbonatados (p > 0,05). Por fim, ao comparar as espécies de madeira utilizadas para a produção dos painéis não carbonatados e carbonatados, observou-se que não houve diferença nos valores de IE (p > 0,05).

Foi observado que todos os painéis apresentaram de eucalipto carbonatados apresentaram valores próximos aos requeridos pela ISO 8335 (STANDARDIZATION, 1987), que estabelece valores máximos de 1,8% para o IE após 24 h em água. Ademais, o IE após 24 h em água dos painéis foram inferiores ao valor máximo de 25% requerido para painéis OSB/1 (EN300: 2006).

~ ~ ~	Inchamento em espessura (%)		
Cura	Eucalipto	Pinus	
Não carbonatado	6,54 (1,24) Aa	6,48 (1,76) Aa	
Carbonatado	1,85 (0,68) Ba	4,41 (1,60) Aa	

Tabela 41 – Valores médios e desvios padrão para o inchamento em espessura dos painéis OSB-cimento-madeira residual não carbonatados e carbonatados

Letras maiúsculas iguais na coluna e letras minúsculas iguais na linha implicam níveis do fator com médias estatisticamente equivalentes ao nível de 0,05 de significância. Fonte: Própria autoria.

A Tabela 42 apresenta os valores médios e desvios padrão da absorção de água (AA) após 24 h em água, dos painéis não carbonatados e carbonatados 12 h. Foi observado que não houve diferença para os valores de AA entre as espécies de madeira (eucalipto e pinus) dos painéis não carbonatados e carbonatados (p > 0,05).

Contudo, ao avaliar o painel de cada madeira (pinus ou eucalipto) separadamente, foi visto que a carbonatação resultou em uma diminuição significativa dos valores de AA para ambas as espécies (p < 0,05). Provavelmente, como também visto para o IE, este resultado deve-se a densificação da matriz, que resultou em diminuição dos poros diminuindo a percolação de água na microestrutura dos materiais (FERNÁNDEZ BERTOS et al., 2004).

a	Absorção de água (%)		
Cura	Eucalipto	Pinus	
Não carbonatado	31,18 (4,05) Aa	28,30 (4,56) Aa	
Carbonatado	17,65 (2,45) Ba	17,77 (2,40) Ba	

Tabela 42 – Valores médios e desvios padrão para de absorção de água dos painéis OSBcimento-madeira residual não carbonatados e carbonatados

Letras maiúsculas iguais na coluna e letras minúsculas iguais na linha implicam níveis do fator com médias estatisticamente equivalentes ao nível de 0,05 de significância. Fonte: Própria autoria

## 6.4.2.4. Propriedades mecânicas

Na Tabela 43 e na Tabela 44 são apresentados os valores médios e desvios padrão do módulo de ruptura (MOR) dos painéis OSB-cimento-madeira residual não carbonatados e carbonatados obtidos pelo na flexão avaliados na direção paralela do *strand* e na direção perpendicular do *strand*, respectivamente. Foi observado que não houve interação entre os fatores: cura e espécie de madeira (p > 0,05) para as amostras testadas na direção paralela do *strand*. Todavia, ao analisar os fatores separadamente, foi observada diferença significativa.

Tabela 43 – Valores médios e desvios padrão para o módulo de ruptura dos painéis OSBcimento-madeira residual não carbonatados e carbonatados testados na direção paralela do

0	Módulo de ruptura (MPa) – na direção paralela do strand		
Cura	Eucalipto	Pinus	Média
Não carbonatado	11,26 (2,06) *	12,44 (1,40) *	11,84 (1,80) B
Carbonatado	19,89 (6,81) *	18,68 (4,12) *	19,28 (5,40) A

strand

Letras maiúsculas iguais na linha implicam níveis do fator com médias estatisticamente equivalentes ao nível de 0.05 de significância. \* Não houve interação entre os fatores (cura e espécie de madeira). Fonte: Própria autoria.

Referente ao MOR, na direção paralela do *strand*, foi visto que o painel carbonatado (19,28 MPa) foi significativamente superior em comparação ao painel não carbonatado (11,84 MPa), ou seja, o processo de carbonatação resultou em um aumento de 63% no MOR, quando este foi testado na direção paralela do *strand* (p < 0,05). A diminuição do pH alcalino da matriz,

como observado pelo teste de fenolftaleína, ocasionada pelo consumo de hidróxido de cálcio para a formação do carbonatado de cálcio, como observado nas análises TG/DTG e DRX, tornou o meio menos alcalino, sendo, portanto, menos agressivo aos *strands*. Devido a isso, provavelmente ocorreu uma menor mineralização da superfície dos *strands*. Além disso, outra hipótese para o incremento do MOR dos materiais pode estar relacionada à densificação da matriz (como apresentado na Tabela 40), que potencialmente pode ter propiciado maior ancoragem entre os *strands* e a matriz.

Ao avaliar na direção paralela do *strand*, o fator espécie de madeira não apresentou diferença na propriedade de MOR. Contudo, ao analisar o MOR na direção perpendicular do *strand*, observou-se que o fator espécie de madeira apresentou diferenças significativas, sendo que o painel de pinus foi significativamente superior em comparação ao painel eucalipto (p < 0,05). E que o processo de carbonatação não resultou em diferenças nos valores de MOR (p > 0,05).

Tabela 44 – Valores médios e desvios padrão para o módulo de ruptura dos painéis OSBcimento-madeira residual não carbonatados e carbonatados testados na direção perpendicular

	Módulo de ruptura (MPa) - na direção perpendicular do strand		
Cura	Eucalipto	Pinus	
Não carbonatado	5,48 (1,57) *	6,45 (1,09) *	
Carbonatado	5,67 (1,14) *	7,25 (1,32) *	
Média	5.57 (1,31) B	6,84 (1,23) A	

do strand

Letras maiúsculas iguais na linha implicam níveis do fator com médias estatisticamente equivalentes ao nível de 0,05 de significância. Fonte: Própria autoria.

Os valores médios e desvios padrão do módulo de elasticidade (MOE) dos painéis não carbonatados e carbonatados, obtidos na flexão estática, avaliados na direção paralela do *strand* e na direção perpendicular do *strand*, estão apresentados, respectivamente na Tabela 45 e na Tabela 46. Ao avaliar o painel nas duas direções (na direção paralela e na direção perpendicular) foi observado que nos painéis de eucalipto, a carbonatação aumentou significativamente os valores de MOE em comparação ao material não carbonatado (p < 0.05).

A carbonatação nos painéis de eucalipto resultou em um aumento de 119% na direção paralela do *strand* e 222% na direção perpendicular do *strand* no MOE devido a densificação e

redução da alcalinidade da matriz. No entanto, no painel de pinus não foram observadas diferenças para o MOE entre os painéis não carbonatados e carbonatados (p > 0,05).

Além disto, ao avaliar separadamente as espécies de madeiras (eucalipto e pinus) testadas em ambas configurações de ensaio de flexão (paralela e perpendicular) em relação a direção dos *strands* no painel, na direção paralela e contra, foi constado que nos painéis carbonatados, o painel de eucalipto apresentou um melhor desempenho para o MOE em comparação ao pinus (p < 0.05).

Tabela 45 – Valores médios e desvios padrão para o módulo de elasticidade dos painéis OSBcimento-madeira residual não carbonatados e carbonatados testados na direção paralela do

strand				
~	Módulo de elasticidade (MPa) - na direção paralela do strand			
Cura	Eucalipto	Pinus		
Não carbonatado	3826 (911) Ba	3913 (1095) Aa		
Carbonatado	8380 (832) Aa	4148 (1733) Ab		

Letras maiúsculas iguais na coluna e letras minúsculas iguais na linha implicam níveis do fator com médias estatisticamente equivalentes ao nível de 0,05 de significância. Fonte: Própria autoria.

Tabela 46 – Valores médios e desvios padrão para o módulo de elasticidade os painéis não carbonatados e carbonatados testados na direção perpendicular do *strand* 

C	Módulo de elasticidade (MPa) na direção perpendicular do strand		
Cura	Eucalipto	Pinus	
Não carbonatado	979 (530) Bb	1676 (512) Aa	
Carbonatado	3161 (817) Aa	1202 (553) Ab	

Letras maiúsculas iguais na coluna e letras minúsculas iguais na linha implicam níveis do fator com médias estatisticamente equivalentes ao nível de 0,05 de significância. Fonte: Própria autoria.

Com relação às propriedades mecânicas de MOR e MOE na direção paralela do *strand* dos painéis para ambas as madeiras, observa-se que os valores encontrados para os painéis carbonatados foram superiores aos requeridos pela norma ISO 8335 (STANDARDIZATION, 1987), que estabelece valores mínimos de 9,0 MPa para o MOR e 3000 MPa para o MOE.

Além disso, os valores médios para a propriedade de MOR na direção paralela do *strand* dos painéis carbonatados foram próximos ao requisito mínimo de 20 MPa estabelecido pela

EN300: 2006 para os painéis OSB/1. Ainda sobre os valores mínimos prescritos pela EN300: 2006 para o painel OSB/1, observou-se que ambos os painéis (eucalipto e pinus) carbonatados apresentaram valores de MOE na direção paralela do *strand* superior aos 2500 MPa.

No entanto, em relação às propriedades mecânicas de testadas na direção perpendicular do *strand*, foi observado que os materiais não atingiram os requisitos mínimos de MOR e MOE requeridos pela ISO 8335 (STANDARDIZATION, 1987), como também, não atingiram os requisitos mínimos prescritos pela EN300: 2006 para os painéis OSB/1, de MOR na direção perpendicular do *strand* = 10 MPa. Para a propriedade de MOE na direção perpendicular do *strand* foi observado que somente os painéis OSB-cimento-madeira residual carbonatados atingiram os requisitos mínimos de 1200 MPa (na direção perpendicular do *strand*) requeridos para os painéis OSB/1 (EN300: 2006).

Na Tabela 47 estão discriminados os valores médios e desvio padrão de arrancamento de parafuso de topo dos painéis não carbonatados e carbonatados. A interação entre os fatores não foi significativa (p > 0,05). Contudo, foi observada diferença apenas no fator processo de carbonatação, ou seja, a carbonatação proporcionou o significativo aumento na tensão máxima.

Cura -	Arrancamento de parafuso topo (N)		
	Eucalipto	Pinus	Média
Não carbonatado	569 (131) *	388 (111) *	478 (149) B
Carbonatado	707 (285) *	844 (240) *	769 (262) A

Tabela 47 – Valores médios e desvios padrão do arrancamento de parafuso topo dos painéis não carbonatados e carbonatados

Letras maiúsculas iguais na linha implicam níveis do fator com médias estatisticamente equivalentes ao nível de 0.05 de significância. \* Não houve interação entre o fator (espécie de madeira). Fonte: Própria autoria.

Os valores médios e desvio padrão de arrancamento de parafuso de superfície dos painéis não carbonatados e carbonatado são listados na Tabela 48. Foi visto que somente para os painéis de eucalipto o processo de carbonatação representou em um aumento significativo da tensão de arrancamento na superfície (873 N) em comparação com o painel não carbonatado (398 N) (p < 0,05). Provavelmente, isso se deve em razão da maior preservação dos *strands* dentro da matriz cimentícia devido a redução da alcalinidade de matriz. No entanto, nos painéis produzidos com pinus a carbonatação não representou em um aumento significativo no valor de tensão (p > 0,05).
Ao comparar as espécies de madeira não carbonatadas os painéis produzidos com pinus eram significativamente maiores que os painéis produzidos com eucalipto (p < 0,05), provavelmente, devido ao maior volume de madeira. No entanto, quando realizado o processo de carbonatação, esse fenômeno foi invertido, o que resultou em maiores valores de tensões de arrancamento para os painéis de eucalipto do que para os de pinus. Essa inversão pode ter ocorrido, possivelmente, pela preservação dos *strands*, maior densificação do cimento e menor mineralização da superfície dos *strands*, nos painéis de eucalipto. Por outro lado, este efeito foi menor nos painéis de pinus devido ao maior volume de *strands*, visto que a sua densidade é maior quando comparada ao eucalipto, e isso ocasiona menor proporção de cimento por *strands* por área de painéis.

Tabela 48 – Valores médios e desvios padrão do arrancamento de parafuso topo dos painéis OSB-cimento-madeira residual não carbonatados e carbonatados

C.	Arrancamento de parafuso superfície (N)		
Cura	Eucalipto	Pinus	
Não carbonatado	398 (123) Bb	547 (71) Aa	
Carbonatado	873 (111) Aa	620 (124) Ab	

Letras maiúsculas iguais na coluna e letras minúsculas iguais na linha implicam níveis do fator com médias estatisticamente equivalentes ao nível de 0,05 de significância. Fonte: Própria autoria.

Na Tabela 49 estão apresentados os valores médios e desvio padrão de adesão interna (AI) dos painéis não carbonatados e carbonatados. Os resultados obtidos mostraram que não houve interação entre os fatores: espécie de madeira e processo de carbonatação (p > 0,05). Entretanto, ao analisar os fatores separadamente foram observadas diferenças significativas. O processo de carbonatação resultou em maiores valores de AI em comparados com os painéis não carbonatados (p < 0,05).

E, analisando o fator espécie de madeira, a média geral dos painéis produzidos com eucalipto foi significativamente maior que os painéis produzidos com pinus (p < 0,05). Tendo em vista que o que o requisito mínimo para a propriedade de AI para painéis cimento-madeira é de 0,40 MPa (STANDARDIZATION, 1987) e para painéis OSB/1 é de 0,30, nenhum dos painéis atendeu às normativas.

~	Adesão interna (MPa)			
Cura	Eucalipto	Pinus	Média	
Não carbonatado	0,22 (0,08) *	0,10 (0,03) *	0,16 (0,08) B	
Carbonatado	0,27 (0,04) *	0,19 (0,02) *	0,22 (0,05) A	
Média	0,24 (0,07) a	0,14 (0,05) b		

Tabela 49 – Valores médios e desvios padrão da adesão interna dos painéis OSB-cimentomadeira residual não carbonatados e carbonatados

Letras maiúsculas iguais na linha implicam níveis do fator com médias estatisticamente equivalentes ao nível de 0.05 de significância. Letras minúsculas iguais na coluna implicam níveis do fator com médias estatisticamente equivalentes ao nível de 0.05 de significância\* Não houve interação entre o fator (cura e espécie de madeira). Fonte: Própria autoria.

#### 6.4.2.5. Efeito da carbonatação na microestrutura dos painéis

Na Figura 45 estão apresentadas as micrografias dos painéis OSB-cimento-madeira residual com 28 dias: (a) eucalipto não carbonatado; (b) eucalipto carbonatado; (c) pinus não carbonatado e (d) pinus carbonatado. Quando observadas as micrografias do painel produzido com eucalipto não carbonatado, foi constatado os *strands* foram levemente preenchidos por produtos de hidratação do cimento, ou seja, até esta idade, houve o efeito da mineralização.

Bem como, nas micrografias do eucalipto não carbonatado, foram observadas a presença de espaços vazios na interface entre o *strand* e matriz. Para as micrografias do painel produzido com pinus não carbonatado é evidente o efeito da mineralização nos *strands*.

Por outro lado, para os painéis carbonatados, especialmente para o painel de eucalipto, as micrografias indicam uma melhora na interface entre o *strand* e a matriz. Nas micrografias do painel de pinus carbonatado, foi observado que a carbonatação diminuí o efeito da mineralização, contudo, este efeito ainda ocorreu. Uma hipótese, para este efeito no painel de pinus, pode estar relacionada com a sua hidrofílicidade, visto que conforme reportado na etapa 1, os *strands* de pinus foram significativamente superiores aos *strands* de eucalipto após imersão em água por 24 h (Tabela 14).

A matriz mais densa e estável devido à formação do carbonato de cálcio, com a diminuição do efeito da mineralização, assim como a melhor interface *strand*-matriz corroborou com os resultados apresentados nos ensaios físicos e mecânicos. Uma vez que que a utilização da carbonatação acelerada nos painéis OSB-cimento-madeira residual possibilitou

uma diminuição de aproximadamente 71% (eucalipto) e 31% (pinus) no inchamento em espessura dos materiais.



Figura 45 – Micrografias dos painéis OSB-cimento-madeira residual com 28 dias

Fonte: Própria autoria

Todavia, para a propriedade de absorção de água, a carbonatação acelerada resultou em um decréscimo de 41% para os painéis de eucalipto, enquanto que para os painéis de pinus houve uma diminuição de 37% na absorção de água. As micrografias também justificam os maiores valores de módulo de ruptura e módulo elástico dos painéis carbonatados, visto que após a cura que os materiais apresentaram tais propriedades próximas e em alguns casos superiores aos requeridos pela EN300: 2006 para o painel OSB/1.

#### 6.4.3. Painéis avaliados com 100 ciclos de envelhecimento

#### 6.4.3.1. Termogravimetria (TG/DTG) difratometria (DRX)

A Figura 46 ilustra os termogramas TG/DTG das amostras dos painéis OSB-cimentomadeira residual de eucalipto e pinus não carbonatado e carbonatado com 100 ciclos de envelhecimento. Assim como visto nos termogramas das amostras com 28 dias, para os termogramas com 100 ciclos também são identificados três picos principais. E, ao avaliar o efeito da carbonatação nos painéis envelhecidos constatou-se que:

- No primeiro pico (90 °C 200 °C) foi observada uma diminuição do pico correspondente à decomposição térmica do silicato de cálcio hidratado (CSH) e etringita nos painéis carbonatados (TAYLOR, 1998; PIPILIKAKI et al., 2008).
- ii. No segundo pico (400 °C 500 °C), correspondente a decomposição térmica do hidróxido de cálcio, foi observado que nos painéis carbonatados com 100 ciclos o hidróxido de cálcio foi significativamente consumido para a formação do carbonato de cálcio.
- iii. No terceiro pico (700 °C 800 °C), relacionado a decomposição térmica do carbonato de cálcio, observa-se um aumento deste pico nos painéis carbonatados com 100 ciclos de envelhecimento. Mesmo após o envelhecimento das amostras não carbonatadas, observou-se a decomposição térmica do carbonato de cálcio mal cristalizado (por volta de 700 °C), enquanto que para as amostras carbonatadas foi observado a decomposição térmica do carbonato de cálcio bem cristalizado (por volta de 750 °C) (CABRAL et al., 2018a).



Figura 46 – Termogramas de TG/DTG das amostras dos painéis OSB-cimento-madeira residual de eucalipto e pinus com 100 ciclos de envelhecimento

Fonte: Própria autoria.

A Tabela 50 apresenta as porcentagens estimadas de carbonato de cálcio e hidróxido de cálcios dos painéis não carbonatados e carbonatados com 100 ciclos, obtidas por meio de cálculos estequiométricos. Foi observada uma redução no teor de hidróxido de cálcio dos painéis carbonatados com 100 ciclos de 6,58% para 4,19% na amostra do painel de eucalipto e de 5,88% para 2,67% na amostra do painel de pinus.

Tabela 50 – Estimativa do carbonato de cálcio e hidróxido de cálcio após 100 ciclos de envelhecimento

Cura _	Hidróxido de cálcio (%)		Carbonatado de cálcio (%)	
	Eucalipto	Pinus	Eucalipto	Pinus
Não carbonatado	6,58	5,88	10,14	10,16
Carbonatado	4,19	2,67	39,84	32,34

Fonte: Própria autoria.

Em relação ao carbonato de cálcio, foi observado um aumento dos painéis carbonatados com 100 ciclos de 10,14% para 39,84 na amostra do painel de eucalipto e de 10,16% para 32,34% na amostra do painel de pinus. A Figura 47 apresenta os difratogramas das amostras dos painéis não carbonatados e carbonatados com 100 ciclos de envelhecimento: (a) eucalipto (b) no intervalo de 10° a 60° (2-theta).

Figura 47 – Difratogramas (DRX) das amostras dos painéis não carbonatados e carbonatados com 28 dias e 100 ciclos: (a) eucalipto (b) pinus





Fonte: Própria autoria.

O perfil de difratograma dos painéis não carbonatados e carbonatados foi similar ao observado nos difratogramas com 28 dias, ou seja, nos painéis carbonatados foi observado uma diminuição nos picos referentes ao hidróxido de cálcio e um aumento nos picos de carbonato de cálcio.

#### 6.4.3.2. Desempenho físico e mecânico

Os valores médios e desvio padrão da densidade aparente (DA) dos painéis OSBcimento-madeira residual envelhecidos por 100 ciclos de imersão e secagem, não carbonatados e carbonatados, estão apresentados na Tabela 51. O processo de carbonatação não resultou em diferença significativa na DA dos painéis com 100 ciclos, ambas as espécies de madeira (p > 0,05).

Tabela 51 – Valores médios e desvios padrão de densidade aparente painéis não carbonatados e carbonatados 100 ciclos

~	Densidade aparente (kg/m <sup>3</sup> )		
Cura	Eucalipto	Pinus	
Não carbonatado	1721 (88) *	1736 (298) *	
Carbonatado	1677 (174) *	1450 (164) *	

\* Não houve interação entre os fatores (cura e espécie de madeira). Fonte: Própria autoria.

Na Tabela 52 são apresentados os valores médios e desvios padrão de inchamento em espessura (IE) após 24 h em água dos painéis envelhecidos por 100 ciclos, não carbonatados e carbonatados.

Tabela 52 – Valores médios e desvios padrão para o inchamento em espessura dos painéis não carbonatados e carbonatados 100 ciclos

~	Inchamento em espessura (%)		
Cura	Eucalipto	Pinus	
Não carbonatado	2,72 (1,59) *	4,43 (1,96) *	
Carbonatado	2,39 (1,26) *	2,39 (2,23) *	

\* Não houve interação entre os fatores (cura e espécie de madeira). Fonte: Própria autoria.

O processo de carbonatação não resultou em uma diminuição estatisticamente significativa nos valores de IE dos painéis envelhecidos (p > 0,05). O mesmo aconteceu ao comparar a espécie de madeira utilizada, não havendo diferença nos valores de IE nos painéis não carbonatados e carbonatado (p > 0,05).

No entanto, nota-se que os painéis carbonatados (eucalipto e pinus) após 100 ciclos de imersão e secagem apresentaram valores próximos aos requeridos pela ISO 8335:1987 que estabelece valores máximos de IE 24 h de 1,8% após 24 h, assim como, valores foram inferiores ao valor máximo IE 24 h de 25%, requerido para painéis na norma OSB/1(EN300: 2006).

Na Tabela 53 estão apresentados os valores médios e desvios padrão de absorção de água (AA) dos painéis envelhecidos por 100 ciclos, não carbonatados e carbonatados. O processo de carbonatação não resultou em uma diminuição estatisticamente significativa nos valores de absorção de água dos painéis envelhecidos (p > 0,05). O mesmo aconteceu ao comparar a espécie de madeira utilizada, não houve diferença nos valores de absorção nos painéis sem carbonatação e com carbonatação acelerada (p > 0,05).

~	Absorção de água (%)		
Cura -	Eucalipto	Pinus	
Não carbonatado	19,81 (1,16) *	19,08 (4,07) *	
Carbonatado	16,18 (3,40) *	18,05 (2,74) *	

Tabela 53 – Valores médios e desvios padrão para a absorção de água dos painéis não carbonatados e carbonatados 100 ciclos

\* Não houve interação entre os fatores (cura e espécie de madeira). Fonte: Própria autoria.

Na Tabela 54 os valores médios e desvios padrão do módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) na direção paralela do *strand* dos painéis OSB-cimento-madeira residual não carbonatados e carbonatados obtidos na flexão. Ao analisar os painéis 100 ciclos, foram observadas diferenças significativas nos valores de MOR e MOE ocasionadas pelo processo de carbonatação e pela espécie de madeira (p < 0.05).

A comparação entre as amostras com 100 ciclos de ambas as madeiras, constatou um aumento significativo nas propriedades mecânicas do material carbonatado em comparação ao não carbonatado tanto para MOR como também para o MOE após 100 ciclos, ou seja, o processo de carbonatação preservou os *strands* após o envelhecimento e com isso também as propriedades mecânicas (p < 0.05). Os valores de MOR dos materiais envelhecidos não

carbonatados foram iguais a 7,89 MPa e 5,59 MPa enquanto que para os materiais carbonatados foram iguais a 17,27 MPa e 9,60 MPa, respectivamente para os painéis produzidos com eucalipto e pinus.

Tabela 54 – Valores médios e desvios padrão para o módulo de ruptura e módulo de elasticidade dos painéis não carbonatados e carbonatados 100 ciclos testados na direção

	Ĩ			
G	Modulo de ruptura (MPa) - na direção paralela do strand			
Cura	Eucalipto	Pinus	Eucalipto	Pinus
Não carbonatado	7,89 (1,57) Ba	5,59 (1,79) Bb	2950 (887) Ba	1402 (857) Bb
Carbonatado	17,27 (1,94) Aa	9,60 (2,06) Ab	8244 (866) Aa	3106 (539) Ab

paralela do strand

Letras maiúsculas iguais na coluna e letras minúsculas iguais na linha implicam níveis do fator com médias estatisticamente equivalentes ao nível de 0,05 de significância. Fonte: Própria autoria.

Portanto, o processo de carbonatação resultou em aumentos de 119% para os painéis de eucalipto e de 72% para os painéis de pinus para os valores de MOR. Enquanto que os valores de MOE passaram de 2950 MPa e 1402 MPa para 8244 MPa e 3106 MPa, respectivamente para os painéis de eucalipto e pinus, representando assim, nos painéis envelhecidos um aumento de 179% para os de eucalipto e de 121% para os de pinus após o processo de carbonatação.

Ao comparar o efeito da carbonatação nos painéis envelhecidos entre as espécies de madeira, foi constatado que a produção dos painéis com eucalipto (17,27 MPa para MOR e 8244 MPa para MOE) foi significativamente maior dos que os produzidos com pinus (9,60 MPa para MOR e 3106 para MOE) (p < 0,05). Contudo, ao avaliar as propriedades mecânicas na flexão na direção perpendicular do *strand* dos painéis não carbonatados e carbonatados (Tabela 55), foi observado que somente para os painéis de eucalipto envelhecidos o processo de carbonatação resultou em maiores valores de MOR (11,39 MPa) e MOE (4184 MPa) em comparação com os valores dos painéis não carbonatados MOR (3,94 MPa) e MOE (1166 MPa) (p < 0,05).

De maneira similar aos resultados encontrados na direção paralela do *strand*, o MOR e MOE dos painéis envelhecidos e carbonatados produzidos com eucalipto foram significativamente superiores em comparação com os painéis produzidos com pinus (p < 0,05). Para os painéis testados na direção perpendicular do *strand* envelhecidos e não carbonatados diferenças significativas entre as espécies de madeira não foram encontradas (p > 0,05).

perpendicular do strand				
Cruze	Módulo de ruptura (MPa) -na direção perpendicular do strand			
Cura	Eucalipto	Pinus	Eucalipto	Pinus
Não carbonatado	3,94 (1,72) Ba	4,27 (2,45) Aa	1166 (712) Ba	1347 (691) Aa
Carbonatado	11,39 (2,08) Aa	3,57 (0,80) Ab	4184 (1831) Aa	1187 (192) Ab

Tabela 55 – Valores médios e desvios padrão para o módulo de ruptura dos painéis OSBcimento-madeira residual não carbonatados e carbonatados 100 ciclos testados na direção

Letras maiúsculas iguais na coluna e letras minúsculas iguais na linha implicam níveis do fator com médias estatisticamente equivalentes ao nível de 0,05 de significância. Fonte: Própria autoria.

Estes resultados para as propriedades de MOR e MOE dos painéis OSB-cimentomadeira residual envelhecidos indicam que a cura com carbonatação acelerada preservou as propriedades mecânicas dos painéis e garantiu melhor adesão entre os *strands* e a matriz após o teste de envelhecimento acelerado com 100 ciclos de molhagem e secagem. Provavelmente isto se deve ao fato dos compósitos cimentícios carbonatados possuírem maior estabilidade química e com isso maior durabilidade, visto que o carbonato de cálcio é um composto mais estável que o hidróxido de cálcio (MOHR et al. 2007).

Através dos resultados obtidos para as propriedades mecânicas de MOR e MOE dos painéis, constatou-se que após 100 ciclos de imersão e secagem os painéis produzidos com eucalipto carbonatados cumpriram os requisitos mínimos da normativa ISO 8335 (STANDARDIZATION, 1987), atingindo os valores mínimos de 9,0 MPa para o MOR e 3000 MPa para o MOE tanto para as amostras testadas na direção paralela do *strand* bem como para as amostras testadas na configuração longitudinal em relação ao *strand*.

Além disso, os painéis produzidos com eucalipto carbonatados, os valores médios para a propriedade de MOR na direção paralela do *strand* dos painéis carbonatados foram próximos ao requisito mínimo de 20 MPa na direção paralela do strand e superiores ao requisito mínimo de 10 MPa na direção perpendicular do *strand* estabelecidos pela EN300: 2006 para os painéis OSB/1. Em relação ao MOE dos painéis de eucalipto carbonatados, os resultados de na direção paralela e na direção perpendicular do *strand* foram superiores a 2500 MPa (na direção paralela) e 1200 MPa (contra) prescritos pela EN300: 2006 para o OSB/1.

Para o painel de pinus carbonatado após 100 ciclos de imersão e secagem, constatou-se que os materiais somente cumpriram os requisitos mínimos da normativa ISO 8335

(STANDARDIZATION, 1987) de 9,0 MPa para o MOR e 3000 MPa para o MOE para as amostras testadas na direção paralela do *strand*. Além disso, os painéis de pinus carbonatados 100 ciclos, não cumpriram os requisitos para o OSB/1 (EN300: 2006) para o MOR e MOE (na direção paralela e na direção perpendicular do *strand*).

#### 6.4.3.3. Caracterização microestrutural

A Figura 48 apresenta as micrografias dos painéis OSB-cimento-madeira residual com 100 ciclos: (a) eucalipto não carbonatado; (b) eucalipto carbonatado; (c) pinus não carbonatado e (d) pinus carbonatado. Ao avaliar as micrografias do painel produzido com eucalipto não carbonatado, foi constatado que os *strands* descolados da matriz após 100 ciclos de imersão e secagem. Enquanto que para as micrografias do painel produzido com pinus não carbonatado foi constada a mineralização nos *strands*, conforme já mencionado, tal efeito nos painéis de pinus pode estar atrelado a hidrofílicidade do pinus.

Para as amostras carbonatadas, as micrografias do painel de eucalipto mostram uma melhora na interface entre o *strand* e a matriz, contudo, um leve efeito de mineralização foi observado nos *strands*. As micrografias do painel de pinus mostram que os *strands* foram deteriorados pelos consecutivos ciclos de imersão e secagem, além disso, foi observada a mineralização dos *strands* em algumas regiões.

Os resultados observados para os painéis OSB cimento-madeira residual corroboram com a hipótese apresentada por Mohr et al. (2005), em que através dos poros e também devido à sua natureza hidrofílica, os *strands* absorvem os produtos de hidratação de baixa solubilização durante os ciclos, tais como a etringita e o hidróxido de cálcio, o que resulta no inchamento das partículas. Por conseguinte, no decorrer dos ciclos, mais especificamente durante o processo de secagem, a água inserida de dentro dos *strands* é removida, causando uma redução de volume e deterioração da interface cimento-*strand*.

Tais efeitos são notados para os painéis após 100 ciclos de imersão e secagem não carbonatados. Além disso, durante o processo de secagem, os íons cálcio permanecem nas paredes e no lúmen dos *strands*, aumentando sua concentração e fazendo com que as *strands* se tornem mineralizadas e haja o decréscimo nas propriedades mecânicas (CABRAL; NAKANISHI; FIORELLI, 2017).



Figura 48 - Micrografias dos painéis OSB-cimento-madeira residual com 100 ciclos

Fonte: Própria autoria.

# 6.4.4. Considerações parciais etapa 4

Com base nos resultados apresentados nesta etapa as seguintes considerações podem ser emitidas para os painéis avaliados com 28 dias de idade:

- A partir da avaliação por aspersão da solução de fenolftaleína e análises de TG/DTG e DRX foi possível constatar que o processo de carbonatação ocorreu nos painéis OSB-cimento-madeira residual, sendo o hidróxido de cálcio transformado em carbonatado de cálcio, além da redução da alcalinidade da matriz.
- Para os painéis produzidos com eucalipto, foi constatado que a carbonatação promoveu o aumento da densidade aparente dos materiais de 1301 kg/m<sup>3</sup> para 1475 kg/m<sup>3</sup>. Isto se deve ao fato de a reação de carbonatação acelerada

proporcionar o aumento do volume de material no interior do compósito. No caso do painel de pinus, não foi observada diferença nos valores de densidade aparente quando realizado o processo de carbonatação.

- Foi observado que nos painéis de eucalipto, a carbonatação resultou em menores valores de inchamento em espessura e absorção de água quando comparados aos painéis não carbonatados. Todavia no painel de pinus, observou-se que os materiais carbonatados apresentaram menores valores de absorção de água. Isso se deve a densificação da matriz, que diminuiu a entrada de água, e consequentemente os valores de inchamento em espessura e absorção de água.
- Quanto ao módulo de ruptura na direção paralela do *strand* dos painéis, constatou-se que não houve diferenças entre os painéis de eucalipto e pinus, contudo, foi observado que a carbonatação resultou em um aumento de 63% no MOR testado na direção paralela do *strand*.
- Em relação ao módulo de elasticidade, ao avaliar o painel nas duas direções (na direção paralela e na direção perpendicular) foi observado que nos painéis de eucalipto a carbonatação aumentou significativamente as propriedades em comparação ao painel não carbonatado.

Referente ao desempenho físico e mecânico dos painéis avaliados após 100 ciclos de imersão e secagem, pode-se concluir que:

- Os painéis carbonatados (eucalipto e pinus) apresentaram valores de inchamento próximos aos requeridos pela ISO 8335:1987.
- Para os painéis carbonatados de eucalipto e pinus foram encontradas melhores propriedades mecânicas (módulo de ruptura e módulo de elasticidade). Isto se deve aos compósitos cimentícios carbonatados possuírem maior estabilidade química e com isso maior durabilidade.
- Na microestrutura dos painéis não carbonatados foi evidenciado a deterioração da interface strand-matriz bem como a mineralização do *strand*.

Portando, através dos resultados encontrados nesta etapa foi constatado que a cura com carbonatação acelerada melhorou as propriedades físicas e mecânicas tanto para os painéis OSB-cimento-madeira residual avaliados com 28 dias de idade, bem como nos painéis avaliados após 100 ciclos de imersão e secagem. Além disso, o eucalipto se mostrou uma boa opção para a produção dos painéis OSB-cimento-madeira residual com melhor desempenho ao ser comparado com o painel de pinus.

### 7. CONCLUSÕES

A partir deste trabalho pode-se concluir que:

1. Foi constatado que a utilização dos tratamentos (água fria, água quente e NaOH) não resultaram em melhoras significativas no desempenho físico, químico, mecânico, cristalográfico, morfológico e térmico dos *strands* de eucalipto e pinus a ponto de apresentar melhor interação destes com o cimento Portland do mesmo modo que os *strands* sem tratamento.

2. Foi possível produzir os painéis OSB-cimento-madeira residual experimentais com *strands* e foi constatado que os materiais apresentaram propriedades físicas próximas ao valor recomendado pela norma ISO 8335:1987. Em relação às propriedades mecânicas, os valores de módulo de ruptura - MOR e módulo de elasticidade - MOE para todos os materiais testados na direção paralela do *strand* foram superiores aos requeridos pela norma ISO 8335:1987, que estabelece valores mínimos de 9,0 MPa para o MOR e 3000 MPa para o MOE. No entanto, para as propriedades mecânicas de testadas na direção perpendicular do *strand* os materiais não atingiram os requisitos mínimos de MOR e MOE requerido pela ISO 8335:1987. Além disso, para a propriedade de MOR (paralela e perpendicular ao *strand*) dos painéis OSB-cimento-madeira residual experimentais, constatou-se que os valores encontrados não atingiram os de os valores de MOR a paralela ao *strand* = 20 MPa e MOR longitudinal ao *strand* = 10 MPa requisitos mínimos prescritos pela EN300: 2006 para os painéis OSB/1.

**3.** Os painéis OSB-cimento-madeira residual se mostraram um material isolante térmico cumprindo o requisito da normativa europeia EN 13986:2004. Foi observado que após o ajuste da água não evaporável (Wn) nos painéis, os valores de densidade aparente foram próximos ao valor proposto nos parâmetros produtivos. O aumento de *strands* de 35% para 45% resultou em um aumento de aproximadamente 31% no MOR (na direção paralela e contra) e de 93% no módulo de elasticidade (MOE) quando este foi ensaiado na direção perpendicular do strand. A pressão empregada para produzir os painéis OSB-cimento-madeira residual otimizados foi efetiva para criar uma taxa de compressão adequada para ambos os materiais (eucalipto e pinus), sendo evidenciado o efeito mola dos materiais.

4. A avaliação por fenolftaleína e pelas análises de TG/DTG e DRX constataram que o processo de carbonatação ocorreu nos painéis OSB-cimento-madeira residual. Foi observado que a carbonatação acelerada reduziu os valores de inchamento em espessura e absorção de água dos painéis. Os valores médios para a propriedade de MOR na direção paralela do *strand* dos painéis carbonatados foram próximos ao requisito mínimo de 20 MPa estabelecido pela EN300: 2006 para os painéis OSB/1. Ainda sobre os valores mínimos prescritos pela EN300: 2006 para o painel OSB/1, observou-se que ambos os painéis (eucalipto e pinus) carbonatados apresentaram valores de MOE na direção paralela do *strand* superior aos 2500 MPa. Sobre os painéis avaliados após 100 ciclos de imersão e secagem foi notado que o desempenho mecânico dos painéis carbonatado foi significativamente superior aos painéis não carbonatados.

Portanto, pode-se concluir que os painéis OSB-cimento-madeira residual produzidos com eucalipto e pinus apresentam potencial como material de construção, visto que as propriedades físicas e mecânicas estão de acordo com aquelas do painel cimento-madeira convencional. Como também, as propriedades mecânicas estão próximas àquelas obtidas para painel OSB/1 quando os painéis OSB cimento-madeira foram curados com carbonatação acelerada.

## REFERÊNCIAS

ABRUZZI, R. C. et al. Relationship between density and anatomical structure of different species of Eucalyptus and identification of preservatives. **Materials Research**, São Carlos, v. 16, n. 6, p. 1428–1438, 2013.

AGGARWAL, L. K. et al. Cement-bonded composite boards with arhar stalks. **Cement and Concrete Composites**, Kidlington v. 30, n. 1, p 44-51, 2008.

AGARWAL, U. P. et al. New cellulose crystallinity estimation method that differentiates between organized and crystalline phases. **Carbohydrate Polymers**, Kidlington v. 190, p. 262–270, 2018.

AIGBOMIAN, E. P.; FAN, M. Development of wood-crete from treated sawdust. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 52, p. 353–360, 2014.

AÏTCIN, P. Cements of yesterday and today: Concrete of tomorrow. **Cement and Concrete Research,** Kidlington, v. 30, n. 9, p. 1349-59, 2000.

ALMEIDA, A. E. F. S. et al. Improved durability of vegetable fiber reinforced cement composite subject to accelerated carbonation at early age. Cement and Concrete Composites, Kidlington, v. 42, p. 49–58, 2013.

AMZIANE, S.; SONEBI, M. Overview on Biobased Building Material made with plant aggregate. **RILEM Technical Letters**, v. 1, p. 31-38, 2016.

APA – THE ENGINEERED WOOD ASSOCIATION. Engineered Wood Construction
Guide Excerpt: Structural Composite Lumber Excerpt from the Engineered Wood
Construction Guide. Washington, 2011. Acesso em: 18 dez. 2018

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 14931. Execução

de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 14810-3**: Chapas de madeira aglomerada: Parte 3: métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. Anuário Estatístico da ABRAF 2013 - ano base 2012. Brasília: STCP Engenharia de Projetos, 2013.

ATOYEBI, O. D.; AWOLUSI, T. F.; DAVIES, I. E. E. Artificial neural network evaluation of cement-bonded particle board produced from red iron wood (Lophira alata) sawdust and palm kernel shell residues. **Case Studies in Construction Materials**, v. 9, p. e00185, 2018.

AUROY, M. et al. Comparison between natural and accelerated carbonation (3% CO<sub>2</sub>): Impact on mineralogy, microstructure, water retention and cracking. **Cement and Concrete Research**, Kidlington, v. 109, p. 64–80, 2018.

BABATUNDE, A. Durability characteristics of cement-bonded particleboards manufactured from maize stalk residue. **Journal of Forestry Research**, Harbin v. 22, n. 1, p. 111–115, 2011.

BILCATI, G. K. et al. Uso potencial de la fibra de curauá (ananas acutifolius) para la fabricación de compuestos cementicios. **Revista ingeniería de construcción**, Santiago, v. 33, n. 2, p. 155–160, 2018.

BOARDMAN, C. R.; GLASS, S. V.; LEBOW, P. K. Simple and accurate temperature correction for moisture pin calibrations in oriented strand board. **Building and Environment**, Kidlington, v. 112, p. 250–260, 2017.

BOERJAN, W.; RALPH, J.; BAUCHER, M. Lignin biosynthesis. Annual Review of Plant Biology, Palo Alto, v. 54, p. 519–546, 2003.

BORGES, P. H. R. et al. Carbonation of CH and C–S–H in composite cement pastes containing high amounts of BFS. **Cement and Concrete Research**, Kidlington, v. 40, n. 2, p. 284–292, 2010.

BORGES, P. H. R. et al. Carbonation durability of blended cement pastes used for waste encapsulation. **Materials and Structures**. Dordrecht. v. 45, n. 5, p. 663–678, 2011.

BORTOLETTO JÚNIOR, G.; GARCIA, J. N. Propriedades de resistência e rigidez à flexão estática de painéis compensados e OSB. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 28, n. 4, p. 557-564, 2004.

BRITISH STANDARD – **BS 13986:2004** Wood-based panels for use in construction - Characteristics, evaluation of conformity and marking. United Kingdom, 2004.

BULLARD, J. W. et al. Mechanisms of cement hydration. **Cement and Concrete Research**, Kidlington, v. 41, n. 12, p. 1208-1223, 2011.

CABRAL, C. P. T. et al. Propriedades de chapas tipo OSB, fabricadas com partículas acetiladas de madeiras de Eucalyptus grandis, Eucalyptus urophylla, Eucalyptus cloeziana e Pinus elliottii. **Revista Árvore**, Viçosa-MG v. 30, n. 4, p. 659–667, 2006.

CABRAL, M. R. **Painéis de partículas homogêneas cimento-bagaço de cana-de-açúcar curados por carbonatação acelerada.** 2016. 81 f, Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2016. Acesso em: 28 de jan. 2019.

CABRAL, M. R. et al. Evaluation of accelerated carbonation curing in cement-bonded balsa particleboard. **Materials and Structures**. Dordrecht, v. 51, n. 2, 14 p., 2018a

CABRAL, M. R. et al. Evaluation of pre-treatment efficiency on sugarcane bagasse fibers for the production of cement composites. Archives of Civil and Mechanical Engineering, Wroclaw, v. 18, n. 4, 2018b.

CABRAL, M. R. et al. Potential of Jerusalem Artichoke (Helianthus tuberosus L.) stalks to produce cement-bonded particleboards. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 122, p. 214–222, 2018c.

CABRAL, M. R.; NAKANISHI, E. Y.; FIORELLI, J. Evaluation of the Effect of Accelerated Carbonation in Cement–Bagasse Panels after Cycles of Wetting and Drying. Journal of Materials in Civil Engineering, Virginia, v. 29, n. 6, p. e04017018, 9, 2017.

CABRAL, M. R.; NAKANISHI, E. Y.; FIORELLI, J. Cement-Bonded Panels Produced with Sugarcane Bagasse Cured by Accelerated Carbonation. Journal of Materials in Civil Engineering, Virginia v. 30, n. 6, p. e04018103, jun. 2018.

Cai, Z; R. Ross. **Mechanical properties of wood-based composite materials**. In: R. J. Ross, ed. Wood Handbook-Wood as an engineering material. Centennial edition. General Technical Report FPL-GTR-190. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. Madison, Wisconsin, 12 p. 2010.

CAO, Y. et al. The influence of cellulose nanocrystals on the microstructure of cement paste. **Cement and Concrete Composites**, Kidlington, v. 74, p. 164–173, 2016.

CASTRO, V. et al. Avaliação dos efeitos de pré-tratamentos da madeira de Eucalyptus benthamii Maiden & Cambage no grau de compatibilidade com cimento Portland. **Revista Árvore**, Viçosa-MG v. 38, n. 5, p. 935-942, 2014.

CASTRO, V. G. DE. Espécies da Amazônia na produção de compósitos madeira-cimento por vibro-compactação. 2015. 221 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias. Curitiba. Acesso em: 17 de dez. 2018.

CASTRO, V. G. et al. Painéis cimento-madeira de Eucalyptus saligna com diferentes aditivos químicos e métodos de formação. **Floresta**, Curitiba, v. 45, n. 2, p. 349, 17 2014.

CASTRO, V.; IWAKIRI, S. Influência de diferentes níveis de acetilação nas propriedades físico-mecânicas de aglomerados e painéis madeira-cimento. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 4, p. 535–540, 2014.

CÉSAR, A. A. S. Estudo da interação adesivo-partícula em painéis OSB (Oriented Strand Board). 2011. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

CÉSAR, A. A. DA S. et al. Análise da qualidade do encolamento de partículas de painéis OSB em condições de laboratório. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 4, p. 501–508, 2014.

CHAKRABORTY, S. et al. Effect of Jute as Fiber Reinforcement Controlling the Hydration Characteristics of Cement Matrix. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, Washington, v. 52, n. 3, p. 1252-1260, 2013.

CHIROMITO, E. M. S. et al. Propriedades mecânicas de painéis produzidos com lascas de madeira em três diferentes comprimentos. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 44, n. 109, p. 175-180, 2016.

CHOUDHURY, A, KUMAR, S AND ADHIKARI, B. Recycled milk pouch and virgin lowdensity polyethylene/linear low-density polyethylene based coir fiber composites. **Journal of Applied Polymer Science**, Hoboken, v, 106, n. 2, p 775–785, 2007.

CONNERS, T. Distinguishing Softwoods from Hardwoods. 2015. Relatório, Agriculture and Natural Resources Publications. University of Kentucky. Acesso em 15 de dez. 2018

DE SÁ, V. A. et al. Manufatura de painéis cimento-madeira de cedro australiano (Toona ciliata M. Roem var. australis) de diferentes procedências e idade. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 88, p. 559-566, 2010.

DIQUÉLOU, Y. et al. Influence of binder characteristics on the setting and hardening of hemp lightweight concrete. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 112, p. 506–517, 2016.

DONAHUE, P. K.; ARO, M. D. Durable phosphate-bonded natural fiber composite products. **Construction and Building Materials**, Amsterdam v. 24, n. 2, p. 215–219, 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Procedimentos para análise lignocelulósica**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2010a. 54 p.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN. 494. Fibre-cement profiled sheets and fittings for roofing – products specification and test methods. London, 1994.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. European Standard - EN 300: oriented strand boards (OSB): definitions, classification and specifications. Belgium, 2006

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. European Standard - EN 310: Wood-based panels: determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength. Bruxelas, 1993.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION EN 317. Determination of swelling in thickness after immersion in water. Bruxelas, 1993.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. European Standard - EN 323: Wood-based: determination of density. Bruxelas, 1993.

SEMPLE, K, E; EVANS, P. D. Wood Cement Composites – Suitability of Western Australian mallee eucalypts, blue gum and melaleucas. A report for the RIRDC/Land & Water Australia/ FWPRDC/ MDBC Joint Venture Agroforestry Program, 2004. 64 p.

EVANS, P, ed., 2002, ACIAR **Proceedings** No.107 Wood-Cement Composites in the Asia Pacific Region, Australian Centre for International Agricultural Research, Canberra.

EZERSKIY, V.; KUZNETSOVA, N. V.; SELEZNEV, A. D. Evaluation of the use of the CBPB production waste products for cement composites. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 190, p. 1117–1123, 2018.

FAN, M. et al. Cement-bonded composites made from tropical woods: Compatibility of wood and cement. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 36, p. 135–140, 2012.

FEBRIANTO, F. et al. Effect of Strand Combination on Dimensional Stability and Mechanical Properties of Oriented Strand Board Made from Tropical Fast Growing Tree Species. Journal of Biological Sciences, v. 10, n. 3, p. 267–272, 2010.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood chemistry, ultra strucuture- reactions**. Berlin: Walterde Gruyter, 1984.

FERNÁNDEZ BERTOS, M. et al. A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO<sub>2</sub>. Journal of Hazardous Materials, Amsterdam, v. 112, n. 3, p. 193–205, 2004.

FERRAZ, J. M. et al. Effects of treatment of coir fiber and cement/fiber ratio on properties of cement-bonded composites. **BioResources**, Raleigh, v. 6, n. 3, p. 3481–3492, 2011.

FERRO, F. S. et al. Environmental aspects of oriented strand boards production. A Brazilian case study. **Journal of Cleaner Production**, Kidlington, v. 183, p. 710–719, 10 2018.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS 1990, **Energy conservation in the mechanical forest industries**, Roma. Acesso em 10 de dez. 2018.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). FAOSTAT – Database Forestry Production and trade. 2018 http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO. Acesso em 11 de dez. de 2018.

FOURNEL, S. et al. Influence of biomass properties on technical and environmental performance of a multi-fuel boiler during on-farm combustion of energy crops. **Applied Energy**, Kidlington, v. 141, p. 247–259, 2015.

FRYBORT, S. et al. Investigation of mechanical interaction at the interface of wood-cement composites by means of electronic speckle pattern interferometry. **Biosources**, Raleigh, v. 7, n. 1970, p. 2483–2495, 2012.

GALINA, N. R. et al. Comparative study on combustion and oxy-fuel combustion environments using mixtures of coal with sugarcane bagasse and biomass sorghum bagasse by the thermogravimetric analysis. **Journal of the Energy Institute**, Leeds, 2018. (No prelo).

GARCI, M. J.C.; JENNINGS, H. M. New Insights into the Effects of Sugar on the Hydration and Microstructure of Cement Pastes. **Cement and Concrete Research**, Kidlington, v. 32, n. 3, p. 393–399. 2002.

GERÇEL, H. F. Production and characterization of pyrolysis liquids from sunflower-pressed bagasse. **Bioresource Technology**, Kidlington, v. 85, n. 2, p. 113–117, 2002.

GHAFFAR, S. H.; FAN, M. Structural analysis for lignin characteristics in biomass straw. **Biomass and Bioenergy**, Kidlington, v. 57, p. 264–279, 201

GLASS, S.V; ZELINKA, S.L. Moisture Relations and Physical Properties of Wood. In: Forest Product Laboratory, editor. Wood Handbook - Wood as an Engineering Material. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison (Wisconsin, USA): Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory; 2010, Chapter 4.

GODA, K. et al. Improvement of plant based natural fibers for toughening green composites effect of load application during mercerization of ramie fibers. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Kidlington, v. 37, n. 12. p. 2213–2220. 2006.

GOLDEMBERG, J. Biomassa e energia. Química Nova, São Paulo v. 32, n. 3, p. 582–587, 2009

GONÇALVES, A. P. B. et al. Physicochemical, Mechanical and Morphologic Characterization of Purple Banana Fibers. Materials **Research**, São Carlos, v. 18, supl. 2, p. 205-209, Dec. 2015.

GORSKI L. **Painéis de partículas orientadas (OSB) da madeira de Pinus spp. e Eucalyptus benthamii**. 2014, 146 f, (Mestrado em Engenharia Florestal). – Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, 2014.

GUIMARÃES, J. L. et al. Characterization of banana, sugarcane bagasse and sponge gourd fibers of Brazil. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam v. 30, n. 3, p. 407–415, 2009.

GÜMÜSKAYA, E.; USTA, M.; KIRCI, H. The effects of various pulping conditions on crystalline structure of cellulose in cotton linters. **Polymer Degradation and Stability**, Kidlington, v. 81, n. 3, p. 559–564, 2003.

HEWLETT, P.C. Lea's Chemistry of Cement and Concrete, fourth ed. Butterworth Heinemann, London. 2004

HUBBE, M. A.; GARDNER, D. J.; SHEN, W. Contact Angles and Wettability of Cellulosic Surfaces: A Review of Proposed Mechanisms and Test Strategies. **BioResources**, Raleigh, v. 10, n. 4, p. 8657–8749, 14 set. 2015.

HUNNICUTT, W.; STRUBLE, L.; MONDAL, P. Effect of synthesis procedure on carbonation of calcium-silicate-hydrate. **Journal of the American Ceramic Society**, Malden, v. 100, n. 8, p. 3736–3745, 1 ago. 2017.

INTERNATIONAL STANDIZATION ORGANIZATION -ISO 8335. Cement-bonded particleboards—boards of Portland or equivalent cement reinforced with fibrous wood particles. Switzerland, 1987.

IWAKIRI, S.; et al. Utilização da madeira de eucalipto na produção de chapas de partículas orientadas – OSB. **Cerne**, Lavras, v. 10, n.1, p. 46- 52, jan./jun. 2004.

IWAKIRI, S. et al. Produção de chapas de madeira aglomerada de cinco espécies de pinus tropicais. **Floresta e Ambiente,** Seropédica, vol.8, n, único, p.137-142, 2001.

IWAKIRI, S. et al. Avaliação do potencial de utilização da madeira de Schizolobium Amazonicum "paricá" e Cecropia hololeuca "embaúba" para produção de painéis cimentomadeira. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 2, p. 303–308, 2012 IWAKIRI, S. et al. Propriedades tecnológicas de painéis cimento-madeira produzidos com partículas de eucalipto. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 14, n. 3, p. 217–223, 2015.

IWAKIRI, S.; PRATA, J. G. Utilização da madeira de Eucalyptus dunnii na produção de painéis de cimento-madeira. **Cerne**, Lavras, v. 14, n. 1, p. 68–74, 2008.

JÄHN, A. et al. Characterization of alkali treated flax fibres by means of FT Raman spectroscopy and environmental scanning electron microscopy. **Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, Kidlington, v. 58, n 10, p. 2271-2279, 2002.

JOHANSSON, D. Strength and color response of solid wood to heat treatment. 2005. 34 f (Licentiate Thesis) – Luleå University of Technology, Department of Skellefteå Campus, Division of Wood Technology. 2005.

JOHN, M. J.; THOMAS, S. Biofibres and biocomposites. **Carbohydrate Polymers**, Kidlington, v. 71, n. 3, p. 343–364, 2008.

JORGE, F. C.; PEREIRA, C.; FERREIRA, J. M. F. Wood-cement composites: a review. Holz Als Roh-und Werkstoff, Heidelberg, v. 62, n. 5, p. 370–377, 2004.

KAZULIS, V. et al. Carbon storage in wood products. **Energy Procedia**, Kidlington, v. 128, p. 558–563, 1 2017.

KHEDARI, J. et al. New lightweight composite construction materials with low thermal conductivity. Cement and Concrete Composites, Kidlington, v. 23, n. 1, p. 65–70, 2001.

KOLLMANN, F. P.; KUENZI, E.W.; STAMM. A. J. (1975). **Principles of wood science and technology. Wood based materials. Properties of Particleboard**. Nail-Holding and Screw-Holding Ability. P. 523 – 529. New York

KUNDU, S. P. et al. Effectiveness of the mild alkali and dilute polymer modification in controlling the durability of jute fibre in alkaline cement medium. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 174, p. 330–342, 2018.

LABIDI, K. et al. All-cellulose composites from alfa and wood fibers. Industrial Crops and **Products**, Amsterdam, v. 127, p. 135–141, 2019.

LAM, L.; WONG, Y.; POON, C. Degree of hydration and gel/space ratio of high-volume fly ash/cement systems. **Cement and Concrete Research**, Kidlington, v. 30, n. 5, p. 747–756, 2000.

LATORRACA, J. V. F. Eucalyptus spp. na produção de painéis de cimento-madeira. 2000.191 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, 2000.

LAVOINE, N. et al. Microfibrillated cellulose – Its barrier properties and applications in cellulosic materials: A review. **Carbohydrate Polymers**, Kidlington, v. 90, n. 2, p. 735–764, 2012.

LEBORGNE, M. R.; GUTKOWSKI, R. M. Effects of various admixtures and shear keys in wood–concrete composite beams. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 24, n. 9, p. 1730–1738, 2010.

LEE, A. W. C.; HONG, Z. Compressive strength of cylindrical samples as an indicator of woodcement compatibility. **Forest products journal**, Peachtree Corners, v. 36, n. 11/12, p. 87–90, 1986.

LI, M. et al. Structural response of cement-bonded wood composite panels as permanent formwork. **Composite Structures**, Kidlington, v. 209, p. 13–22, 2019.

LIPTÁKOVÁ, E.; KÚDELA, J. Analysis of the Wood-Wetting Process. Holzforschung, Berlin, v. 48, n. 2, p. 139–144, 1994.

LIU, W. J.; JIANG, H.; YU, H. Q. Thermochemical conversion of lignin to functional materials: a review and future directions. **Green Chemistry**, Cambridge, v. 17 p. 4888-4907, 2015.

LOPES, W. A; FASCIO, M. Esquema para interpretação de espectros de substâncias orgânicas na região do infravermelho. **Química Nova**, São Paulo, v. 27, n. 4, p. 670-673, 2004.

LOPES, Y. L. V. et al. Avaliação do potencial técnico da madeira e cascas de Eucalyptus grandis Hill ex Maiden na produção de painéis cimento-madeira. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 67, p. 111–122, 2005.

LOTHENBACH, B; DURDZINSKI, P; WEERDT, K. D. C. Thermogravimetric analysis. In: SCRIVENER, K, SNELLINGS, R; LOTHENBACH, B **A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials,** CRC Press, Oxford, 2016.

LUBE, V. M. Effects of moisture-induced thickness swelling on the microstructure of oriented strand board. 2016. 134 f (Mestrado em Forestry) – The University of British Columbia, 2016.

MACÊDO, A. N.; SOUZA, A. A. C. E; NETO, B. B. P. Chapas de cimento-madeira com resíduos da indústria madeireira da Região Amazônica. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 12, n. 2, p. 131–150, 2012.

MACEDO, L. B. DE et al. Painéis OSB de madeira Pinus sp. e adição de partículas de polipropileno biorientado (BOPP). **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 44, n. 112, p. 887-894, 2016.

MALONEY, T. M. Modern particleboard e dry-process fiberboard manufacturing. 2nd ed. São Francisco: Miller Freeman Publication, 1993. 689 p.

MARTIN, A. R. et al. Studies on the thermal properties of sisal fiber and its constituents. **Thermochimica Acta**, Amsterdam, v. 506, n. 1–2, p. 14–19, 2010.

MATOSKI, A. **Utilização de pó de madeira com granulometria controlada na produção de painéis de cimento-madeira**. 2005. 187 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

MAZIAD, N. A. et al. Radiation synthesis and characterization of super absorbent hydrogels for controlled release of some agrochemicals. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Hungary, v. 307, n. 1, p. 513–521, 2016.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto:** microestrutura, propriedades e materiais. 2nd. ed. Sao Paulo: Ibracon, 2014.

MENDES, L. M. Pinus spp. na produção de painéis de partículas orientadas (OSB). 2001.103 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

MENDES, R. F. Efeito do tratamento térmico sobre as propriedades de painéis OSB. 2010. 115p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", USP, Piracicaba, 2010.

MOHR, B. J.; BIERNACKI, J. J.; KURTIS, K. E. Supplementary cementitious materials for mitigating degradation of kraft pulp fiber-cement composites. **Cement and Concrete Research**, Kidlington v. 37, n. 11, p. 1531–1543, 2007.

MOHR, B. J.; NANKO, H.; KURTIS, K. E. Durability of kraft pulp fiber – cement composites to wet / dry cycling. Cement and Concrete Composites, Kidlington, v. 27, p. 435–448, 2005.

MORÁN, J. I. et al. Extraction of cellulose and preparation of nanocellulose from sisal fibers. **Cellulose**, London, v. 15, n. 1, p. 149–159, 2008.

MOSLEMI, A. A. Emerging technologies in mineral-bonded wood and fiber composites. Advanced Performance Materials, Lancs, v. 6, n. 2, p. 161–179, 1999

MOSLEMI, A. A.; GARCIA, J. F.; HOFSTRAND, A. D. Effect of Various Treatments and Additives on Wood-Portland Cement-Water Systems. **Wood and Fiber Science**, Monona, v. 15, n. 2, p. 164–176, 1983.

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

MUSOKOTWANE, I E. O. **Particle moisture content effects on the physical and mechanical properties of magnesite cement-bonded particleboard**. 1982. 153 f. Dissertação (Master of Science) - The University of Bristish Columbia, 1982.

NAKANISHI, E. Y. et al. Formaldehyde-free particleboards using natural latex as the polymeric binder. **Journal of Cleaner Production**, , Kidlington, v. 195, p. 1259-1269 2018

NASCIMENTO, M. F. DO; LAHR, F. A. R.; CHRISTOFORO, A. L. **Painéis de partículas de média densidade: Fabricação e caracterização**. Série Didática – Produtos Derivados de Madeira – Painéis de Partículas, Escola de Engenharia de São Carlos, 74 p, 2015.

NASCIMENTO, M. F. et al. Painéis OSB fabricados com madeiras da caatinga do nordeste do Brasil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 15, n. 1, p. 41–48, 2015.

NASSER, R. A. et al. Use of tree pruning wastes for manufacturing of wood reinforced cement composites. **Cement and Concrete Composites**, Kidlington, v. 72, p. 246–256, 2016.

NCL INDUSTRIES LTD. **Bison panel - Cement bonded particle board**. Abids. Disponível em: <u>https://www.nclind.com/characteristics-of-bison</u> Acesso em: 18 dez. 2018.

OH, S. Y. et al. Crystalline structure analysis of cellulose treated with sodium hydroxide and carbon dioxide by means of X-ray diffraction and FTIR spectroscopy. **Carbohydrate Research**, Kidlington, v. 340, n. 15, p. 2376-2391, 2005.

OKINO, E. Y. et al. Cement-bonded wood particleboard with a mixture of eucalypt and rubberwood. Cement and Concrete Composites, Kidlington, v. 26, n. 6, p. 729–734, 2004.

OKINO, E. Y. A; TEIXEIRA, D. E; DEL MENEZZI, C. H. S. Post-thermal treatment of Oriented Strand Board (OSB) made from cypress (Cupressus glauca lam.). Maderas. Ciencia y tecnologia, Concepción, v. 9, n. 3, p. 199-210, 2007.

OLIVEIRA, F. et al. Phenolic and lignosulfonate-based matrices reinforced with untreated and lignosulfonate-treated sisal fibers. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 96, p. 30–41, 1 2017.

OZSAHIN, S. Optimization of process parameters in oriented strand board manufacturing with artificial neural network analysis. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlin, v. 71, n. 6, p. 769–777, 2013.

PAGE, J. et al. Multi-physical properties of a structural concrete incorporating short flax fibers. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 140, p. 344–353, 2017.

PAPADOPOULOS, A. N. Natural Durability and Performance of Hornbeam Cement Bonded Particleboard **Maderas. Ciencia y tecnologia**, Concepción, v. 10, n. 2, p. 93–98, 2008.

PETER, M. A. et al. Competition of several carbonation reactions in concrete: A parametric study. **Cement and Concrete Research**, Kidlington, v. 38, n. 12, p. 1385–1393, 2008.

PIETAK, A. et al. Atomic force microscopy characterization of the surface wettability of natural fibres. **Applied Surface Science**, Amsterdam, v. 253, n. 7, p. 3627–3635, 2007.

PIPILIKAKI, P. et al. The effect of temperature on thaumasite formation. **Cement and Concrete Composites**, Kidlington v. 30, n. 10, p. 964–969, 2008.

PLINKE, B. et al. Increase of Material Yield in Plywood Production with New Veneer Processing Technologies. PTFBPI: "1st International Conference on Processing Technologies for the Forest and Biobased Products Industries". **Proceedings**. Kuchl, Austria: Salzburg University of Applied Sciences, 2010

POLETTO, M.; ORNAGHI JÚNIOR, H. L.; ZATTERA, A. J. Native cellulose: Structure, characterization and thermal properties. **Materials**, Basel, v. 7, n. 9, p. 6105-6119, 2014.

QUIROGA, A.; MARZOCCHI, V.; RINTOUL, I. Influence of wood treatments on mechanical properties of wood cement composites and of Populus Euroamericana wood fibers. **Composites Part B: Engineering**, Oxford, v. 84, p. 25–32, 2016.

RAHMAN, M. M.; KHAN, M. A. Surface treatment of coir (Cocos nucifera) fibers and its influence on the fibers' physico-mechanical properties. **Composites Science and Technology**, Barking v. 67, n. 11–12, p. 2369–2376, 2007.

RIDI, F. et al. Hydration kinetics of tricalcium silicate by calorimetric methods. **Journal of Colloid and Interface Science**, San Diego, v. 364, n. 1, p. 118–124, 2011.

RODRIGUES, B. V. M. et al. Ultrathin and nanofibers via room temperature electrospinning from trifluoroacetic acid solutions of untreated lignocellulosic sisal fiber or sisal pulp. **Journal of Applied Polymer Science**, Hoboken, v. 132, n. 16, p. n/a-n/a, 20 abr. 2015.

ROSA, T. S. DA et al. Utilização de Cinco Espécies de Eucalyptus para a Produção de Painéis OSB. **Floresta Ambiente**, Seropédica, v 24, e20160049, 2017.

ROSA, M. F. et al. Effect of fiber treatments on tensile and thermal properties of starch/ethylene vinyl alcohol copolymers/coir biocomposites. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 100, n. 21, p. 5196–5202, 2009.

ROSTAMI, V. et al. Microstructure of cement paste subject to early carbonation curing. **Cement and Concrete Research**, Kidlington v. 42, n. 1, p. 186–193, 2012.

ROY, A. et al. Improvement in mechanical properties of jute fibres through mild alkali treatment as demonstrated by utilisation of the Weibull distribution model. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 107, p. 222–228, 2012.

SÁ, V. A. DE et al. Manufatura de painéis cimento-madeira de cedro australiano (Toona ciliata M. Roem var. australis) de diferentes procedências e idade. Scientia Forestalis, Piracicaba, v. 38, n. 88, p. 559–566, 2010.

SAIN, M.; PANTHAPULAKKAL, S. Bioprocess preparation of wheat straw fibers and their characterization. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 23, n. 1, p. 1–8, 2006.

SALDANHA, L. K. Alternativas tecnológicas para a produção de chapas de partículas orientadas "OSB". 2004. 97f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004

SANCHEZ-SILVA, L. et al. Thermogravimetric–mass spectrometric analysis of lignocellulosic and marine biomass pyrolysis. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 109, p. 163–172, 2012.

SANTOS, S. F. et al. Supercritical carbonation treatment on extruded fibre-cement reinforced with vegetable fibres. Cement and Concrete Composites, Kidlington, v. 56, p. 84–94, 2015.

SAVASTANO, H.; WARDEN, P. G.; COUTTS, R. S. P. Brazilian waste fibres as reinforcement for cement-based composites. **Cement and Concrete Composites**, Kidlington, v. 22, n. 5, p. 379–384, 2000.

SEDAN, D. et al. Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement: Influence of the fibre/matrix interaction. **Journal of the European Ceramic Society**, Kidlington, v. 28, p. 183–192, 2008.

SEGAL, L. et al. An Empirical Method for Estimating the Degree of Crystallinity of Native Cellulose Using the X-Ray Diffractometer. **Textile Research Journal**, Lancaster, v. 29, n. 10, p. 786–794, 1959.

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,** Amsterdam, v. 16, n. 2, p. 89–100, 2002.

SEMPLE, K. E., EVANS, P. D. Wood-cement composites - suitability of western Australian mallee eucalypt, blue gum and melaleucas. RIRDC. Barton. 2004. 65p

SHAO, Y, MORSHED, A.Z. Early carbonation for hollow-core concrete slab curing and carbon dioxide recycling. **Materials and Structures**. Dordrecht. v. 48, n. 1–2, p. 307-319, 2015.

SHMULSKY, R.; JONES, P. D. Forest Products and Wood Science: An Introduction, 6th Edition. Wiley-Blackwell, Hoboken, New Jersey, 2011.

SILVA, G. C. et al. Efeito de aditivos minerais sobre as propriedades de chapas cimentomadeira. **Revista Arvore,** Viçosa, v. 30, n. 3, p. 451–456, 2006.

SINHA, E.; ROUT, S. K. Influence of fibre-surface treatment on structural, thermal and mechanical properties of jute. **Journal of Materials Science**, Norwell, v. 43, n. 8, p. 2590–2601, 2008.

SOTANNDE, O. A. et al. Evaluation of cement-bonded particle board produced from Afzelia africana wood residues. **Journal of Engineering Science and Technology**, Malasia, v. 7, n. 6, p. 732–743, 2012.

SOUZA, A. M. Produção e avaliação do desempenho de painéis de partículas orientadas (OSB) de Pinus sp. com inclusão de telas metálicas. 2012. 117p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, 2012

STARK, N. M.; CAI, Z.; CARLL, C. Wood-Based Composite Materials Panel Products, Glued-Laminated Timber, Structural Materials. **Wood Handbook - Wood as an engineering material**, p. 1–28, 2010.

SWEET, M. S.; WINANDY, J. E. Influence of Degree of Polymerization of Cellulose adn Hemicellulose on Strength Loss in Fire-Retardant-Treated Southern Pine. **Holzforschung**, Berlin, v. 53. n. 3, p. 311-317, 1999.

TAYLOR, H. F. W. Cement chemistry. London: Academic, 1998.

TEIXEIRA, D.E. 2012. Recycled old corrugated container fibers for wood-fiber cement sheets. **ISRN Forestry**, 2012: 8. Article ID 923413

THOMAS, S.; PAUL, S.A.; POTHAN, L.A.; DEEPA, B. Natural fibres: structure, properties and applications. In: KALIA, S.; KAITH, B.S.; KAUR, I. **Cellulose Fibers: Bioand Nano-Polymer Composites. Green Chemistry Technology**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. TITTELEIN, P.; CLOUTIER, A.; BISSONNETTE, B. Design of a low-density wood–cement particleboard for interior wall finish. **Cement and Concrete Composites**, Kidlington v. 34, n. 2, p. 218–222, 2012.

TONOLI, G. H. D. et al. Cellulose modified fibres in cement based composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Kidlington v. 40, n. 12, p. 2046–2053, 2009.

TONOLI, G. H. D. et al. Rationalizing the impact of aging on fiber–matrix interface and stability of cement-based composites submitted to carbonation at early ages. **Journal of Materials Science**, Norwell, v. 51, n. 17, p. 7929–7943, 2016.

TRAN, L.Q.N.; FUENTES, C.A.; DUPONT-GILLAIN, C.; VAN VUURE, A.W.; VERPOEST, I. Wetting analysis and surface characterization of coir fibres used as reinforcement for composites. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**. Amsterdam, v. 377, p. 251-260, 2011.

TRIANOSKI, R. et al. Efeito da espécie e formulação do adesivo nas propriedades de painéis LVL de Eucalyptus dunnii, Eucalyptus saligna e Eucalyptus urograndis. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 46, n. 118, 2018.

TRIANOSKI, R.; IWAKIRI, S.; CHIES, D. Utilização da madeira de Cryptomeria japonica para produção de painéis de partículas orientadas (OSB). **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 44, n. 110, 2016.

VAN ELTEN, G. J. Production of wood wool cement board and wood strand cement board (Eltoboard) on one plant and applications of the products. In: INTERNATIONAL INORGANICBONDED FIBER COMPOSITES CONFERENCE, 10., 2006, São Paulo. **Abstracts...** São Paulo, 2006. p. 1–12

VAN SOEST, P. J. Nutritional ecology of the ruminant. New York: Cornell University Press, 1994.

VIDAL, A.C.F; HORA, A. B. Panorama de mercado: painéis de madeira.BNDES Setorial2014;40:323-384.Disponívelem

https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/3023/1/Panorama de mercado.pdf Acesso em: 17 set. 2018.

VIJAYAVENKATARAMAN, S.; INIYAN, S.; GOIC, R. A review of climate change, mitigation and adaptation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 16, n. 1, p. 878–897, 2012.

WANG, D. et al. A review on use of limestone powder in cement-based materials: Mechanism, hydration and microstructures. **Construction and Building Materials,** Amsterdam, v. 181, n. 30, p. 659-672, 2018.

WANG, L. et al. Value-added recycling of construction waste wood into noise and thermal insulating cement-bonded particleboards. **Construction and Building Materials,** Amsterdam, v. 125, p. 316–325, 2016.

WANG, S. H. Construction Materials Science. Beijing: China Construction Industry Publisher, 1988.

WEI, J.; MEYER, C. Improving degradation resistance of sisal fiber in concrete through fiber surface treatment. **Applied Surface Science**, Amsterdam, v. 289, n. 0, p. 511–523, 2014.

WEI, Y. et al. A preliminary investigation on microstructural characteristics of interfacial zone between cement and exploded wood fiber strand by using SEM-EDS. Journal of Wood Science, Tokyo, v. 50, n. 4, p 327–336, 2004.

WINANDY, J. E.; ROWELL, R. M. Chemistry of wood strength. In: ROWELL, R. M. Handbook of wood chemistry and wood composites. CRC Press LLC, London, New York, 2005.

WOLFE, R. W.; GJINOLLI, A. Durability and Strength of cement- bonded wood particle composites made from construction waste. Forest Products Journal, Peachtree Corners, v. 49, n. 2, p. 24–31, 1999.

XU, F. Structure, ultrastructure, and chemical composition. New York: Elsevier, 2010.

YOUNG, R. A. Historical developments in wood chemistry. **SDUJ Faculty of Forestry**. v. 1. p.1-15. 2008

YUAN, Y.; LEE, T.R. Contact angle and wetting properties. In: BRACCO, G.; HOLST, B. **Surface science techniques**. Springer series in surface sciences 51. Springer-Verlag ed. Berlin, 2013.

ZERBE, J. I.; CAI, Z.; HARPOLE, G. B. An Evolutionary History of Oriented Strandboard (OSB). USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General Technical Report, FPL-GTR-236, Madison, Wisconsin, 10 p, 2015.

ZUCCO, L. L. Estudo da viabilidade da fabricação de placas de compostos à base de cimento e casca de arroz. 1999. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual Campinas, Campinas, 1999.

ZUKOWSKI, B. et al. The durability of SHCC with alkali treated curaua fiber exposed to natural weathering. **Cement and Concrete Composites**, Kidlington v. 94, p. 116–125, 2018.