

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS – CAV
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

MATHEUS ZANGHELINI TEIXEIRA

**DESEMPENHO ESTRUTURAL DE PAINÉIS DE MADEIRA LAMELADA COLADA
CRUZADA DE *Eucalyptus benthamii* POR MEIO DE MODELAGEM NUMÉRICA**

LAGES-SC

2023

MATHEUS ZANGHELINI TEIXEIRA

**DESEMPENHO ESTRUTURAL DE PAINÉIS DE MADEIRA LAMELADA COLADA
CRUZADA DE *Eucalyptus benthamii* POR MEIO DE MODELAGEM NUMÉRICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Centro de Ciências Agroveterinárias (CAV) da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal.
Orientador: Dr. Rodrigo Figueiredo Terezo.
Coorientador: Dr. Alessandro Bayestorff da Cunha.

LAGES-SC

2023

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Universitária Udesc,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Teixeira, Matheus Zanghelini

DESEMPENHO ESTRUTURAL DE PAINÉIS DE MADEIRA
LAMELADA COLADA CRUZADA DE *Eucalyptus benthamii*
POR MEIO DE MODELAGEM NUMÉRICA / Matheus Zanghelini
Teixeira. -- 2023.

140 p.

Orientador: Rodrigo Figueiredo Terezo

Coorientador: Alessandro Bayestorff da Cunha

Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa
Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Florestal, Lages, 2023.

1. Construção sustentável. 2. Estruturas de madeira. 3.
Desempenho estrutural. 4. Elementos finitos. I. Terezo, Rodrigo
Figueiredo. II. Cunha, Alessandro Bayestorff da . III. Universidade
do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. IV. Título.

MATHEUS ZANGHELINI TEIXEIRA

**DESEMPENHO ESTRUTURAL DE PAINÉIS DE MADEIRA LAMELADA COLADA
CRUZADA DE *Eucalyptus benthamii* POR MEIO DE MODELAGEM NUMÉRICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Centro de Ciências Agroveterinárias (CAV) da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Rodrigo Figueiredo Terezo (orientador)
Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC

Prof^ª. Dra. Carmeane Effting (membro externo)
Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC

Prof. Dr. Rafael Holdorf Lopez (membro externo)
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Prof. Dr. Márcio Carlos Navroski (membro suplente)
Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC

Lages, 28 de setembro de 2023.

Dedico a todos que contribuem para a expansão da tecnologia e das estruturas de madeira no Brasil, esse material que provém de um dos seres mais lindos da Terra: a árvore.

Dedico a todos que têm esperança do verbo “esperançar” e que acreditam na Educação como meio para a Revolução Humana e o Desenvolvimento Sustentável.

AGRADECIMENTOS

A minha gratidão à minha mãe, Itamara Zanghelini, e minha mãe-vó, Teresinha Stramosk, por estarem sempre ao meu lado, por todo o amor e suporte, por me educarem tão bem, por se preocuparem e sempre se fazerem presente na minha vida.

A minha gratidão ao meu pai, Odair de Jesus Teixeira, e aos meus avós paternos, Hilda Aparecida Teixeira e Renaldo Teixeira, por todo o suporte e carinho, por acreditarem no meu potencial e por todo o afeto.

A minha gratidão à minha irmã, Amanda Gomes Ramos, por ser tão presente e especial, por todo o zelo, afeto e carinho, por ser parceira e incrível em tudo o que faz.

A minha gratidão à minha prima e parceira de mestrado, Kathleen Stramosk, por me ouvir sempre, dedicar tanto tempo a mim e me proporcionar momentos maravilhosos.

A minha gratidão à minha primeira amizade do mestrado, Rayllana Larsen, por todos os pôres de sol emocionantes, chimarrão de qualidade e por ser minha parceira de estatística.

A minha gratidão aos amigos que cativei no mestrado, Samuel da Silva Santos, Ângela Silva dos Santos, Huga Géssica Bento de Oliveira e, em especial, Camila Alves Corrêa, por iluminarem meus dias, por alegrarem a minha rotina, por toda a parceria e por não soltarem a minha mão.

A minha gratidão à minha amiga, Mônica Nascimento da Silva, por sempre me ouvir, por acreditar na minha capacidade, se disponibilizar e ser a minha inspiração de ser humano e de professora freiriana.

A minha gratidão aos meus amigos de Lages-SC, que são meus amores, por me ouvirem e me tirarem da rotina, por serem genuínos e não permitirem que a distância nos afete, por me arrancarem as melhores gargalhadas e despertarem em mim energia vital.

A minha gratidão aos meus familiares que são presentes e que se preocupam comigo, em especial às minhas madrinhas, Marinez Zanghelini Stramosk e Eliane Aparecida Teixeira, por todo o amor e carinho, por apoiarem minhas escolhas e acreditarem no meu potencial.

A minha gratidão à família que me recebeu em Florianópolis-SC, Arthur Aquino Pereira e Rosane Schenkel de Aquino, por abrirem as portas do seu lar e me receberem tão bem, por todo suporte e afeto.

A minha gratidão ao meu professor e orientador, Rodrigo Figueiredo Terezo, por abrir as portas da UDESC e do mestrado para mim, por me guiar, me ensinar com paciência e fazer eu me desenvolver tão bem nessa trajetória, por amar o que faz e me mostrar a excelência das

estruturas em madeira, por acreditar no meu potencial e me encorajar na busca incessante por conhecimento.

A minha gratidão à minha amiga e professora, Helena Cristina Vieira, por todo o tempo dedicado a mim, por ser parceira de cafés e atividades acadêmicas, por me guiar tão bem no estágio docência, por permitir que eu abrisse minhas asas em sala de aula e tivesse as melhores experiências possíveis.

A minha gratidão à minha professora de Tecnologia da Madeira, Polliana D'Angelo Rios, por me apresentar a madeira de forma tão linda e poética, por toda atenção, amizade e parceria, e, principalmente, por ser uma educadora tão humana.

A minha gratidão aos professores da UDESC, em especial ao Professor Alexsandro Bayestorff da Cunha, por me coorientar, pelas revisões de texto e por sempre se fazer disponível, e à Professora Mari Lúcia Campos, por ser uma educadora encantadora e revolucionária.

A minha gratidão à banca avaliadora dessa dissertação, Professora Carneane Effting e Professor Rafael Holdorf Lopez, por aceitarem fazer parte desse momento tão importante da minha vida acadêmica, por avaliarem e contribuírem com o meu trabalho.

A minha gratidão à UDESC e ao FUMDES/UNIEDU pela bolsa de apoio e incentivo.

A minha gratidão ao mestre, Dr. Daisaku Ikeda, por todo o seu esforço em prol da paz mundial e da revolução humana.

A minha gratidão a Deus, ao universo e à vida. Que eu jamais perca a esperança por um mundo melhor, que eu continue sempre trilhando o caminho em busca da práxis, da educação libertadora, do desenvolvimento sustentável e do humanismo dentro e fora da engenharia. Por um mundo onde ninguém seja deixado para trás.

É preciso ter esperança, mas esperança do verbo esperar; porque tem gente que tem esperança do verbo esperar. E esperança do verbo esperar não é esperança, é espera. Esperançar é se levantar, esperançar é ir atrás, esperançar é construir, esperançar é não desistir! Esperançar é levar adiante, esperançar é juntar-se com outros para fazer de outro modo (FREIRE, 1992, p.110-111).

RESUMO

O setor das florestas plantadas contribui para a conservação da biodiversidade e a diminuição das emissões de gases de efeito estufa através do sequestro de carbono. No Brasil, a maioria dessas florestas (75,8%) é representada pelo cultivo de Eucalipto, o qual, aliado à tecnologia, pode apresentar bons resultados para a sua aplicação estrutural. Uma das tecnologias que recentemente começou a ser utilizada no país foi o Painel de Madeira Lamelada Colada Cruzada, ou *Cross Laminated Timber* (CLT). Estruturalmente, trata-se de uma placa ortogonal composta por camadas de lamelas, dispostas de forma perpendicular entre si, de um material anisotrópico, o que resulta em um elemento com comportamento mecânico complexo de se dimensionar por método analítico. Sendo assim, o objetivo desse trabalho foi analisar o comportamento estrutural, via Método dos Elementos Finitos (MEF), de CLT de *Eucalyptus benthamii*, uma espécie recente e promissora no sul do Brasil, que não se tem conhecimento sobre seu potencial em CLT. As propriedades experimentais de *E. benthamii* foram simuladas em modelagem de ensaio mecânico e foram validadas no *software* *Dublal RFEM*[®] e seu módulo adicional *RF-Laminate*[®]. Com essas propriedades validadas, foi modelada uma edificação de dois pavimentos a fim de analisar o comportamento dos CLT como lajes e paredes. Para tornar ainda mais aplicável ao setor produtivo, a edificação também foi modelada com propriedades de *Pinus spp.* e com painéis de padrão comercializado na Europa, onde o sistema CLT já é bem consolidado. Otimizou-se as espessuras e foram determinados o peso e o volume de cada protótipo, além de serem analisadas as tensões e deformações dos painéis. Os resultados foram promissores e demonstraram que as madeiras brasileiras deste estudo possuem potencial para serem utilizadas como matéria-prima de paredes e lajes de CLT. Apresentando menor peso em relação ao protótipo europeu e o menor volume de todos, o protótipo com CLT de *E. benthamii* se destacou em relação aos demais.

Palavras-chave: Construção sustentável; Estruturas de madeira; Desempenho estrutural; Elementos finitos.

ABSTRACT

The planted forest sector contributes to biodiversity conservation and the reduction of greenhouse gas emissions through carbon sequestration. In Brazil, the majority of these forests (75.8%) are Eucalyptus plantations, which, when combined with technology, can yield positive results for structural applications. One of the technologies that has recently been adopted in the country is Cross Laminated Timber (CLT). Structurally, CLT is an orthogonal plate composed of layers of lamellae arranged perpendicularly to each other, made of an anisotropic material. This results in an element with a complex mechanical behavior that is challenging to design using analytical methods. Therefore, the objective of this study was to analyze the structural behavior of *Eucalyptus benthamii* CLT, a recent and promising species in southern Brazil, which lacks knowledge of its potential in CLT. The mechanical properties of *E. benthamii* were simulated and validated using mechanical test modeling in the Dlubal RFEM® software and its RF-Laminate® add-on module. With these properties validated, a two-storey building was modeled in order to analyze the behavior of CLT as slabs and walls. To make it even more applicable to the production sector, the building was also modeled with *Pinus spp.* properties and with standard panels marketed in Europe, where the CLT system is already well established. The thicknesses were optimized and the weight and volume of each prototype were determined, as well as analysing the stresses and deformations of the panels. The results were promising and showed that the Brazilian woods under study have the potential to be used as raw material for CLT walls and slabs. With a lower weight than the European prototype and the smallest volume of all, the *E. benthamii* CLT prototype stood out from the rest.

Keywords: Sustainable construction; Wood structures; Structural performance; Finite elements.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ilustração de <i>Cross Laminated Timber</i> (CLT).....	13
Figura 2 – Fluxograma da estrutura da dissertação.....	16
Figura 3 - Representação dos três planos anatômicos de corte da madeira de folhosa: transversal, tangencial e radial.	17
Figura 4 - Tipos de simetria dos materiais.....	18
Figura 5 - Ilustração de painel CLT.....	23
Figura 6 - Painéis CLT fletidos fora (a) e dentro (b) do plano, na maior (esq.) e menor (dir.) orientação de resistência.....	25
Figura 7 – Diagrama de tensões normais pelo RF-Laminate	26
Figura 8 – Representação de forças e momentos da equação de Mindlin	30
Figura 9 - Representação de deformações e curvaturas de CLT pela equação de Mindlin.....	30
Figura 10 - Mapa dos principais países	36
Figura 11 - Mapa dos principais autores	36
Figura 12 – Ensaio de flexão à três pontos de CLT experimental de <i>E. benthamii</i>	51
Figura 13 - Dados gerais de entrada no <i>software</i> RFEM 5 [®]	53
Figura 14 - Definição do plano de trabalho e malha de desenho no <i>software</i> RFEM 5 [®]	54
Figura 15 - Ensaio de flexão à três pontos no <i>software</i> RFEM 5 [®]	55
Figura 16 - Características de CLT no <i>software</i> RFEM 5 [®] e RF-Laminate [®]	56
Figura 17 - Resistências do CLT no <i>software</i> RFEM 5 [®] e RF-Laminate [®]	57
Figura 18 – Opções de modelação do CLT no <i>software</i> RFEM 5 [®] e RF-Laminate [®]	57
Figura 19 - Deflexão do CLT em modelagem de ensaio de flexão à três pontos	58
Figura 20 – Projeto edificação em CLT	68
Figura 21 – Fachadas edificação em CLT	69
Figura 22 – Perspectivas edificação em CLT e identificação dos painéis.....	70
Figura 23 – Modelagem da edificação em CLT	74
Figura 24 – Articulações de linha da edificação em CLT.....	75
Figura 25 – Cargas modeladas na edificação em CLT	77
Figura 26 – Combinações de Cargas da Combinação de Resultados	78
Figura 27 – Representação gráfica da distribuição de tensões de flexão local ($\sigma_{b,0}$) em paredes do eixo Y de <i>E. benthamii</i>	83
Figura 28 - Representação gráfica da distribuição de tensões de cisalhamento ($V_{x'z'}$) no CLT n ^o 14 de <i>E. benthamii</i>	84

Figura 29 - Representação gráfica da distribuição de tensões de cisalhamento vertical ($V_{y'z'}$) em CLT laje de piso de <i>E. benthamii</i>	85
Figura 30 - Representação gráfica da distribuição de tensões de flexão global ($\sigma_{b,0+t/c,0}$) em CLT laje de piso de <i>E. benthamii</i>	86
Figura 31 – Deslocamentos máximos dos painéis de laje	89
Figura 32 – Deslocamentos máximos de paredes em X	91
Figura 33 – Deslocamentos máximos de paredes em Y	92

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Teste de Normalidade por Q-Q Plot.....	61
Gráfico 2 – Espessuras de CLT por grupo para cada modelagem.....	80
Gráfico 3 – Comparação do volume de CLT entre os protótipos modelados	94
Gráfico 4 – Comparação do peso de CLT entre os protótipos modelados	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de resistência definidas em ensaios de peças estruturais	20
Tabela 2 - Principais autores sobre a temática	37
Tabela 3 - Propriedades mecânicas e densidade de <i>E. benthamii</i> para as modelagens	49
Tabela 4 - Dimensões dos painéis CLT utilizados nesse estudo.	50
Tabela 5 - Deslocamentos verticais obtidos dos ensaios de flexão à três pontos pelo método experimental	52
Tabela 6 - Deslocamentos verticais obtidos dos ensaios de flexão à três pontos pelo método experimental e dos elementos finitos	59
Tabela 7 – Dimensões de CLT segundo a ETA 06/0138:2017.....	69
Tabela 8 - Propriedades mecânicas e densidade para as modelagens	71
Tabela 9 - Propriedades mecânicas para as modelagens.....	72
Tabela 10 – Resistência ao cisalhamento no plano do CLT KLH®	73
Tabela 11 – Resistência ao cisalhamento no plano do CLT	73
Tabela 12 – Cargas permanentes e variáveis aplicadas na edificação	76
Tabela 13 – Cargas de vento aplicadas na edificação	77
Tabela 14 - Espessura dos painéis	79
Tabela 15 – Tensões máximas	81
Tabela 16 – Deslocamentos máximos dos CLT	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABDI	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BS	<i>British Standards</i>
CAV	Centro de Ciências Agroveterinárias
CLT	<i>Cross Laminated Timber</i>
COPANT	Comissão Pan Americana de Normas Técnicas
ETA	<i>European Technical Approval</i>
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
MEF	Método dos Elementos Finitos
MLCC	Madeira Lamelada Colada Cruzada
NBR	Normas Técnicas Brasileiras
PSF	Ponto de Saturação das Fibras
UDESC	Universidade do Estado de Santa Catarina

LISTA DE SÍMBOLOS

E_x	Módulo de Elasticidade na flexão paralelo às fibras
E_y	Módulo de Elasticidade na flexão perpendicular às fibras
f	Resistência
f_b	Resistência à flexão
f_{c0}	Resistência à compressão paralela às fibras
f_{c90}	Resistência à compressão perpendicular às fibras
f_{e0}	Resistência ao embutimento paralelo às fibras
f_{e90}	Resistência à tração perpendicular às fibras
f_{tM}	Resistência convencional da madeira obtida no ensaio de flexão estática
f_{t0}	Resistência à tração paralela às fibras
f_{t90}	Resistência à tração perpendicular às fibras
f_{v0}	Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras
f_{xy}	Resistência ao cisalhamento no plano
$f_{R,m}$	Resistência ao cisalhamento por rolamento
G	Módulo de cisalhamento
GR	Módulo de cisalhamento perpendicular às fibras, de <i>rolling shear</i>
M	Momento fletor
M_{xy}	Momento de torção
N	Força no plano
N_{xy}	Força de cisalhamento no plano
V	Força de cisalhamento transversal
ϵ	Deformação no plano
γ	Deformação transversal
κ	Curvatura
k	Característico
m	Médio
ν	Coefficientes de Poisson
C_{ux}	Constante da Mola
$\sigma_{b+t/c}$	Tensão máxima de flexão
$\sigma_{t/c}$	Componente tensão normal de tração/compressão
σ_b	Componente tensão normal de flexão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	14
1.1.1	Objetivo Geral.....	14
1.1.2	Objetivos Específicos	15
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	A MADEIRA.....	17
2.1.1	<i>Eucalyptus benthamii</i> Maiden et Cabbage.....	21
2.2	PAINEL DE MADEIRA LAMELADA COLADA CRUZADA.....	22
2.2.1	Processo Fabril do CLT	24
2.2.2	Comportamento Estrutural do CLT.....	24
2.3	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	27
2.3.1	Teoria das Placas	28
2.3.2	Propriedades da Madeira.....	31
3	CAPÍTULO I - ESTADO DA ARTE DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE MADEIRA LAMELADA COLADA CRUZADA VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	33
3.1	INTRODUÇÃO	34
3.2	MATERIAL E MÉTODOS	35
3.3	RESULTADOS	35
3.3.1	Principais autores e países	35
3.3.2	Artigos sobre a temática.....	37
3.3.3	Análise dos Resultados	41
3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
	REFERÊNCIAS.....	43
4	CAPÍTULO II – VALIDAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DA MADEIRA E DE PAINÉIS DE MADEIRA LAMELADA COLADA CRUZADA DE <i>EUCALYPTUS BENTHAMII</i> VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	45
4.1	INTRODUÇÃO	46
4.2	MATERIAL E MÉTODOS	48
4.2.1	Propriedades físicas e mecânicas da madeira de <i>Eucalyptus benthamii</i>	48

4.2.2	CLT experimental de <i>Eucalyptus benthamii</i>	49
4.2.3	Simulação numérica de ensaio experimental de CLT e validação das propriedades da madeira	52
4.2.4	Análise dos dados.....	58
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	58
4.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
	REFERÊNCIAS.....	62
5	CAPÍTULO III – COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE MADEIRA LAMELADA COLADA CRUZADA DE <i>EUCALYPTUS BENTHAMII</i> FRENTE A <i>PINUS SPP.</i> E PAINÉIS COMERCIALIZADOS NA EUROPA	65
5.1	INTRODUÇÃO.....	66
5.2	MATERIAL E MÉTODOS	67
5.2.1	Modelo Arquitetônico.....	67
5.2.2	Características e propriedades físico-mecânicas dos painéis.....	71
5.2.3	Modelagem estrutural	73
5.2.4	Cargas e Combinação de Resultados	75
5.2.5	Análise dos dados.....	78
5.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	79
5.3.1	Espessura dos painéis CLT	79
5.3.2	Tensões máximas dos painéis CLT	80
5.3.3	Deslocamento máximo dos painéis CLT.....	87
5.3.4	Volume e peso de CLT para cada edificação	94
5.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	96
	REFERÊNCIAS.....	97
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES.....	100
	REFERÊNCIAS	102
	APÊNDICE A – DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO NO PLANO DOS PAINÉIS CLT.....	107
	APÊNDICE B - CÁLCULOS DA AÇÃO DO VENTO, NBR 6123 (1988)	109
	APÊNDICE C – TENSÕES MÁXIMAS DO PROTÓTIPO EM CLT DE <i>EUCALYPTUS BENTHAMII</i>	112
	APÊNDICE D – TENSÕES MÁXIMAS DO PROTÓTIPO EM CLT DA KLH®.....	113

APÊNDICE E – TENSÕES MÁXIMAS DO PROTÓTIPO EM CLT DE <i>PINUS SPP.</i>	114
.....	
APÊNDICE F - VOLUME E PESO DE CLT DE <i>E. BENTHAMII</i>	115
APÊNDICE G – VOLUME E PESO DE CLT DA KLH® (ETA-06/0138)	118
APÊNDICE H – VOLUME E PESO DE CLT DE <i>PINUS SPP.</i>	122
ANEXO A – ESPESSURAS PADRÃO DOS PAINÉIS FABRICADOS PELA KLH®	126
ANEXO B - ISOPLETAS DA VELOCIDADE BÁSICA DO VENTO (V_0) NO BRASIL	
.....	127
ANEXO C – PARÂMETROS METEREOLÓGICOS PARA CALCULAR O FATOR S_2	
.....	128
ANEXO D – COEFICIENTE DE ARRASTO (C_A) PARA EDIFICAÇÕES	
PARALELEPIPÉDICAS EM VENTO DE ALTA TURBULÊNCIA	129
ANEXO E – EQUAÇÕES DE TENSÕES UTILIZADAS PELO DUBLAL RF-	
LAMINATE PARA CLT ORTOTRÓPICO	130
ANEXO F – CÁLCULO DAS RELAÇÕES DE SOLICITAÇÃO E RESISTÊNCIA DAS	
TENSÕES PARA MATERIAL ORTOTRÓPICO PELO DUBLAL RF-	
LAMINATE®	131

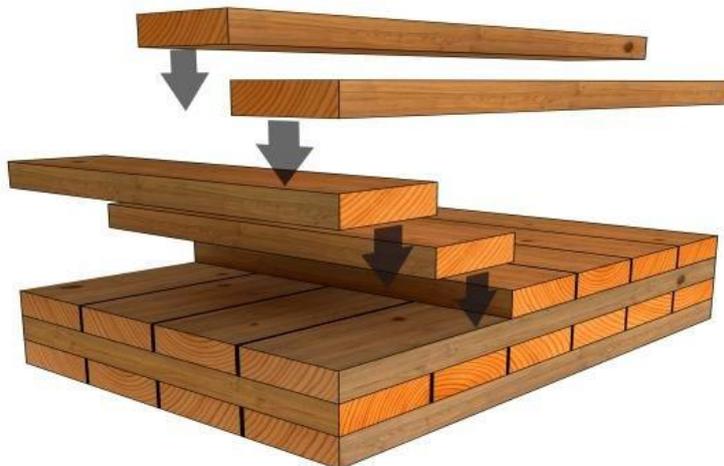
1 INTRODUÇÃO

No Brasil, com o desenvolvimento industrial e a grande utilização da madeira, ocorreu a exploração predatória de florestas nativas e aumentou a necessidade do uso e manejo consciente. A maneira encontrada para não acabar com as florestas nativas e abastecer os setores dependentes da madeira, foi o reflorestamento (RODRIGUES, 2002). As florestas plantadas estão sendo muito importantes para o desenvolvimento econômico, social e ambiental, pois além de contribuir diminuindo a mudança climática, elas geram muitos empregos e promovem renda para as populações locais. Em 2021, o setor gerou oportunidades de trabalho a 2,97 milhões de brasileiros em todo o território nacional (IBÁ, 2022).

Com grande destaque econômico, a indústria florestal representa 1,2% do PIB Nacional e alcançou receita bruta total de R\$ 244,6 bilhões no ano de 2021. Esse importante setor para uma economia de baixo carbono, que procura desenvolver pesquisas para aprimorar seus produtos e olha para o futuro com base na bioeconomia, destaca-se pela sua produtividade, tecnologia, manejo florestal mais sustentável e pela sua responsabilidade socioambiental (IBÁ, 2022).

Dentre vários produtos provenientes das florestas plantadas, um deles é a madeira sólida, a qual apresentou um crescimento de 4,8%, em 2021, no seu consumo para uso industrial, com um volume de 227,3 milhões de m³ (IBÁ, 2022). A madeira no uso industrial, aliada com tecnologia, está proporcionando nos últimos anos novas possibilidades estruturais de ser utilizada no setor da construção civil, como os Painéis de Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC), também conhecidos como *Cross Laminated Timber* (CLT) ou X-lam. A Figura 1 contém uma ilustração do CLT que representa a maneira como as lamelas são dispostas de forma cruzada entre as camadas.

Figura 1 – Ilustração de *Cross Laminated Timber* (CLT).



Fonte: Buck *et al.* (2016).

Esses painéis são rígidos, autoportantes e possibilitam uma construção mais sustentável, principalmente pela sua principal matéria-prima ser a madeira, a qual é natural e armazena CO₂, e pela diminuição da geração de resíduos sólidos quando comparada ao sistema construtivo convencional do Brasil. Referente a isso, segundo a Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI):

A construção executada com processo convencional, ainda largamente utilizada no Brasil, frequentemente é marcada por processos com altos custos, baixo nível de planejamento, baixa qualificação do trabalhador, altos índices de desperdícios, baixa qualidade e incidências de manifestações patológicas e baixo desempenho ambiental (ABDI, 2015, p. 25).

A mudança no setor da construção civil é necessária para alcançar o desenvolvimento sustentável almejado pela Agenda 2030 da ONU (Organização das Nações Unidas). Sistemas construtivos de madeira proveniente de florestas plantadas, ou manejadas de forma sustentável, inclusive o CLT, são uma alternativa. O CLT já é bem consolidado no continente europeu, onde começou a ser fabricado no início da década de 90 (OLIVEIRA, 2018), entretanto a sua inserção ainda é recente no Brasil. Por isso, necessita-se de mais estudos referentes ao seu desempenho estrutural com madeiras cultivadas nacionalmente.

Conforme o relatório anual da Indústria Brasileira de Árvores - IBÁ (2022), com o total de 9,93 milhões de hectares de árvores plantadas no Brasil, o ano de 2021 apresentou um aumento de 1,9% da área total em relação ao ano de 2020. Desse total, a

maioria (75,8%) é representada pelo cultivo de eucalipto e 19,4% pelo cultivo de pinus, com 7,53 milhões de hectares e 1,93 milhão de hectares, respectivamente. Dentre diversas espécies de eucalipto, há o *Eucalyptus benthamii* que chama a atenção para o sul do Brasil devido a sua grande resistência a geadas, porém ainda possui pouco melhoramento genético e pouco conhecimento sobre a qualidade da madeira, seu crescimento e produção (SERPE, 2015). Também não há estudo suficiente dessa espécie como matéria-prima para produção de painéis estruturais de madeira, inclusive de CLT.

Sendo assim, essa pesquisa demonstra ser de extrema relevância, pois busca avaliar o desempenho estrutural de CLT de *E. benthamii* de forma numérica, baseada em testes experimentais, o que possibilita a aplicabilidade prática dos painéis por meio da modelagem estrutural pelo Método dos Elementos Finitos (MEF). É feito um protótipo de uma edificação, na qual o CLT de *E. benthamii* é comparado com o de *Pinus spp.* de florestas plantadas brasileiras e com o CLT comercializado por uma grande empresa europeia. Os resultados obtidos podem agregar maior valor às madeiras em questão, possibilitando-as como matéria-prima de CLT e fornecendo novos painéis para o mercado, o que torna essa pesquisa altamente aplicável ao setor produtivo.

Portanto, as questões de pesquisa que se colocam são: (1) O método numérico reflete os resultados do método experimental? (2) Quais espessuras das lamelas resultarão melhor eficiência nos painéis de uma edificação de dois pavimentos? (3) Qual a diferença entre o volume necessário de CLT de *E. benthamii* em comparação com o CLT de *Pinus spp.* e com o CLT de uma fabricante europeia para uma edificação de dois pavimentos? (4) Os modelos de painéis CLT desse estudo são compatíveis com os modelos comercializados na Europa?

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar o comportamento estrutural de Painéis de Madeira Lamelada Colada Cruzada de *Eucalyptus benthamii*, como laje e parede, via modelagem numérica utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF).

1.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar as vantagens do MEF em estudos estruturais de CLT;
- Validar as propriedades experimentais da madeira de *Eucalyptus benthamii* em modelo numérico;
- Identificar se o comportamento de painéis de CLT sob esforços de flexão pode ser adequadamente representado por elementos finitos;
- Determinar as espessuras mais eficientes das lamelas dos painéis CLT para modelagem numérica estrutural;
- Avaliar o desempenho estrutural do CLT de *Eucalyptus benthamii*, em comparação com CLT de *Pinus spp.* e CLT de uma fabricante europeia;
- Quantificar o peso e o volume dos protótipos desenvolvidos em MEF.

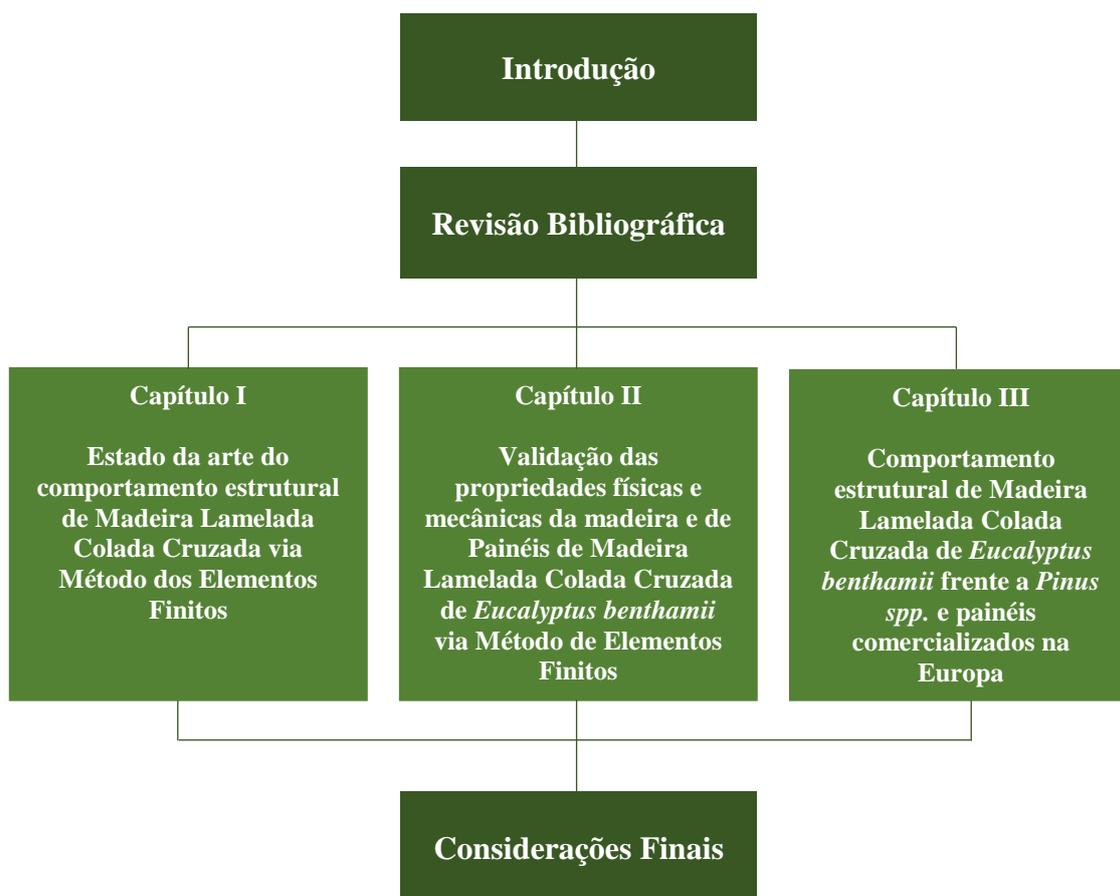
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Inicialmente, há a introdução sobre o tema, com a justificativa e os objetivos desse trabalho. Posteriormente, desenvolve-se a revisão bibliográfica, na qual os principais conceitos pertinentes a esta pesquisa são levantados e descritos, fornecendo assim embasamento teórico para a execução dos três capítulos seguintes.

O Capítulo I faz um estado da arte sobre o comportamento estrutural de CLT via MEF e identifica as vantagens deste método. No Capítulo II é feita a simulação de ensaio experimental de CLT de *E. benthamii* para validar as propriedades da madeira do *software* de elementos finitos. E o último capítulo, o Capítulo III, faz uma aplicação dessas propriedades validadas em um projeto de uma edificação de dois pavimentos, onde os painéis são utilizados como paredes e lajes de piso e cobertura. Neste último capítulo, faz-se a otimização dos CLT e se estuda o comportamento estrutural desses painéis, comparando-os com CLT de *Pinus spp.* e com CLT de uma fabricante europeia.

Por fim, são feitas as considerações finais de todo o trabalho e a recomendação de futuras pesquisas. A Figura 2 apresenta um fluxograma da estrutura geral da dissertação.

Figura 2 – Fluxograma da estrutura da dissertação



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

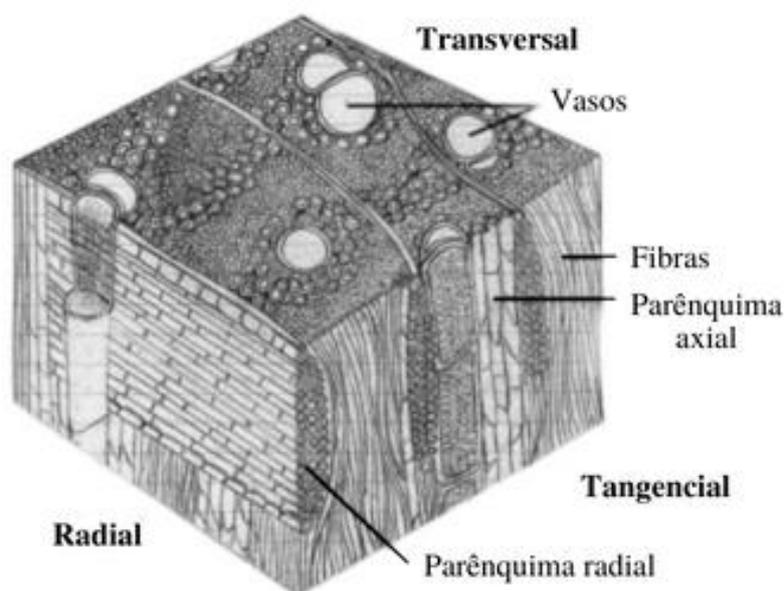
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordados conceitos importantes referente à madeira e suas características, à espécie em foco nesse estudo, assim como aos painéis CLT e ao método numérico de elementos finitos.

2.1 A MADEIRA

A madeira é um material natural e, quando proveniente de florestas plantadas ou de florestas cujo manejo é sustentável, é considerada de fonte renovável. Ela possui uma estrutura anatômica complexa (Figura 3), a qual explica o seu comportamento físico-mecânico diferente para cada plano (transversal, longitudinal radial e tangencial).

Figura 3 - Representação dos três planos anatômicos de corte da madeira de folhosa: transversal, tangencial e radial.



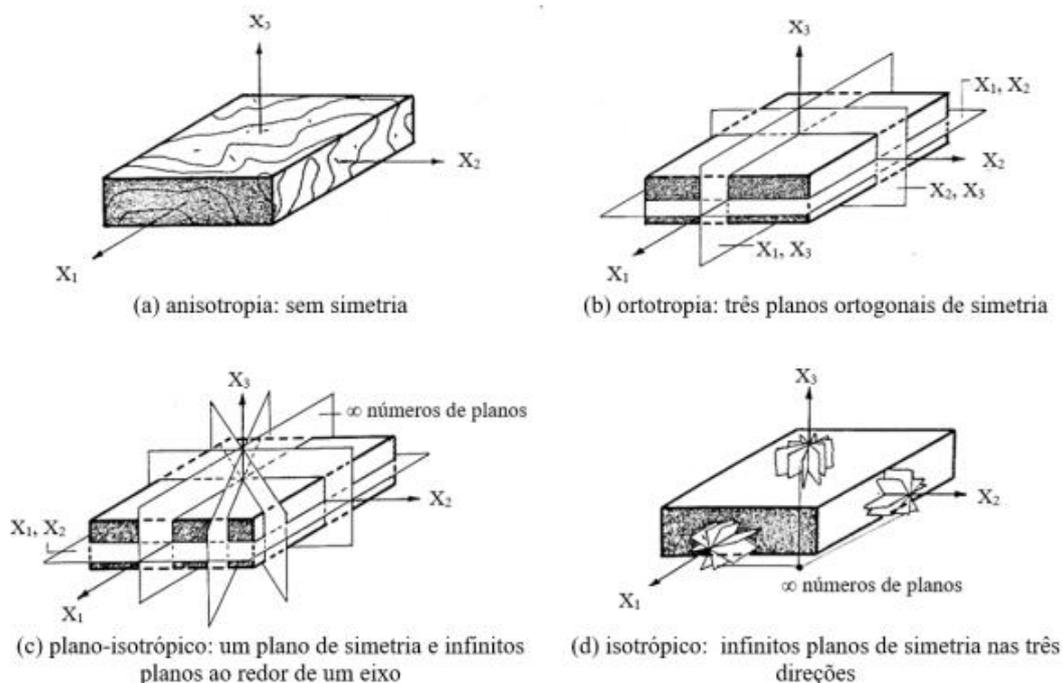
Fonte: Adaptado de Raymundo *et al.* (2017).

Sendo um material comumente utilizado na construção civil por centenas de séculos, a madeira é vantajosa nas suas propriedades de resistência quando comparada com outros materiais, principalmente na relação entre peso e resistência (DINWOODIE, 1975). A qualidade da madeira é referente ao conjunto de características físicas, mecânicas, químicas e anatômicas da espécie. Essa qualidade irá prever qual o melhor uso e destinação do material (GONÇALEZ *et al.*, 2006).

Pela sua complexidade natural, é necessário considerar diversas variáveis no dimensionamento estrutural de elementos de madeira para garantir a segurança da estrutura. Uma delas é a rigidez, que é uma propriedade mecânica que correlaciona tensão com deformação. As rigidezes variam com o ponto ou plano de análise da madeira (KOLLMANN; COTE, 1968).

Outra característica importante a ser levada em consideração é a anisotropia da madeira, que é a falta de planos de simetria no material (MASCIA, 1991). Porém, a madeira também pode ser considerada como um material linear ortotrópico quando se refere a estruturas, com três planos de simetria (MASCIA; LAHR, 2006). É possível compreender bem o conceito de anisotropia analisando como é a estrutura anatômica da madeira, como mostra a Figura 3. Em painéis CLT, por exemplo, considera-se o produto como material plano ortotrópico. Na Figura 4 é possível diferenciar os tipos de simetria que os materiais podem ter.

Figura 4 - Tipos de simetria dos materiais



Fonte: Adaptada de Bodig e Jayne (1982).

Uma das propriedades físicas mais importante para determinar a qualidade da madeira é a densidade, pois a mesma tem forte correlação com outras características (PANSWIN; DE ZEEUW, 1980). A densidade pode ser definida como a quantidade de parede celular por espaços vazios da madeira, a qual pode alterar ao longo da árvore

(RODRIGUES *et al.*, 2018). Madeiras de maior densidade possuem maior resistência mecânica quando comparado com madeiras de densidade menor, o que demonstra a correlação entre a densidade da madeira e as suas propriedades mecânicas (LOBÃO *et al.*, 2004).

Além disso, vale ressaltar que a madeira é um material higroscópico, ou seja, ela é capaz de absorver e remover umidade da sua estrutura conforme a situação em que está submetida. Ela incha quando absorve água e, quando seca, ela contrai (OLIVEIRA; SILVA, 2003). O encolhimento se refere a redução do teor de umidade do ponto de saturação das fibras (PSF), e isso pode causar rachaduras, empenamentos e outros defeitos estruturais (HARADA *et al.*, 2005).

A dureza e a rigidez estão associadas às resistências do material. As resistências e rigidezes da madeira são maiores quando essas estão na direção longitudinal, comparado à direção perpendicular. A maior resistência da madeira é quando a mesma é submetida a tração ao longo da fibra, seguida pela resistência à flexão, que é aproximadamente metade da resistência à tração. Já a resistência à compressão longitudinal é cerca de um quarto da resistência à tração ao longo das fibras, ficando a tração perpendicular às fibras com a menor resistência quando comparada a todos os tipos de tensionamento (DINWOODIE, 1975).

Visto a heterogeneidade da estrutura da madeira e de seu comportamento físico e mecânico devido a sua anisotropia e ortotropia, é necessário projetar e fabricar estruturas e produtos de madeira engenheirada conforme as normativas e diretrizes para garantir bom desempenho estrutural. No Brasil há a ABNT NBR 7190 (2022), a qual é destinada a projetos de estruturas de madeira e fornece métodos de ensaio para caracterização de madeiras. A NBR 7190-1 (2022) padroniza as classes de resistência para coníferas e folhosas (Tabela 1). Essas classes fornecem suas propriedades de resistência, rigidez e de densidade.

Tabela 1 - Classes de resistência definidas em ensaios de peças estruturais

	Símbolo	CONÍFERAS												FOLHOSAS							
		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	D18	D24	D30	D35	D40	D50	D60	D70
PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA (MPa)																					
Flexão	$f_{b,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50	18	24	30	35	40	50	60	70
Tração paralela	$f_{t,0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30	11	14	18	21	24	30	36	42
Tração perpendicular	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Compressão paralela	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29	18	21	23	25	26	29	32	34
Compressão perpendicular	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2	7,5	7,8	8,0	8,1	8,3	9,3	11	13,5
Cisalhamento	$f_{v,k}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	3,4	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,5	5,0
PROPRIEDADES DE RIGIDEZ (GPa)																					
Módulo de elasticidade a 0° médio	$E_{0,m}$	7	8	9	9,5	10	11	12	12	13	14	15	16	9,5	10	11	12	13	14	17	20
Módulo de elasticidade a 0° característico	$E_{0,05}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10	11	8	8,5	9,2	10	11	12	14	16,8
Módulo de elasticidade a 90° médio	$E_{90,m}$	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	1,1	1,33
Módulo de elasticidade transversal médio	G_m	0,4	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	1,1	1,25
DENSIDADE (kg/m³)																					
Densidade característica	ρ_k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460	475	485	530	540	560	620	700	900
Densidade média	ρ_m	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550	570	580	640	650	660	750	840	1080
Nota 1 Valores obtidos conforme ABNT NBR 7190-4																					
Nota 2 Valores referentes ao teor de umidade igual a 12 %																					

Fonte: NBR 7190-1 (2022).

Além dessas informações de padronização de classes de resistência da madeira, a NBR 7190 (2022) dispõe de classes de resistência para espécies nativas. A padronização de classes resistentes de madeira serrada é de importância indiscutível tanto para a fase de projeto estrutural de uma construção e fabricação de produtos de madeira engenheirada, quanto para seu correto desempenho.

2.1.1 *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage

Por sua resistência a baixas temperaturas e a geadas, o *Eucalyptus benthamii* se destaca como uma alternativa de espécie florestal de rápido crescimento para o Sul do Brasil, onde o inverno é mais severo, principalmente nos Estados de Santa Catarina e do Paraná. O *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage é nativo da cidade de Camden, na Austrália, e foi introduzido no Brasil, em Santa Catarina, em 1988 pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa/Florestas). A árvore é relativamente alta, chegando a 36 m e diâmetros de 50 cm. O gênero é utilizado em extensos programas de reflorestamento e a espécie vem sendo estudada para conhecer suas características e potencialidades (NISGOSKI *et al.*, 1998; SILVA *et al.*, 2012).

Nesses estudos, Nisgoski *et al.* (1998) descreveram a anatomia da madeira de *E. benthamii* e, dentre várias características, concluíram que a madeira é moderadamente dura, possui cerne e alburno distintos, sendo que o cerne tem cor marrom avermelhada e o alburno amarelo rosado, a grã é irregular, a textura varia entre fina e média e não possui cheiro e gosto perceptíveis.

Já Higa e Pereira (2003) investigaram os usos potenciais da espécie com 8 anos de idade e indicam a possibilidade de utilizar como lenha, carvão e celulose. Não aconselharam usar a madeira serrada de *Eucalyptus benthamii* de forma estrutural devido a presença de rachaduras de topo das tábuas e toras, empenamentos e rachaduras internas no período de secagem. Sendo assim, definiram a madeira como dimensionalmente instável, tendo altos índices de contração volumétrica e de coeficiente de anisotropia.

Referente às propriedades físicas da madeira, como densidade básica, Benin *et al.* (2017) encontrou valor médio de 0,50 g/cm³ para *E. benthamii* aos 5 anos de idade com diferentes espaçamentos de plantio. Müller *et al.* (2013) e Alves *et al.* (2011) encontraram valor médio de 0,52 g/cm³ e 0,47g/cm³, respectivamente, para a mesma espécie com 6 anos de idade. Pereira *et al.* (2001) determinaram a densidade da madeira com 7 anos de idade igual a 0,48 g/cm³, enquanto Nones *et al.* (2015) avaliaram a madeira com 13 anos de idade e obtiveram valor médio igual a 0,52 g/cm³. Tomio (2020) caracterizou a madeira de *E. benthamii* com 23 anos de idade e encontrou valor médio de 0,61 g/cm³.

Em relação ao rendimento da matéria-prima, Cunha *et al.* (2015) avaliaram o *Eucalyptus benthamii* Maiden *et* Cambage com 13 anos de idade em diferentes métodos de desdobro e afirmaram que, para peças comerciais, o rendimento líquido médio foi de 43,4% (para a classe com diâmetros entre 20 a 25 cm) e 39,2% (para a classe com diâmetro de 25,1 cm a 30 cm). Referente ao método de desdobro, concluíram que os tangenciais foram superiores ao radial na classe de menor diâmetro, enquanto o tangencial e radial teve rendimentos equivalentes na classe com os maiores diâmetros.

Tomio *et al.* (2021) avaliaram a influência da classe diamétrica e do método de desdobro no rendimento de *E. benthamii*, com ciclo de rotação longa (23 anos). Com isso, determinaram rendimento médio do desdobro de 54,76% em peças de madeira serrada de classe 4 e 5, conforme a ABNT NBR 14806 (2002). Concluíram que o aproveitamento de toras de *E. benthamii* no processo de desdobro é possível em rotação longa, com rendimento equivalente a grande parte das espécies comerciais de rápido crescimento.

Sobre a qualidade genética, Silva *et al.* (2022) afirmam que a espécie apresenta potencial para seleção genética, possibilitando produção de sementes e disponibilização de mudas de boa qualidade para uso em áreas com ocorrência de geadas e produção de madeira com maior rendimento para serraria. No Brasil, o cultivo de *E. benthamii* já é realizado em escala comercial. Com informações cada vez mais precisas sobre a madeira, será possível agregar valor à sua matéria-prima.

2.2 PAINEL DE MADEIRA LAMELADA COLADA CRUZADA

A Madeira Lamelada Colada Cruzada é um produto inovador. Trata-se de painéis pré-fabricados e formados por lamelas (tábuas) de madeira dispostas ortogonalmente (Figura 5), ou seja, sobrepostas de forma perpendicular entre si, e unidas com adesivo estrutural sob alta pressão. O sistema de CLT viabiliza trabalhar o painel como laje de piso, laje de cobertura e paredes de vedação. Os painéis podem ser utilizados como um elemento estrutural rígido e autoportante (AMORIM *et al.*, 2017). As tábuas individuais podem ter espessura de 16 a 50 mm e largura de 60 a 240 mm. As dimensões dos CLT variam de 60 a 300 cm de largura e o comprimento pode chegar até 18 m, dependendo do fabricante (GAGNON; KARACABEYLI, 2019).

Figura 5 - Ilustração de painel CLT



Fonte: Oliveira (2018).

Os painéis de CLT começaram a ser desenvolvidos no continente europeu no início da década de 90, porém no Brasil começou há cerca de 10 anos. Portanto, essa tecnologia ainda é muito recente no âmbito nacional e gera muitos questionamentos sobre o seu desempenho, visto também que há um certo preconceito sobre a utilidade da madeira como elemento estrutural (OLIVEIRA, 2018).

Os CLT podem ser compostos por madeiras de características homogêneas, onde todas as lamelas possuem a mesma classe de resistência, ou podem ser combinadas, onde são dispostas as lamelas com maior resistência nas camadas externas (BUILDING AND CONSTRUCTION AUTHORITY, 2018). Esse sistema construtivo possui muitas vantagens, entre elas destacam-se a rápida execução no canteiro de obras, as fundações que podem ser mais rasas devido a madeira ser mais leve que o concreto, por exemplo, e o bom conforto acústico e térmico que os painéis promovem, além de serem bem resistentes ao fogo (CLT HANDBOOK, 2013).

2.2.1 Processo Fabril do CLT

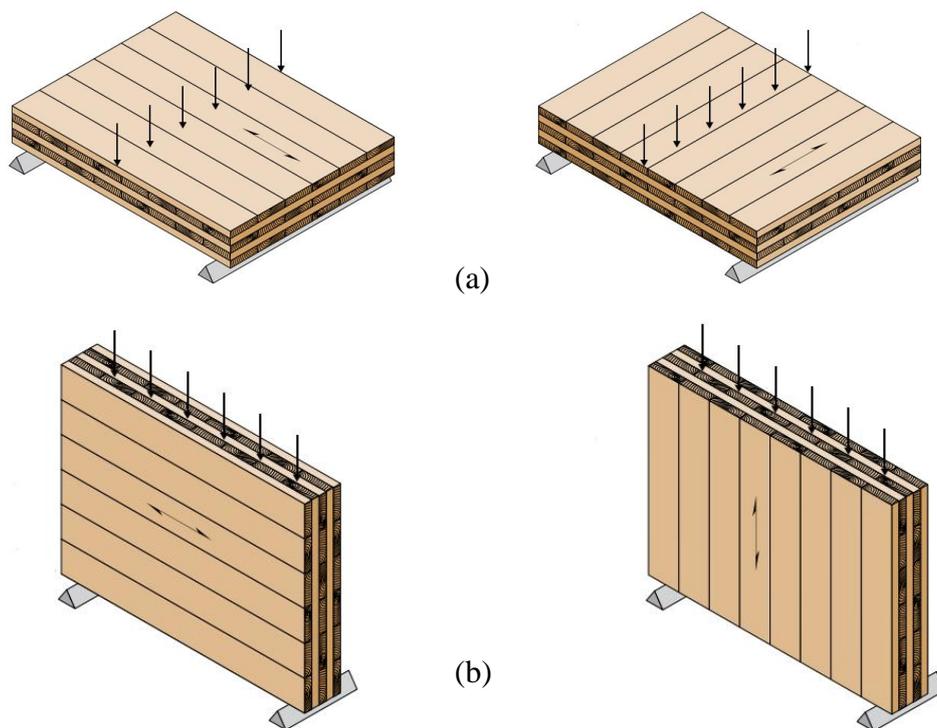
O processo fabril dos painéis em CLT começa pela escolha e seleção da matéria-prima. Depois da extração da madeira, esta podendo ou não receber algum tipo de tratamento contra agentes biológicos, há o processo de fabricação, que começa com a triagem e secagem das lamelas. Posteriormente, as tábuas são secadas, classificadas e, dependendo da fabricante e do tamanho solicitado, podem ser ligadas, nos topos, umas às outras por *finger joints*. Então, as lamelas passam pela plaina e é realizada a montagem dos painéis com a aplicação do adesivo, prensagem, corte e usinagem das peças (LUCENA *et al.*, 2019). Após a pré-fabricação, os painéis são transportados para o canteiro de obras e é feita a montagem e união dos painéis paralela à execução dos sistemas hidráulico e elétrico.

A fabricação experimental de um painel CLT pode durar de 15 min a 1 hora, variando de acordo com os equipamentos disponíveis e adesivos utilizados. Os adesivos devem ser aplicados nas duas faces maiores de cada lamela, mas a colagem das bordas laterais pode ser realizada também. As colas podem ser de poliuretano, melamina e a base de compostos fenólicos. Após a colagem das tábuas é feita a prensagem, a qual pode ser manual ou hidráulica e dependerá das dimensões do painel e do adesivo aplicado (LUCENA, 2019). Assim como o sistema convencional de alvenaria e concreto precisa de um controle de qualidade efetivo para oferecer bons resultados, a fabricação de CLT também precisa controlar os parâmetros e garantir boa qualidade para a sua finalidade (OLIVEIRA, 2018).

2.2.2 Comportamento Estrutural do CLT

Um painel CLT pode ser utilizado como placa de piso ou laje e como parede. Cada situação está susceptível a um tipo de flexão: dentro ou fora do plano. A flexão fora do plano (Figura 6-a) acontece quando as cargas são aplicadas na face plana do CLT (perpendiculares ao plano) e provoca cisalhamento perpendicular às fibras, além de tensões normais. Já a flexão dentro do plano (Figura 6-b) existe pelas cargas aplicadas na borda do painel, provocando cisalhamento ao longo da espessura e tensões normais.

Figura 6 - Painéis CLT fletidos fora (a) e dentro (b) do plano, na maior (esq.) e menor (dir.) orientação de resistência.



Fonte: ANSI (2018).

Referente à orientação das lamelas, ao considerar que a madeira resiste mais quando exigida de forma paralela às fibras, normalmente os CLT usados como piso e laje possuem as lamelas direcionadas de forma paralela ao sentido do vão principal. Já nos CLT utilizados como parede, as suas lamelas externas são orientadas de forma paralela às cargas de gravidade. A orientação das lamelas implica em diferentes resistências e as camadas periféricas do CLT são as que mais influenciam no momento de inércia transversal (FPINNOVATION, 2019).

O RF-Laminate[®], aplicativo do *software* RFEM[®], calcula a resistência à flexão dos painéis ou a tensão máxima de flexão em um painel com a soma das tensões de tração e compressão (global) com a de tensão normal de flexão (local), conforme a Equação 1. Nas opções de cálculo do *software* é possível escolher o acoplamento ou não nas laterais das lamelas do CLT, o que implica na consideração do cisalhamento global ou isolado. Por padrão, o acoplamento é considerado (DLUBAL, 2020).

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\text{global}} + \sigma_{\text{local}}, \quad (1)$$

Sendo,

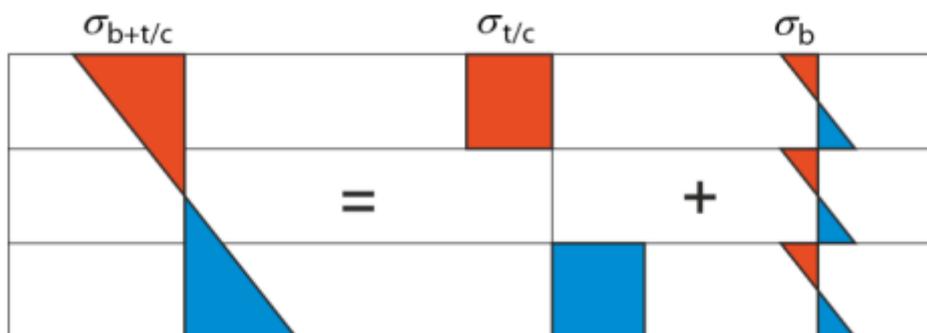
$\sigma_{\max} = \sigma_{b+t/c}$ = Tensão máxima de flexão;

$\sigma_{\text{global}} = \sigma_{t/c}$ = Componente de tração/compressão da tensão normal;

$\sigma_{\text{local}} = \sigma_b$ = Componente de flexão da tensão normal.

Na Figura 7 consta o modelo de diagramas de tensão que o módulo RF-Laminate[®] disponibiliza nos resultados.

Figura 7 – Diagrama de tensões normais pelo RF-Laminate



Fonte: DLUBAL (2016).

Onde,

$\sigma_{b+t/c}$ = Tensão máxima de flexão;

$\sigma_{t/c}$ = Componente de tração/compressão da tensão normal;

σ_b = Componente de flexão da tensão normal.

Os painéis de CLT são produtos industrializados e precisam ter precisão e qualidade durante toda a sua produção para garantir propriedades físicas e mecânicas que assegurem as resistências especificadas pelos projetos e normas (CALIL NETO, 2011). Em consequência do crescente interesse e utilização do CLT na construção civil, faz-se necessário estudos e pesquisas que avaliem seu desempenho estrutural com diferentes espécies de madeira plantadas no Brasil, quantidade de camadas, colas, dimensões e utilizações. É possível analisar o comportamento estrutural do CLT por meio de vários métodos, sendo esses experimentais, analíticos e/ou numéricos.

Sobre os métodos experimentais, nacionalmente há a ABNT NBR 7190-7 (2022) que recomenda ensaios para obter propriedades mecânicas do CLT. Além dessa, há a

ABNT NBR 7190-2 e NBR 7190-4 (2022) que indicam métodos de ensaios para peças estruturais de madeira de florestas plantadas para lotes não homogêneos e para lotes homogêneos, respectivamente. Destaca-se para elementos de placa os ensaios de flexão para se obter o módulo de elasticidade (MOE) e o cisalhamento transversal (*rolling shear*). O efeito *rolling shear* é a propensão das fibras rolarem quando estiverem sujeitas a tensões tangenciais ao seu redor.

Dentre os métodos analíticos, os quais não são o foco principal do presente trabalho, destaca-se o método Gama, que é uma adaptação do Anexo B da Eurocode 5 (CEN, 2004); o método *Composite Theory* ou *K-method* (BLASS; FELLMOSE, 2004); e o método *Shear Analogy* (KREUZINGER, 1999). Em busca de melhorar a precisão dos resultados pelo método analítico, pesquisadores estão se dedicando ao método numérico, sobretudo o Método dos Elementos Finitos (ALBOSTAMI *et al.*, 2020).

2.3 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O Método dos Elementos Finitos (MEF) surgiu como uma alternativa para solucionar problemas que são complexos e difíceis de resolver. Este método divide o material contínuo em pequenos fragmentos denominados de elementos finitos, transformando o meio contínuo em discreto formando uma rede de elementos. Esses elementos podem variar de forma e de tamanho. Os pontos de encontro das linhas são chamados de nós (ASSAN, 1999).

A malha de elementos finitos deve ser definida cuidadosamente com tamanho que garanta resultados fiéis ao modelo real. Geralmente, quanto menor ou mais refinada a malha, mais condizentes serão os resultados. A análise numérica é uma ferramenta estrutural que pode diminuir a quantidade de experimentos onerosos. Porém, é importante confirmar os estudos numéricos com analíticos e/ou experimentais para ajustar modelos válidos e precisos.

O MEF está sendo bem aceito por profissionais da engenharia para analisar e projetar estruturas e demais produtos. Há vários *softwares* comerciais de elementos finitos. Entre eles, destaca-se o RFEM[®] que é desenvolvido pela Dlubal Software GmbH[®]. O RFEM[®] é disponibilizado gratuitamente para estudantes e o site da Dlubal[®]

disponibiliza diversos manuais, vídeo-aulas e modelagens para a aprendizagem e utilização do programa.

O RFEM[®] possui vários módulos variando tipos de análises e tipos de materiais. Desses módulos, o de grande interesse para estudar o CLT é o módulo RF-Laminate[®], o qual é destinado para análise de tensão e deformação de materiais compostos por camadas e lamelas. Esse módulo calcula pela Teoria das Placas de Mindlin ou de Kirchhoff (DLUBAL, 2016).

2.3.1 Teoria das Placas

Placas são elementos estruturais inicialmente planos cujas dimensões laterais são bem maiores que sua espessura. O comportamento de placas submetidos a esforços de flexão podem ser solucionados por, principalmente, duas teorias, as quais o MEF do RFEM[®] calcula: a Teoria de Kirchhoff ou Teoria Clássica de Placas e a Teoria de Reissner e Mindlin. A Teoria de Mindlin é recomendada para placas mais espessas, enquanto a Teoria de Kirchhoff é recomendada para flexão de placas mais finas (DLUBAL, 2020).

A principal diferença entre as duas teorias é que na de Kirchhoff os deslocamentos resultantes do efeito de cisalhamento não são considerados, ou seja, não há giro na seção quando a placa é deformada. Já na Teoria de Mindlin, por considerar placas mais espessas e isso ser significativo nos deslocamentos e esforços internos, considera-se a deslocamento resultante do cisalhamento ao longo da espessura, o que resultará numa placa plana, entretanto não perpendicular à superfície após a deformação (MILANI, 2006).

Ambas as teorias resultam em tensões iguais, porém se diferem nos deslocamentos verticais devido a consideração ou não do cisalhamento, como visto anteriormente. Os painéis CLT são considerados como placas espessas, sendo assim, os seus cálculos são realizados com a Teoria de Mindlin.

Para melhor compreensão da Teoria de Mindlin, tem-se a Equação 2 que é a matriz de rigidez apropriada para deformações, tanto dentro quanto fora do plano, de um CLT simétrico, com ângulos de rotação múltiplas de 90°. Além disso, como o CLT pode ou não ter suas lamelas coladas lateralmente, essa matriz leva em consideração os fatores de

redução k , os quais são valores adimensionais entre 0 e 1. Painéis que são colados lateralmente, admite-se k igual a 1 (DLUBAL, 2016).

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \\ V_{xz} \\ V_{yz} \\ N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & D_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & k_{33}D_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & k_{44}D_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & k_{55}D_{55} & 0 & 0 & 0 \\ & & sym. & & & D_{66} & D_{67} & 0 \\ & & & & & & D_{77} & 0 \\ & & & & & & & k_{88}D_{88} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \\ \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (2)$$

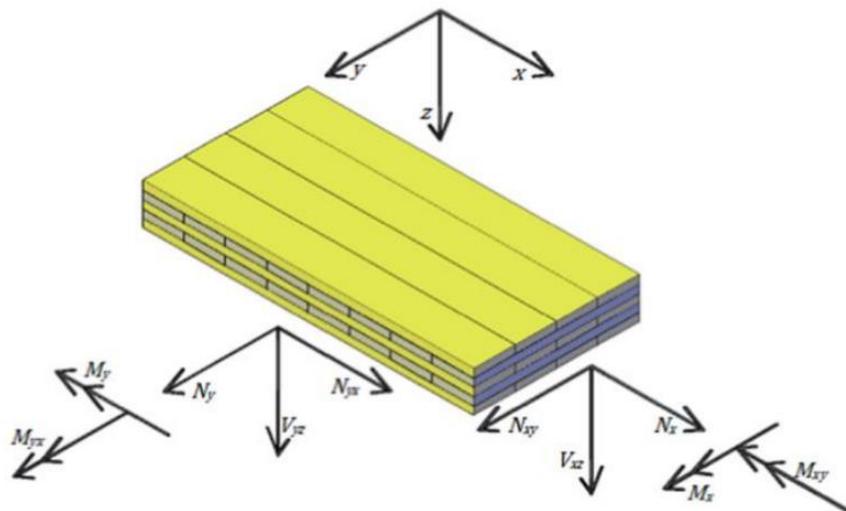
Legenda:

- Fator de redução (k) e Elemento D_{ij} de rigidez de flexão e torção (N.m);
- Fator de redução (k) e Elemento D_{ij} de rigidez de cisalhamento (N/m);
- Fator de redução (k) e Elemento D_{ij} de rigidez da camada (N/m).

D_{ij} são elementos de rigidez que resultam de uma soma de considerações da madeira para cada camada em relação à espessura e direção das fibras. Esses elementos foram separados por cores, conforme a legenda da matriz, para facilitar a compreensão sobre o que se referem. Os fatores k_{33} , k_{44} , k_{55} e k_{88} são utilizados para reduzir os valores de rigidez referentes às especificações das bordas do CLT, sendo que k_{88} reduz D_{88} que considera a espessura e o módulo de cisalhamento da camada (DLUBAL, 2016; TURESSON *et al.*, 2019).

Já M_x e M_y são os momentos fletores, M_{xy} é o momento de torção, V_{xz} e V_{yz} são as forças de cisalhamento transversal, N_x e N_y são as forças no plano e N_{xy} a força de cisalhamento no plano. A Figura 8 representa a direção dessas forças (N/m) e momentos (Nm/m).

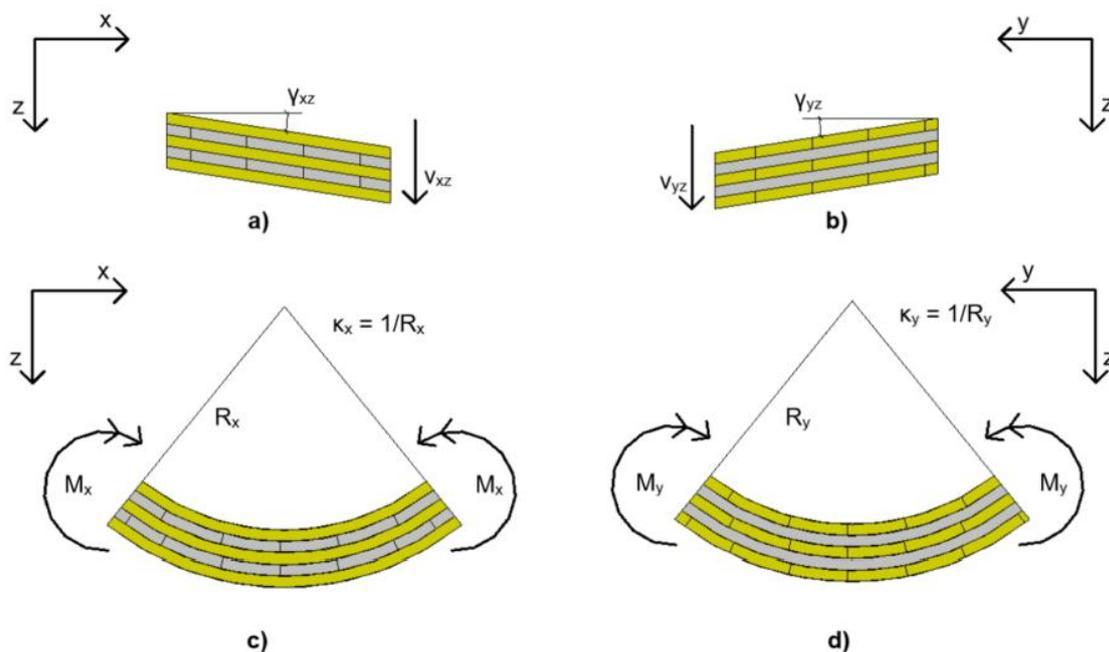
Figura 8 – Representação de forças e momentos da equação de Mindlin

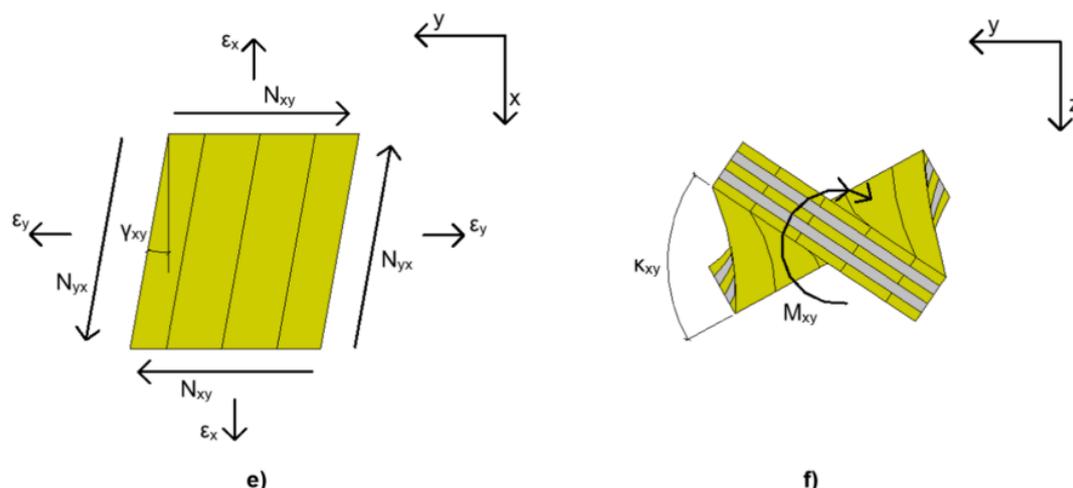


Fonte: Turesson *et al.* (2019).

Ainda sobre as variáveis da Equação 2, κ_x , κ_y e κ_{xy} (m^{-1}) são curvaturas, γ_{xz} e γ_{yz} são as deformações transversais, ϵ_x e ϵ_y são as deformações no plano e γ_{xy} é a deformação de cisalhamento no plano. Essas deformações são resultantes das forças e momentos e estão ilustradas na Figura 9.

Figura 9 - Representação de deformações e curvaturas de CLT pela equação de Mindlin





Fonte: TURESSON *et al.* (2019).

A Figura 9 (a) e (b) demonstram as deformações transversais de cisalhamento γ_{xz} e γ_{yz} . As curvaturas κ_x , κ_y e κ_{xy} podem ser observadas na Figura 9 (c), (d) e (f), respectivamente. Já a Figura 9 (e) mostra as deformações ϵ_x e ϵ_y no plano e γ_{xy} de cisalhamento. Os R_x e R_y são raios de curvatura.

2.3.2 Propriedades da Madeira

O RFEM[®] possui uma biblioteca extensa de materiais com todas as características e propriedades conforme normativas do mundo todo. É possível selecionar o material madeira e verificar quais as normas disponíveis. Referente ao Brasil, pode-se inserir madeiras com suas determinadas classes de resistência e demais propriedades conforme a NBR 7190 (1997). Entretanto, quando o material a ser utilizado na modelagem não existe na biblioteca, é possível inserir as características e propriedades físicas e mecânicas manualmente.

Como o CLT é um produto ortotrópico, as propriedades dos materiais são diferentes para cada direção. Sendo assim, é necessário inserir dois módulos de elasticidade (E_x , E_y), três módulos de cisalhamento (G_{yz} , G_{xz} , G_{xy}) e dois coeficientes de Poisson (ν_{xy} , ν_{yx}). O módulo de elasticidade (E_x) pode ser determinado por meio de ensaios à flexão seguindo normativas vigentes, como a NBR 7190. Referente ao módulo de elasticidade E_y , a norma BS EN 16351 (2015) determina que esse valor pode ser simplificado como nulo quando os CLT não são colados nas bordas.

Os módulos de rigidez podem ser obtidos experimentalmente por meio de ensaios específicos, mas na falta desses valores experimentais necessários para a análise estrutural, pode-se utilizar as seguintes relações sugeridas por Bodig e Jayne (1982):

$$E_x : E_y : E_z \approx 20 : 1,6 : 1 \quad (2)$$

$$G_{xy} : G_{xz} : G_{yz} \approx 10 : 9,4 : 1 \quad (3)$$

$$E_x : G_{xy} \approx 14 : 1 \quad (4)$$

Sobre os Coeficientes de Poisson, Bodig e Jayne (1982) também estimam o valor médio de ν_{xy} para coníferas e folhosas de 0,37. Além dessas características, é necessário informar ao programa os valores das resistências à flexão, tração e compressão, bem como das resistências ao cisalhamento. Essas resistências são obtidas experimentalmente, mas é possível determinar algumas dessas resistências de maneira mais simplificada, seguindo equações de correlação entre uma propriedade e outra, adotadas pelas normas técnicas, para se obter a propriedade que se deseja. A NBR 7190-3 (2022) possui as seguintes relações (Equações 6 e 7) para caracterização simplificada da resistência da madeira serrada a partir de ensaios de compressão paralela às fibras:

$$\frac{f_{c0,k}}{f_{t0,k}} = 0,77 \quad \frac{f_{c90,k}}{f_{c0,k}} = 0,25 \quad \frac{f_{e0,k}}{f_{c0,k}} = 1,0 \quad (5)$$

$$\frac{f_{e90,k}}{f_{c0,k}} = 0,25 \quad \frac{f_{tM,k}}{f_{t0,k}} = 1,0 \quad \frac{f_{t90,k}}{f_{t0,k}} = 0,05 \quad (6)$$

Onde,

$f_{c0,k}$ = Resistência característica à compressão paralela às fibras;

$f_{c90,k}$ = Resistência característica à compressão perpendicular às fibras;

$f_{e0,k}$ = Resistência característica ao embutimento paralelo às fibras;

$f_{e90,k}$ = Resistência característica ao embutimento perpendicular às fibras;

$f_{tM,k}$ = Resistência característica convencional obtida no ensaio de flexão estática;

$f_{t0,k}$ = Resistência característica à tração paralela às fibras;

$f_{t90,k}$ = Resistência característica à tração perpendicular às fibras.

3 CAPÍTULO I - ESTADO DA ARTE DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE MADEIRA LAMELADA COLADA CRUZADA VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

RESUMO

Em busca do desenvolvimento sustentável, a madeira engenheirada é uma alternativa para o setor da construção civil brasileira. O foco do estudo é na Madeira Lamelada Colada Cruzada, ou *Cross Laminated Timber* (CLT), um painel composto por camadas de lamelas coladas estruturalmente que forma um elemento estrutural rígido e autoportante, o qual é utilizado como parede, laje de piso e laje de cobertura. Para garantir a qualidade das propriedades físico-mecânicas do CLT, estudos vêm sendo realizados de forma experimental, analítica e/ou numérica, inclusive via modelagem numérica pelo Método dos Elementos Finitos (MEF). Este trabalho fornece uma revisão atualizada da literatura sobre o comportamento estrutural do CLT pelo MEF, destacando os principais autores e as vantagens do método. Para isso, exportou-se informações da base de dados Scopus® para o *software* VOSviewer® e foram realizados mapas bibliométricos. O MEF se mostrou eficiente e confiável segundo os artigos referenciados, além de muito versátil pela sua abrangência de possibilidades.

Palavras-chave: Estruturas de madeira; Desempenho estrutural; Modelagem numérica.

ABSTRACT

In search of sustainable development, engineered wood is an alternative for the Brazilian construction sector. The focus of the study is on Cross-Laminated Timber (CLT), a panel composed of layers of structurally bonded lamellas that forms a rigid, self-supporting structural element, which is used as a wall, floor slab and roof slab. In order to guarantee the quality of the physical-mechanical properties of CLT, studies have been carried out experimentally, analytically and/or numerically, including numerical modeling using the Finite Element Method (FEM). This paper provides an up-to-date review of the literature on the structural behavior of CLT using FEM, highlighting the main authors and the advantages of the method. To do this, information was exported from the Scopus® database to the VOSviewer® software and bibliometric maps were made. The FEM proved to be efficient and reliable according to the articles referenced, as well as being very versatile due to its wide range of possibilities.

Keywords: Wood structures; Structural performance; Numerical modeling.

3.1 INTRODUÇÃO

O setor das florestas plantadas contribui para a conservação da biodiversidade e a diminuição das emissões de gases de efeito estufa através do sequestro de carbono. A plantação e a conservação das florestas representam 4,5 bilhões de toneladas de CO₂ armazenados. Com isso, é evidente a importância do cultivo de árvores para minimizar os efeitos da mudança climática (IBÁ, 2022). Entretanto, enquanto a indústria das árvores procura mitigar a poluição ambiental, tem-se o setor da construção civil como um dos mais poluentes e causadores de impactos ambientais no Brasil, principalmente pelo grande desperdício de materiais e destinação inadequada de resíduos (ABDI, 2015).

Para o melhor controle de qualidade e a minimização da geração de resíduos sólidos pelo setor, a industrialização da construção civil é uma alternativa (MARQUES, 2008). Com isso, a madeira engenheirada surge como uma possibilidade de construção mais sustentável, visto que a madeira é um material de fonte renovável e o seu uso e substituição pelo método convencional de construir colabora para a diminuição do processo de degradação dos recursos naturais. Sendo assim, vale salientar que as construções de madeira, proveniente de florestas de manejo sustentável, contribuem para o desenvolvimento sustentável almejado pela Agenda 2030, a qual busca garantir um planeta saudável às futuras gerações (ONU, 2015).

Um dos produtos de madeira engenheirada é o Painel de Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC), também conhecido como *Cross Laminated Timber* (CLT) ou X-lam. Trata-se de um painel estrutural que pode ser utilizado como laje de cobertura, parede e laje de piso (AMORIM *et al.*, 2017). No Brasil é recente essa tecnologia, porém há um crescente interesse de utilização do CLT na construção civil, e, por isso, faz-se importante estudos e pesquisas que avaliem seu desempenho estrutural com diferentes espécies de madeira, quantidade de camadas, colas, dimensões e aplicações.

É possível analisar o comportamento estrutural do CLT por meio de vários métodos, sendo esses: experimentais, analíticos e/ou numéricos. Em busca de melhorar a precisão dos resultados pelo método analítico, pesquisadores estão se dedicando ao método numérico, sobretudo o Método dos Elementos Finitos (MEF) (ALBOSTAMI *et al.*, 2020).

O objetivo deste capítulo foi identificar os principais autores, fornecer uma revisão atualizada da literatura sobre o comportamento estrutural de CLT por modelagem numérica via MEF e identificar suas principais vantagens.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

Esse trabalho está fundamentado em uma ampla pesquisa bibliográfica. Para a etapa de coleta de dados, definiu-se a base de dados Scopus[®] e a estratégia de busca: (TITLE-ABS-KEY (cross AND laminated AND timber) AND TITLE-ABS-KE (finite AND element AND method)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar")). Pode-se observar que os termos de busca utilizados "cross laminated timber" e "finite element method" foram restritos ao título, resumo e palavras-chave dos recursos e o tipo de documento foi definido como artigo. Já sobre a data de publicação dos artigos, não foi aplicado nenhum filtro.

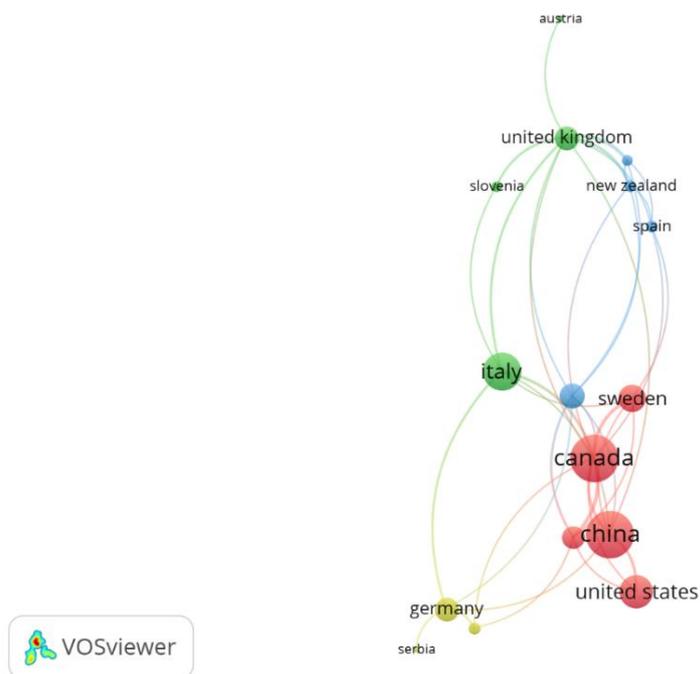
A etapa de coleta de dados resultou em uma amostra de 197 artigos. As informações de citação e as informações bibliográficas dos artigos foram exportadas da base de dados em formato CSV (excel) e importadas na ferramenta VOSviewer[®], um software que cria, visualiza e explora mapas bibliométricos. No VOSviewer[®] foi gerado um mapa de autores que possuem três ou mais artigos publicados e um mapa dos principais países que publicam artigos com a temática de interesse. Com os mapas feitos, explorou-se alguns artigos a fim de atingir o objetivo de levantar os estudos mais relevantes de comportamento estrutural de CLT via MEF para esse trabalho, assim como as vantagens desse método numérico.

3.3 RESULTADOS

3.3.1 Principais autores e países

O mapa da Figura 10 mostra que são bem poucos os países que se destacam no desenvolvimento de pesquisas com essa temática e que o Brasil não está entre eles. A bibliografia existente que estuda o comportamento estrutural de CLT pelo MEF está concentrada principalmente no Canadá, China, Itália e Estados Unidos.

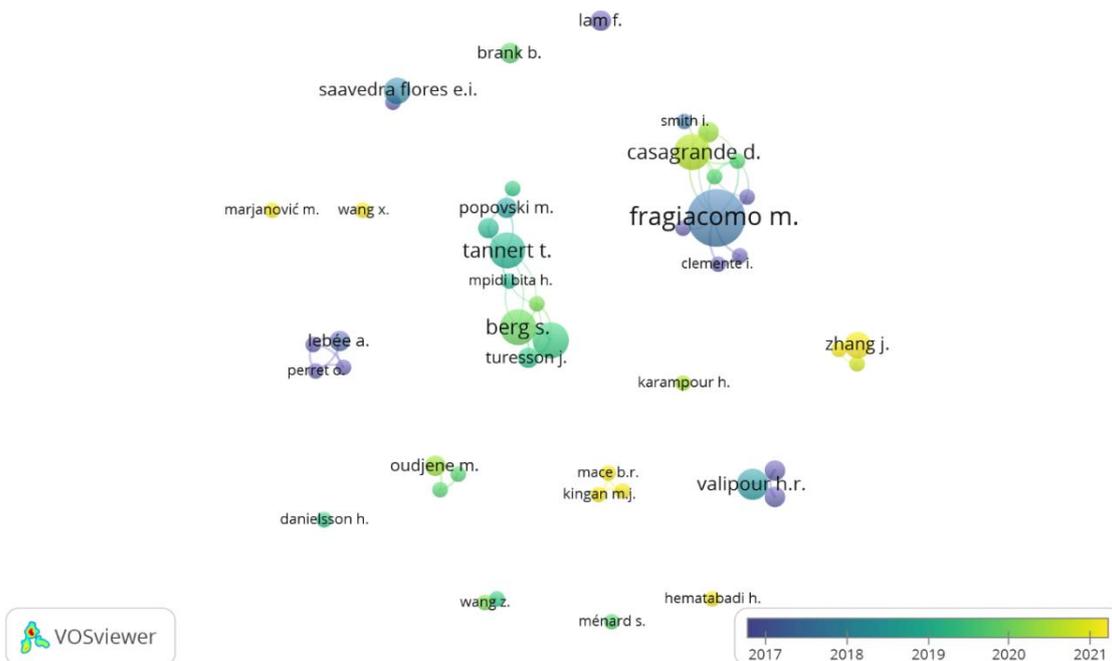
Figura 10 - Mapa dos principais países



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Com o mapa da Figura 11, pode-se observar os principais autores sobre o tema. O mapa também possibilita visualizar, por meio das cores, o ano em que os autores se destacam com as publicações.

Figura 11 - Mapa dos principais autores



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Para quantificar a relevância de cada autor para a produção bibliográfica de CLT por MEF, fez-se a Tabela 2 que apresenta os autores que têm 4 ou mais artigos publicados sobre o assunto e a quantidade de citações. Essas informações foram obtidas no VOSviewer[®] com os dados que foram exportados do Scopus[®].

Tabela 2 - Principais autores sobre a temática

AUTOR	ARTIGOS SOBRE O TEMA	CITAÇÕES
Fragiacomo, M.	11	250
Tannert, T.	7	147
Berg, S.	7	50
Ekevad, M.	7	49
Casagrande, D.	7	36
Valipour, H. R.	6	240
Saavedra Flores, E. I.	5	60
Zhang, J.	5	20
Brandford, M. A.	4	225
Hassanieh, A.	4	225
Popovski, M.	4	118
Shahnewaz, M.	4	98
Lam, F.	4	45
Lebée, A.	4	29
Brank. B.	4	26
Turesson, J.	4	22
Oudjene, M.	4	20
Polastri, A.	4	17

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Após esses dados obtidos, foram selecionados artigos apenas de alguns autores, pois citar os artigos de todos os autores da Tabela 2 resultaria em um extenso trabalho. Portanto, pesquisou-se no Scopus[®] os artigos e foram escolhidos aqueles que parecem ser de maior relevância para esse estudo. Abaixo, em 3.3.2., são citados os estudos escolhidos.

3.3.2 Artigos sobre a temática

Rinaldin & Fragiaco (2016) fizeram modelagem de elementos finitos avançada de edifícios de CLT para análises dinâmicas não-lineares. O modelo foi usado para reproduzir os resultados experimentais dos testes de mesa vibratória realizados no Japão

nos edifícios de madeira em escala real de 3 e 7 andares. Os painéis foram modelados com elementos de casca elásticos lineares e os conectores de metal (suportes, cantoneiras, parafusos) foram especificados com molas histeréticas não lineares com 3 graus de liberdade. As comparações numérico-experimentais demonstram a capacidade do modelo em capturar as respostas sísmicas dos dois edifícios com erros de 20% na aceleração relativa e 7% no deslocamento do telhado. Verificou-se que o atrito afeta significativamente a resposta sísmica, pois reduz o pico de deslocamento do topo em até 31%.

Berg *et al.* (2019) analisaram pelo MEF a rigidez à flexão de painéis CLT com larguras e espessuras variadas. Foram realizadas simulações bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D) para comparar o deslocamento resultante. As modelagens mostraram que os modelos 2D subestimam o deslocamento quando comparados aos modelos 3D e que a rigidez nos modelos bidimensionais deve ser ajustada para levar em consideração a largura do CLT e, portanto, não obter resultados com pouca precisão.

Já Turesson *et al.* (2019) avaliaram o impacto da largura e espessura de CLT de 3 e 5 camadas, cujas lamelas não são coladas nas bordas. Para isso, foi analisada a rigidez ao cisalhamento pelo MEF e por método analítico. As lamelas dos painéis CLT podem ou não ser coladas nas bordas, por isso utiliza-se coeficientes para regular os valores de rigidez. Nesse estudo, verificou-se que o coeficiente k_{88} , o qual está relacionado com a rigidez das camadas do painel, varia de acordo com a largura/espessura do painel. Para largura e espessuras menores, o fator k_{88} mostrou ser mais baixo. Além disso, ao comparar os resultados calculados com os existentes experimentalmente, pode-se concluir que os resultados dessa pesquisa são confiáveis, pois os mesmos diferenciaram em menos de 2,9%.

Outro estudo realizado foi o de Ma *et al.* (2021), que avaliaram as propriedades mecânicas de painéis CLT com madeira de *Acer saccharum* sob cargas fora do plano através de testes de cisalhamento em bloco, flexão de vão longo, flexão de vão curto e simulação numérica para conhecer o comportamento de adesão, flexão e cisalhamento dos painéis. A modelagem numérica por elementos finitos dos ensaios de flexão foi realizada com a lei constitutiva ortogonal e o modelo de dano progressivo embasado nos parâmetros das propriedades do material a partir da classificação e referências da madeira

serrada. A simulação comparada com os resultados experimentais de resistência à flexão resultou em menos que 10,7% de diferença.

Huber *et al.* (2021) desenvolveram um modelo de elementos finitos baseado em componentes não-lineares 3D para um sistema de piso em CLT, cuja finalidade foi estudar o comportamento de colapso e os caminhos alternativos de carga (ALPs) para avaliar a robustez estrutural. Esse estudo foi realizado por meio de uma análise do tipo *pushdown*, que consiste em aplicar cargas crescentes até o colapso da estrutura, em que foram considerados os parâmetros referentes ao vão do piso, tipo de conexão utilizada, localização vertical do piso, o nível de amarração e a rigidez horizontal da parede. Essas variáveis foram analisadas em 80 modelos de elementos finitos. Os autores concluíram que a abordagem de modelagem pelo MEF reproduziu suficientemente os fenômenos não-lineares observados durante os experimentos *pushdown*. Além disso, o estudo mostrou que a resistência ao colapso foi afetada pelo vão do piso, seguido pela resistência axial, rigidez e ductilidade da ligação piso a piso, além do peso acima do nível e a espessura do painel.

Saavreda Flores *et al.* (2014) realizaram uma investigação sobre o comportamento mecânico de painéis de CLT por uma abordagem de homogeneização computacional. Para isso, adotaram um procedimento de elementos finitos em uma estrutura de modelagem multiescala na finalidade de determinar a resposta constitutiva da madeira em razão da falta de conhecimento sobre alguns dos parâmetros microestruturais da madeira ou suas suscetíveis variações consideráveis. Para validar o modelo multiescala, foi medido experimentalmente o módulo de Young longitudinal e a densidade de vigas de madeira serrada de *Pinus radiata*, além da realização de ensaios experimentais submetidos a cargas de flexão, cisalhamento e compressão. Neste contexto, foi encontrado diferenças em valores médios em 10,9%, correspondente para densidade de 3,7%, para flexão em 13%, cisalhamento 20,4% e compressão em 5,3%, resultados que revelam as potenciais capacidades preditivas da atual modelagem multiescala para a análise de materiais de madeira e estruturas de madeira.

Outro estudo realizado foi o de Zhang *et al.* (2020), o qual fez uma investigação experimental para estudar o método de análise de elementos finitos da taxa de carbonização em piso de CLT. Para isso, foram conduzidos experimentos de incêndio em

três grupos de piso de CLT doméstico sob condições de aumento de temperatura padrão ISO 834, aplicando testes de tração e cisalhamento da camada simulada usando o método de elementos finitos em dois tipos de modelos para taxa de carbonização do piso, os que consideram e os que não consideram a delaminação do laminado. Ao final da experimentação, foi possível concluir que a velocidade de carbonização da placa de CLT está positivamente correlacionada com o tempo de queima, é possível simular o modo de falha real da resina adesiva utilizada, além da possibilidade de utilização do *software* ABAQUS® para simular o adesivo ao realizar a testagem de velocidade de carbonização da placa de CLT por MEF.

Kozarić *et al.* (2021) analisaram a rigidez de painéis CLT de piso com e sem aberturas por modelagem numérica de elementos finitos utilizando elementos 2D e 3D. Os dados utilizados para fazer a modelagem foram baseados em experimentos já publicados anteriormente. Obteve-se uma alta correlação entre os dados experimentais e das modelagens, o que significa que o MEF pode ser muito eficiente para compreender o comportamento estrutural dos painéis.

Além desses estudos, vale ressaltar que também há pesquisas brasileiras referente ao comportamento estrutural de CLT por meio do MEF. Dentre elas, destaca-se a de Silva *et al.* (2023), que analisaram a resistência ao cisalhamento e a rigidez de corpos de prova de CLT de *Pinus elliottii*, *Eucalyptus grandis*, *Toona ciliata* e *Acrocarpus fraxinifolius*, de maneira experimental e por modelagens numéricas. Referente ao MEF, eles concluíram que os modelos desenvolvidos em sistema linear obtiveram comportamento estrutural semelhante aos corpos de prova experimentais de flexão e cisalhamento, e que as modelagens possibilitaram analisar as concentrações de tensões dos corpos de prova.

Outro estudo brasileiro é o de Lucena (2017), no qual se objetivou analisar o deslocamento e determinar a carga de ruptura por flexão dos painéis CLT de *Pinus taeda* por meio de modelagem analítica e numérica pelo MEF. Ao comparar o deslocamento obtido pelos dois métodos, verificou-se que a diferença máxima entre eles foi de apenas 2,8%, ou seja, os resultados foram muito próximos. Comparou-se também os valores de deslocamento das modelagens com os valores experimentais, os quais foram maiores que os valores determinados pelas modelagens. Já a carga e a tensão máxima entre os dois métodos não ultrapassaram de 8,2% de diferença, o que demonstra que, em geral, os

resultados foram bem próximos e o método dos elementos finitos se mostra ser uma alternativa aos métodos experimentais para estimar as propriedades mecânicas dos painéis CLT.

3.3.3 Análise dos Resultados

Nos estudos citados, pode-se observar que o MEF vem sendo cada vez mais utilizado nas pesquisas científicas, as quais estão mostrando bons resultados. Geralmente, para validar o MEF, os estudos são realizados também de forma experimental e/ou de forma analítica para poder comparar e quantificar a diferença entre os métodos. Nos trabalhos feitos por alguns dos principais pesquisadores sobre o tema, conclui-se que a pouca diferença entre os resultados obtidos pelos diferentes métodos é satisfatória e apresenta uma boa aproximação dos resultados.

Além disso, os artigos comprovam as múltiplas possibilidades de se estudar o comportamento estrutural do CLT pelo MEF. Pôde-se observar estudos que analisam o comportamento mecânico em placas individuais e o comportamento das placas em edifícios de múltiplos andares, como visto no estudo de Rinaldin & Fragiaco (2016) que fizeram análises dinâmicas com diferentes conectores em edifícios de 5 e 7 pavimentos.

Pode-se observar também a evolução que está sendo desenvolvida nas pesquisas de CLT pelo MEF ao estudar os painéis com diferentes camadas e identificar a importância de inserir coeficientes de rigidez adequados de acordo com a configuração/dimensão do painel e suas camadas (TURESSON *et al.*, 2019). Outro fator relevante para as modelagens numéricas estruturais é o tipo de modelo a ser realizado, pois comprovou-se que modelos 3D podem fornecer resultados mais confiáveis quando comparado com modelos 2D, a não ser que seja alterada a matriz de rigidez conforme o necessário (BERG *et al.*, 2019).

É possível prever o comportamento da estrutura sobre diversos parâmetros, desde flexão, cisalhamento e compressão, até o comportamento do CLT sob efeitos de abalos sísmicos ou de incêndio, como mostra Zhang *et al.* (2020) que analisaram a taxa de carbonização e a sua velocidade.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo identificou os principais autores e evidenciou o estado da arte de artigos sobre o comportamento estrutural de CLT por modelagem numérica via MEF a fim de conhecer as principais vantagens de utilizar esse método.

Os resultados mostraram que uma das vantagens do MEF é a sua possibilidade de ser muito eficiente para compreender o comportamento estrutural do CLT, pois observou-se nos artigos uma boa aproximação entre os resultados pelo MEF e os demais métodos. Outra vantagem do MEF é a sua versatilidade de se estudar o CLT, pois ele permite realizar vários tipos de testes mecânicos, de vibração e até de queima de painéis com diferentes dimensões e quantidades de camadas, de edifícios de um ou de múltiplos pavimentos. Além disso, o MEF se torna muito vantajoso por permitir analisar o comportamento estrutural do CLT de forma não onerosa, por não depender de equipamentos específicos e de laboratórios experimentais para obter os resultados almejados, pois depende apenas de *software* de elementos finitos e de uma máquina computacional.

É de suma importância que pesquisas de modelagens numéricas de CLT por MEF continuem sendo realizadas para contribuir na consolidação desse método que, futuramente, poderá substituir, em muitos casos, os experimentos que são custosos e demandam muito tempo para serem realizados.

REFERÊNCIAS

- ABDI. Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI). **Manual da construção industrializada**. Conceitos e etapas. Volume 1: estrutura e vedação. Brasília, 2015.
- ALBOSTAMI, A.; WU, Z.; CUNNINGHAM, L. Elastic response of cross-laminated timber panels using finite element and analytical techniques. **Canadian Journal of Civil Engineering**, Vol. 48, 2020.
- AMORIM, S. T. A.; MANTILLA, J. N. R.; CARRASCO, E. V. M. A madeira laminada cruzada: aspectos tecnológicos, construtivos e de dimensionamento. **Revista Matéria**, Vol. 22, pp. 1-7, 2017.
- BERG, S.; TURESSON, J.; EKEVAD, M.; HUBER, J. A. J. Finite element analysis of bending stiffness for cross-laminated timber with varying board width. **Wood Material Science & Engineering**, Vol. 14, pp. 392-403, 2019.
- HUBER, J. A. J.; BITA, H. M.; TANNERT, T.; BERG, S. Finite element analysis of alternative load paths to prevent disproportionate collapse in platform-type CLT floor systems. **Engineering Structures**, Vol. 240, pp. 1-16, 2021.
- IBÁ. Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório IBÁ 2020**. 2020.
- KOZARIĆ, L.; BURSAĆ, S.; VOJNIĆ PURČAR, M.; BEŠEVIĆ, M.; TEKIĆ, Z. Finite element analysis of dynamic characteristics and bending stiffness for cross laminated timber floor panels with and without openings. **Drvna Industrija**, Vol. 72, nº 4, pp. 373-379, 2021.
- LUCENA, R. C. **Análise teórica de rigidez e resistência à flexão de painéis de madeira lamelada colada cruzada**. 2017. Monografia de conclusão de curso. UFSC, Centro Tecnológico, Florianópolis, 2017.
- MA, Y.; MUSAH, M.; SI, R. *et al.* Integrated experimental and numerical study on flexural properties of cross laminated timber made of low-value sugar maple lumber. **Construction and Building Materials**, Vol. 280, pp. 1-16, 2021.
- MARQUES, L. E. M. M. **O papel da madeira na sustentabilidade da construção**. 2008. Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2008.
- ONU. Organização das Nações Unidas. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. 2015.
- RINALDIN, G.; FRAGIACOMO, M. Non-linear simulation of shaking-table tests on 3- and 7-storey X-Lam timber buildings. **Engineering Structures**, Vol. 113, pp. 133-148, 2016.

SAAVEDRA FLORES, E. I.; DAYYANI, I.; AJAJ, R. M.; CASTRO-TRIGUERO, R. *et al.* Analysis of cross-laminated timber by computational homogenisation and experimental validation. **Composite Structures**, Vol. 121, pp. 386-394, 2015.

SILVA, J. V. F.; PEREIRA, M. C. M.; SILVA, M. F. F.; MOLINA, J. C. Experimental and numerical analysis of specimen configurations for cross laminated timber on rolling shear stiffness and strength response. **Engineering Structures**, Vol. 284, pp. 1-17, 2023.

TURESSON, J.; BERG, S.; EKEVAD, M. Impact of board width on in-plane shear stiffness of cross-laminated timber. **Engineering Structures**, Vol. 196, pp. 1-8, 2019.

ZHANG, J.; CHEN, H.; BAI, Y.; LIAO, J. Finite Element Analysis of the Charring Rate of Cross-Laminated Timber Floor. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, Vol. 48, pp. 1122-1131, 2020.

4 CAPÍTULO II – VALIDAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DA MADEIRA E DE PAINÉIS DE MADEIRA LAMELADA COLADA CRUZADA DE *Eucalyptus benthamii* VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

RESUMO

A Madeira Lamelada Colada Cruzada, também conhecida como Cross Laminated Timber (CLT), é um painel estrutural complexo de ser analisado em função da natureza anisotrópica da madeira e do composto ser um painel ortotrópico. A modelagem numérica, pelo método dos elementos finitos (MEF), pode ser uma boa alternativa de análise, em função de solucionar problemas de valor de contorno mais difíceis de serem resolvidos analiticamente. Para tanto, é recomendável validar as propriedades experimentais para garantir resultados precisos. O objetivo desse capítulo foi validar as propriedades físicas e mecânicas, obtidas experimentalmente por outros autores, de CLT de *Eucalyptus benthamii* em modelagem estrutural via MEF. Para isso, foi simulado o ensaio experimental de flexão a três pontos em três painéis CLT, no software RFEM[®] e RF-Laminate[®] da Dlubal[®]. Por meio de um teste t de Student a 5% de significância, os resultados demonstraram que as deflexões no método experimental e no numérico não apresentaram diferença significativa, o que demonstra que as propriedades do painel CLT experimental de *E. benthamii* podem ser adequadamente representadas pelo MEF.

Palavras-chave: Estruturas de madeira; Simulação numérica; Deflexão.

ABSTRACT

Cross Laminated Timber (CLT) is a complex structural panel to analyze due to the anisotropic nature of the wood and the fact that the composite is an orthotropic panel. Numerical modeling using the finite element method (FEM) can be a good alternative for analysis, as it solves boundary value problems that are more difficult to solve analytically. To this end, it is advisable to validate the experimental properties in order to guarantee accurate results. The objective of this chapter was to validate the physical and mechanical properties, obtained experimentally by other authors, of *Eucalyptus benthamii* CLT in structural modeling via FEM. To do this, the experimental three-point bending test on three CLT panels was simulated using Dlubal's RFEM[®] and RF-Laminate[®] software. Through a Student's t-test at a 5% significance level, the results demonstrated that the deflections in both the experimental and numerical methods did not show significant differences. This indicates that the properties of the experimental CLT panel of *E. benthamii* can be adequately represented by the FEM.

Keywords: Wood structures; Numerical simulation; Deflection.

4.1 INTRODUÇÃO

Nos últimos vinte anos, tem sido observado um notável crescimento na utilização de estruturas de madeira em edifícios residenciais e comerciais. Essa tendência tem sido verificada inclusive em países que não possuem uma tradição no emprego desse material. Tal progresso tem sido impulsionado principalmente pela introdução de produtos de madeira eco-friendly e altamente eficazes, tais como as vigas de madeira laminada colada (Glulam), os painéis de madeira laminada cruzada (CLT) e os painéis de madeira laminada folheada (LVL). Esses elementos têm encontrado amplo uso tanto em estruturas unidirecionais quanto em estruturas bidirecionais (SANDOLI *et al.*, 2021).

O método construtivo do CLT é baseado em painéis de madeira maciça autoportantes que podem ser utilizados como paredes ou lajes, o que simplifica a construção de edifícios de grande porte ou com múltiplos andares, além de romper com as limitações dos sistemas construtivos tradicionais de madeira leve. Tipicamente, um painel de CLT é formado por camadas de madeira coladas de forma perpendicular entre si. Devido ao avanço da indústria de painéis CLT nos últimos anos, especialmente na Europa, pesquisadores e profissionais da área de engenharia de construção têm despertado interesse nesse produto, devido a uma série de benefícios associados, como o baixo impacto ambiental, a alta relação entre resistência e peso, a facilidade e o tempo reduzido de instalação, o apelo estético, a menor emissão de dióxido de carbono em comparação com estruturas de aço e concreto, o menor consumo de energia na sua fabricação e a maior resistência ao fogo, aos tremores de terra e ao calor (YOUNIS; DODOO, 2022).

Para o desenvolvimento de projetos em estruturas de madeira, faz-se necessário conhecer as propriedades físicas e mecânicas da madeira escolhida. Essas propriedades podem ser determinadas por meio de ensaios laboratoriais para, posteriormente, serem utilizadas nos cálculos analíticos para dimensionamento. Entretanto, segundo Christovasilis *et al.* (2016), o comportamento estrutural de painéis CLT é mais difícil de ser calculado analiticamente em função da sua característica ortogonal.

Outra forma de prever o comportamento estrutural é por meio do método numérico, sobretudo o Método dos Elementos Finitos (MEF). O MEF se baseia em dividir o material analisado em pequenos fragmentos, formando assim uma malha de elementos finitos, que possibilita solucionar a estrutura com aproximações para os problemas de

valores de contorno (MOAVENI, 1999). Essa malha deve ser dimensionada de modo que os resultados sejam gerados com confiabilidade.

Para obter resultados confiáveis pelo MEF, as modelagens numéricas devem condizer com a realidade. Portanto, torna-se importante a validação das propriedades, que se dá por meio da simulação numérica dos ensaios realizados. Pesquisas mostram que é viável validar as propriedades e estudar o comportamento estrutural de painéis CLT via MEF, como no estudo de Shirmohammadli *et al* (2023), que desenvolveram modelagens para avaliar ligações de hastes em CLT, para tanto, simularam os experimentos em método numérico e os validaram com sucesso por meio de critérios, como a carga máxima, o deslocamento e o modo de ruptura.

Zhang *et al.* (2023) fabricaram seis painéis de madeira e bambu lamelados cruzados (CLBT) e dois painéis CLT. Eles fizeram teste de flexão à quatro pontos e compararam a rigidez à flexão experimental com a rigidez determinada a partir da carga e deslocamento máximos obtidos da simulação pelo MEF. Eles concluíram que o método numérico foi mais preciso que o método teórico, além de ter erro relativo médio dentro de 10%, entre os valores experimentais e simulados para a rigidez à flexão. Outro estudo é o de Akter *et al.* (2021) que, para garantir resultados confiáveis sobre a rigidez e a resistência de conexões parede-piso de CLT, validaram com sucesso as propriedades de ensaios em dois modelos numéricos via MEF. Uma das modelagens resultou em 6,9% e outra em 4,9% de erro absoluto médio, possibilitando representar bem os dados experimentais.

Essa pesquisa teve como foco explorar o potencial da madeira de *Eucalyptus benthamii*, espécie que possui potencial de rápido crescimento no sul do Brasil, principalmente pela sua resistência ao frio rigoroso (SILVA *et al.*, 2012). Essa espécie vem sendo estudada por diversos pesquisadores a fim de conhecer as suas potencialidades, como mostra os estudos de Silva *et al.* (2022), Tomio *et al.* (2021), Benin *et al.* (2017), Cunha *et al.* (2015), Müller *et al.* (2014) e Alves *et al.* (2011). Porém, nenhum dos autores investigou o *E. benthamii* como matéria-prima para painéis CLT.

Sendo assim, o objetivo dessa pesquisa foi validar as propriedades físicas e mecânicas de CLT de *E. benthamii*, obtidas experimentalmente por outros autores, em modelagem estrutural via MEF.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus benthamii*

A madeira de *E. benthamii* utilizada nesse estudo foi caracterizada no trabalho de Tomio (2020). O material foi proveniente de 5 árvores de um plantio experimental com 23 anos de idade, localizado no paralelo 27° 48' 28.430" de latitude Sul e 50° 19' 45.090" de longitude Oeste, na Estação Experimental da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI), em Lages-SC. A região de Lages apresenta uma precipitação anual entre 1.300 a 1.500 mm e temperatura média de 15 a 16°C. De acordo com a classificação de Köppen, o clima é do tipo Cfb – Temperado, mesotérmico úmido e verão ameno (SDR, 2003).

No Centro de Ciências Agroveterinárias (CAV) da Universidade Estadual de Santa Catarina (UDESC), foram determinadas as propriedades físicas e mecânicas da madeira de *E. benthamii* nos Laboratórios de Tecnologia da Madeira localizados no prédio da Engenharia Florestal.

Segundo Tomio (2020) as árvores tinham altura média de 37,16 m e diâmetro de altura do peito (DAP) médio de 49 cm. Para a caracterização da madeira, utilizou-se a primeira tora de 1,30 m de comprimento de cada árvore, além um disco no DAP com 5 cm de espessura. De cada tora, foi retirado um pranchão central com 7 cm de espessura, o qual, posteriormente, foi seccionado em peças com seção transversal de 7 x 7 cm. A partir destas peças, foram preparados os corpos de prova conforme a norma COPANT 459 (1972).

Os corpos de prova foram armazenados em ambiente climatizado com temperatura de 20 ± 3 °C e umidade relativa de $65 \pm 5\%$ até a estabilização da massa (COPANT 459, 1972). Além disso, utilizou-se o disco do DAP para determinar a densidade básica seguindo as recomendações da COPANT 461 (1972). Para isso, o disco foi imerso em água até sua saturação completa e depois foi seco em estufa sob temperatura de 103 ± 2 °C com circulação forçada de ar até massa constante (TOMIO, 2020).

Já as propriedades mecânicas utilizadas desse estudo foram obtidas a partir do ensaio de flexão estática (COPANT 555, 1972) para se ter o módulo de elasticidade (E_x) e resistência à flexão (f_b), do ensaio de compressão paralela às fibras (COPANT 464,

1972) para determinar a resistência compressão paralela às fibras (f_{c0}), e do ensaio de cisalhamento (COPANT 463, 1972) para obter a resistência ao cisalhamento (f_v). Além desses, Tomio realizou ensaios de retratibilidade (COPANT 462, 1972) e de dureza (COPANT 465, 1972). As propriedades físicas e mecânicas utilizadas para a modelagem numérica do CLT estão na Tabela 3. Utilizou-se valores médios para representar as propriedades.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas e densidade de *E. benthamii* para as modelagens

DENSIDADE BÁSICA (kg/m³)	E_x (MPa)	f_b (MPa)	f_v (MPa)	f_{c0} (MPa)
610	15325	109,11	13,07	43,51

Legenda: E_x = módulo de elasticidade obtido no ensaio de flexão; f_b = resistência à flexão ou módulo de ruptura ao ensaio de flexão estática; f_v = resistência ao cisalhamento; f_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras.

Fonte: Adaptada de Tomio (2020).

A madeira caracterizada de *E. benthamii* com 23 anos pode ser considerada como moderadamente pesada pela sua densidade. Nas propriedades mecânicas de rigidez e resistência, a espécie demonstrou ser superior, e na de cisalhamento foi equivalente, quando comparado às espécies comerciais do mesmo gênero (TOMIO, 2020).

4.2.2 CLT experimental de *Eucalyptus benthamii*

Coelho (2020) produziu três painéis CLT com três camadas de madeira de *E. benthamii*, as quais foram provenientes da segunda tora de cada árvore de 23 anos de idade, do mesmo plantio experimental das madeiras caracterizadas por Tomio (2020). As propriedades físicas e mecânicas dos CLT foram determinadas no Laboratório de Construções e Materiais - LABCOM, localizado no prédio da Engenharia Florestal do CAV.

Para a fabricação dos painéis, foram selecionadas visualmente 60 lamelas conforme as normas da ABNT NBR 14806 (2002) e NBR 11700 (1991). As lamelas foram refiladas para padronizar a largura em 13 cm e possibilitar uma melhor organização e disposição das tábuas nas camadas dos painéis. Além disso, a fim de retirar a camada superficial e abrir os poros da madeira para melhorar a inserção da cola e,

consequentemente, a colagem, as lamelas foram aplainadas com uma plaina Lynus PDL-1300 até atingirem a espessura de $2,5 \pm 0,1$ cm (COELHO, 2020).

Posteriormente, realizou-se o destopo no comprimento das lamelas das camadas longitudinais e transversais com o objetivo de adaptar o tamanho das lamelas conforme as dimensões da prensa, além de possibilitar a retirada de possíveis defeitos. O comprimento final das tábuas das camadas ortogonais foram de $65 \pm 0,1$ cm (COELHO, 2020).

Coelho (2020) iniciou a montagem do painel com a aplicação manual do adesivo a base de poliuretano, o qual foi o PUR 501.0 monocomponente poliuretano da empresa Kleiberit. Como a madeira utilizada é bem densa, então utilizou-se a maior gramatura que o fabricante recomenda, que foi de 200 g/m^2 . A primeira camada longitudinal das lamelas foi organizada na prensa, a qual recebeu a segunda camada (ortogonal) com a cola já aplicada. Depois foi aplicada a cola estrutural nas lamelas da última camada e, por fim, estas foram postas sobre a camada ortogonal.

Cada painel foi prensado por 24 horas em uma prensa manual com força de pressão de 30 toneladas e dimensões totais de 2650 mm x 1200 mm x 2000 mm (comprimento x largura x altura). A prensa aplicou no sentido vertical uma pressão de 0,6 MPa. Após a prensagem, foi realizado o acabamento dos painéis com corte em esquadro por meio de uma serra esquadrejadeira Possamai SCI- 2900 e as dimensões finais de cada CLT foram determinadas, conforme a Tabela 4 (COELHO, 2020).

Tabela 4 - Dimensões dos painéis CLT utilizados nesse estudo.

PAINEL CLT	ALTURA (mm)	COMPRIMENTO (mm)	LARGURA (mm)
1	75	2040	650
2	76	2100	660
3	77	2100	655

Fonte: Adaptada de Coelho (2020).

Com os CLT prontos, Coelho (2020) determinou o módulo de elasticidade a partir de ensaios de flexão à três pontos, conforme a NBR 7190 (1997), e à quatro pontos, conforme a BS EN 16351 (2015). Posterior a estes testes não destrutivos, foram retirados corpos de provas para realizar os testes de cisalhamento, conforme a NFB 5-32 (1942), e

de compressão normal às fibras, compressão paralela às fibras, tração normal às fibras, flexão, densidade e teor de umidade, conforme a ABNT NBR 7190 (1997).

Dentre todos esses ensaios, o único utilizado para comparar o método experimental com o numérico foi o de flexão à três pontos, o qual fornece dados de aplicação de cargas e suas respectivas deformações verticais. Para esse teste experimental (Figura 12), Coelho (2020) utilizou uma prensa hidráulica manual da Charlott capaz de aplicar uma força de 100 toneladas e uma célula de carga U10M/5kN com os transdutores de deslocamento de WA 50 mm. O vão entre apoios foi de 1680 mm e o deslocamento foi determinado utilizando um transdutor indutivo (WA[®] 50 mm) acoplado a um sistema de aquisição de dados (Quantum-X[®]) e um *software* (Catman Easy[®]) da HBM[®]. Cada painel foi testado nas duas faces, (A) superior e (B) inferior, a fim de amenizar a heterogeneidade da madeira.

Figura 12 – Ensaio de flexão à três pontos de CLT experimental de *E. benthamii*



Fonte: Coelho (2020).

Buscou-se a planilha de cada ensaio realizado por Coelho (2020) e foi encontrada a carga máxima aplicada no regime elástico e seu respectivo deslocamento. Esses dados estão na Tabela 5.

Tabela 5 - Deslocamentos verticais obtidos dos ensaios de flexão à três pontos pelo método experimental

PAINEL CLT	CARGA MÁXIMA (kN)	DESLOCAMENTO (mm)
1A	3,75	1,39
1B	5,76	1,86
2A	6,50	2,07
2B	6,90	2,96
3A	7,04	4,40
3B	5,81	3,14
Média		2,64
Coefficiente de Variação (%)		41,36

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Este ensaio foi simulado em software de elementos finitos, seguindo os mesmos dados de aplicação de cargas para obter seus respectivos deslocamentos verticais, a fim de comparar o método experimental com o método numérico e possibilitar a validação das propriedades da madeira.

4.2.3 Simulação numérica de ensaio experimental de CLT e validação das propriedades da madeira

Foram realizadas modelagens numéricas estruturais de painéis CLT pelo MEF no *software* RFEM[®] da Dlubal[®], na sua versão 5.26 e no seu módulo adicional RF-Laminate[®]. O Manual RF-Laminate[®] (2020) foi utilizado para auxiliar na realização das modelagens e compreender melhor o funcionamento do programa. Inicialmente no *software*, é definido o tipo do modelo e qual norma seguirá a classificação dos casos e combinações de cargas. As modelagens desse trabalho foram feitas em modelo 3D e a norma seguida foi a ABNT NBR 8681 (2003), que já está no banco de dados do RFEM[®], conforme a Figura 13.

Figura 13 - Dados gerais de entrada no *software* RFEM 5®

Novo modelo - dados gerais

Gerar Opções Histórico

Nome do modelo Designação
Ensaio 3 pontos E. benthamii

Nome do projeto Designação
CLT Qualificação

Pasta:
C:\Users\Matheus Zanghelini\Desktop\Mestrado\Dissertação

Tipo de modelo

3D

2D - XY ($u_z/\varphi_x/\varphi_y$)

2D - XZ ($u_x/u_z/\varphi_y$)

2D - XY ($u_x/u_y/\varphi_z$)

Classificação dos casos e combinações de carga

De acordo com a norma:
NBR 8681

Criar combinações automaticamente

Combinações de carga

Combinações de resultados (apenas para análise linear)

Orientação positiva do eixo global Z

Para cima

Para baixo

Modelo

Abrir modelo da estrutura:

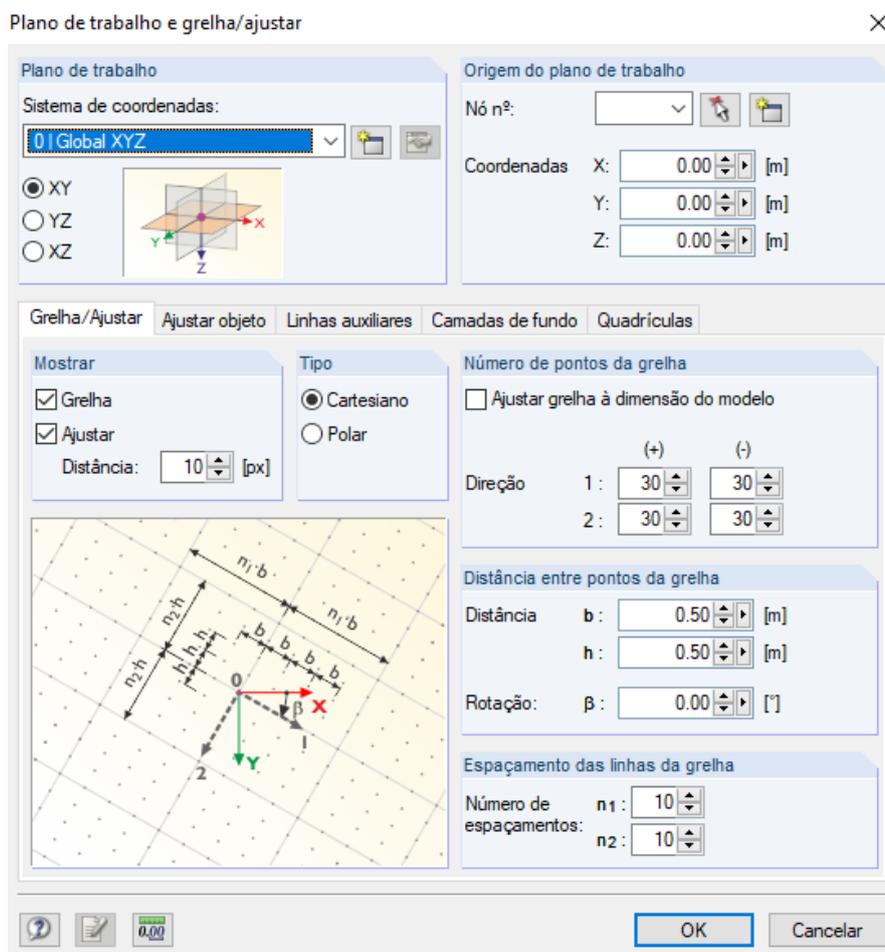
Exemplo CLT

Comentário

OK Cancelar

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Após isso, é necessário ajustar a grelha para poder fazer as modelagens conforme o desejado. Foi determinado o sistema de coordenadas XYZ para o plano de trabalho e a malha de desenho do tipo cartesiano com pontos distantes a cada 0,5 metros entre si, conforme mostra a Figura 14.

Figura 14 - Definição do plano de trabalho e malha de desenho no *software* RFEM 5®

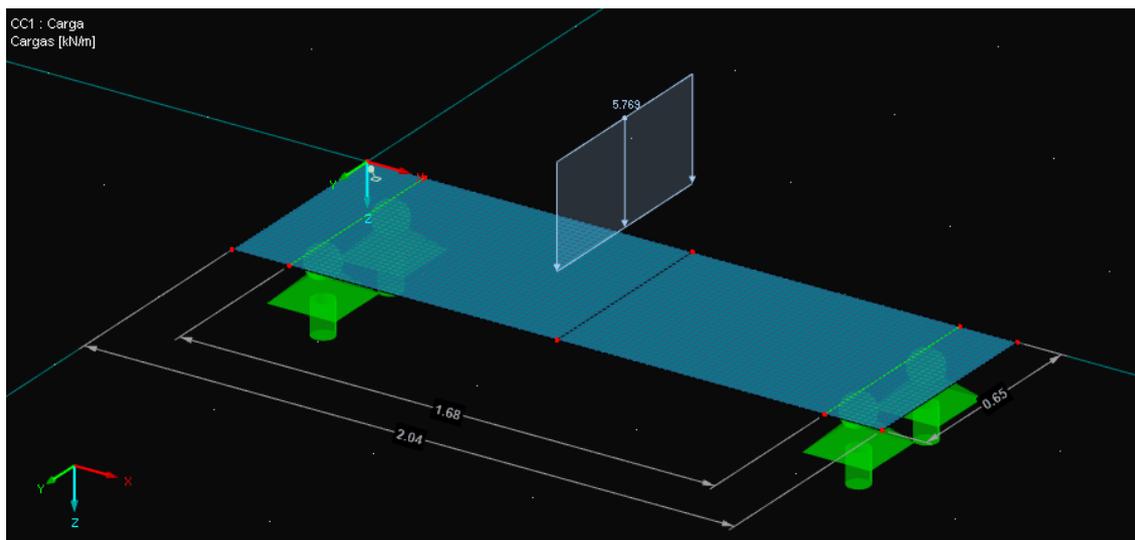
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Para simular o ensaio experimental de flexão à três pontos realizado por Coelho (2020), as dimensões dos três painéis CLT foram limitadas por pontos conforme as dimensões da Tabela 4, os quais foram conectados por linhas e depois inseriu-se superfície retangular, que posteriormente foi configurada como elemento lamelado e ortotrópico no módulo RF-Laminate®. Nesse módulo, foram configuradas as dimensões e as características das camadas do painel, assim como as propriedades mecânicas da madeira. Foram feitas 6 modelagens, visto que se fez dois ensaios por painel CLT.

Portanto, pelo MEF foi simulado o teste com as mesmas condições experimentais, como mostra a Figura 15, com carga em quilonewtons e distância em metros. Os apoios foram configurados como articulados para efeito de comportamento estrutural. No *software*, a malha de elementos finitos foi composta por quadrângulos, os quais tiveram suas dimensões definidas cuidadosamente, com intuito de possibilitar resultados fiéis ao

modelo real. Para tanto, os elementos da malha foram testados em diferentes dimensões (100 cm, 40 cm, 10 cm e 2 cm) para obter o melhor refinamento e, então, verificou-se que os resultados de deslocamento não se alteraram com os elementos finitos menores de 40 cm. Geralmente, quanto menor ou mais refinada a malha, mais condizentes tendem a ser os resultados. Sendo assim, a malha de 2 cm foi a escolhida.

Figura 15 - Ensaio de flexão à três pontos no *software* RFEM 5[®]



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Além dessas propriedades, é preciso inserir no RF-Laminate[®] outras, conforme consta no capítulo 2.3.2. Na Figura 16 é possível visualizar as características do Painel 1, como quantidade de camadas, espessuras das camadas, direção ortotrópica, módulos de elasticidade, módulos de rigidez, Coeficientes de Poisson e peso específico. Conforme visto em 2.3.2, os módulos de rigidez foram estimados pelas relações sugeridas por Bodig e Jayne (1982) a partir do módulo de elasticidade na flexão obtido por Tomio (2020). Na falta de valores experimentais, esses autores também estimam o valor médio do Coeficiente de Poisson ν_{xy} para dicotiledôneas de 0,37.

Figura 16 - Características de CLT no *software* RFEM 5[®] e RF-Laminate[®]

1.2 Características do material - Ortotrópico

Composição atual: 1 | Composição 1

Lista de superfícies: 1

Composição n° 1

Camada n°	B Espessura t [cm]	C Direção ortotrópica β [°]	D Módulo de elasticidade [N/mm ²] E_x	E E_y	F G_{xz}	G Módulo de rigidez [N/mm ²] G_{yz}	H G_{xy}	I Coeficiente de Poisson [-] ν_{xy}	J ν_{yx}	K Peso específico γ [N/m ³]
1	2.50	0.00	15325.240	0.000	1028.980	109.470	1094.660	0.370	0.000	5982.1
2	2.50	90.00	15325.240	0.000	1028.980	109.470	1094.660	0.370	0.000	5982.1
3	2.50	0.00	15325.240	0.000	1028.980	109.470	1094.660	0.370	0.000	5982.1
4										
5										
6										
7										
8										
9										

Informação

Camada n°: 0

- Peso específico: [N/m³]

- Peso da superfície: [psf]

Σ Espessura: 7.50 [cm]

Σ Peso da superfície: 9.37 [psf]

Plano de referência

Alteração do plano de referência: 0.00 [cm]

Relacionado com:

Borda superior

Centro da composição

Borda inferior

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Já para as propriedades mecânicas de resistência, são necessários outros valores que também não foram estimados experimentalmente por Tomio (2020). A norma EN 16351 (CEN, 2015) propõe o valor da resistência ao cisalhamento por rolamento ($f_{R,m}$) de 1,1 MPa para painéis nos quais as superfícies laterais das tábuas não são coladas entre si. Foi estimada também a resistência à tração perpendicular às fibras (f_{t90}), obtida por meio da norma BS EN 338 (2016) e da ABNT NBR 7190-1 (2022), que consideram o valor de 0,6 MPa para folhosas. Já os demais valores, como resistência à compressão perpendicular às fibras (f_{c90}) e resistência a tração paralela às fibras (f_{t0}), seguiram os cálculos de estimativa determinados pela ABNT NBR 7190-3 (2022), os quais resultaram em 10,878 MPa e 56,509 MPa, respectivamente. As propriedades mecânicas do CLT no RF-Laminate[®] podem ser visualizadas na Figura 17.

Figura 17 - Resistências do CLT no *software* RFEM 5® e RF-Laminate®

1.3 Resistências dos materiais - Ortotrópico

Composição atual: 1 | Composição 1

Lista de superfícies: 1

Composição nº 1

Camadas

Camada n°	Designação do material	Resistências à flexão / tração / compressão [N/mm ²]						Resistências ao corte [N/mm ²]		
		f _{b,0,k}	f _{b,90,k}	f _{t,0,k}	f _{t,90,k}	f _{c,0,k}	f _{c,90,k}	f _{xy,k}	f _{v,k}	f _{R,k}
1	E. benthamii	109.110	109.110	56.507	0.600	43.510	10.877	13.070	13.070	1.100
2	E. benthamii	109.110	109.110	56.507	0.600	43.510	10.877	13.070	13.070	1.100
3	E. benthamii	109.110	109.110	56.507	0.600	43.510	10.877	13.070	13.070	1.100
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Além dessas propriedades inseridas, levou-se em consideração o acoplamento entre as camadas, a não colagem lateral das lamelas do CLT e a largura das tábuas de 13 cm. Como não foram coladas as laterais das lamelas, o Eurocode 5 (CEN, 2004) indica um fator de redução de rigidez à torção de $K_{33} = 0,489$ e de camada $K_{88} = 0,585$, como mostra a Figura 18.

Figura 18 – Opções de modelação do CLT no *software* RFEM 5® e RF-Laminate®

Detalhes da composição nº 1

Cálculo / Modelação

Opções de cálculo

Considerar acoplamento

Madeira laminada cruzada sem cola nos lados estreitos

Verificação de membrana (dimensionamento de torção e corte de secção I)

Largura da tábua

b : 13.00 [cm]

Coefficientes de redução da resistência

Para elementos com rigidez à torção

k₃₃ : 0.489 [-]

Para elementos de resistência ao corte

k₄₄ : 1.000 [-]

k₅₅ : 1.000 [-]

Para elementos de rigidez da membrana

k₈₈ : 0.585 [-]

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Com todas as propriedades e características inseridas e o modelo pronto, o *software* calculou pela Teoria das Placas de Mindlin, a qual é indicada para placas menos esbeltas, pois leva em consideração as deformações de cisalhamento ao longo da espessura. A partir disso, é preciso interpretar e analisar os resultados. Assim, será possível concluir se o método numérico reflete os resultados do método experimental.

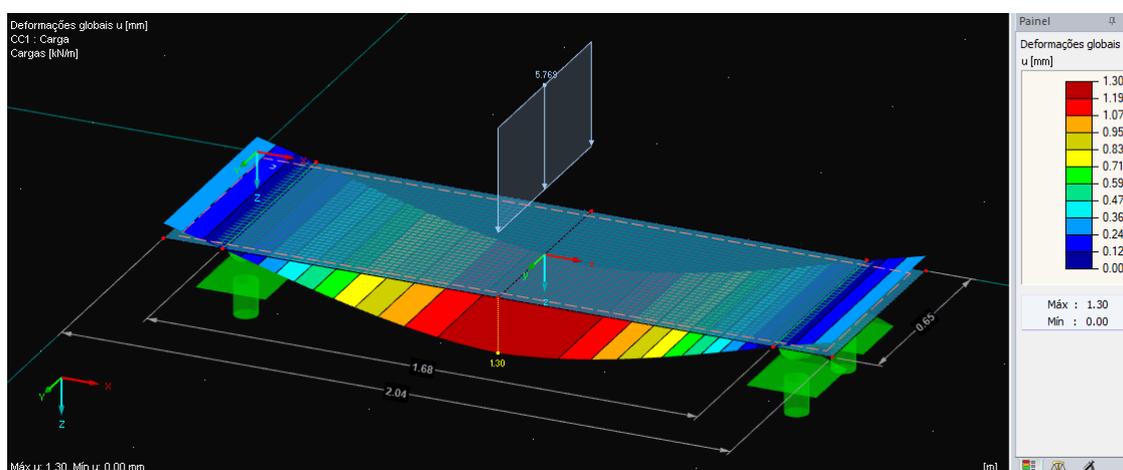
4.2.4 Análise dos dados

Verificou-se a normalidade dos dados de deslocamento vertical, obtidos no ensaio de flexão à três pontos, por gráfico Quantil-Quantil, ou Q-Q Plot, e foram comparados esses valores entre os métodos experimental e numérico pelo teste “t de Student” para amostras independentes, no *software* R[®], com 95% de confiabilidade. Se os resultados de deslocamento vertical não forem diferentes significativamente, então essas propriedades utilizadas estarão validadas, o que possibilita novos estudos serem feitos com as propriedades de *E. benthamii* no RFEM[®].

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As modelagens numéricas estruturais apresentaram no RFEM[®] os resultados de deslocamento vertical para cada ensaio. O *software* proporciona a visualização dos resultados de forma bem dinâmica e visual com escala de cores ou com o valor do deslocamento no centro do vão do painel, como consta na Figura 19.

Figura 19 - Deflexão do CLT em modelagem de ensaio de flexão à três pontos



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os deslocamentos verticais, obtidos nos CLT pelo MEF com propriedades físicas e mecânicas de *E. benthamii* pela Teoria das Placas de Mindlin, são apresentadas na Tabela 6. Na mesma tabela estão os deslocamentos verticais pelo método experimental e suas respectivas cargas máximas.

Tabela 6 - Deslocamentos verticais obtidos dos ensaios de flexão à três pontos pelo método experimental e dos elementos finitos

PAINEL CLT	CARGA MÁXIMA APLICADA (kN)	MÉTODO EXPERIMENTAL (mm)	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (mm)	DIFERENÇA ENTRE OS MÉTODOS (%)
1A	3,75	1,39	1,30	6,47
1B	5,76	1,86	2,00	7,00
2A	6,50	2,07	2,16	4,17
2B	6,90	2,96	2,29	22,64
3A	7,04	4,40	2,26	48,64
3B	5,81	3,14	1,86	40,76
Média		2,64	1,98	21,61
Coefficiente de Variação (%)		41,36	18,70	

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Ao comparar os resultados, é possível verificar altos coeficientes de variação em ambos os métodos, porém bem maior no método experimental (41,36%). Um fator que contribui para os altos coeficientes de variação é o fato das lamelas não terem sido classificadas mecanicamente antes de compor o painel experimental, sendo que pelo MEF todos os painéis utilizaram exatamente as mesmas médias de propriedades físicas e mecânicas da madeira de *E. benthamii*. A atual ABNT NBR 7190-2 (2022) recomenda a classificação visual e mecânica para as peças estruturais e a escolha da classe de resistência se dá a partir da menor classificação entre as duas.

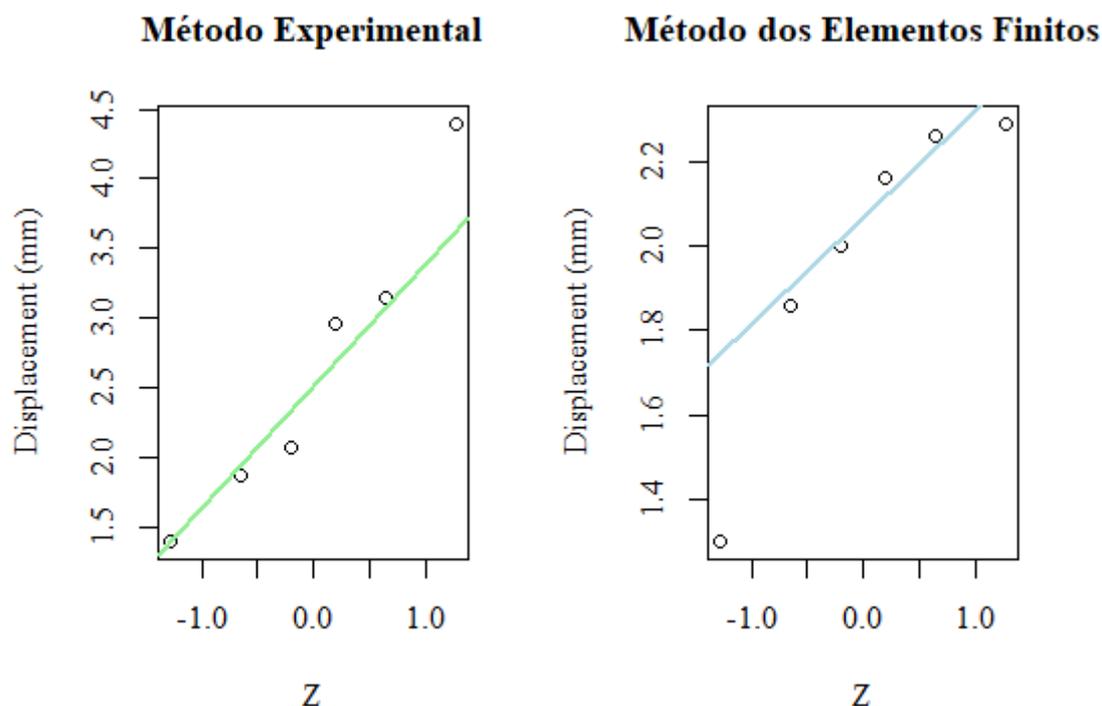
Além disso, a diferença entre os deslocamentos experimentais e por elementos finitos se deu entre o limite de 4,17% e 48,64%, apresentando uma média de 21,61%. Esta diferença é semelhante a observada por Sciomenta *et al.* (2021), que compararam a deflexão experimental com resultados via MEF de ensaio de flexão à quatro pontos em painéis CLT compostos por três camadas. Os painéis foram modelados em duas configurações, uma de forma homogênea e outra mista, esta última tendo dois tipos de

madeira na sua composição. Os autores consideraram uma boa relação entre os resultados de deslocamento dos métodos experimental e numérico, tendo diferença de 15% para os CLT homogêneos e de 22% para os mistos. Essas diferenças podem ser resultantes pela madeira ser um material anisotrópico e heterogêneo, o que implica também na possibilidade de existirem defeitos presentes no interior dos elementos que não estavam visíveis no seu exterior.

Também se observa na Tabela 6 que a média dos deslocamentos obtidos pelo modelo numérico foi menor que os deslocamentos do ensaio experimental. O mesmo comportamento foi obtido por Wang *et al.* (2020), que fizeram CLT de três e quatro camadas com madeira classificada visualmente e os testaram em ensaio experimental de ruptura por carga concentrada, a fim de avaliar as propriedades de flexão. Os autores simularam o ensaio pelo MEF com malha de 5 cm e obtiveram a deflexão média modelada menor que a mensurada no ensaio experimental. Eles salientam que isso se deve pelo fato de que os defeitos presentes na madeira não são inseridos no modelo e que podem existir erros no manuseio dos experimentos reais, enquanto os modelos FE são alimentados pela média das propriedades. Entretanto, a diferença entre os deslocamentos dos dois métodos não foi significativa, ou seja, eles obtiveram resultados consistentes, mostrando confiança na validação.

Os resultados da análise estatística para verificar a normalidade dos dados se encontram no Gráfico 1. Pode-se observar que há linearidade no gráfico Q-Q Plot, apesar de cada método apresentar um valor discrepante na borda superior (método experimental) e na borda inferior (método numérico). Com a conferência da normalidade dos dados, fez-se o teste “t de Student” com 5% de significância, o qual apresentou um valor-p de 0,2099. Para valor-p maior que 0,05, aceita-se H_0 , hipótese de que não há diferença estatística significativa entre os métodos.

Gráfico 1 - Teste de Normalidade por Q-Q Plot



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse estudo mostrou que a classificação mecânica das lamelas a comporem o CLT é importante, pois apenas a classificação visual pode refletir a anisotropia da madeira nos coeficientes de variação das deflexões, principalmente no método experimental. No método numérico, como foram utilizadas as médias das propriedades físicas e mecânicas da madeira de *E. benthamii* em todas as camadas dos painéis, formou-se elementos mais homogêneos e, conseqüentemente, com menores coeficientes de variação.

Os resultados de deflexão do método experimental e do método numérico obtiveram uma diferença média de 21,61% e não apresentaram diferença estatística significativa, pelo teste t de Student a 5% de significância. Portanto, as propriedades da madeira utilizadas no RFEM® e RF-Laminate® foram validadas e o CLT experimental de *E. benthamii* pode ser adequadamente representado pelo MEF. Isso possibilita a utilização dessas características e propriedades mecânicas para estudar o comportamento de CLT de *E. benthamii* como lajes e paredes de uma edificação, ou de um grande edifício, por exemplo, o que é altamente aplicável ao setor produtivo.

REFERÊNCIAS

AKTER, S.T.; SCHWEIGLER, M.; SERRANO, E.; BADER, T.K. A Numerical Study of the Stiffness and Strength of Cross-Laminated Timber Wall-to-Floor Connections under Compression Perpendicular to the Grain. **Buildings** Vol. 11, 2021.

ALVES, I. C. N.; GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; SILVA, H. D. Caracterização tecnológica da madeira de *Eucalyptus benthamii* para produção de celulose kraft. **Ciência Florestal**, Vol. 21, nº. 1, pp. 167-174, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR 7190-1: Projeto de estruturas de madeira. Parte 1: Critérios de dimensionamento**. Rio de Janeiro, 2022.

_____. **NBR 7190-2: Projeto de estruturas de madeira. Parte 2: Métodos de ensaio para classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira**. Rio de Janeiro, 2022.

_____. **NBR 7190-3: Projeto de estruturas de madeira. Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas**. Rio de Janeiro, 2022.

_____. **NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 11700: Madeira serrada de coníferas provenientes de reflorestamento para uso geral – Classificação**. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 14806: Madeira – Madeira serrada de eucalipto**. Brasil, 2002.

ASSOCIATION FRANCAISE DE NORMALISATION (NFB). **NFB 5-32: Essai de cisaillement**. Paris, 1942.

BENIN, C.C.; WATZLAWICK, L. F.; HILLIG, E. Propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus benthamii* sob efeito do espaçamento de plantio. **Ciência Florestal**, Vol. 27, nº. 4, pp. 1375-1384, 2017.

BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of Wood and Wood Composites**. New York: Van Nostrand, 1982.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION (BSI). **BS EN 338: Structural timber - Strength classes**. Londres, 2016.

CHRISTOVASILIS, I.; BRUNETTI, M.; FOLLESA, M.; NOCETTI, M.; VASSALO, D. Evaluation of the mechanical properties of cross laminated timber with elementary beam theories. **Construction and Building Materials**, Vol. 122, pp. 202-213, 2016.

COELHO, H. B. **Propriedades físicas e mecânicas de painéis de madeira lamelada cruzada de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Florestal. Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2020.

COMISIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. **COPANT 459: Acondicionamento dos corpos-de-prova**. Copant, 1972.

_____. **COPANT 461: Massa específica aparente básica**. Copant, 1972.

_____. **COPANT 462: Retratibilidade**. Copant, 1972.

_____. **COPANT 463: Cisalhamento**. Copant, 1972.

_____. **COPANT 464: Compressão Paralela às Fibras**. Copant, 1972.

_____. **COPANT 465: Dureza Janka**. Copant, 1972.

_____. **COPANT 555: Flexão Estática**. Copant, 1972.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALIZATION (CEN). **EN 16351: Timber structures - Cross laminated timber - Requirements**. Brussels, 2015.

_____. **Eurocode 5: Design of timber structure. Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings**. Brussels, 2004.

CUNHA, A. B.; BRAND, M. A.; SIMÃO, R. L.; MARTINS, S. A. et al. Determinação do rendimento de matéria-prima de *Eucalyptus benthamii* Maiden & Cambage por meio de diferentes métodos de desdobro. **Revista Árvore**, Vol. 39, nº. 4, pp.733-741, 2015.

MÜLLER, B.V. **Efeito de sistemas de desdobro na qualidade e rendimento de madeira serrada de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage**. 2013. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

MOAVENI, S. **Finite element analysis: theory and application with ANSYS**. Prentice Hall, New Jersey, 1999.

SANDOLI, A.; D'AMBRA, C.; CERARDI, C.; CALDERONI, B.; PROTA, A. Sustainable Cross-Laminated Timber Structures in a Seismic Area: Overview and Future Trends. **Applied Sciences**, Vol. 11, nº. 5, 2021.

SCIOMENTA, M.; EGIDIO, A. D.; BEDON, C.; FRAGIACOMO, M. Linear model to describe the working of a three layers CLT strip slab: Experimental and numerical validation. **Advances in Structural Engineering**, Vol. 24, pp. 3118-3132, 2021.

SECRETARIA DE ESTADO DE DESENVOLVIMENTO REGIONAL (SDR). **Caracterização Regional: Lages**. p. 36, 2003.

SHIRMOHAMMADLI, Y.; HASHEMI, A.; MASOUDNIA, R.; QUENNEVILLE, P. Numerical modeling investigation of cross-laminated timber connections consisting of multiple glued-in rods. **Structures**, Vol. 53, pp. 491-500, 2023.

SILVA, L. D.; HIGA, A. R.; SANTOS, G. A. Desafios do uso da madeira de *Eucalyptus benthamii* para serraria. In: *Silvicultura e melhoramento genético de Eucalyptus benthamii*. Curitiba: **Editora FUPEF**, pp. 123-150, 2012.

SILVA, L. D.; HIGA, A. R.; FLOSS, P. A.; CROCE, D. M.; RESENDE, M. D. V.; GARCIA, J. N.; SPIECKER, H.; KHALE, H. *Eucalyptus benthamii*: uma espécie geneticamente promissora para produção de madeira em áreas sujeitas a ocorrência de geada. **Revista Floresta**, Vol. 52, nº. 3, pp. 422-435, 2022.

TOMIO, G. **Avaliação tecnológica da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage com 23 anos de idade**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Florestal. Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2020.

TOMIO, G. F.; CUNHA, A. B.; BRAND, M. A.; CÓRDOVA, U. A. Rendimento e qualidade da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage de rotação longa no processo de desdobro. **Scientia Forestalis**, Vol. 49, 2021.

WANG, J.; NING, F.; LI, J.; ZHU, H. Experimental study and finite element simulation analysis of the bending properties of Cross-Laminated Timber (CLT) two-way plates. **Journal of Engineering Science and Technology Review**, Vol. 13, nº. 4, pp. 132–14, 2020.

YOUNIS, A.; DODOO, A. Cross-laminated timber for building construction: A life-cycle-assessment overview. **Journal of Building Engineering**, Vol. 52, 2022.

ZHANG, X.; YANG, S.; FEI, B.; QIN, D.; YANG, J.; LI, H.; WANG, X. Bending and shear performance of a cross-laminated composite consisting of flattened bamboo board and Chinese fir lumber. **Construction and Building Materials**, Vol. 392, 2023.

5 CAPÍTULO III – COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE MADEIRA LAMELADA COLADA CRUZADA DE *Eucalyptus benthamii* FRENTE A *Pinus spp.* E PAINÉIS COMERCIALIZADOS NA EUROPA

RESUMO

Com a grande emissão de CO₂ pelo setor de edifícios e da construção, faz-se necessária a substituição de materiais poluentes por materiais de fonte renovável, como a madeira. Nas últimas décadas, desenvolveu-se produtos de madeira engenheirada, como o Painel de Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC). Esse painel estrutural, formado por camadas de lamelas dispostas ortogonalmente entre si, é rígido e autoportante, podendo ser utilizado como parede, laje de piso e de cobertura. Entretanto, como é uma tecnologia relativamente nova, pesquisas estão sendo feitas com diferentes espécies de madeira para conhecer novos potenciais de matéria-prima. O objetivo desse estudo foi otimizar as espessuras de MLCC e analisar o seu comportamento estrutural, via Método dos Elementos Finitos, comparando *Eucalyptus benthamii*, espécie nova no sul do Brasil, frente ao *Pinus spp.* de florestas plantadas brasileiras e a painéis de uma fabricante europeia. Para isso, modelou-se uma edificação e foram aplicados os painéis como lajes e paredes. As análises de rigidez e flexão, juntamente com o peso e volume de cada protótipo, evidenciou o potencial das madeiras de florestas plantadas brasileiras, principalmente do *E. benthamii*, para serem utilizadas nos MLCC.

Palavras-chave: Modelagem estrutural; Elementos finitos; Estruturas de madeira.

ABSTRACT

With the significant emission of CO₂ by the building and construction sector, it is necessary to replace polluting materials with materials from renewable sources, such as wood. In the last few decades, engineered wood products have been developed, such as the Cross-Laminated Timber (CLT). This structural panel, made up of layers of lamellas arranged orthogonally between them, is rigid and self-supporting and can be used as a wall, floor slab and roof. However, as it is a relatively new technology, research is being carried out with different species of wood in order to discover new potential raw materials. The objective of this study was to optimize the thickness of MLCC and analyze its structural behavior via the Finite Element Method, comparing *Eucalyptus benthamii*, a new species in southern Brazil, with *Pinus spp.* from Brazilian planted forests and panels from a European manufacturer. To do this, a building was modeled and the panels were used as slabs and walls. The stiffness and bending analyses, together with the weight and volume of each prototype, showed the potential of wood from Brazilian planted forests, especially *E. benthamii*, to be used in CLTs.

Keywords: Structural modeling; Finite elements; Wood structures.

5.1 INTRODUÇÃO

O setor de edifícios e da construção teve participação global de cerca de 37% nas emissões de dióxido de carbono (CO₂), referente à energia de operações e processos, e cerca de 34% da demanda final de energia, no ano de 2021 (PNUMA, 2021). Uma das formas de diminuir as emissões de CO₂ é a substituição de materiais comumente utilizados, como o concreto e o aço, por madeira na construção das cidades. Isso promoverá vantagem para alcançar a estabilização do clima, considerando que a madeira armazena CO₂ em sua estrutura e poderia tornar as edificações como referência de estoque de carbono mundial (CHURKINA *et al*, 2020)

Uma das formas de construir em madeira, desde pequenas edificações até grandes edifícios, é com os Painéis de Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC), também conhecidos como *Cross Laminated Timber* (CLT). O CLT foi inventado, em 1947, pelo engenheiro francês Pierre Gauthier, o qual utilizou os painéis para fabricar telhados, paredes e portas. Entretanto, a tecnologia não foi difundida e acabou reaparecendo apenas na década de 1990, na Áustria, quando o governo promoveu um programa de desenvolvimento de novos projetos para melhor aproveitar a madeira, de forma estrutural, e absorver o material que estava abundante no país (THAI *et al*, 2020).

Estudos comprovam que construções em CLT impactam positivamente o meio ambiente ao substituírem outros materiais construtivos. Shin *et al* (2023) avaliaram o ciclo de vida de paredes de concreto e de paredes de CLT, e concluíram que as paredes de madeira tiveram uma economia de 45% na emissão de CO₂ e 49% de energia. Mas o sistema de CLT vai além das vantagens ambientais, ele também se destaca pelas suas aplicações e benefícios estruturais, principalmente pela madeira ter uma ótima relação de peso e resistência (ASDRUBALI *et al.*, 2017). Os CLT são formados por um número ímpar de camadas de lamelas, dispostas ortogonalmente entre si, o que configura um produto rígido e autoportante, com comportamento mecânico dentro e fora do plano que o permite ser aplicado como pisos, paredes e lajes de cobertura (HUANG *et al.*, 2023).

Produtos de madeira engenheirada, como o CLT, promovem propriedades mais homogêneas e maior estabilidade dimensional para a madeira. Entretanto, como a madeira é um material natural e anisotrópico, suas propriedades físicas e mecânicas variam conforme espécies, características de cultivo e tempo de crescimento (SUN *et al.*,

2020). Devido a essa alta variabilidade, estudos vêm sendo realizados com CLT de diferentes espécies para avaliar suas potencialidades e buscar a inclusão e expansão da fonte de madeiras para os painéis, como o caso de Terezo *et al.* (2023), Sun *et al.* (2020), Navaratnam *et al.* (2020), Hematabadi *et al.* (2020), Pereira & Calil Junior (2019), Wang *et al.* (2018) e Kramer *et al.* (2014).

O Brasil, conforme o relatório anual da Indústria Brasileira de Árvores - IBÁ (2022), possui cerca de 9,93 milhões de hectares de árvores plantadas, sendo a maioria de Eucalipto (75,8%) e de Pinus (19,4%). No sul do Brasil, como o inverno é mais severo, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa/Florestas) introduziu, em 1988, o *Eucalyptus benthamii* Maiden *et* Cambage no estado de Santa Catarina. A espécie é nativa da cidade de Camden, na Austrália, e se caracteriza por sua resistência a baixas temperaturas e a geadas (NISGOSKI *et al.*, 1998; SILVA *et al.*, 2012). Entretanto, como o *E. benthamii* é relativamente novo no Brasil, ainda não há estudos suficientes de sua matéria-prima como potencial para a fabricação de CLT.

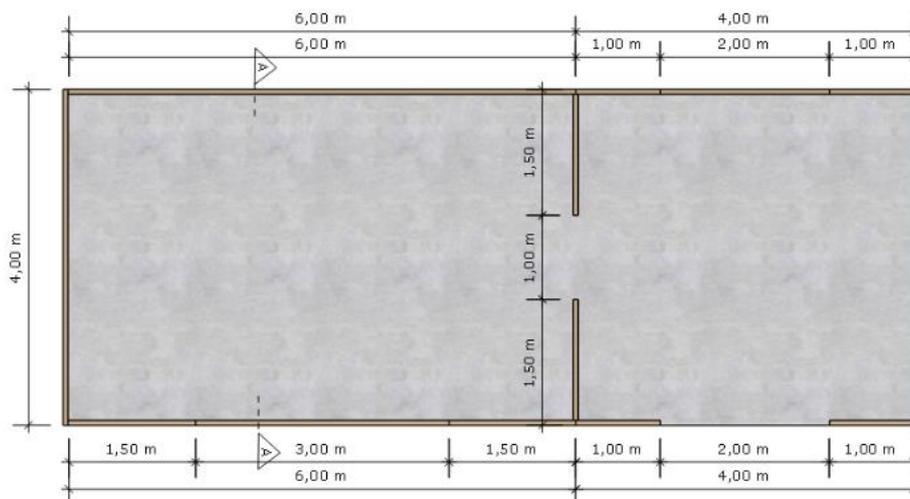
Sendo assim, esse capítulo teve como objetivo otimizar as espessuras de CLT de um protótipo de edificação, modelado via Método dos Elementos Finitos (MEF) com propriedades já validadas da madeira de *E. benthamii*, além da madeira de *Pinus spp.* de florestas plantadas brasileiras e de CLT padrão comercializado na Europa. Analisou-se também a rigidez e a deformação dos painéis e foi determinada a cubagem e o peso de madeira para cada modelo.

5.2 MATERIAL E MÉTODOS

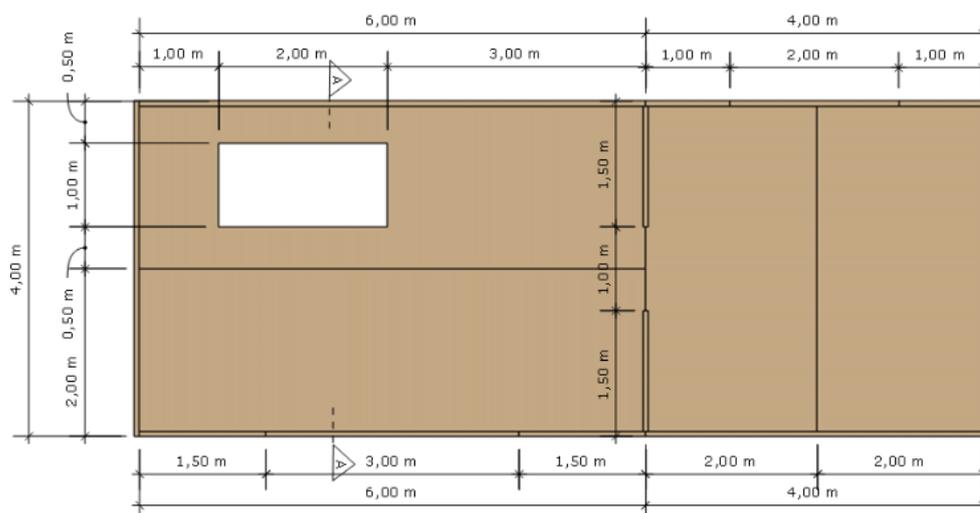
5.2.1 Modelo Arquitetônico

O modelo desenvolvido para analisar o CLT como placas de parede e de laje, tanto de piso quanto de cobertura, consiste em uma edificação de dois pavimentos que possui aproximadamente 80 m², conforme as Figuras 20 e 21.

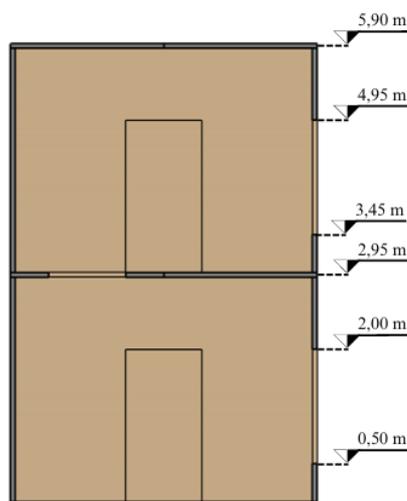
Figura 20 – Projeto edificação em CLT



Planta Baixa - Térreo



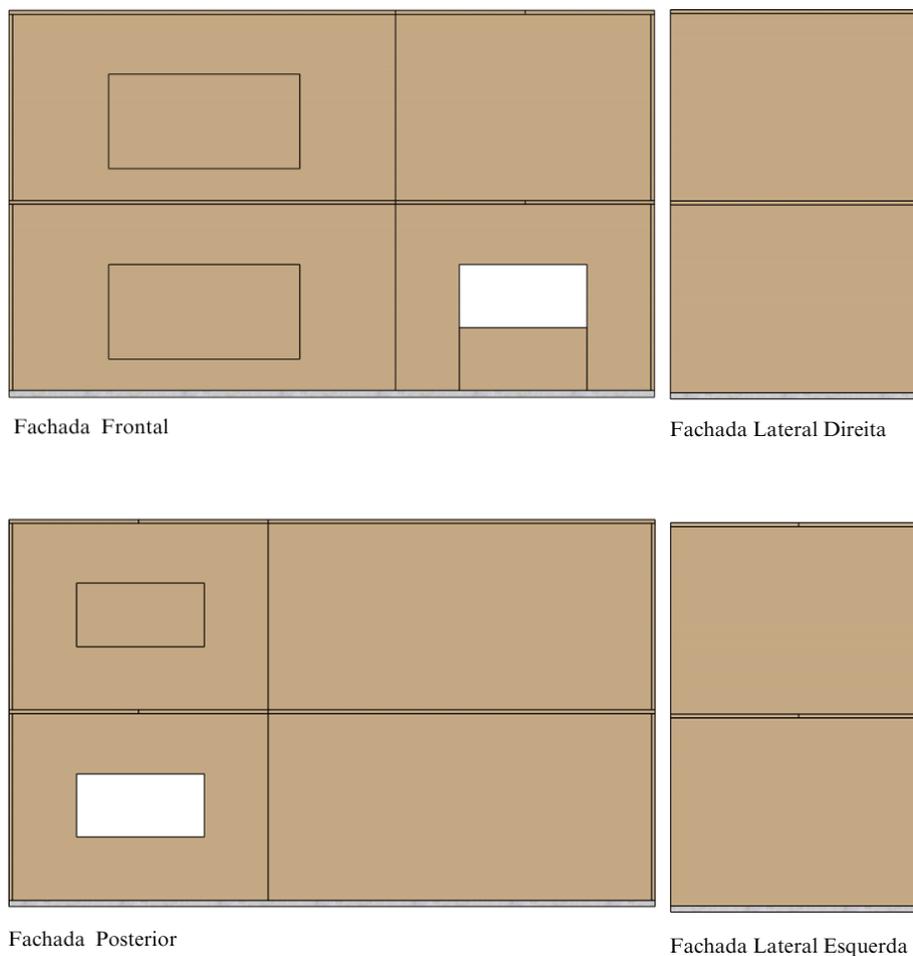
Planta Baixa - Pavimento Superior



Corte AA

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 21 – Fachadas edificação em CLT



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Esse projeto foi elaborado pela Dlubal® e adaptado pelo autor para atingir as dimensões de CLT estabelecidas pela ETA 06/0138 (2017) (Tabela 7), a qual avalia e fornece as diretrizes e propriedades físicas e mecânicas dos painéis CLT fabricados pela KLH Massivholz GmbH®, uma das principais empresas fabricantes de CLT da Europa.

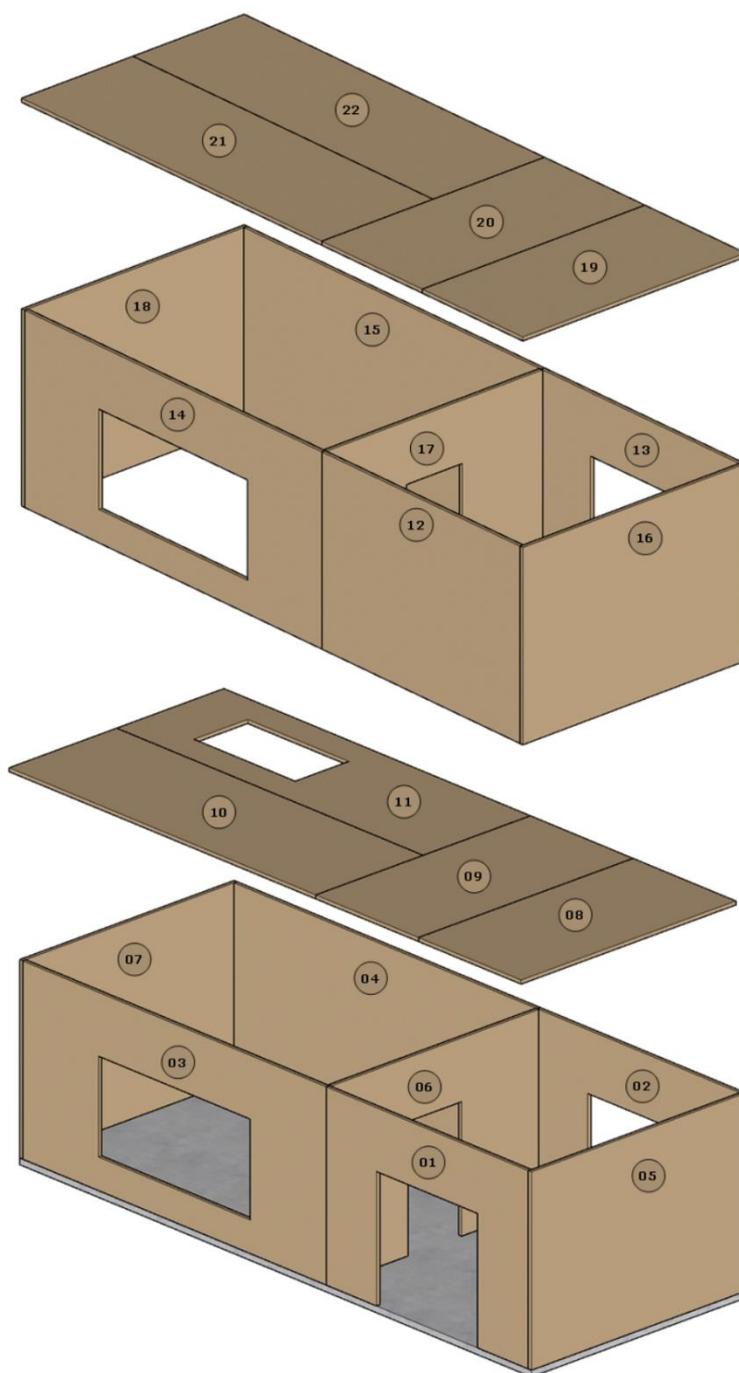
Tabela 7 – Dimensões de CLT segundo a ETA 06/0138:2017

VARIÁVEL	DIMENSÃO / ESPECIFICAÇÃO
Espessura	57 a 300 mm
Largura	≤ 2,98 m
Comprimento	≤ 16,50 m
Número de camadas	3 a 16

Fonte: Adaptado de ETA 06/0138 (2017).

A edificação é composta por quatorze painéis de parede, quatro painéis de laje de piso do pavimento superior e quatro painéis de laje de cobertura, totalizando-se 22 placas, sendo que algumas são inteiras e outras possuem aberturas para esquadrias e escada, a fim de avaliar o comportamento estrutural em diferentes situações (Figura 22).

Figura 22 –Perspectivas edificação em CLT e identificação dos painéis



Perspectiva

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os painéis foram numerados para identificá-los e, posteriormente, facilitar a compreensão dos resultados.

5.2.2 Características e propriedades físico-mecânicas dos painéis

Foram selecionadas características e propriedades de duas espécies de madeiras de florestas plantadas brasileiras: *Eucalyptus benthamii* e *Pinus spp.* Além disso, selecionou-se as especificações de CLT comerciais de uma empresa europeia: a KLH Massivholz GmbH[®]. Sendo assim, totalizaram-se três tratamentos.

Para o *E. benthamii*, usou-se as propriedades validadas pelo autor no Capítulo II desse trabalho. Já para os CLT de *Pinus spp.*, foram utilizadas as propriedades da Classe 2 de resistência da madeira, do respectivo gênero proveniente de florestas plantadas, as quais estão disponíveis na ABNT NBR 7190-2 (2022). E para os painéis da KLH[®], seguiu-se as especificações da ETA 06/0138 (2017). Na Tabela 8 há os valores de densidade para cada tratamento e algumas propriedades mecânicas.

Tabela 8 - Propriedades mecânicas e densidade para as modelagens

PAINEL CLT	DENSIDADE BÁSICA (kg/m ³)	E_x (MPa)	f_b (MPa)	f_v (MPa)	f_{c0} (MPa)
<i>E. benthamii</i>	610,00	15.325,24	109,11	13,07	43,51
KLH [®]	560,84	12.000,00	24,00	2,70	24,00
<i>Pinus spp.</i>	400,00	8.000,00	27,00	3,50	18,00

Legenda: E_x = módulo de elasticidade obtido no ensaio de flexão; f_b = resistência à flexão ou módulo de ruptura ao ensaio de flexão estática; f_v = resistência ao cisalhamento; f_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras.

Fonte: Adaptada de Tomio (2020), ETA 06/0138 (2017) e ABNT NBR 7190-2 (2022).

Além dessas, também são necessárias outras propriedades para as modelagens estruturais. Para os painéis da empresa europeia, todas as propriedades necessárias estão na ETA 06/0138 (2017) e no *software* RFEM[®], o qual fornece uma biblioteca com as especificações de CLT das principais empresas fabricantes, inclusive da KLH[®]. Entretanto, para os CLT de *E. benthamii* e *Pinus spp.*, foi necessário caracterizar seguindo a bibliografia existente e normativas técnicas vigentes, conforme a seguir.

Os módulos de cisalhamento foram determinados por meio das relações estabelecidas por Bodig e Jayne (1982) a partir do módulo de elasticidade na flexão. O Coeficiente de Poisson (ν_{xy}) utilizado foi o valor médio, também estabelecido por Bodig e Jayne (1982), de 0,37 tanto para coníferas quanto para folhosas. Já para a resistência à tração perpendicular às fibras (f_{t90}) desses painéis, foram aplicados os valores determinados pela ABNT NBR 7190-1 (2022), a qual considera o valor de 0,4 MPa e 0,6 MPa para coníferas e folhosas, respectivamente.

Outras propriedades, como resistência à compressão perpendicular às fibras (f_{c90}) e resistência à tração paralela às fibras (f_{t0}), seguiram os cálculos de estimativa da ABNT NBR 7190-3 (2022). A resistência ao cisalhamento por rolamento ($f_{R,m}$) também é fundamental, então foi utilizado o valor de 1,1 MPa, o qual é proposto pela norma BS EN 16351 (2015) para painéis nos quais as superfícies laterais das tábuas não são coladas entre si. Na Tabela 9 estão essas propriedades mecânicas utilizadas nas modelagens.

Tabela 9 - Propriedades mecânicas para as modelagens

PROPRIEDADE	UN.	PAINEL CLT		
		<i>E. benthamii</i>	KLH [®]	<i>Pinus spp.</i>
G_{xz}	MPa	1028,980	690,000	537,140
G_{yz}	MPa	109,470	50,000	57,140
G_{xy}	MPa	1094,660	500,000	571,430
f_{c90}	MPa	10,877	2,700	4,500
f_{t0}	MPa	56,507	16,500	23,380
f_{t90}	MPa	0,600	0,120	0,400
$f_{R,m}$	MPa	1,100	1,200	1,100

Legenda: G = módulo de cisalhamento no plano indicado; f_{c90} = resistência à compressão perpendicular às fibras; f_{t0} = resistência à tração paralela às fibras; f_{c90} = resistência à tração perpendicular às fibras; $f_{R,m}$ = resistência ao cisalhamento por rolamento.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Outra resistência necessária para alimentar as modelagens é a resistência ao cisalhamento no plano do painel (f_{xy}), cujo valor varia conforme a espessura da placa. Para seguir o mesmo padrão dos painéis da KLH[®], utilizou-se a relação de espessura e resistência ao cisalhamento no plano da ETA 06/0138 (2017), como mostra a Tabela 10, visto que não há valores dessa propriedade disponíveis nas normas brasileiras.

Tabela 10 – Resistência ao cisalhamento no plano do CLT KLH[®]

Espessura da camada	(mm)	19	34	45
Valor de resistência característica ao cisalhamento no plano do CLT (f_{xy})	(MPa)	8,4	5,5	3,9

Fonte: Adaptada de ETA 06/0138 (2017).

Para obter os valores de resistência ao cisalhamento no plano para as espessuras padrões de CLT (20, 30 e 40 mm), fez-se interpolação linear com os dados da Tabela 10. Tanto a f_{xy} do *E. benthamii* quanto a f_{xy} do *Pinus spp.* foi calculada a partir da relação entre a resistência ao cisalhamento e a resistência ao cisalhamento no plano da KLH[®] para cada espessura, o que resultou nos valores apresentados na Tabela 11 (APÊNDICE A).

Tabela 11 – Resistência ao cisalhamento no plano do CLT

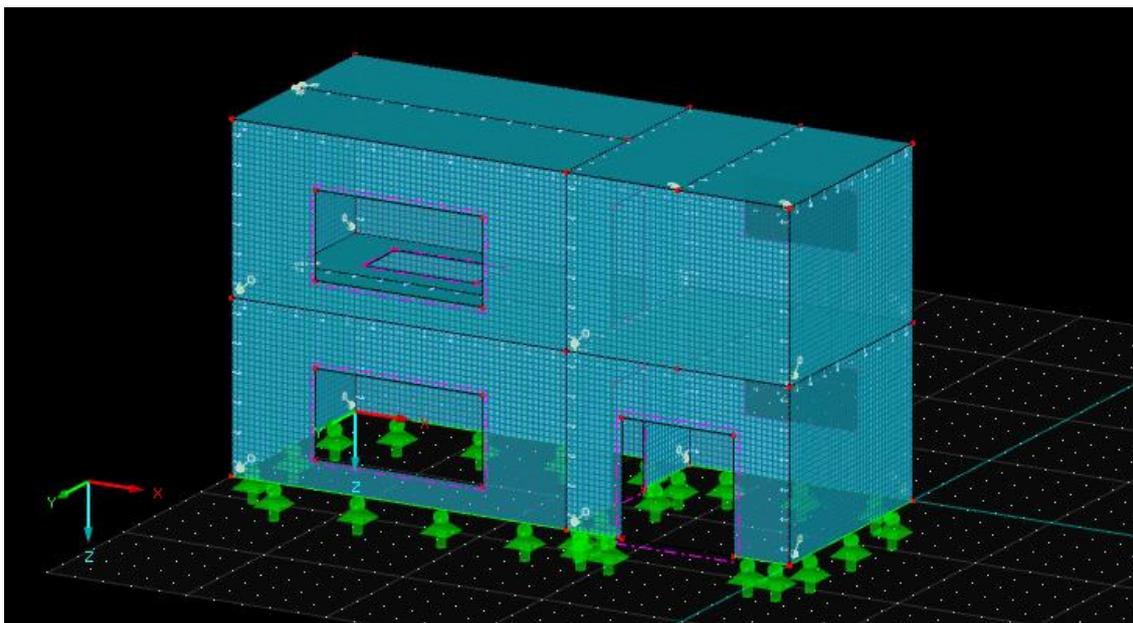
ESPESSURA DA CAMADA (mm)	f_{xy} (MPa)		
	KLH[®]	<i>E. benthamii</i>	<i>Pinus spp.</i>
20	8,20	39,69	10,63
30	6,20	30,01	8,04
40	4,34	21,01	6,63

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

5.2.3 Modelagem estrutural

A edificação de CLT foi modelada via MEF no *software* RFEM[®] da Dlubal[®], versão 5.26, e no seu módulo adicional RF-Laminate[®] que dimensiona superfícies lameladas (Figura 23). A malha de elementos finitos das modelagens desse trabalho é composta por quadrângulos, os quais foram testados em diferentes dimensões: 100 cm, 40 cm, 10 cm e 2 cm. Observou-se que os resultados não alteraram com os elementos menores de 40 cm, entretanto as modelagens com a malha de 2 cm deixaram o arquivo extenso e o *software* lento para realizar os cálculos. Sendo assim, refinou-se a malha com elementos finitos de 10 cm x 10 cm, pois a mesma mostrou oferecer resultados confiáveis e boa fluidez na utilização do RFEM[®].

Figura 23 – Modelagem da edificação em CLT

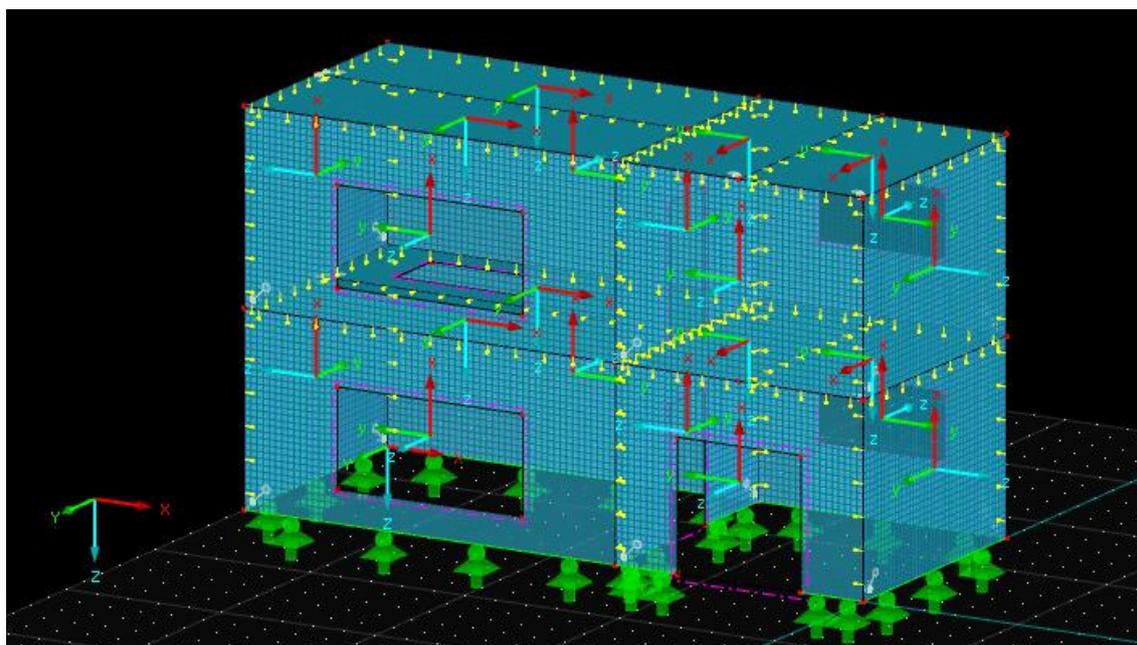


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A estrutura da edificação está sobre apoios articulados em linha na base das paredes do pavimento térreo e a modelagem foi configurada para calcular o dimensionamento pela Teoria de Mindlin. Considerou-se o acoplamento entre as camadas dos painéis e a não colagem lateral das lamelas. Sendo assim, a matriz de rigidez foi ajustada seguindo os fatores de redução de rigidez à torção de $K_{33} = 0,489$ e de camada $K_{88} = 0,585$, os quais são especificados pela Eurocode 5 (CEN, 2004) para CLT sem cola nas laterais das lamelas.

Inseriu-se articulações em linha para simular a conexão entre os CLT, como mostra a Figura 24, com constante da mola (C_{ux}) igual a 2.400 kN/m^2 . Os painéis de laje são apoiados sobre os painéis de paredes, então os mesmos tiveram apenas ligações verticais entre si. Já entre os painéis de laje, tanto de piso quanto de cobertura, foi aplicada uma ligação horizontal. Portanto, como as paredes no eixo Y são maiores que as paredes das extremidades, optou-se por conectá-las somente com ligações na horizontal.

Figura 24 – Articulações de linha da edificação em CLT



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Para otimizar as espessuras dos painéis da edificação, os mesmos foram separados no *software* em quatro grupos: Paredes em X, Paredes em Y, Lajes de Piso e Lajes de Cobertura. Assim, pôde-se alterar as espessuras e analisar os resultados para cada grupo. O autor seguiu o padrão de dimensões dos CLT da KLH® (ANEXO A), fornecendo ao RF-Laminate® as espessuras das camadas, das maiores até chegar nas mais otimizadas.

5.2.4 Cargas e Combinação de Resultados

Referente à classificação dos casos e combinações de cargas que o *software* utilizou nos cálculos, seguiu-se a norma brasileira ABNT NBR 8681 (2003). Além do peso próprio da estrutura que o programa já considera, aplicou-se cargas verticais permanentes e variáveis distribuídas nas lajes de CLT, tanto do pavimento superior quanto da cobertura. As cargas foram determinadas conforme a ABNT NBR 6120 (2019) que dispõe das ações a serem consideradas em projeto de estruturas de edificações. Na Tabela 12 consta a descrição das cargas que foram consideradas na estrutura e seus respectivos valores aplicados na modelagem.

Tabela 12 – Cargas permanentes e variáveis aplicadas na edificação

CARGA PERMANENTE			
CONJUNTO DE CLT	MATERIAL	CARGA (kN/m²)	TOTAL (kN/m²)
Laje do Pavimento Superior	Revestimento de pisos de edifícios residenciais e comerciais (5 cm)	1,00	1,08
	Impermeabilização com manta asfáltica simples (0,3 cm)	0,08	
Laje de Cobertura	Impermeabilizações em coberturas com manta asfáltica e proteção mecânica, sem revestimento (10 cm)	1,80	2,50
	Telhados com telhas cerâmicas em geral (exceto tipo germânica e colonial) e estrutura de madeira com inclinação $\leq 40\%$	0,70	
CARGA VARIÁVEL			
CONJUNTO DE CLT	LOCAL	CARGA (kN/m²)	TOTAL (kN/m²)
Laje do Pavimento Superior	Dormitórios, sala, copa, cozinha e sanitários de edifícios residenciais	1,50	1,50
Laje de Cobertura	Coberturas com acesso apenas para manutenção	1,00	1,00

Fonte: Adaptada da ABNT NBR 6120 (2019).

Além das cargas permanentes e variáveis, foram calculadas e aplicadas as cargas de vento para as placas de paredes do eixo X e do eixo Y da edificação. Os cálculos da ação do vento, que são fundamentais para o dimensionamento de estruturas, seguiram os parâmetros da ABNT NBR 6123 (1988) e estão demonstrados no APÊNDICE B. Já os ábacos utilizados estão nos Anexos B, C e D. A Tabela 13 apresenta as cargas de vento utilizadas na modelagem.

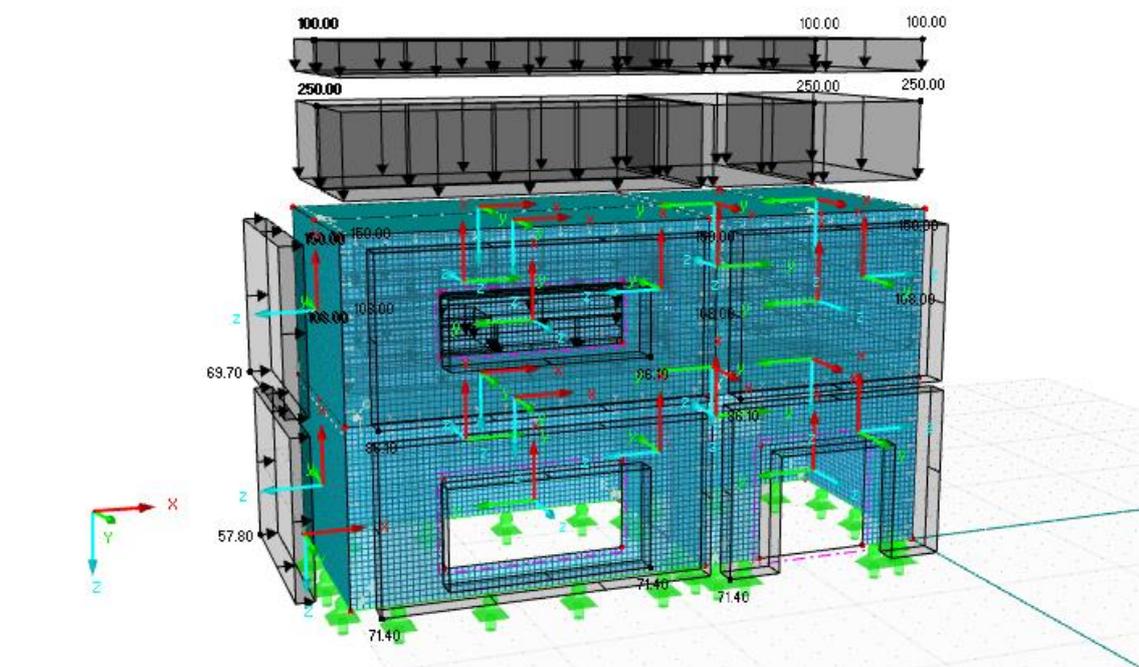
Tabela 13 – Cargas de vento aplicadas na edificação

CARGA DE VENTO		
GRUPO DE CLT	DIREÇÃO	CARGA (kN/m ²)
Paredes do Pavimento Térreo	X	0,578
	Y	0,714
Paredes do Pavimento Superior	X	0,697
	Y	0,861

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Para determinar as forças estáticas de vento, levou-se em consideração que a edificação residencial está sobre um terreno de topografia plana, em zona urbana. Considerou-se também, para a força de arrasto, que o vento é de alta turbulência, ou seja, a altura da residência é menor que duas vezes a altura média das edificações próximas, o que resulta em menor sucção das paredes e, conseqüentemente, coeficientes de magnitude menor comparados com ventos de baixa turbulência. A Figura 25 representa as cargas aplicadas na modelagem.

Figura 25 – Cargas modeladas na edificação em CLT



Fonte: Elaborado pelo autor (2023). Unidade em Kgf/m².

O RF-Laminate dimensionou as placas avaliando as tensões no estado limite último e as deformações, conforme a norma brasileira de estruturas de madeira ABNT NBR 7190-1 (2022), no estado limite de utilização (L/300). O *software* calculou utilizando diferentes combinações de cargas, conforme a ABNT NBR 8681 (2003), via análise de segunda ordem, e solucionou o sistema por equações algébricas não-lineares de Picard. Para análise de dados, utilizou-se a combinação de resultados, a qual decorre da combinação dos casos de carregamento em situação normal com efeito desfavorável. A Figura 26 mostra a lista de combinações de cargas que são levadas em consideração na combinação de resultados.

Figura 26 – Combinações de Cargas da Combinação de Resultados

Carregamento em combinação de resultados CR1				
Fator	nº	Designação	Critério	
1.00	Norm	CO1	1.25*CC1	Permanente
1.00	Norm	CO2	1.25*CC1 + 1.5*CC2	Permanente
1.00	Norm	CO3	1.25*CC1 + 1.5*CC2 + 0.84*CC3	Permanente
1.00	Norm	CO4	1.25*CC1 + 1.5*CC2 + 0.84*CC4	Permanente
1.00	Norm	CO5	1.25*CC1 + 1.4*CC3	Permanente
1.00	Norm	CO6	1.25*CC1 + 1.4*CC4	Permanente
1.00	Norm	CO7	1.25*CC1 + 1.2*CC2 + 1.4*CC3	Permanente
1.00	Norm	CO8	1.25*CC1 + 1.2*CC2 + 1.4*CC4	Permanente

Legenda: CO = Combinação de cargas; CC1 = Carga permanente; CC2 = Carga variável; CC3 = Carga de vento em X; CC4 = Carga de vento em Y.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

5.2.5 Análise dos dados

As tensões e deformações foram calculadas pelo *software* e suas equações estão no ANEXO E. Já as relações entre solicitação e resistência ou deformação obtidas no RF-Laminate® seguiram os cálculos contidos no ANEXO F. Para análise dos dados, utilizou-se gráficos de superfície para visualizar as deformações das placas CLT, disponibilizados no RFEM®, além de tabelas com resultados de deformações e tensões máximas. A cubagem e o peso também são apresentados e comparados por meio de gráficos e tabela.

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.3.1 Espessura dos painéis CLT

Os resultados da otimização de espessura dos painéis, para o grupo de CLT de Paredes em X, de Paredes em Y, de Laje de Piso e de Laje de Cobertura para cada edificação, estão na Tabela 14.

Tabela 14 - Espessura dos painéis

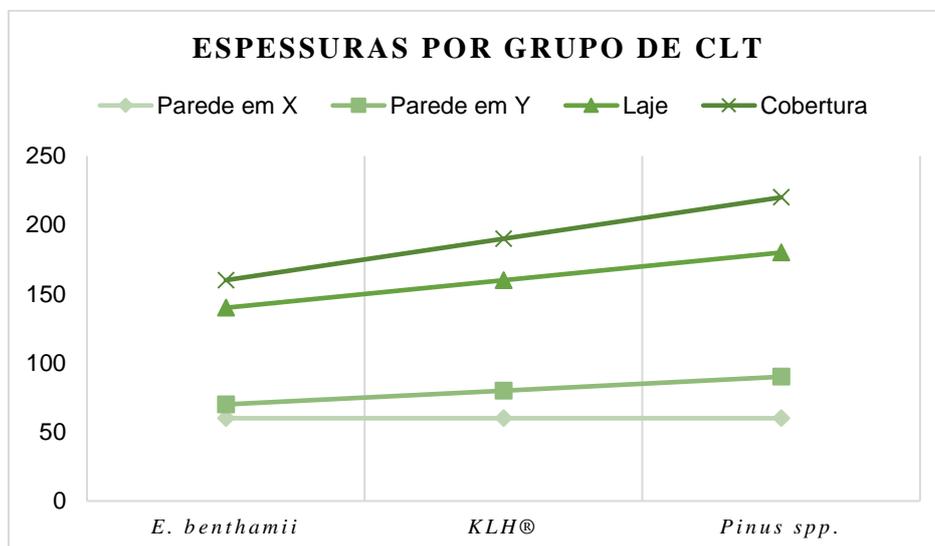
GRUPO	CAMADA	ESPESSURA (mm)		
		<i>E. benthamii</i>	KLH [®]	<i>Pinus spp.</i>
Paredes em X	1	20	20	20
	2	20	20	20
	3	20	20	20
	Total	60	60	60
Paredes em Y	1	20	30	30
	2	30	20	30
	3	20	30	30
	Total	70	80	90
Lajes de Piso	1	30	40	40
	2	20	20	30
	3	40	40	40
	4	20	20	30
	5	30	40	40
	Total	140	160	180
Lajes de Cobertura	1	40	40	30
	2	20	40	40
	3	40	30	30
	4	20	40	20
	5	40	40	30
	6	-	-	40
	7	-	-	30
Total	160	190	220	

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Pode-se observar que os painéis de *Eucalyptus benthami* obtiveram as menores espessuras para os grupos de Paredes em Y, Lajes de Piso e de Cobertura, seguidos dos CLT da KLH[®] e de *Pinus spp.* Já o grupo de Paredes em X apresentou a mesma espessura, que é a mínima de 60 mm, para todos os tratamentos. No Gráfico 2 é possível visualizar

melhor a tendência de aumento de espessura, separada por grupo, conforme as três modelagens.

Gráfico 2 – Espessuras de CLT por grupo para cada modelagem



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

As espessuras refletem as propriedades físico-mecânicas inseridas de cada painel. Para compreender quais fatores influenciaram na determinação das espessuras mínimas, as seções 5.3.2 e 5.3.3 apresentam as tensões máximas existentes e os deslocamentos máximos em cada painel, respectivamente.

5.3.2 Tensões máximas dos painéis CLT

As tensões máximas calculadas pelo RFEM® e as relações de solicitação/resistência dos painéis CLT mais tensionados para cada edificação estão na Tabela 15. Por meio das relações de solicitação e resistência é possível observar quais painéis chegaram mais próximo de atingir o estado limite. Os resultados de todos os painéis das edificações de *E. benthamii*, da KLH® e de *Pinus spp.* estão no APÊNDICE C, D e E, respectivamente.

Tabela 15 – Tensões máximas

PAINEL	$\sigma_{b,0}$ (MPa)	$\sigma_{b,0}$ / Resistência	$\sigma_{t/c,0}$ (MPa)	$\sigma_{t/c,0}$ / Resistência	$\sigma_{b,0+t/c,0}$ (MPa)	$\sigma_{b,0+t/c,0}$ / Resistência	$\gamma_{y'z'}$ (MPa)	$\gamma_{y'z'}$ / Resistência	$\gamma_{x'z'}$ (MPa)	$\gamma_{x'z'}$ / Resistência	$\gamma_{x'y'}$ (MPa)	$\gamma_{x'y'}$ / Resistência
TENSÕES MÁXIMAS – CLT <i>E. benthamii</i>												
PAREDES EM Y												
1	-1,410	0,01	-3,601	0,08	-4,398	0,09	0,250	0,23	0,426	0,03	-0,995	0,03
14	-3,014	0,03	-4,475	0,10	-5,783	0,11	0,180	0,16	-0,868	0,07	-1,742	0,04
PAREDES EM X												
5	0,672	0,01	-8,624	0,20	-8,717	0,20	-0,097	0,09	0,097	0,01	-1,727	0,04
7	-1,269	0,01	9,233	0,16	9,349	0,16	0,107	0,10	0,187	0,01	1,603	0,04
16	-2,028	0,02	2,783	0,05	4,781	0,07	-0,089	0,08	0,375	0,03	-1,000	0,03
18	-2,125	0,02	3,867	0,07	-5,868	0,11	-0,089	0,08	-0,351	0,03	0,955	0,02
LAJE DE PISO												
11	-1,518	0,01	4,284	0,08	5,423	0,09	0,376	0,34	0,415	0,03	-1,242	0,04
LAJES DE COBERTURA												
21	-1,354	0,01	4,090	0,07	5,444	0,08	-0,344	0,31	0,373	0,03	-0,934	0,05
22	-1,354	0,01	4,066	0,07	5,420	0,08	-0,344	0,31	0,373	0,03	0,927	0,05
TENSÕES MÁXIMAS – CLT KLH®												
PAREDES EM Y												
1	-3,162	0,13	3,153	0,19	-3,579	0,15	0,262	0,22	0,526	0,19	-0,719	0,12
14	-5,542	0,23	-3,223	0,13	-6,328	0,26	0,179	0,15	-1,043	0,39	-1,247	0,20
PAREDES EM X												
5	-0,643	0,03	-8,308	0,35	-8,414	0,35	-0,073	0,06	-0,074	0,03	-1,201	0,15
7	-1,199	0,05	8,836	0,54	8,838	0,54	0,083	0,07	0,136	0,05	1,157	0,14
16	-2,408	0,10	2,725	0,17	4,987	0,26	-0,062	0,05	0,414	0,15	-0,675	0,08

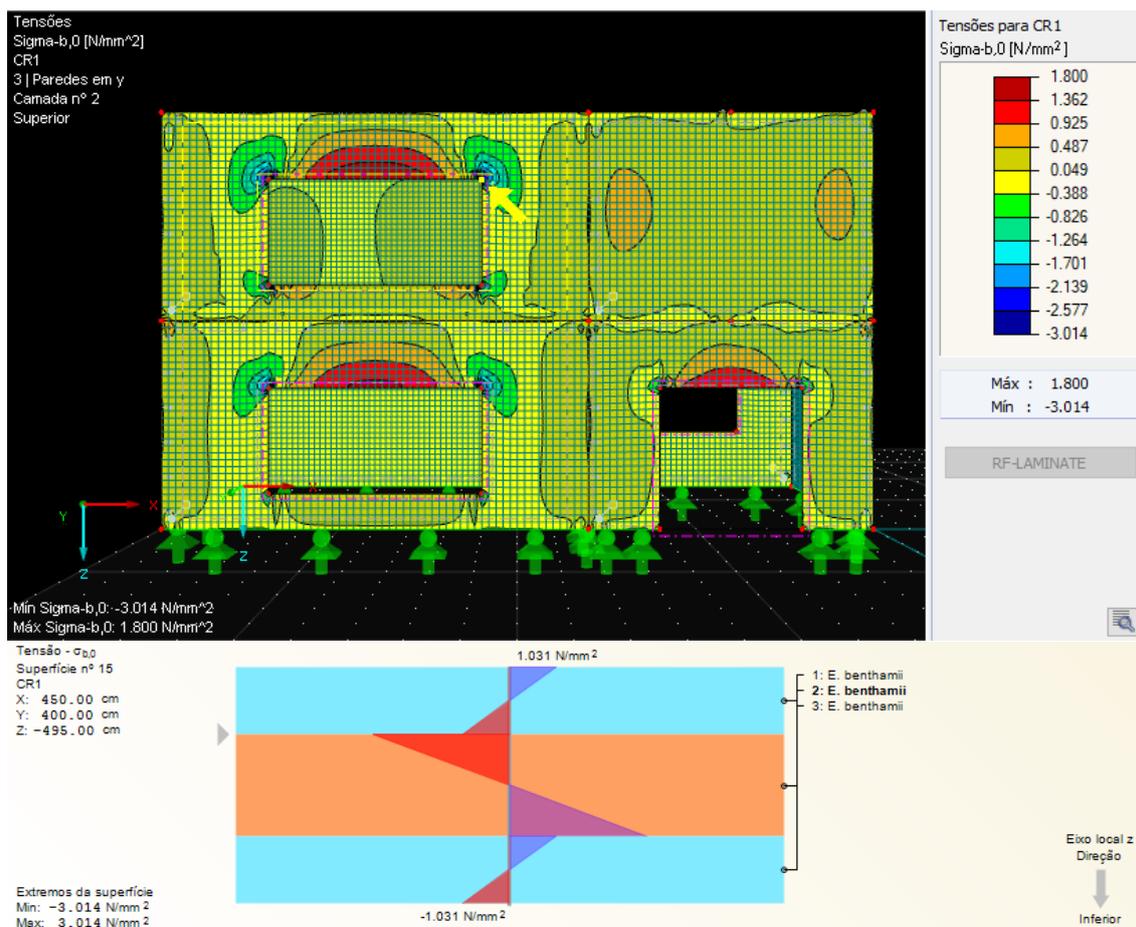
CONTINUAÇÃO TENSÕES MÁXIMAS – CLT KLH®												
LAJE DE PISO												
11	1,104	0,05	3,425	0,21	4,529	0,25	-0,276	0,23	0,299	0,11	-0,711	0,15
LAJES DE COBERTURA												
21	0,935	0,04	3,538	0,21	4,473	0,25	-0,233	0,19	0,242	0,09	-0,439	0,10
22	-0,935	0,04	3,512	0,21	4,447	0,25	-0,233	0,19	0,242	0,09	0,448	0,10
TENSÕES MÁXIMAS – CLT <i>Pinus spp.</i>												
PAREDES EM Y												
1	-1,351	0,05	-2,222	0,12	-1,679	0,14	0,246	0,22	0,360	0,10	-0,655	0,08
14	-2,541	0,09	-2,780	0,15	-1,879	0,19	0,131	0,12	-0,711	0,20	-1,130	0,14
PAREDES EM X												
5	-0,668	0,02	-7,630	0,42	-7,550	0,43	-0,079	0,07	0,079	0,02	-1,480	0,14
7	1,267	0,05	-6,779	0,38	-5,668	0,42	0,093	0,08	0,191	0,05	1,463	0,14
16	-1,648	0,06	-2,156	0,12	-0,081	0,16	-0,072	0,07	0,307	0,09	-0,810	0,08
18	1,695	0,06	3,726	0,16	-1,132	0,22	-0,068	0,06	-0,285	0,08	0,742	0,07
LAJE DE PISO												
11	0,735	0,03	-2,487	0,14	-3,222	0,17	0,279	0,25	0,279	0,08	-0,717	0,13
LAJES DE COBERTURA												
21	0,456	0,02	-2,865	0,16	-3,320	0,18	-0,269	0,24	0,269	0,08	-0,416	0,07
22	-0,456	0,02	-2,884	0,16	-3,340	0,18	-0,269	0,24	0,269	0,08	-0,433	0,08

Legenda: $\sigma_{b,0}$ = Tensão máxima de flexão local paralela às fibras; $\sigma_{v/c,0}$ = Tensão máxima de tração/compressão paralela às fibras; $\sigma_{b,0+v/c,0}$ = Tensão máxima de flexão paralela às fibras; γ = Tensão máxima de cisalhamento no plano correspondente.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Para os CLT de parede, é muito importante avaliar as tensões de flexão local e total máximas ($\sigma_{b,0}$ e $\sigma_{b,0+t/c,0}$, respectivamente). Os painéis que mais tiveram solicitações de tensão de flexão local foram os nº. 14, como é possível observar na borda das aberturas das placas no protótipo de eucalipto, na Figura 27.

Figura 27 – Representação gráfica da distribuição de tensões de flexão local ($\sigma_{b,0}$) em paredes do eixo Y de *E. benthamii*



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

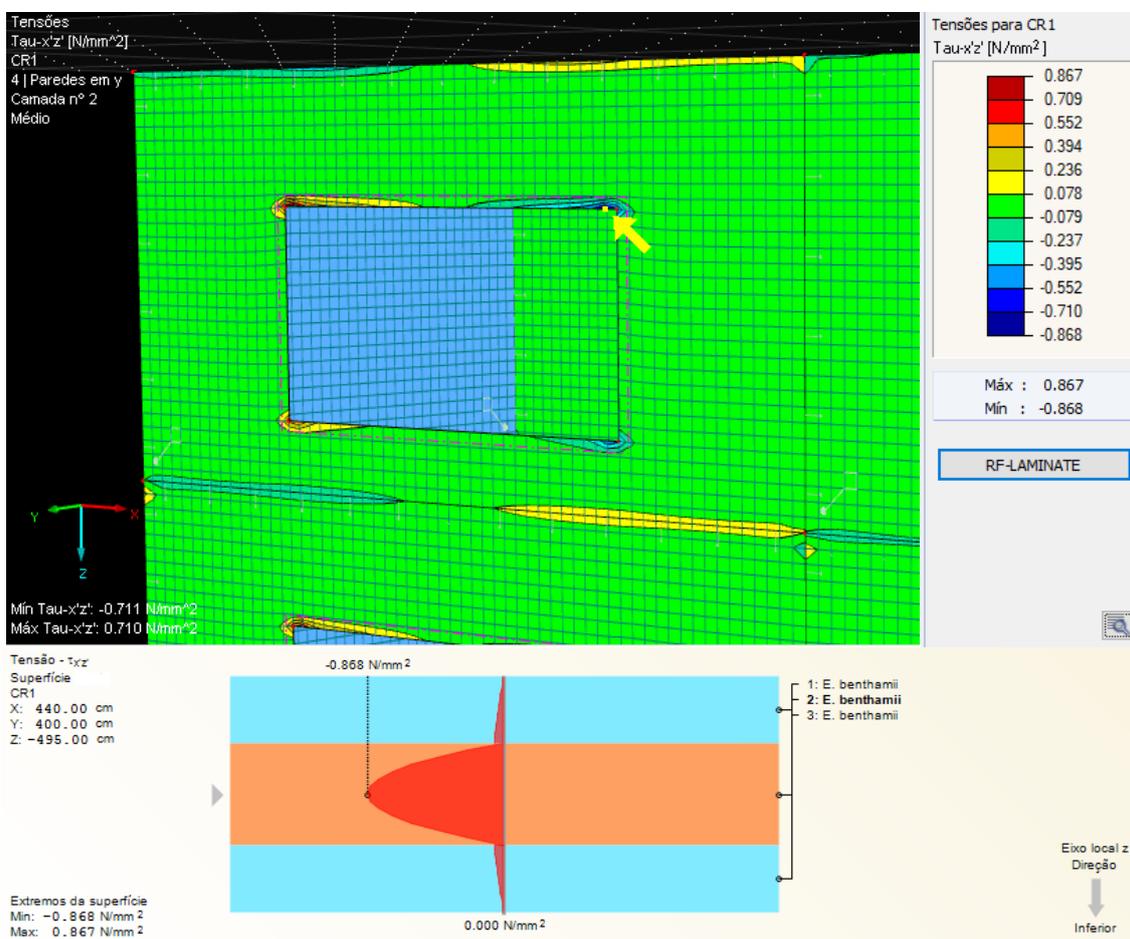
Já a flexão total foi maior nos CLT nº. 7 dos protótipos de *E. benthamii* e da KLH[®] e no CLT nº 5 de *Pinus spp.*, ambos nas extremidades do pavimento térreo, o que sugere ser devido às suas menores espessuras e por suportarem cargas do pavimento superior.

Outra tensão importante a ser avaliada no dimensionamento de paredes de CLT é o cisalhamento no plano ($\checkmark_{x'y}$). As paredes que tiveram maiores solicitações referente a essa propriedade foram as nº 5 e nº 14. Se observar, o painel nº 5 está localizado no térreo, recebendo grande carregamento, e o painel nº 14 está localizado no pavimento superior,

recebendo cargas de vento e com uma grande abertura para janela, o que explica ter as maiores tensões.

Além disso, no geral, as maiores tensões de cisalhamento no plano XZ ($\mathbb{V}_{x'z'}$), outra propriedade fundamental, foram nas paredes nº 14 das três edificações. É possível visualizar as tensões de $\mathbb{V}_{x'z'}$ nos gráficos, obtidos do protótipo de *E. benthamii* para representação, na Figura 28.

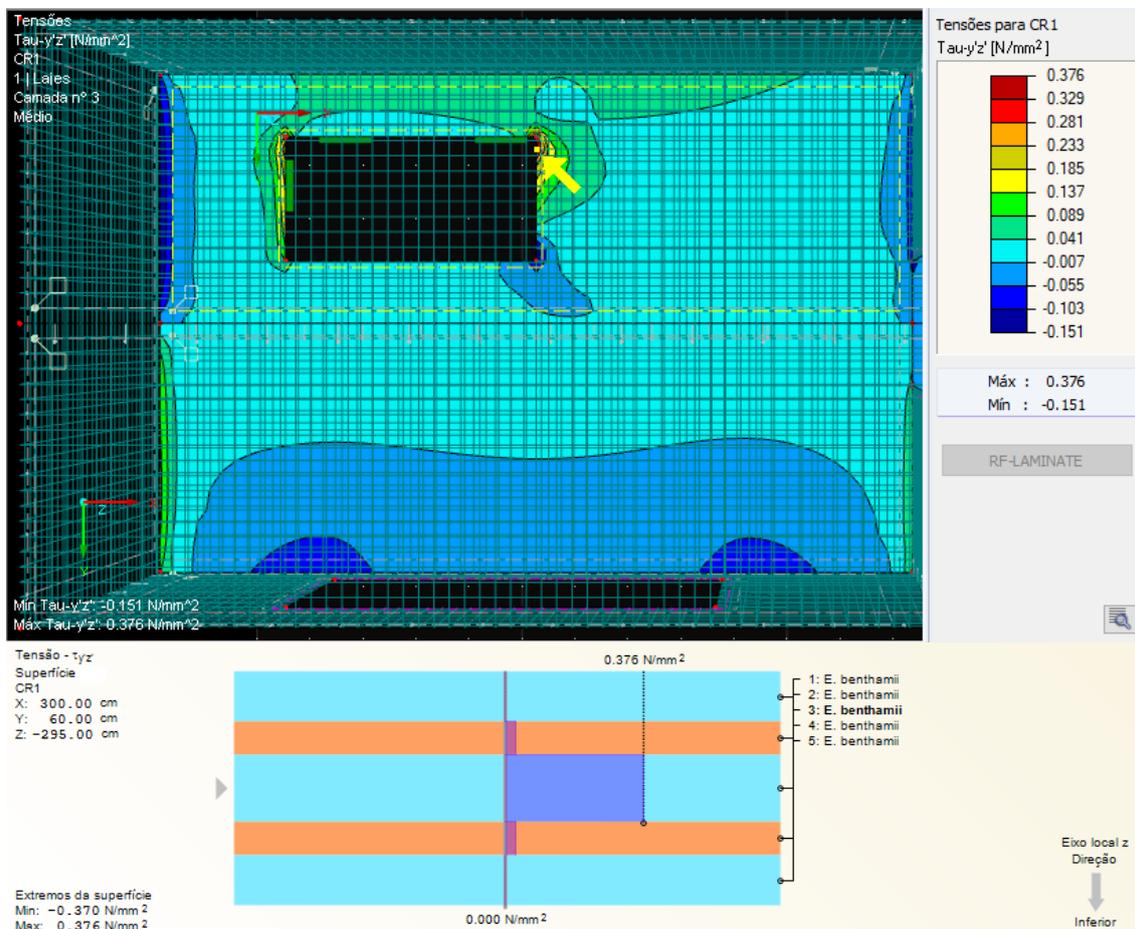
Figura 28 - Representação gráfica da distribuição de tensões de cisalhamento ($\mathbb{V}_{x'z'}$) no CLT nº 14 de *E. benthamii*



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Para os CLT que estão sob flexão fora do plano, como os de piso e de cobertura, é importante verificar a tensão de cisalhamento vertical ($\mathbb{V}_{y'z'}$ e $\mathbb{V}_{x'z'}$). O painel de laje que recebeu maior cisalhamento foi o nº 11, o qual vence um vão de 600 cm e possui abertura para escada. Na Figura 29 estão os gráficos representando a sua distribuição, tanto em superfície quanto ao longo da camada.

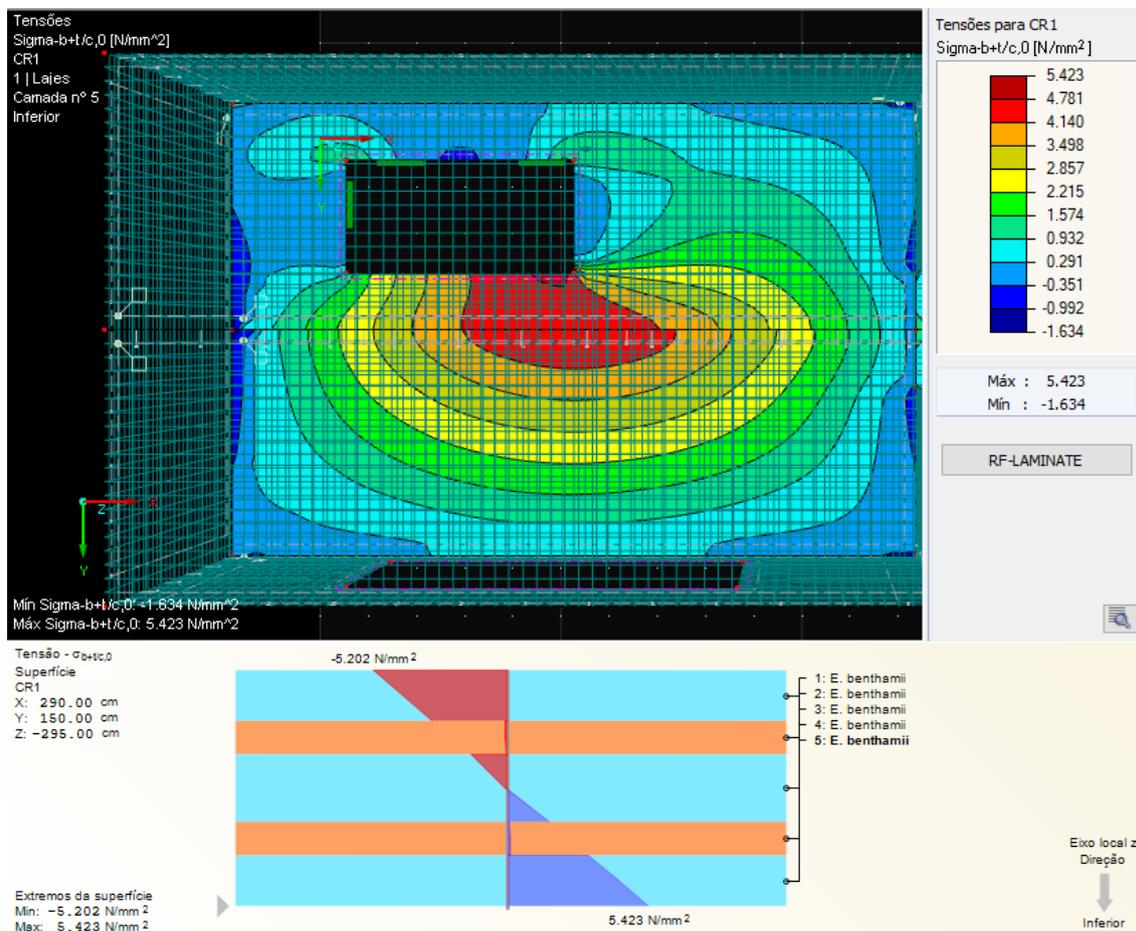
Figura 29 - Representação gráfica da distribuição de tensões de cisalhamento vertical (τ_{yz}) em CLT laje de piso de *E. benthamii*



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Outra propriedade importante para os painéis de laje é a flexão global máxima. Os CLT de cobertura que tiveram o valor de $\sigma_{b,0+t/c,0}$ mais alto foram os n° 21 e n° 22, devido ao vão livre de 600 cm que os mesmos suportam. Já o CLT de laje com flexão mais solicitada foi o n° 11, que também possui o maior vão livre (600 cm). A Figura 30 representa as tensões $\sigma_{b,0+t/c,0}$ dos CLT n° 10 e n° 11 de *E. benthamii*.

Figura 30 - Representação gráfica da distribuição de tensões de flexão global ($\sigma_{b,0+t/c,0}$) em CLT laje de piso de *E. benthamii*



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Foram analisadas a flexão local, que é resultante da resistência à flexão f_b , a flexão total, que é resultante das resistências de flexão, tração e compressão (f_b , f_t e f_c), e as tensões de cisalhamento, que são resultantes das resistências f_v , $f_{R,m}$ e f_{xy} , além dos módulos de rigidez G . Todas essas resistências inseridas são mais elevadas para o *E. benthamii* do que para a KLH[®] e para o *Pinus spp.* da ABNT NBR 7190-2 (2022), o que explica as menores relações de solicitação/resistência do *E. benthamii*.

Pode-se observar que, mesmo o *E. benthamii* possuindo maior densidade e maiores resistências, ele obteve maiores tensões comparado aos outros tratamentos. Isso ocorre porque, justamente por ter propriedades mais elevadas, os CLT de eucalipto foram menos espessos que os demais, obtendo assim maiores tensões, mesmo que estas estejam muito distantes de atingir seu estado limite último, o que não compromete a estabilidade estrutural.

Em geral, verificou-se que as relações foram bem baixas, ou seja, as tensões máximas existentes são pequenas comparado ao quanto os CLT resistem, o que demonstra que as tensões não foram o fator determinante para a otimização das espessuras, mas sim os deslocamentos, como é visto na seção 5.3.3.

5.3.3 Deslocamento máximo dos painéis CLT

Quando as espessuras inseridas do *software* eram um pouco menores do que as determinadas na otimização, os CLT até apresentavam índices de tensões aceitáveis, mas seus deslocamentos verticais não eram aceitáveis para o estado limite de utilização. Portanto, dimensionou-se os painéis CLT de acordo com os requisitos de deflexão vertical, ou seja, o fator determinante para otimizar as espessuras dos painéis foi o deslocamento dos mesmos.

A Tabela 18 apresenta o maior deslocamento de cada painel e sua respectiva relação entre o deslocamento existente e o limite aceitável (20 mm). Quanto mais próximo de 1 (um) é o valor da relação, mais próximo do limite aceitável é o deslocamento.

Tabela 16 – Deslocamentos máximos dos CLT

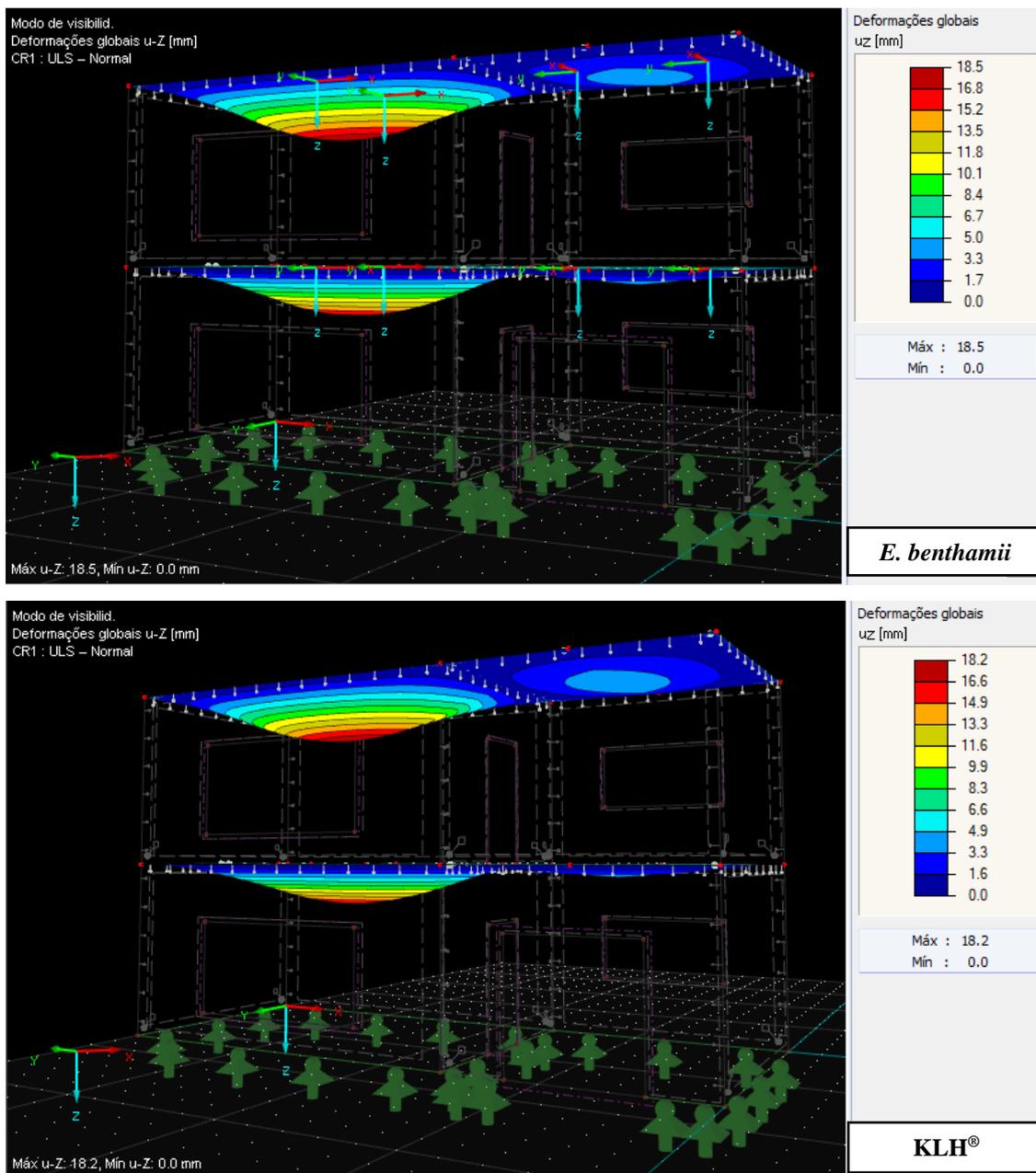
	PAINEL	<i>E. benthamii</i>		KLH®		<i>Pinus spp.</i>	
		u_z (mm)	Relação u_z / Limite	u_z (mm)	Relação u_z / Limite	u_z (mm)	Relação u_z / Limite
PAREDES Y	1	-6,60	0,33	-8,10	0,41	-6,6	0,33
	2	0,60	0,03	1,00	0,05	1,00	0,05
	3	-11,50	0,57	-15,10	0,76	-11,60	0,58
	4	0,60	0,03	1,10	0,05	1,10	0,05
	12	-3,60	0,18	-3,60	0,18	-3,80	0,19
	13	-2,90	0,15	-2,60	0,13	-2,70	0,14
	14	-14,00	0,70	-18,70	0,94	-14,50	0,73
	15	-3,30	0,17	-2,80	0,14	-3,10	0,16
PAREDES X	5	0,20	0,01	0,30	0,01	0,30	0,01
	6	-0,20	0,01	-0,30	0,01	-0,20	0,01
	7	-3,50	0,17	-4,70	0,24	-6,90	0,35
	16	-1,40	0,07	-1,30	0,07	-1,50	0,07
	17	3,40	0,17	3,40	0,17	3,30	0,17
	18	-5,50	0,28	-6,10	0,31	-7,20	0,36
LAJES	8	4,90	0,25	4,50	0,22	4,80	0,24
	9	4,90	0,25	4,50	0,22	4,80	0,24
	10	17,10	0,85	16,60	0,83	16,40	0,82
	11	17,10	0,85	16,60	0,83	16,40	0,82
	19	4,50	0,23	4,80	0,24	4,90	0,25
	20	4,50	0,23	4,80	0,24	4,90	0,25
	21	18,50	0,93	18,20	0,91	17,60	0,88
	22	18,50	0,93	18,20	0,91	17,60	0,88

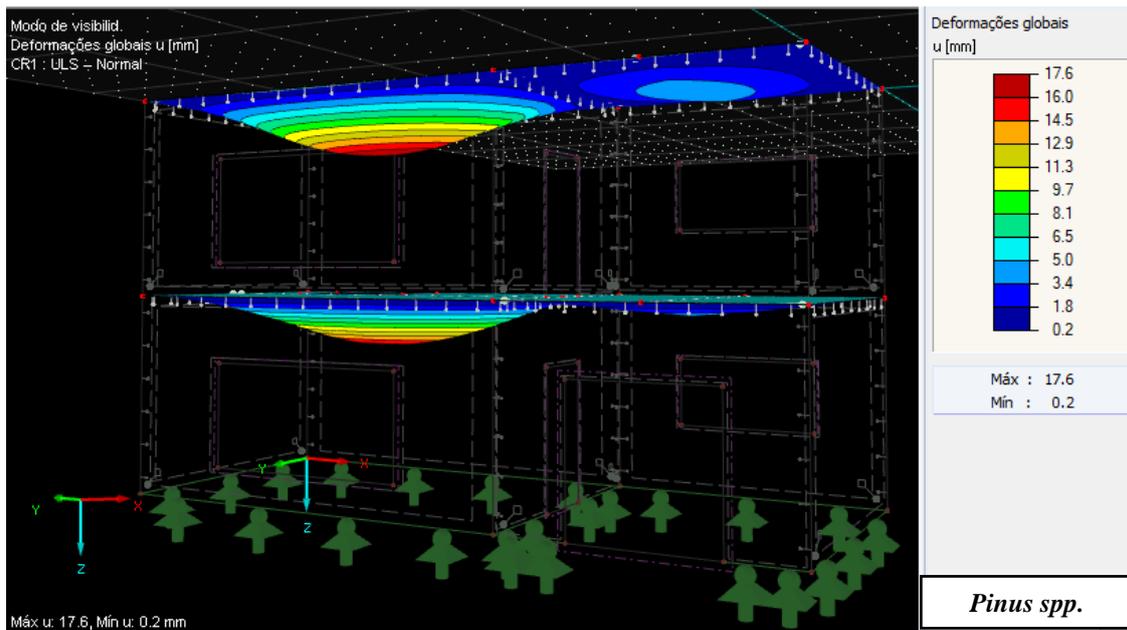
Legenda: u_z = deslocamento máximo; Limite = 20 mm que se refere a $L/300$ cm, sendo L a maior dimensão dos painéis (600 cm). Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os CLT de laje de piso mais desfavoráveis foram os nº 10 e nº 11, que apresentaram um deslocamento máximo no eixo Z de 5,5 mm, 6,10 mm e 7,20 mm para o *E. benthamii*, a KLH® e o *Pinus spp.*, respectivamente. Já as lajes de cobertura que apresentaram maiores deformações foram as nº 21 e 22, com u_z de 18,50 mm para o

eucalipto, 18,20 mm para a KLH® e 17,60 mm para o pinus, no estado limite utilização. É possível ver os deslocamentos das lajes, para os três tratamentos, nos gráficos de superfície da Figura 31.

Figura 31 – Deslocamentos máximos dos painéis de laje



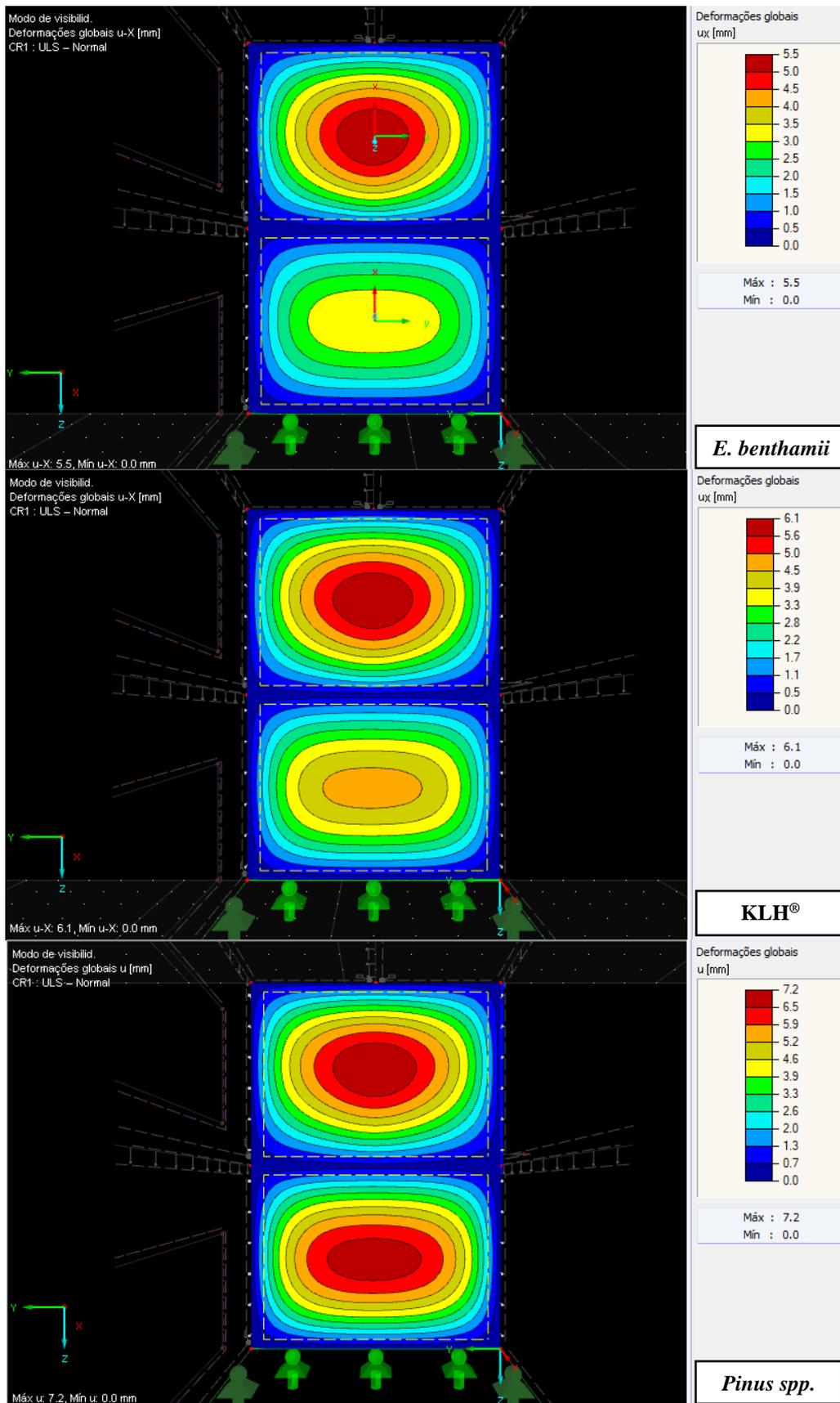


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O maior deslocamento nas lajes 10, 11, 21 e 22 é explicado por estarem sobre um vão livre maior (600 cm) comparado às outras lajes (400 cm). Já as lajes de cobertura obtiveram valores de deflexão mais altos do que as lajes de piso, isso ocorreu devido ao seu maior recebimento de cargas verticais, conforme a Tabela 12 em 5.2.4.

As paredes no eixo X que mais deformaram foram os CLT nº 18. Como as paredes em X obtiveram a mesma espessura nos três tratamentos, é possível compreender que seus resultados de deslocamento refletem as propriedades mecânicas inseridas em cada modelagem. O módulo de elasticidade (E_x) é uma propriedade que está diretamente relacionada com a flexão dos painéis. O E_x do *E. benthamii*, obtido experimentalmente por Tomio (2020), é mais elevado (15325,24 MPa) do que o da KLH® / ETA 06/0138 (2017), de 12000 MPa, seguido do *Pinus spp.* da ABNT NBR 7190-2 (2022), de 8000 MPa, apresentando valores de deflexão de 5,50 mm, 6,10 mm e 7,20 mm para as modelagens de *E. benthamii*, KLH® e *Pinus spp.*, respectivamente. Esses resultados podem ser observados graficamente a seguir, na Figura 32.

Figura 32 – Deslocamentos máximos de paredes em X

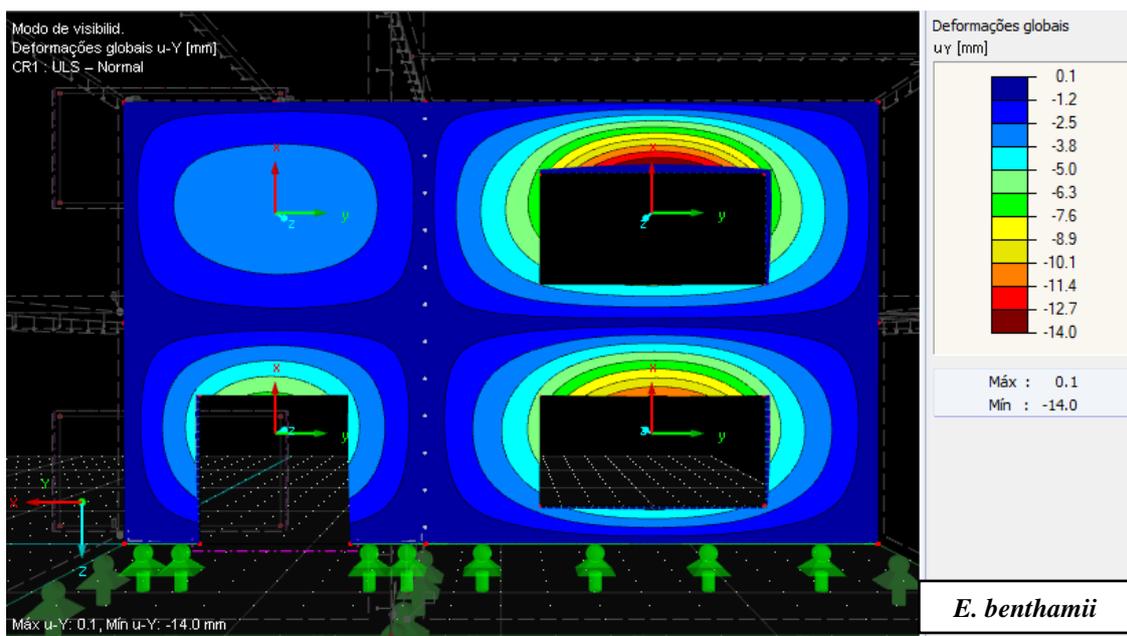


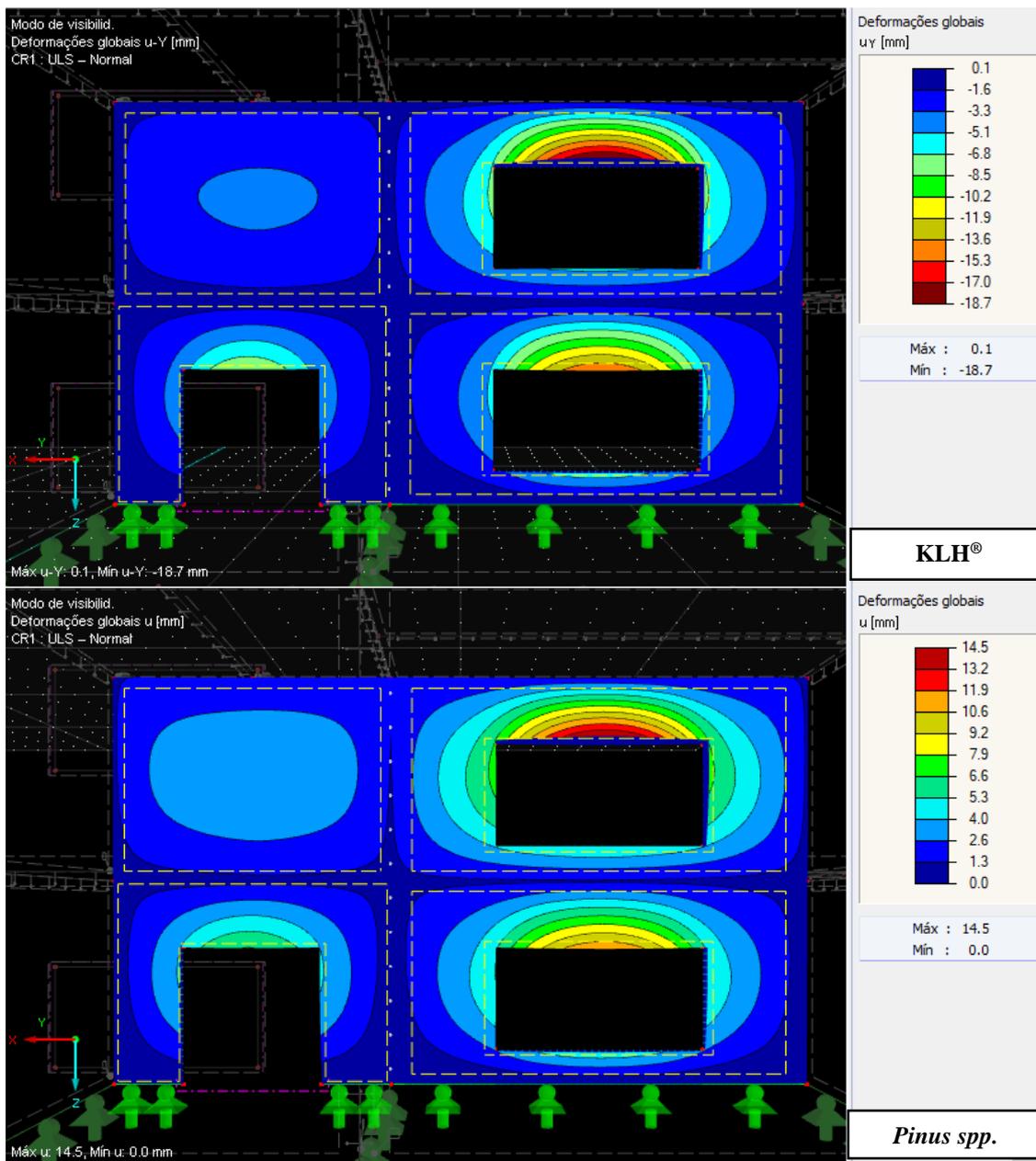
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O que explica o CLT nº 18, que se localiza no pavimento superior, ter deformação maior que os painéis nº 5, 6, 16 e 17 é o recebimento direto da carga de vento em X, enquanto estes não o teve. Acontece que o CLT nº 7 também recebeu carregamento de vento, todavia o carregamento para o térreo era menor comparado à carga do pavimento superior, como visto na Tabela 13 na seção 5.2.4.

A parede do eixo Y que apresentou maior deflexão foi o CLT nº 14, cujo comprimento é de 600 cm e está localizado no pavimento superior, recebendo diretamente maior carga de vento. A deformação maior foi para a modelagem da KLH®, seguida da modelagem de pinus e de eucalipto, com valores de, respectivamente, 18,70 mm, 14,50 mm e 14,00 mm, como mostra a Figura 33.

Figura 33 – Deslocamentos máximos de paredes em Y





Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os CLT *E. benthamii*, além de ter menor espessura, apresenta menores deslocamentos para as paredes em Y. Isso se dá pelas suas propriedades superiores aos demais tratamentos, principalmente pelo E_x (15325,24 MPa) e pela f_b (109,11 MPa) que foram obtidos por Tomio (2020).

Os resultados mostram, por meio das relações de deslocamento máximo e deflexão limite, que os CLT mencionados com maiores valores para paredes em Y, lajes de piso e de cobertura deformaram entre 70% e 94% do limite, tendo o *E. benthamii* as

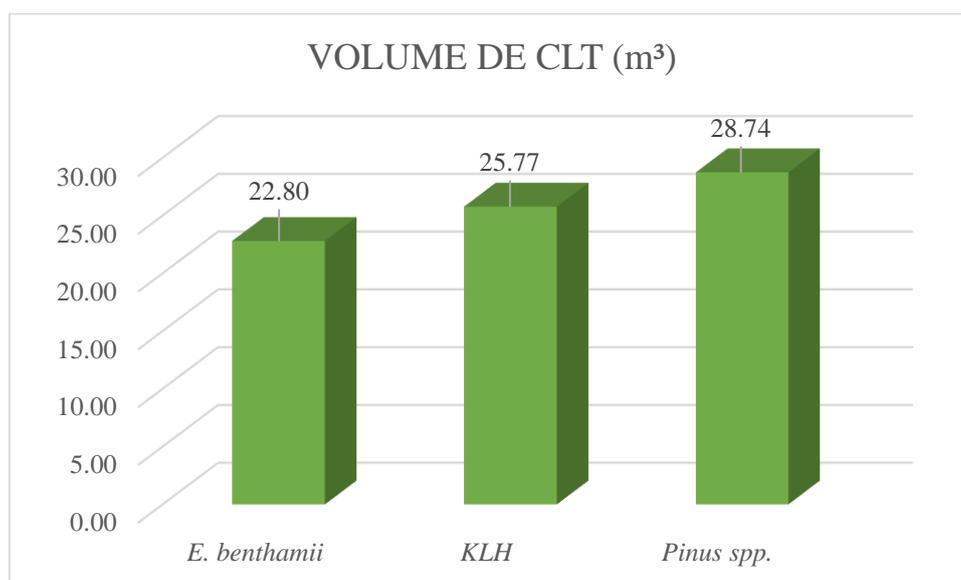
menores relações de paredes e as maiores de lajes quando comparado com os demais tratamentos.

As lajes de *E. benthamii* tiveram as maiores relações devido a menor espessura dos CLT, a qual foi proporcionada pelas propriedades físico-mecânicas da madeira, principalmente pela sua densidade mais elevada, de 610 kg/m³ por Tomio (2020), quando comparada com os demais, de 560,84 kg/m³ e 400 kg/m³ da KLH® / ETA 06/0138 (2017) e do *Pinus spp.* pela ABNT NBR 7190-2 (2022). Isso representa a vantagem em se utilizar uma madeira mais densa e resistente para utilizar em CLT, como a espécie de eucalipto estudada, pois permite painéis menos espessos sem comprometer a estabilidade dimensional, tanto de paredes como de lajes.

5.3.4 Volume e peso de CLT para cada edificação

Calculou-se o volume e o peso de CLT visando comparar a quantidade necessária de madeira para executar cada protótipo. As planilhas mais detalhadas, que apresentam a composição de camadas e resultados de volume e peso de todos os painéis da edificação de *E. benthamii*, da KLH® e de *Pinus spp.*, se encontram no APÊNDICE F, APÊNDICE G e APÊNDICE H, respectivamente. O Gráfico 3 apresenta os valores de volume dos protótipos de CLT.

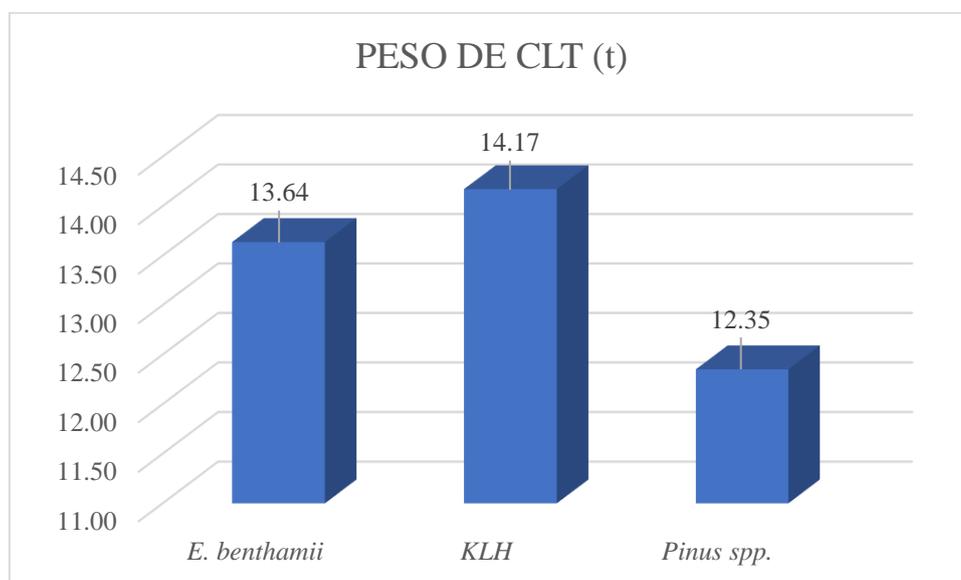
Gráfico 3 – Comparação do volume de CLT entre os protótipos modelados



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A edificação de *Eucalyptus benthamii* possui menor volume quando comparado às demais, com 22,80 m³ de CLT, que significa 2,97 m³ a menos que a edificação da KLH[®], que resultou em 25,77 m³, e 5,94 m³ a menos que a de *Pinus spp.*, que obteve 28,74 m³. Esses dados eram esperados, visto que os CLT de menores espessuras foram o de eucalipto, seguido da empresa europeia e do pinus brasileiro com classe de resistência 2. No Gráfico 4 é possível visualizar o peso de CLT para cada tratamento.

Gráfico 4 – Comparação do peso de CLT entre os protótipos modelados



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O protótipo de *Pinus spp.* foi o mais leve de todos, mostrando ser necessário 12,35 toneladas de CLT para executar a edificação dimensionada, tendo 1,29 toneladas a menos que a de *E. benthamii* e 1,82 toneladas a menos que a da KLH[®], esta última sendo a mais pesada com um total de 14,17 toneladas. Entretanto, como foi o mais leve, necessitou-se de mais volume de CLT para alcançar estabilidade estrutural na edificação modelada.

Essa relação entre peso e volume das edificações é consequência da densidade da madeira que foi utilizada nas modelagens. Com um peso total de 13,64 toneladas, os CLT de *E. benthamii*, mesmo possuindo menor volume, não obtiveram o protótipo mais leve que o de *Pinus spp.*, mas apresentaram menos peso quando comparado ao protótipo da KLH[®]. Isso mostra que a madeira de *E. benthamii*, que é o foco desse estudo, possui potencial para produzir CLT, pois a mesma apresentou estabilidade dimensional dentro

dos limites últimos e de utilização exigidos utilizando menos volume e tendo menos peso que os painéis de padrão comercializados na Europa.

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio da modelagem estrutural via MEF, foi possível otimizar as espessuras de painéis CLT, o que resultou num peso e num volume mínimo para cada protótipo estudado, e foi evidenciado o potencial do comportamento estrutural de madeiras de florestas plantadas brasileiras, *Eucalyptus benthamii* e *Pinus spp.*, em painéis CLT modelados como paredes e lajes em uma edificação de dois pavimentos.

Com as análises de tensões e deformações, pode-se concluir que o CLT de *E. benthamii* possui potencial estrutural para ser comercializado e utilizado em edificações. Apresentou estabilidade dimensional dentro dos estados limite último e de serviço, com o protótipo de menor volume, além de ser mais leve quando comparado com o protótipo da fabricante europeia.

Embora o *Pinus spp.* de classe 2 de resistência da ABNT NBR 7190-2 (2022) não obtenha propriedades mínimas exigidas pela ETA 06/0138, o mesmo também apresentou potencial para ser fabricado e comercializado. No dimensionamento realizado, ele obteve maior volume e menor peso devido a sua densidade ser mais baixa, entretanto apresentou tensões e deformações aceitáveis dentro dos limites propostos.

REFERÊNCIAS

ASDRUBALI, F.; FERRACUTI, B.; LOMBARDI, L.; GUATTARI, C.; EVANGELISTI, L.; GRAZIESCHI, G. A review of structural, thermo-physical, acoustical, and environmental properties of wooden materials for building applications. **Building and Environment**, Vol. 114, pp. 307-332, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6120: Ações para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro, 1988.

_____. **NBR 7190-1: Projeto de estruturas de madeira. Parte 1: Critérios de dimensionamento**. Rio de Janeiro, 2022.

_____. **NBR 7190-2: Projeto de estruturas de madeira. Parte 2: Métodos de ensaio para classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira**. Rio de Janeiro, 2022.

_____. **NBR 7190-3: Projeto de estruturas de madeira. Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas**. Rio de Janeiro, 2022.

_____. **NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2003.

BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of Wood and Wood Composites**. New York: Van Nostrand, 1982.

CHURKINA, G.; ORGANSCHI, A.; REYER, C.; RUFF, A. Buildings as a global carbon sink. **Nature Sustainability**, Vol. 3, pp. 269–276, 2020.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALIZATION (CEN). **Eurocode 5: Design of timber structure. Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings**. Brussels, 2004.

_____. **BS EN 16351 - Timber structures - Cross laminated timber - Requirements**. Brussels, 2015.

ETA. Europäische Technische Bewertung. **ETA 06/0138: KLH solid wood slabs: Solid wood slab element to be used as structural elements in buildings**. Österreichisches Institut für Bautechnik (OIB): KLH Massivholz GmbH, 51 p., 2017.

HEMATABADI, H.; MADHOUSHI, M.; KHAZAEYAN, A.; EBRAHIMI, G.; HINDMAN, D.; LOFERSKI, J. Bending and shear properties of cross-laminated timber panels made of poplar (*Populus alba*). **Construction and Building Materials**, Vol. 265, pp. 1-10, 2020.

HUANG, Z.; HUANG, D.; CHUI, Y.; CHEN, Z. A layered beam-based model for analyzing the stress of rolling shear for the cross-laminated timber panels under out-of-plane bending. **Engineering Structures**, Vol. 289, 2023.

IBÁ. Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório IBÁ 2022**. 2022.

KLH. KLH Massivholz GmbH. Structural pre-analysis tables. 2023.

KRAMER, A.; BARBOSA, A. R.; SINHA, A. Viability of hybrid poplar in ANSI approved cross-laminated timber applications. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Vol. 26, 2014.

NAVARATNAM, S.; CHRISTOPHER, P. B.; NGO, T.; LE, T. V. Bending and shear performance of Australian Radiata pine cross-laminated timber. **Construction and Building Materials**, Vol. 232, 2020.

NISGOSKI, S.; MUNIZ, G. I. B.; KLOCK, U. Caracterização anatômica da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage. **Ciência Florestal**, Vol. 8, n° 1, pp. 67-76, 1998.

PEREIRA, M. C. M.; CALIL JUNIOR, C. Strength and stiffness of cross laminated timber (CLT) panels produced with *Pinus* and *Eucalyptus*: experimental and analytical comparisons. **Revista Matéria**, Vol. 24, n° 2, 2019.

PNUMA. United Nations Environment Programme. **Global status report for buildings and construction: towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector**. 2021.

SHIN, B.; CHANG, S. J.; WI, S.; KIM, S. Estimation of energy demand and greenhouse gas emission reduction effect of cross-laminated timber (CLT) hybrid wall using life cycle assessment for urban residential planning. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Vol. 185, 2023.

SILVA, L. D.; HIGA, A. R.; SANTOS, G. A. **Desafios do uso da madeira de *Eucalyptus benthamii* para serraria**. In: Silvicultura e melhoramento genético de *Eucalyptus benthamii*. Curitiba: Editora FUPEF, pp. 123-150, 2012.

SUN, X.; HE, M.; LI, Z. Novel engineered wood and bamboo composites for structural applications: State-of-art of manufacturing technology and mechanical performance evaluation, **Construction and Building Materials**, Vol. 249, 2020.

TEREZO, R. F.; SAMPAIO, C. A. P.; CASTRO, A. S.; VALLE, A.; MORAES, P. D. Bending properties of cross-laminated timber panels produced with *Pinus taeda* from a mountain region in Santa Catarina, Brazil. **Floresta**, Vol. 53, n° 3, pp. 299-304, 2023.

THAI, M. V.; MÉNARD, S.; ELACHACHI, S. M.; GALIMARD, P. Performance of notched connectors for CLT-Concrete. **Buildings**, Vol. 10, pp. 1-20, 2020.

TOMIO, G. Avaliação tecnológica da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage com 23 anos de idade. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Florestal. Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2020.

WANG, X.; QUE, Y.; HU, Y.; JIANG, G.; QUE, Z. Effect of diferente thickness of the layers of cross-laminated timber made from chinese firo n the mechanical performance. **BioResources**, Vol. 13, pp. 7002-7016, 2018.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

O estado da arte mostrou que o Método dos Elementos Finitos é eficiente para prever o comportamento estrutural do CLT, visto que a diferença entre os resultados do MEF e dos demais métodos não foi significativa nos artigos evidenciados. Além disso, o MEF é versátil e não oneroso, pois permite simular vários ensaios mecânicos e dinâmicos, com diferentes configurações de CLT, apenas com o auxílio de um *software* computacional.

O alto coeficiente de variação, observado nos resultados do ensaio de flexão à três pontos dos painéis CLT, mostrou a importância de se fazer a classificação mecânica e, não apenas, a classificação visual, sendo as duas fundamentais para formar painéis CLT mais homogêneos. O MEF representou bem o ensaio experimental de flexão à três pontos simulado em modelagem numérica, validando as propriedades e permitindo utilizá-las no modelo de edificação, sem a necessidade de executar um protótipo em escala real, o que seria oneroso e demandaria mão-de-obra.

Os painéis de CLT de *E. benthamii*, tanto de lajes quanto de paredes, apresentaram bom comportamento estrutural e obtiveram as menores espessuras em todos os painéis analisados, com todas as tensões e deformações abaixo do limite exigido. Além disso, o CLT de *E. benthamii* se mostrou compatível com os painéis comercializados pela fabricante europeia, apresentando estabilidade dimensional com um protótipo mais leve e de menor volume.

O *Pinus spp.* de Classe 2 de resistência da ABNT NBR 7190-2 (2022) também apresentou bons resultados estruturais e potencial em ser utilizado em painéis CLT. Com o protótipo de menor peso e maior volume, suas propriedades apresentaram tensões e deformações aceitáveis, dentro dos estados limites últimos e de utilização no dimensionamento realizado.

Baseando-se em ensaios experimentais e validando-os em modelo numérico, essa pesquisa evidenciou o potencial do *Eucalyptus benthamii* como matéria-prima para Painéis de Madeira Lamelada Colada Cruzada. A modelagem do protótipo de *E. benthamii* e do pinus estudado mostrou a possibilidade da inserção dessas madeiras

brasileiras para uso estrutural de CLT, agregando maior valor a elas e fornecendo novos tipos de painéis para o mercado.

Recomenda-se estudar as madeiras desse estudo em modelagens de edifícios altos, de múltiplos pavimentos, e com outras simulações naturais, para se ter conhecimento do seu comportamento estrutural em outras situações e continuar promovendo o seu potencial como material resistente e renovável, cuja contribuição para o desenvolvimento de cidades sustentáveis é muito importante.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (ABDI). **Manual da construção industrializada**. Conceitos e etapas. Volume 1: estrutura e vedação. Brasília, 2015.
- ALBOSTAMI, A.; WU, Z.; CUNNINGHAM, L. Elastic response of cross-laminated timber panels using finite element and analytical techniques. **Canadian Journal of Civil Engineering**, Vol. 48, 2020.
- ALVES, I. C. N.; GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; SILVA, H. D. Caracterização tecnológica da madeira de *Eucalyptus benthamii* para produção de celulose kraft. **Ciência Florestal**, Vol. 21, nº. 1, pp. 167-174, 2011.
- AMORIM, S. T. A.; MANTILLA, J. N. R.; CARRASCO, E. V. M. A madeira laminada cruzada: aspectos tecnológicos, construtivos e de dimensionamento. **Revista Matéria**, Vol. 22, pp. 1-7, 2017.
- ANSI. American National Standards Institute. **ANSI/APA PRG 320-2018: Standard for Performance-Rated Cross-Laminated Timber**. Tacoma. 2018.
- ASSAN, A. E. **Método dos elementos finitos: primeiros passos**. Campinas, SP: Editora Unicamp, 1999.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro, 1988.
- _____. **NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, 1997.
- _____. **NBR 7190-1: Projeto de estruturas de madeira. Parte 1: Critérios de dimensionamento**. Rio de Janeiro, 2022.
- _____. **NBR 7190-2: Projeto de estruturas de madeira. Parte 2: Métodos de ensaio para classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira**. Rio de Janeiro, 2022.
- _____. **NBR 7190-3: Projeto de estruturas de madeira. Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas**. Rio de Janeiro, 2022.
- _____. **NBR 7190-4: Projeto de estruturas de madeira. Parte 4: Métodos de ensaio para caracterização de peças estruturais**. Rio de Janeiro, 2022.
- _____. **NBR 7190-7: Projeto de estruturas de madeira. Parte 7: Métodos de ensaio para caracterização de madeira lamelada colada cruzada estrutura**. Rio de Janeiro, 2022.
- _____. **NBR 14806: Madeira – Madeira serrada de eucalipto**. Brasil, 2002.

BENIN, C.C.; WATZLAWICK, L. F.; HILLIG, E. Propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus benthamii* sob efeito do espaçamento de plantio. **Ciência Florestal**, Vol. 27, n°. 4, pp. 1375-1384, 2017.

BLASS, H. J.; FELLMOSE, P. **Design of solid wood panels with cross layers**. In: Proceedings of the 8th world conference on timber engineering. Lahti, Finland, 2004.

BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of Wood and Wood Composites**. New York: Van Nostrand, 1982.

BUCK, D.; WANG, X. A.; HAGMAN, O.; GUSTAFSSON, A. Further development of cross-laminated timber (clt) – Mechanical tests on 45° alternating layers. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING (WCTE), 2016, Vienna, Áustria. Anais [...]. Vienna: WCTE, 2016.

BUILDING AND CONSTRUCTION AUTHORITY. **Design for manufacturing and assembly (DfMA): Mass Engineered Timber (MET)**. Guidebook, Vol. 1, 75 p., 2018.

CALIL NETO, C. **Madeira laminada colada (MLC): controle de qualidade em combinações espécie – adesivo – tratamento químico**. 2011. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

COMISIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. **COPANT 459: Acondicionamento dos corpos-de-prova**. Copant, 1972.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALIZATION (CEN). **Eurocode 5: Design of timber structure. Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings**. Brussels, 2004.

_____. **BS EN 16351 - Timber structures - Cross laminated timber - Requirements**. Brussels, 2015.

CUNHA, A. B.; BRAND, M. A.; SIMÃO, R. L.; MARTINS, S. A. et al. Determinação do rendimento de matéria-prima de *Eucalyptus benthamii* Maiden & Cabbage por meio de diferentes métodos de desdobro. **Revista Árvore**, Vol. 39, n°. 4, pp.733-741, 2015.

DINWOODIE, J. M. Timber: a review of the structure-mechanical property relationship. **Journal of Microscopy**, Vol. 104, n°. 1, pp. 3–32, 1975.

DLUBAL. Dlubal Software GmbH. **RF-Laminate Manual**. Tiefenbach: Germany, 2020.

DLUBAL. Dlubal Software GmbH. **RF-Laminate Program Description**. Tiefenbach: Germany, 2016.

FREIRE, P. **Pedagogia da Esperança: um reencontro com a Pedagogia do Oprimido**. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1992.

GAGNON, S.; KARACABEYLI, E. **CLT Handbook Canadian Edition**. FPInnovation, Port-Claire, QC, Canadá, 2019.

GONÇALEZ, J. C.; BREDÁ, L. C.; BARROS, J. F. M. MACEDO, D. G.; JANIN, G.; COSTA, A. F. C. et al. Características tecnológicas das madeiras de *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden e *Eucalyptus cloeziana* F. Muell visando ao seu aproveitamento na indústria moveleira. **Revista Ciência Florestal**, Vol. 16, nº. 3, pp. 329-341, 2006.

HARADA, M.; HAYASHI, Y.; HAYASHI, T.; KARUBE, M.; OHGAMA, T. Effect of moisture content of members on mechanical properties of timber joints. **Journal of Wood Science**, Vol. 51, pp. 282-285, 2005.

HIGA, R.C.V.; PEREIRA, J.C.D. **Usos potenciais do *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage**. Colombo: Embrapa Florestas, 2003.

IBÁ. Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório IBÁ 2022**. 2022.

KLH. KLH Massivholz GmbH. **Structural pre-analysis tables**. 2023.

KOLLMANN, F. F. P.; COTE, W. A. JR. **Principles of wood science and technology: I Solid Wood**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Vol. 1, 1968.

KREUZINGER, H. **Platten, Scheiben und Schalen**. Ein Berechnungsmodell für gängige Statikprogramme. Bauen mit Holz, Vol. 1, pp. 34–39, 1999.

LOBÃO, M. S.; LÚCIA, R. M. D.; MOREIRA, M. S. S.; GOMES, A. Caracterização das propriedades físico-mecânicas da madeira de eucalipto com diferentes densidades. **Revista Árvore**, Vol. 28, nº. 6, pp. 889-894, 2004.

LUCENA, R.; TEREZO, R.; DO VALLE, A.; RIGHEZ, J.; MOTTA, G. Confecção e análise de rigidez de painéis de madeira lamelada colada cruzada de *Pinus taeda*. **Brazilian Journal of Technology**, Vol. 2, nº. 1, pp. 439-452, 2019.

MASCIA, N. T. **Considerações a respeito da Anisotropia na Madeira**. 1991. Tese de Doutorado. Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 1991.

MASCIA, N. T.; LAHR, F. A. R. Remarks on orthotropic elastic models applied to wood. **Materials Research**, Vol. 9, nº. 3, pp. 301–310, 2006.

MILANI, A. C. **Análise de lajes planas protendidas pelo método dos elementos finitos**. 2006. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

MÜLLER, B.V. **Efeito de sistemas de desdobro na qualidade e rendimento de madeira serrada de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage**. 2013. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

NISGOSKI, S.; MUNIZ, G. I. B.; KLOCK, U. Caracterização anatômica da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage. **Ciência Florestal**, Vol. 8, n°.1, pp. 67-76, 1998.

NONES, D. L.; BRAND, M. A.; CUNHA, A. B.; CARVALHO, A. F.; WEISE, S. M. K. Determinação das propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal produzido a partir de *Eucalyptus benthamii*. **Floresta**, Vol. 45, n°. 1, pp. 57 - 64, 2015.

OLIVEIRA, G. L. **Cross Laminated Timber (CLT) no Brasil: processo construtivo e desempenho**. 2018. Tese de doutorado. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

OLIVEIRA, J. T. S.; SILVA, J. C. Variação radial da retratibilidade e densidade básica da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm. **Revista Árvore**, Vol. 27, n°. 3, pp. 381-385, 2003.

ONU. Organização das Nações Unidas. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. 2015.

PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. 4 ed. New York: Mc Graw Hill, 1980.

PEREIRA, J. C. D.; SCHAITZA, E. G.; SHIMIZU, J. Y. **Características físicas, químicas e rendimentos da destilação seca da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage**. Colombo: Embrapa Florestas, 2001.

RAYMUNDO, C. E. V. et al. **VII Botânica no Inverno 2017**. Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, 332 p., 2017.

RODRIGUES, R. A. D. **Variabilidade de propriedades físico-mecânicas em lotes de madeira serrada de eucalipto para a construção civil**. Dissertação de Mestrado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2002.

RODRIGUES, E. B.; ROBALLO, E. A.; SATURNINO, K.; SCAIN, L.; ROSSO, S. **Avaliação da massa específica de *Cedrella fissilis* em comparativo com demais espécies nativas**. In: Salão internacional de ensino, pesquisa e extensão. Bagé, Vol. 10, 2018.

SERPE, E. L. **Efeitos de diferentes dosagens de adubação no crescimento inicial de *Eucalyptus benthamii* na região sul do estado do Paraná**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, 2015.

SILVA, L. D.; HIGA, A. R.; SANTOS, G. A. Desafios do uso da madeira de *Eucalyptus benthamii* para serraria. In: Silvicultura e melhoramento genético de *Eucalyptus benthamii*. Curitiba: Editora FUPEF, pp. 123-150, 2012.

SILVA, L. D.; HIGA, A. R.; FLOSS, P. A.; CROCE, D. M.; RESENDE, M. D. V.; GARCIA, J. N.; SPIECKER, H.; KHALE, H. *Eucalyptus benthamii*: uma espécie

geneticamente promissora para produção de madeira em áreas sujeitas a ocorrência de geadas. **Revista Floresta**, Vol. 52, nº. 3, pp. 422-435, 2022.

TOMIO, G. F.; CUNHA, A. B.; BRAND, M. A.; CÓRDOVA, U. A. Rendimento e qualidade da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage de rotação longa no processo de desdobro. **Scientia Forestalis**, Vol. 49, 2021.

TURESSON, J.; BERG, S.; EKEVAD, M. Impact of board width on in-plane shear stiffness of cross-laminated timber. **Engineering Structures**, Vol. 196, 2019.

APÊNDICE A – DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO NO PLANO DOS PAINÉIS CLT

Determinou-se a resistência ao cisalhamento no plano (f_{xy}) do CLT por meio de interpolação linear, conforme a seguinte relação:

$$(ESP_1 - ESP_?) / (f_{xy1} - f_{xy?}) = (ESP_1 - ESP_0) / (f_{xy1} - f_{xy0})$$

sendo ESP a espessura da camada, em mm.

Com o f_{xy} da KLH, conforme a seguir,

Espessura da camada (ESP)	mm	19	34	45
Valor de resistência característica ao cisalhamento no plano do CLT (f_{xy})	MPa	8,4	5,5	3,9

Fonte: Adaptada de ETA 06/0138 (2017).

calculou-se a f_{xy} para os painéis com espessura de 20 mm, 30 mm e 40 mm:

$$(19 - 20) / (8,4 - f_{xy20}) = (19 - 34) / (8,4 - 5,5)$$

$$f_{xy20} = 8,20 \text{ MPa}$$

$$(19 - 30) / (8,4 - f_{xy30}) = (19 - 34) / (8,4 - 5,5)$$

$$f_{xy30} = 6,20 \text{ MPa}$$

$$(19 - 40) / (8,4 - f_{xy40}) = (19 - 34) / (8,4 - 5,5)$$

$$f_{xy40} = 4,34 \text{ MPa}$$

Com as f_{xy} da KLH determinadas e com as resistências ao cisalhamento (f_v) de 2,70 MPa, 13,07 MPa e 3,50 MPa da KLH, do *E. benthamii* e do *Pinus spp.*, respectivamente, fez-se a relação entre as propriedades e foram determinadas as f_{xy} :

- Para *E. benthamii*:

$$2,70 \text{ MPa} * f_{xy20} = 8,20 \text{ MPa} * 13,07 \text{ MPa}$$

$$f_{xy20} = 39,69 \text{ MPa (para ESP de 20mm)}$$

$$2,70 \text{ MPa} * f_{xy30} = 6,20 \text{ MPa} * 13,07 \text{ MPa}$$

$$f_{xy30} = 30,01 \text{ MPa (para ESP de 30mm)}$$

$$2,70 \text{ MPa} * f_{xy40} = 4,34 \text{ MPa} * 13,07 \text{ MPa}$$

$$f_{xy40} = 21,01 \text{ MPa (para ESP de 40mm)}$$

- Para *Pinus spp.*:

$$2,70 \text{ MPa} * f_{xy20} = 8,20 \text{ MPa} * 3,50 \text{ MPa}$$

$$f_{xy20} = 10,63 \text{ MPa (para ESP de 20mm)}$$

$$2,70 \text{ MPa} * f_{xy30} = 6,20 \text{ MPa} * 3,50 \text{ MPa}$$

$$f_{xy30} = 8,04 \text{ MPa (para ESP de 30mm)}$$

$$2,70 \text{ MPa} * f_{xy40} = 4,34 \text{ MPa} * 3,50 \text{ MPa}$$

$$f_{xy40} = 5,63 \text{ MPa (para ESP de 40mm)}$$

As resistências ao cisalhamento no plano dos painéis e suas espessuras estão resumidas na tabela a seguir:

ESPESSURA DA CAMADA (mm)	f_{xy} (MPa)		
	KLH [®]	<i>E. benthamii</i>	<i>Pinus spp.</i>
20	8,20	39,69	10,63
30	6,20	30,01	8,04
40	4,34	21,01	6,63

APÊNDICE B - CÁLCULOS DA AÇÃO DO VENTO, NBR 6123 (1988)

- I. Velocidade básica do vento (V_0): é selecionada no gráfico das isopletas da velocidade básica no Brasil (Anexo B), disponibilizada na NBR 6123 (1988). O gráfico apresenta os valores de velocidade com intervalos de 5 m/s. A V_0 escolhida, para posteriormente calcular a velocidade característica do vento, foi de 45 m/s que engloba grande parte do estado de Santa Catarina.

- II. Fator topográfico (S_1): leva em consideração a topografia do terreno. Para esse estudo, considerou-se terreno de topografia plana. Para terrenos planos ou fracamente acidentado, que é o caso desse estudo, a norma estabelece o valor de $S_1 = 1,00$.

- III. Fator de rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno (S_2): considera o efeito conjunto dessas três condições. Referente à rugosidade do terreno, esse trabalho se encaixa na categoria IV, a qual é indicada para terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona urbanizada e outras. Sobre as dimensões da edificação, ela se enquadra na Classe A, que é indicada para quando a maior dimensão horizontal ou vertical não excede 20 m. Já a altura 'z' da edificação é necessária na equação do S_2 a seguir, assim como os parâmetros 'b', 'p' e ' F_r ' que são determinados a partir da categoria e da classe na tabela de parâmetros meteorológicos, conforme Anexo C.

$$S_2 = b * F_r * (z / 10)^p$$

Como F_r é apenas correspondente à Categoria II, considera-se $F_r = 1,00$. Selecionou-se $b = 0,86$ e $p = 0,12$ e foi calculada S_2 tanto para as paredes do pavimento térreo ($z \cong 3,00$ m) quanto para as paredes do pavimento superior ($z \cong 6,00$ m), conforme a seguir:

$$S_2 (\text{Térreo}) = 0,86 * 1,00 * (3,00 / 10)^{0,12} = 0,74$$

$$S_2 (\text{Pav. Superior}) = 0,86 * 1,00 * (6,0 / 10)^{0,12} = 0,81$$

IV. Fator estatístico (S_3): leva em consideração o grau de segurança requerido e a vida útil da construção. Edificações residenciais se encaixam no Grupo 2, o qual estabelece $S_3 = 1,00$.

V. Velocidade característica do vento (V_k): foi calculada pela multiplicação da velocidade básica do vento e dos fatores S_1 , S_2 e S_3 , tanto para o pavimento térreo quanto para o pavimento superior, conforme a seguir:

$$V_k = V_0 * S_1 * S_2 * S_3$$

$$V_k (\text{Térreo}) = 45 \text{ m/s} * 1,00 * 0,74 * 1,00 = 33,30 \text{ m/s}$$

$$V_k (\text{Pav. Superior}) = 45 \text{ m/s} * 1,00 * 0,81 * 1,00 = 36,45 \text{ m/s}$$

VI. Pressão dinâmica do vento (q): é correspondente à velocidade característica V_k . Calculou-se para as paredes do térreo e do o pavimento superior por meio da seguinte expressão:

$$q = 0,613 * V_k^2$$

$$q (\text{Térreo}) = 0,613 * (33,30)^2 = 679,75 \text{ N/m}^2 \cong 68,00 \text{ kgf/m}^2$$

$$q (\text{Pav. Superior}) = 0,613 * (36,45)^2 = 814,43 \text{ N/m}^2 \cong 82,00 \text{ kgf/m}^2$$

Utilizou-se critério de arredondamento para cima.

VII. Força de arrasto (F_a): é a componente da força global na direção do vento, a qual é determinada por:

$$F_a = C_a * q * A_e$$

Onde:

C_a = coeficiente de arrasto;

A_e = área frontal efetiva da edificação.

Para edificações paralelepípedicas em ventos de alta turbulência, a NBR 6123 (1988) possibilita determinar o C_a por meio de um ábaco (Anexo D) com as relações entre as dimensões l_1/l_2 e h/l_1 , sendo l_1 o comprimento da lateral da edificação perpendicular à direção do vento, l_2 o comprimento da lateral paralela à direção do vento em simulação e h a altura da edificação. A seguir estão as relações e o C_a determinado para o vento na direção X e na direção Y.

Ao simular o vento em X, temos:

$$l_1 = 4,00 \text{ m}; l_2 = 10,00 \text{ m}; e h \cong 6,00 \text{ m.}$$

Então, calcula-se:

$$l_1/l_2 = 4,00/10,00 = 0,40$$

$$h/l_1 = 6,00/4,00 = 1,50$$

Com os valores de l_1/l_2 e h/l_1 , encontrou-se um C_a de aproximadamente 0,85.

Ao simular o vento em Y, temos:

$$l_1 = 10,00 \text{ m}; l_2 = 4,00 \text{ m}; e h \cong 6,00 \text{ m.}$$

Então, calcula-se:

$$l_1/l_2 = 10,00/4,00 = 2,50$$

$$h/l_1 = 6,00/10,00 = 0,60$$

Com os valores de l_1/l_2 e h/l_1 , encontrou-se um C_a de aproximadamente 1,05.

Após o C_a determinado, foram calculadas as forças de arrasto sem multiplicar pela área, pois elas foram posteriormente aplicadas de forma distribuída nas superfícies das modelagens:

$$F_a = C_a * q$$

$$F_a \text{ em X (Térreo)} = 0,85 * 68,00 = 57,80 \text{ kgf/m}^2$$

$$F_a \text{ em X (Pav. Superior)} = 0,85 * 82,00 = 69,70 \text{ kgf/m}^2$$

$$F_a \text{ em Y (Térreo)} = 1,05 * 68,00 = 71,40 \text{ kgf/m}^2$$

$$F_a \text{ em Y (Pav. Superior)} = 1,05 * 82,00 = 86,10 \text{ kgf/m}^2$$

APÊNDICE C – TENSÕES MÁXIMAS DO PROTÓTIPO EM CLT DE *Eucalyptus benthamii*

	PAINEL	$\sigma_{b,0}$ (MPa)	$\sigma_{b,0}$ / Resistência	$\sigma_{t/c,0}$ (MPa)	$\sigma_{t/c,0}$ / Resistência	$\sigma_{b,0+t/c,0}$ (MPa)	$\sigma_{b,0+t/c,0}$ / Resistência	$\gamma_{y'z'}$ (MPa)	$\gamma_{y'z'}$ / Resistência	$\gamma_{x'z'}$ (MPa)	$\gamma_{x'z'}$ / Resistência	$\gamma_{x'y'}$ (MPa)	$\gamma_{x'y'}$ / Resistência
PAREDES Y	1	-1,410	0,01	-3,601	0,08	-4,398	0,09	0,250	0,23	0,426	0,03	-0,995	0,03
	2	-0,727	0,01	2,542	0,04	2,653	0,05	-0,213	0,19	0,213	0,02	0,557	0,01
	3	2,439	0,02	-3,800	0,09	-4,885	0,10	0,221	0,20	-0,714	0,05	-1,414	0,04
	4	-0,889	0,01	-1,989	0,05	-2,035	0,05	-0,241	0,22	0,241	0,02	0,619	0,02
	12	-1,309	0,01	-2,705	0,06	-3,025	0,05	-0,082	0,07	0,143	0,01	-1,041	0,03
	13	-1,008	0,01	-2,113	0,05	-2,249	0,05	-0,117	0,11	-0,251	0,02	-0,736	0,02
	14	-3,014	0,03	-4,475	0,10	-5,783	0,11	0,180	0,16	-0,868	0,07	-1,742	0,04
	15	-1,036	0,01	-2,714	0,06	-3,750	0,07	-0,136	0,12	0,245	0,02	1,198	0,03
PAREDES X	5	0,672	0,01	-8,624	0,20	-8,717	0,20	-0,097	0,09	0,097	0,01	-1,727	0,04
	6	-0,392	0,00	8,405	0,15	8,458	0,15	0,072	0,07	-0,072	0,01	1,365	0,03
	7	-1,269	0,01	9,233	0,16	9,349	0,16	0,107	0,10	0,187	0,01	1,603	0,04
	16	-2,028	0,02	2,783	0,05	4,781	0,07	-0,089	0,08	0,375	0,03	-1,000	0,03
	17	-1,608	0,01	3,506	0,06	4,249	0,07	0,070	0,06	0,278	0,02	0,537	0,01
	18	-2,125	0,02	3,867	0,07	-5,868	0,11	-0,089	0,08	-0,351	0,03	0,955	0,02
LAJES	8	-0,786	0,01	2,177	0,04	2,766	0,04	0,131	0,12	-0,147	0,01	-0,476	0,02
	9	-0,788	0,01	2,191	0,04	2,782	0,04	-0,132	0,12	0,148	0,01	-0,356	0,01
	10	-1,324	0,01	3,758	0,07	4,751	0,08	-0,253	0,23	0,284	0,02	-0,718	0,02
	11	-1,518	0,01	4,284	0,08	5,423	0,09	0,376	0,34	0,415	0,03	-1,242	0,04
	19	-0,682	0,01	-2,053	0,05	-2,735	0,05	-0,160	0,15	0,173	0,01	-0,382	0,02
	20	-0,683	0,01	2,057	0,04	2,740	0,04	0,188	0,17	-0,204	0,02	0,359	0,02
	21	-1,354	0,01	4,090	0,07	5,444	0,08	-0,344	0,31	0,373	0,03	-0,934	0,05
	22	-1,354	0,01	4,066	0,07	5,420	0,08	-0,344	0,31	0,373	0,03	0,927	0,05

Legenda: $\sigma_{b,0}$ = Tensão máxima de flexão local paralela às fibras; $\sigma_{t/c,0}$ = Tensão máxima de tração/compressão paralela às fibras; $\sigma_{b,0+t/c,0}$ = Tensão máxima de flexão paralela às fibras; γ = Tensão máxima de cisalhamento no plano correspondente. Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

APÊNDICE D – TENSÕES MÁXIMAS DO PROTÓTIPO EM CLT DA KLH®

	PAINEL	$\sigma_{b,0}$ (MPa)	$\sigma_{b,0} /$ Resistência	$\sigma_{t/c,0}$ (MPa)	$\sigma_{t/c,0} /$ Resistência	$\sigma_{b,0+t/c,0}$ (MPa)	$\sigma_{b,0+t/c,0} /$ Resistência	$\gamma_{y'z'}$ (MPa)	$\gamma_{y'z'} /$ Resistência	$\gamma_{x'z'}$ (MPa)	$\gamma_{x'z'} /$ Resistência	$\gamma_{x'y'}$ (MPa)	$\gamma_{x'y'} /$ Resistência
PAREDES Y	1	-3,162	0,13	3,153	0,19	-3,579	0,15	0,262	0,22	0,526	0,19	-0,719	0,12
	2	-1,242	0,05	3,139	0,19	3,617	0,21	-0,234	0,20	-0,264	0,10	0,399	0,06
	3	-4,492	0,19	-2,650	0,11	-4,738	0,20	0,238	0,20	-0,849	0,31	-0,996	0,16
	4	-1,515	0,06	-2,786	0,12	-2,794	0,12	-0,252	0,21	0,271	0,10	0,439	0,07
	12	-1,756	0,07	2,135	0,13	-3,65	0,15	0,088	0,07	0,179	0,07	-0,709	0,11
	13	-1,480	0,06	2,521	0,15	2,605	0,16	-0,106	0,09	-0,221	0,08	-0,612	0,10
	14	-5,542	0,23	-3,223	0,13	-6,328	0,26	0,179	0,15	-1,043	0,39	-1,247	0,20
15	-2,539	0,11	-1,712	0,07	2,700	0,12	-0,125	0,10	-0,155	0,06	0,864	0,14	
PAREDES X	5	-0,643	0,03	-8,308	0,35	-8,414	0,35	-0,073	0,06	-0,074	0,03	-1,201	0,15
	6	-0,398	0,02	8,066	0,49	8,117	0,49	0,059	0,05	0,060	0,02	1,008	0,12
	7	-1,199	0,05	8,836	0,54	8,838	0,54	0,083	0,07	0,136	0,05	1,157	0,14
	16	-2,408	0,10	2,725	0,17	4,987	0,26	-0,062	0,05	0,414	0,15	-0,675	0,08
	17	-1,604	0,07	3,348	0,20	3,706	0,22	0,041	0,03	0,251	0,09	0,416	0,05
	18	-2,198	0,09	-3,806	0,16	-6,004	0,25	-0,050	0,04	-0,372	0,14	0,742	0,09
LAJES	8	-0,513	0,02	1,552	0,09	2,065	0,12	0,102	0,08	-0,110	0,04	-0,336	0,07
	9	-0,515	0,02	1,566	0,09	2,081	0,12	0,102	0,08	-0,110	0,04	-0,187	0,04
	10	-0,949	0,04	2,956	0,18	3,905	0,22	-0,193	0,16	0,209	0,08	-0,358	0,08
	11	1,104	0,05	3,425	0,21	4,529	0,25	-0,276	0,23	0,299	0,11	-0,711	0,15
	19	-0,462	0,02	-1,736	0,07	-2,197	0,09	-0,129	0,11	0,134	0,05	-0,173	0,04
	20	-0,462	0,02	1,741	0,11	2,203	0,12	-0,129	0,11	0,134	0,05	-0,194	0,04
	21	0,935	0,04	3,538	0,21	4,473	0,25	-0,233	0,19	0,242	0,09	-0,439	0,10
22	-0,935	0,04	3,512	0,21	4,447	0,25	-0,233	0,19	0,242	0,09	0,448	0,10	

Legenda: $\sigma_{b,0}$ = Tensão máxima de flexão local paralela às fibras; $\sigma_{t/c,0}$ = Tensão máxima de tração/compressão paralela às fibras; $\sigma_{b,0+t/c,0}$ = Tensão máxima de flexão paralela às fibras; γ = Tensão máxima de cisalhamento no plano correspondente. Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

APÊNDICE E – TENSÕES MÁXIMAS DO PROTÓTIPO EM CLT DE *Pinus spp.*

	PAINEL	$\sigma_{b,0}$ (MPa)	$\sigma_{b,0} /$ Resistência	$\sigma_{t/c,0}$ (MPa)	$\sigma_{t/c,0} /$ Resistência	$\sigma_{b,0+t/c,0}$ (MPa)	$\sigma_{b,0+t/c,0} /$ Resistência	$\gamma_{y'z'}$ (MPa)	$\gamma_{y'z'} /$ Resistência	$\gamma_{x'z'}$ (MPa)	$\gamma_{x'z'} /$ Resistência	$\gamma_{x'y'}$ (MPa)	$\gamma_{x'y'} /$ Resistência
PAREDES Y	1	-1,351	0,05	-2,222	0,12	-1,679	0,14	0,246	0,22	0,360	0,10	-0,655	0,08
	2	-0,804	0,03	2,178	0,09	1,876	0,10	-0,221	0,20	-0,253	0,07	0,409	0,05
	3	-2,065	0,08	-2,277	0,13	-1,544	0,15	0,222	0,20	-0,580	0,17	-0,896	0,11
	4	-0,949	0,04	-1,800	0,10	-1,819	0,10	-0,240	0,22	0,265	0,08	-0,548	0,07
	12	1,051	0,04	-1,751	0,10	-0,312	0,11	0,078	0,07	0,135	0,04	-0,812	0,10
	13	0,857	0,03	1,901	0,08	-1,358	0,08	-0,120	0,11	-0,200	0,06	-0,633	0,08
	14	-2,541	0,09	-2,780	0,15	-1,879	0,19	0,131	0,12	-0,711	0,20	-1,130	0,14
	15	-0,907	0,03	-1,582	0,09	-0,836	0,12	-0,118	0,11	-0,254	0,07	0,897	0,11
PAREDES X	5	-0,668	0,02	-7,630	0,42	-7,550	0,43	-0,079	0,07	0,079	0,02	-1,480	0,14
	6	0,318	0,01	7,387	0,32	7,338	0,32	0,059	0,05	-0,059	0,02	1,327	0,12
	7	1,267	0,05	-6,779	0,38	-5,668	0,42	0,093	0,08	0,191	0,05	1,463	0,14
	16	-1,648	0,06	-2,156	0,12	-0,081	0,16	-0,072	0,07	0,307	0,09	-0,810	0,08
	17	0,826	0,03	3,565	0,15	3,116	0,17	0,056	0,05	0,142	0,04	0,452	0,04
	18	1,695	0,06	3,726	0,16	-1,132	0,22	-0,068	0,06	-0,285	0,08	0,742	0,07
LAJES	8	0,363	0,01	-1,257	0,07	-1,620	0,08	0,098	0,09	-0,105	0,03	-0,328	0,06
	9	-0,364	0,01	-1,254	0,07	-1,618	0,08	0,099	0,09	-0,106	0,03	-0,232	0,04
	10	-0,621	0,02	-2,089	0,12	-2,710	0,14	-0,184	0,17	0,197	0,06	-0,440	0,08
	11	0,735	0,03	-2,487	0,14	-3,222	0,17	0,279	0,25	0,279	0,08	-0,717	0,13
	19	-0,252	0,01	-1,601	0,09	-1,853	0,10	-0,148	0,13	0,148	0,04	0,175	0,03
	20	0,260	0,01	-1,662	0,09	-1,922	0,10	-0,148	0,13	0,148	0,04	0,190	0,03
	21	0,456	0,02	-2,865	0,16	-3,320	0,18	-0,269	0,24	0,269	0,08	-0,416	0,07
	22	-0,456	0,02	-2,884	0,16	-3,340	0,18	-0,269	0,24	0,269	0,08	-0,433	0,08

Legenda: $\sigma_{b,0}$ = Tensão máxima de flexão local paralela às fibras; $\sigma_{t/c,0}$ = Tensão máxima de tração/compressão paralela às fibras; $\sigma_{b,0+t/c,0}$ = Tensão máxima de flexão paralela às fibras; γ = Tensão máxima de cisalhamento no plano correspondente. Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

APÊNDICE F - VOLUME E PESO DE CLT DE *E. benthamii*

SUPERF. N°	DESIGNAÇÃO DO MATERIAL	ESPESSURA (mm)	N° DE CAMADAS	ÁREA (cm ²)	VOLUME (cm ³)	PESO (kg)
1	<i>E. benthamii</i>	20.00	2	78000.00	312000.00	186.64
	<i>E. benthamii</i>	30.00	1	78000.00	234000.00	139.98
Σ		70.00	3	78000.00	546000.00	326.62
2	<i>E. benthamii</i>	20.00	2	98000.00	392000.00	234.50
	<i>E. benthamii</i>	30.00	1	98000.00	294000.00	175.87
Σ		70.00	3	98000.00	686000.00	410.37
3	<i>E. benthamii</i>	20.00	2	132000.00	528000.00	315.85
	<i>E. benthamii</i>	30.00	1	132000.00	396000.00	236.89
Σ		70.00	3	132000.00	924000.00	552.75
4	<i>E. benthamii</i>	20.00	2	177000.00	708000.00	423.53
	<i>E. benthamii</i>	30.00	1	177000.00	531000.00	317.65
Σ		70.00	3	177000.00	1239000.00	741.18
5	<i>E. benthamii</i>	20.00	3	118000.00	708000.00	423.53
Σ		60.00	3	118000.00	708000.00	423.53
6	<i>E. benthamii</i>	20.00	3	98000.00	588000.00	351.75
Σ		60.00	3	98000.00	588000.00	351.75
7	<i>E. benthamii</i>	20.00	3	118000.00	708000.00	423.53
Σ		60.00	3	118000.00	708000.00	423.53
8	<i>E. benthamii</i>	30.00	2	80000.00	480000.00	287.14
	<i>E. benthamii</i>	20.00	2	80000.00	320000.00	191.43
	<i>E. benthamii</i>	40.00	1	80000.00	320000.00	191.43
Σ		140.00	5	80000.00	1120000.00	670.00
9	<i>E. benthamii</i>	30.00	2	80000.00	480000.00	287.14
	<i>E. benthamii</i>	20.00	2	80000.00	320000.00	191.43

	<i>E. benthamii</i>	40.00	1	80000.00	320000.00	191.43
Σ		140.00	5	80000.00	1120000.00	670.00
10	<i>E. benthamii</i>	30.00	2	120000.00	720000.00	430.71
	<i>E. benthamii</i>	20.00	2	120000.00	480000.00	287.14
	<i>E. benthamii</i>	40.00	1	120000.00	480000.00	287.14
Σ		140.00	5	120000.00	1680000.00	1004.99
11	<i>E. benthamii</i>	30.00	2	100000.00	600000.00	358.93
	<i>E. benthamii</i>	20.00	2	100000.00	400000.00	239.28
	<i>E. benthamii</i>	40.00	1	100000.00	400000.00	239.28
Σ		140.00	5	100000.00	1400000.00	837.49
12	<i>E. benthamii</i>	20.00	2	118000.00	472000.00	282.36
	<i>E. benthamii</i>	30.00	1	118000.00	354000.00	211.77
Σ		70.00	3	118000.00	826000.00	494.12
13	<i>E. benthamii</i>	20.00	2	98000.00	392000.00	234.50
	<i>E. benthamii</i>	30.00	1	98000.00	294000.00	175.87
Σ		70.00	3	98000.00	686000.00	410.37
14	<i>E. benthamii</i>	20.00	2	132000.00	528000.00	315.85
	<i>E. benthamii</i>	30.00	1	132000.00	396000.00	236.89
Σ		70.00	3	132000.00	924000.00	552.75
15	<i>E. benthamii</i>	20.00	2	177000.00	708000.00	423.53
	<i>E. benthamii</i>	30.00	1	177000.00	531000.00	317.65
Σ		70.00	3	177000.00	1239000.00	741.18
16	<i>E. benthamii</i>	20.00	3	118000.00	708000.00	423.53
Σ		60.00	3	118000.00	708000.00	423.53
17	<i>E. benthamii</i>	20.00	3	98000.00	588000.00	351.75
Σ		60.00	3	98000.00	588000.00	351.75

18	<i>E. benthamii</i>	20.00	3	118000.00	708000.00	423.53
Σ		60.00	3	118000.00	708000.00	423.53
19	<i>E. benthamii</i>	40.00	3	80000.00	960000.00	574.28
	<i>E. benthamii</i>	20.00	2	80000.00	320000.00	191.43
Σ		160.00	5	80000.00	1280000.00	765.71
20	<i>E. benthamii</i>	40.00	3	80000.00	960000.00	574.28
	<i>E. benthamii</i>	20.00	2	80000.00	320000.00	191.43
Σ		160.00	5	80000.00	1280000.00	765.71
21	<i>E. benthamii</i>	40.00	3	120000.00	1440000.00	861.42
	<i>E. benthamii</i>	20.00	2	120000.00	480000.00	287.14
Σ		160.00	5	120000.00	1920000.00	1148.56
22	<i>E. benthamii</i>	40.00	3	120000.00	1440000.00	861.42
	<i>E. benthamii</i>	20.00	2	120000.00	480000.00	287.14
Σ		160.00	5	120000.00	1920000.00	1148.56
Σ Total				2458000.00	22798000.00	13637.99

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

APÊNDICE G – VOLUME E PESO DE CLT DA KLH® (ETA-06/0138)

SUPERF. Nº	DESIGNAÇÃO DO MATERIAL	ESPESSURA (mm)	Nº DE CAMADAS	ÁREA (cm ²)	VOLUME (cm ³)	PESO (kg)
1	ETA-06/0138	30.00	2	78000.00	468000.00	257.40
	ETA-06/0138	20.00	1	78000.00	156000.00	85.80
Σ		80.00	3	78000.00	624000.00	343.20
2	ETA-06/0138	30.00	2	98000.00	588000.00	323.40
	ETA-06/0138	20.00	1	98000.00	196000.00	107.80
Σ		80.00	3	98000.00	784000.00	431.20
3	ETA-06/0138	30.00	2	132000.00	792000.00	435.60
	ETA-06/0138	20.00	1	132000.00	264000.00	145.20
Σ		80.00	3	132000.00	1056000.00	580.80
4	ETA-06/0138	30.00	2	177000.00	1061999.88	584.10
	ETA-06/0138	20.00	1	177000.00	354000.00	194.70
Σ		80.00	3	177000.00	1416000.00	778.80
5	ETA-06/0138	20.00	3	118000.00	708000.00	389.40
Σ		60.00	3	118000.00	708000.00	389.40
6	ETA-06/0138	20.00	3	98000.00	588000.00	323.40
Σ		60.00	3	98000.00	588000.00	323.40

7	ETA-06/0138	20.00	3	118000.00	708000.00	389.40
Σ		60.00	3	118000.00	708000.00	389.40
8	ETA-06/0138	40.00	3	80000.00	960000.00	528.00
	ETA-06/0138	20.00	2	80000.00	320000.00	176.00
Σ		160.00	5	80000.00	1280000.00	704.00
9	ETA-06/0138	40.00	3	80000.00	960000.00	528.00
	ETA-06/0138	20.00	2	80000.00	320000.00	176.00
Σ		160.00	5	80000.00	1280000.00	704.00
10	ETA-06/0138	40.00	3	120000.00	1440000.00	792.00
	ETA-06/0138	20.00	2	120000.00	480000.00	264.00
Σ		160.00	5	120000.00	1920000.00	1056.00
11	ETA-06/0138	40.00	3	100000.00	1200000.00	660.00
	ETA-06/0138	20.00	2	100000.00	400000.00	220.00
Σ		160.00	5	100000.00	1600000.00	880.00
12	ETA-06/0138	30.00	2	118000.00	708000.00	389.40
	ETA-06/0138	20.00	1	118000.00	236000.00	129.80
Σ		80.00	3	118000.00	944000.00	519.20
13	ETA-06/0138	30.00	2	98000.00	588000.00	323.40
	ETA-06/0138	20.00	1	98000.00	196000.00	107.80

Σ		80.00	3	98000.00	784000.00	431.20
14	ETA-06/0138	30.00	2	132000.00	792000.00	435.60
	ETA-06/0138	20.00	1	132000.00	264000.00	145.20
Σ		80.00	3	132000.00	1056000.00	580.80
15	ETA-06/0138	30.00	2	177000.00	1061999.88	584.10
	ETA-06/0138	20.00	1	177000.00	354000.00	194.70
Σ		80.00	3	177000.00	1416000.00	778.80
16	ETA-06/0138	20.00	3	118000.00	708000.00	389.40
Σ		60.00	3	118000.00	708000.00	389.40
17	ETA-06/0138	20.00	3	98000.00	588000.00	323.40
Σ		60.00	3	98000.00	588000.00	323.40
18	ETA-06/0138	20.00	3	118000.00	708000.00	389.40
Σ		60.00	3	118000.00	708000.00	389.40
19	ETA-06/0138	40.00	4	80000.00	1280000.00	704.00
	ETA-06/0138	30.00	1	80000.00	240000.00	132.00
Σ		190.00	5	80000.00	1520000.00	836.00
20	ETA-06/0138	40.00	4	80000.00	1280000.00	704.00
	ETA-06/0138	30.00	1	80000.00	240000.00	132.00
Σ		190.00	5	80000.00	1520000.00	836.00

21	ETA-06/0138	40.00	4	120000.00	1920000.00	1056.00
	ETA-06/0138	30.00	1	120000.00	360000.00	198.00
Σ		190.00	5	120000.00	2280000.00	1254.00
22	ETA-06/0138	40.00	4	120000.00	1920000.00	1056.00
	ETA-06/0138	30.00	1	120000.00	360000.00	198.00
Σ		190.00	5	120000.00	2280000.00	1254.00
Σ Total				2458000.00	25768000.00	14172.40

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

APÊNDICE H – VOLUME E PESO DE CLT DE *Pinus spp.*

SUPERF. Nº	DESIGNAÇÃO DO MATERIAL	ESPESSURA (mm)	Nº DE CAMADAS	ÁREA (cm ²)	VOLUME (cm ³)	PESO (kg)
1	<i>Pinus spp.</i>	30.00	3	78000.00	702000.00	275.37
Σ		90.00	3	78000.00	702000.00	275.37
2	<i>Pinus spp.</i>	30.00	3	98000.00	882000.00	345.98
Σ		90.00	3	98000.00	882000.00	345.98
3	<i>Pinus spp.</i>	30.00	3	132000.00	1188000.00	466.02
Σ		90.00	3	132000.00	1188000.00	466.02
4	<i>Pinus spp.</i>	30.00	3	177000.00	1593000.00	624.89
Σ		90.00	3	177000.00	1593000.00	624.89
5	<i>Pinus spp.</i>	20.00	2	118000.00	472000.00	185.15
	<i>Pinus spp.</i>	20.00	1	118000.00	236000.02	92.58
Σ		60.00	3	118000.00	708000.00	277.73
6	<i>Pinus spp.</i>	20.00	2	98000.00	392000.00	153.77
	<i>Pinus spp.</i>	20.00	1	98000.00	196000.02	76.88
Σ		60.00	3	98000.00	588000.00	230.65
7	<i>Pinus spp.</i>	20.00	2	118000.00	472000.00	185.15
	<i>Pinus spp.</i>	20.00	1	118000.00	236000.02	92.58

Σ		60.00	3	118000.00	708000.00	277.73
8	<i>Pinus spp.</i>	40.00	3	80000.00	960000.00	528.00
	<i>Pinus spp.</i>	30.00	2	80000.00	480000.00	264.00
Σ		180.00	5	80000.00	1440000.00	792.00
9	<i>Pinus spp.</i>	40.00	3	80000.00	960000.00	528.00
	<i>Pinus spp.</i>	30.00	2	80000.00	480000.00	264.00
Σ		180.00	5	80000.00	1440000.00	792.00
10	<i>Pinus spp.</i>	40.00	3	120000.00	1440000.00	792.00
	<i>Pinus spp.</i>	30.00	2	120000.00	720000.00	396.00
Σ		180.00	5	120000.00	2160000.00	1188.00
11	<i>Pinus spp.</i>	40.00	3	100000.00	1200000.00	660.00
	<i>Pinus spp.</i>	30.00	2	100000.00	600000.00	330.00
Σ		180.00	5	100000.00	1800000.00	990.00
12	<i>Pinus spp.</i>	30.00	3	118000.00	1062000.00	416.59
Σ		90.00	3	118000.00	1062000.00	416.59
13	<i>Pinus spp.</i>	30.00	3	98000.00	882000.00	345.98
Σ		90.00	3	98000.00	882000.00	345.98
14	<i>Pinus spp.</i>	30.00	3	132000.00	1188000.00	466.02

Σ		90.00	3	132000.00	1188000.00	466.02
15	<i>Pinus spp.</i>	30.00	3	177000.00	1593000.00	624.89
Σ		90.00	3	177000.00	1593000.00	624.89
16	<i>Pinus spp.</i>	20.00	2	118000.00	472000.00	185.15
	<i>Pinus spp.</i>	20.00	1	118000.00	236000.02	92.58
Σ		60.00	3	118000.00	708000.00	277.73
17	<i>Pinus spp.</i>	20.00	2	98000.00	392000.00	153.77
	<i>Pinus spp.</i>	20.00	1	98000.00	196000.02	76.88
Σ		60.00	3	98000.00	588000.00	230.65
18	<i>Pinus spp.</i>	20.00	2	118000.00	472000.00	185.15
	<i>Pinus spp.</i>	20.00	1	118000.00	236000.02	92.58
Σ		60.00	3	118000.00	708000.00	277.73
19	<i>Pinus spp.</i>	30.00	4	80000.00	960000.00	376.58
	<i>Pinus spp.</i>	40.00	2	80000.00	640000.00	251.05
	<i>Pinus spp.</i>	20.00	1	80000.00	160000.00	62.76
Σ		220.00	7	80000.00	1760000.00	690.40
20	<i>Pinus spp.</i>	30.00	4	80000.00	960000.00	376.58
	<i>Pinus spp.</i>	40.00	2	80000.00	640000.00	251.05
	<i>Pinus spp.</i>	20.00	1	80000.00	160000.00	62.76
Σ		220.00	7	80000.00	1760000.00	690.40

21	<i>Pinus spp.</i>	30.00	4	120000.00	1440000.00	564.87
	<i>Pinus spp.</i>	40.00	2	120000.00	960000.00	376.58
	<i>Pinus spp.</i>	20.00	1	120000.00	240000.00	94.14
Σ		220.00	7	120000.00	2640000.00	1035.59
22	<i>Pinus spp.</i>	30.00	4	120000.00	1440000.00	564.87
	<i>Pinus spp.</i>	40.00	2	120000.00	960000.00	376.58
	<i>Pinus spp.</i>	20.00	1	120000.00	240000.00	94.14
Σ		220.00	7	120000.00	2640000.00	1035.59
Σ Total				2458000.00	28738000.00	12351.93

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

ANEXO A – ESPESSURAS PADRÃO DOS PAINÉIS FABRICADOS PELA KLH®



MADE FOR BUILDING
BUILT FOR LIVING

STANDARD PANEL TYPES

FOR THE WALL
Covering layer in the transverse panel direction TT

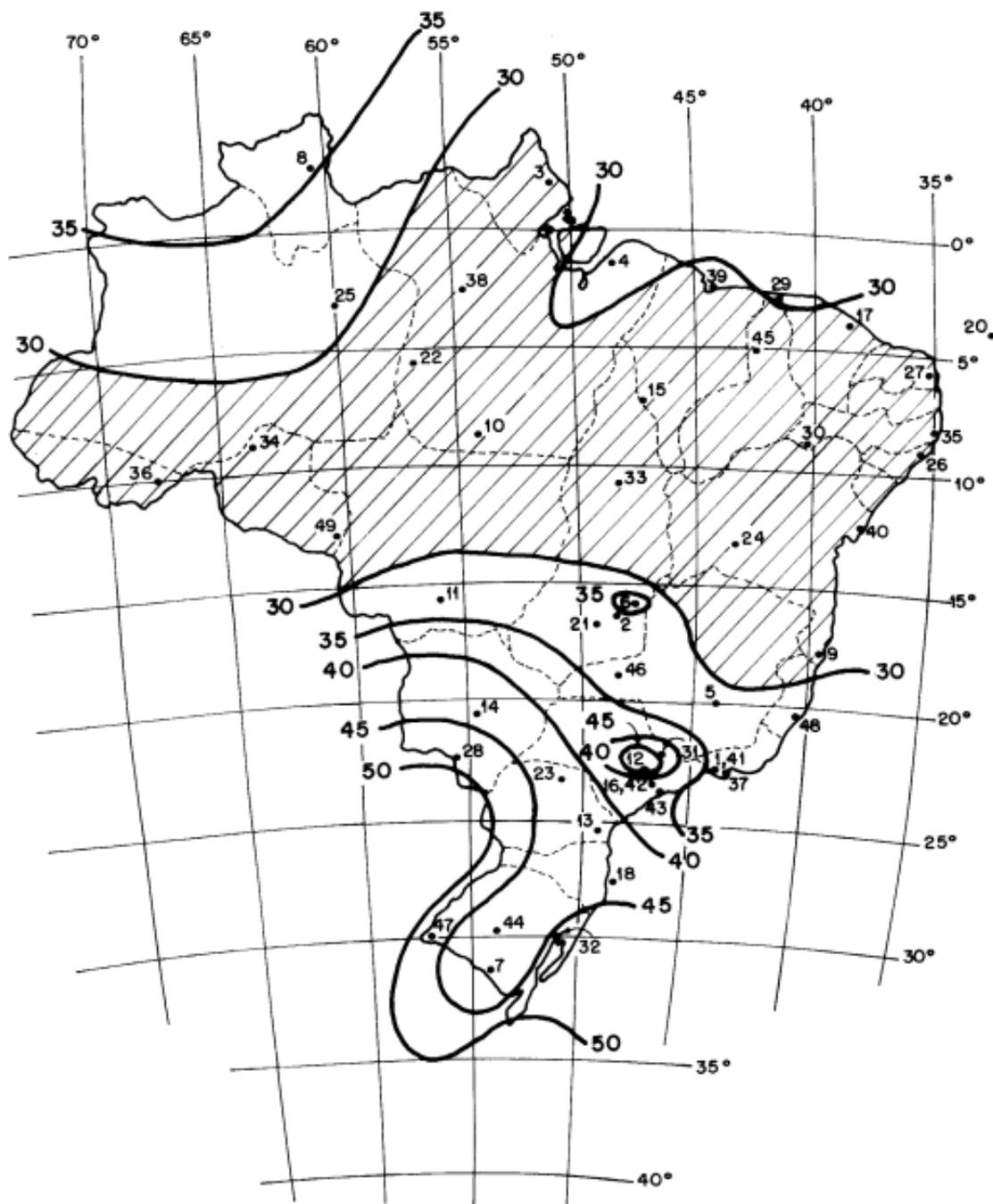
Panel Type	Panel structure / Thickness of lamellas [mm]					
KLH 60 mm 3s TT	20	20	20			
KLH 70 mm 3s TT	20	30	20			
KLH 80 mm 3s TT	30	20	30			
KLH 90 mm 3s TT	30	30	30			
KLH 100 mm 3s TT	30	40	30			
KLH 110 mm 3s TT	40	30	40			
KLH 120 mm 3s TT	40	40	40			
KLH 100 mm 5s TT	20	20	20	20	20	20
KLH 110 mm 5s TT	20	20	30	20	20	20
KLH 120 mm 5s TT	30	20	20	20	30	
KLH 130 mm 5s TT	30	20	30	20	30	
KLH 140 mm 5s TT	30	20	40	20	30	
KLH 150 mm 5s TT	30	30	30	30	30	
KLH 160 mm 5s TT	40	20	40	20	40	

FOR CEILING AND ROOF
Covering layer in the longitudinal panel direction TL

KLH 60 mm 3s TL	20	20	20			
KLH 70 mm 3s TL	20	30	20			
KLH 80 mm 3s TL	30	20	30			
KLH 90 mm 3s TL	30	30	30			
KLH 100 mm 3s TL	40	20	40			
KLH 110 mm 3s TL	40	30	40			
KLH 120 mm 3s TL	40	40	40			
KLH 100 mm 5s TL	20	20	20	20	20	20
KLH 110 mm 5s TL	20	20	30	20	20	20
KLH 120 mm 5s TL	30	20	20	20	30	
KLH 130 mm 5s TL	30	20	30	20	30	
KLH 140 mm 5s TL	40	20	20	20	40	
KLH 150 mm 5s TL	40	20	30	20	40	
KLH 160 mm 5s TL	40	20	40	20	40	
KLH 170 mm 5s TL	40	30	30	30	40	
KLH 180 mm 5s TL	40	30	40	30	40	
KLH 190 mm 5s TL	40	40	30	40	40	
KLH 200 mm 5s TL	40	40	40	40	40	
KLH 160 mm 5ss TL	30+30	40	30+30			
KLH 180 mm 7s TL	20	40	20	20	20	40
KLH 200 mm 7s TL	20	40	20	40	20	40
KLH 220 mm 7s TL	30	40	30	20	30	40
KLH 240 mm 7s TL	30	40	30	40	30	40
KLH 180 mm 7ss TL	30+30	20	20	20	30+30	
KLH 200 mm 7ss TL	30+30	20	40	20	30+30	
KLH 220 mm 7ss TL	40+40	20	20	20	40+40	
KLH 240 mm 7ss TL	40+40	20	40	20	40+40	
KLH 260 mm 7ss TL	40+40	30	40	30	40+40	
KLH 280 mm 7ss TL	40+40	40	40	40	40+40	
KLH 300 mm 8ss TL	40+40	30	40+40	30	40+40	
KLH 320 mm 8ss TL	40+40	40	40+40	40	40+40	

Fonte: KLH Massivholz GmbH (2023).

ANEXO B - ISOPLETAS DA VELOCIDADE BÁSICA DO VENTO (V_0) NO BRASIL



V_0 = em m/s

V_0 = máxima velocidade média medida sobre 3 s, que pode ser excedida em média uma vez em 50 anos, a 10 m sobre o nível do terreno em lugar aberto e plano

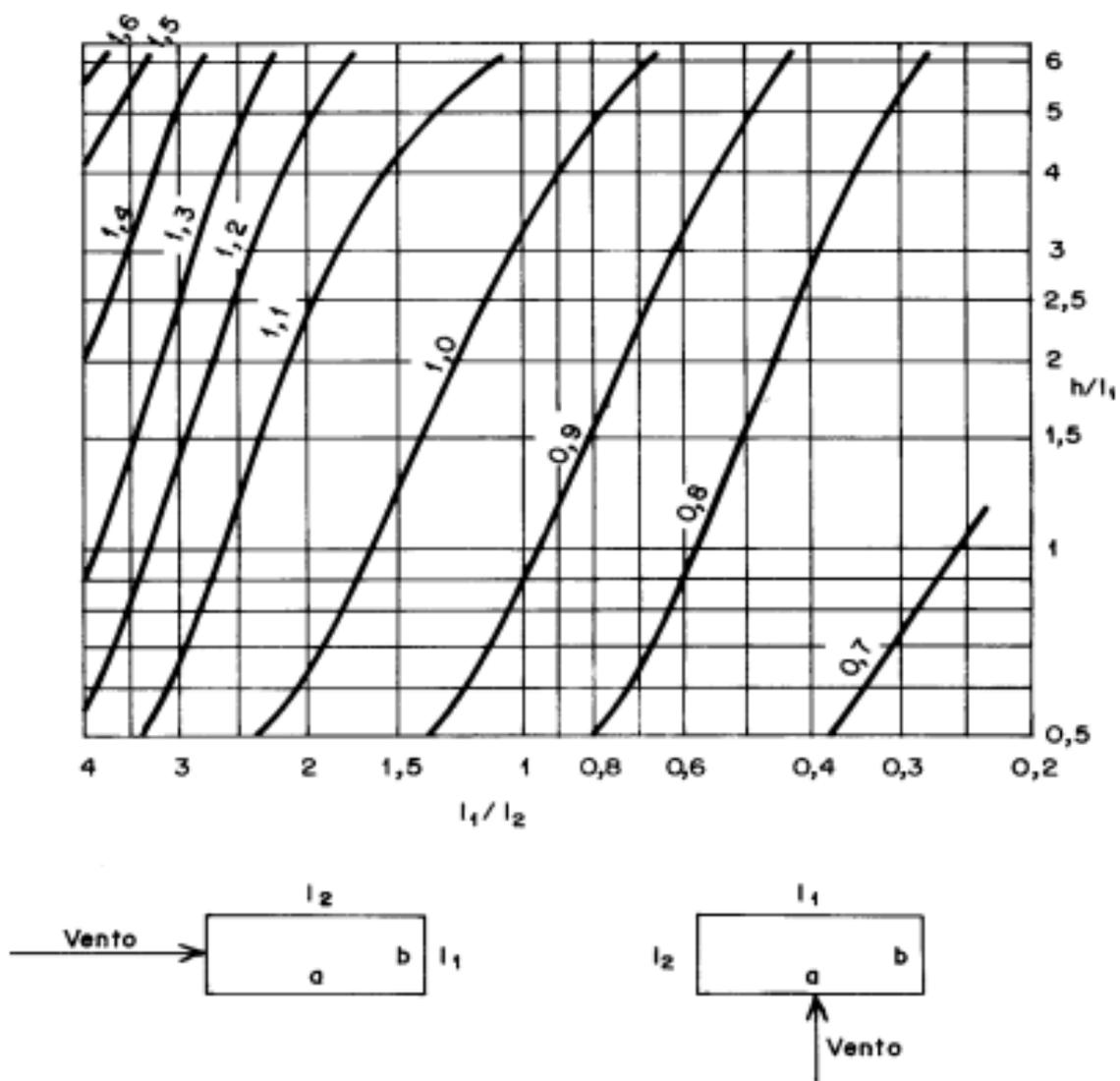
Fonte: NBR 6123 (1988, p. 6).

**ANEXO C – PARÂMETROS METEREOLÓGICOS PARA CALCULAR O
FATOR S_2**

Categoria	z_g (m)	Parâmetro	Classes		
			A	B	C
I	250	b	1,10	1,11	1,12
		p	0,06	0,065	0,07
II	300	b	1,00	1,00	1,00
		F_r	1,00	0,98	0,95
		p	0,085	0,09	0,10
III	350	b	0,94	0,94	0,93
		p	0,10	0,105	0,115
IV	420	b	0,86	0,85	0,84
		p	0,12	0,125	0,135
V	500	b	0,74	0,73	0,71
		p	0,15	0,16	0,175

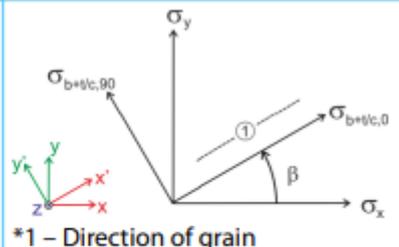
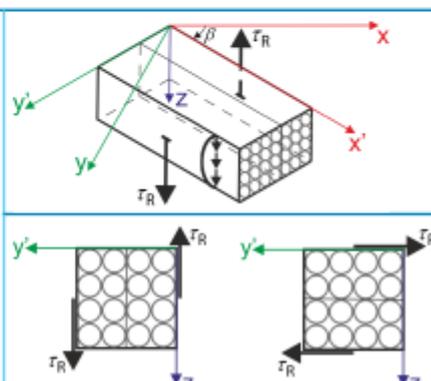
Fonte: NBR 6123 (1988, p. 9).

ANEXO D – COEFICIENTE DE ARRASTO (C_A) PARA EDIFICAÇÕES
PARALELEPÍPICAS EM VENTO DE ALTA TURBULÊNCIA



Fonte: NBR 6123 (1988, p. 24).

ANEXO E – EQUAÇÕES DE TENSÕES UTILIZADAS PELO DUBLAL RE-LAMINATE PARA CLT ORTOTRÓPICO

$\sigma_{b+t/c,0}$	Normal stress along the grain $\sigma_{b+t/c,0} = \sigma_x \cos^2 \beta + \tau_{xy} \sin 2\beta + \sigma_y \sin^2 \beta$	 *1 – Direction of grain
$\sigma_{b+t/c,90}$	Normal stress perpendicular to the grain $\sigma_{b+t/c,90} = \sigma_x \sin^2 \beta - \tau_{xy} \sin 2\beta + \sigma_y \cos^2 \beta$	
$\sigma_{t/c,0}$	Tension/compression component of the normal stress along the grain $\sigma_{t/c,0} = \frac{\sigma_{b+t/c,0(\text{top})} + \sigma_{b+t/c,0(\text{middle})} + \sigma_{b+t/c,0(\text{bottom})}}{3}$	
$\sigma_{t/c,90}$	Tension/compression component of the normal stress perpendicular to the grain $\sigma_{t/c,90} = \frac{\sigma_{b+t/c,90(\text{top})} + \sigma_{b+t/c,90(\text{middle})} + \sigma_{b+t/c,90(\text{bottom})}}{3}$	
$\sigma_{b,0}$	Bending component of the normal stress along the grain $\sigma_{b,0} = \sigma_{b+t/c,0} - \sigma_{t/c,0}$	
$\sigma_{b,90}$	Bending component of the normal stress perpendicular to the grain $\sigma_{b,90} = \sigma_{b+t/c,90} - \sigma_{t/c,90}$	
τ_R	Rolling shear stress $\tau_R = -\tau_{xz} \sin \beta + \tau_{yz} \cos \beta$	

Fonte: DLUBAL (2016, pp. 41-42).

**ANEXO F – CÁLCULO DAS RELAÇÕES DE SOLICITAÇÃO E
RESISTÊNCIA DAS TENSÕES PARA MATERIAL ORTOTRÓPICO PELO
DUBLAL RF-LAMINATE®**

Stresses [Pa]	Ratios [–]	
$\sigma_{b,0}$	$\frac{ \sigma_{b,0} }{f_{b,0,d}}$	
$\sigma_{b,90}$	$\frac{ \sigma_{b,90} }{f_{b,90,d}}$	
$\sigma_{t/c,0}$	$= \begin{cases} \frac{\sigma_{t/c,0}}{f_{t,0,d}} & \text{if } \sigma_{t/c,0} > 0 \\ \frac{ \sigma_{t/c,0} }{f_{c,0,d}} & \text{if } \sigma_{t/c,0} \leq 0 \end{cases}$	
$\sigma_{t/c,90}$	$= \begin{cases} \frac{\sigma_{t/c,90}}{f_{t,90,d}} & \text{if } \sigma_{t/c,90} > 0 \\ \frac{ \sigma_{t/c,90} }{f_{c,90,d}} & \text{if } \sigma_{t/c,90} \leq 0 \end{cases}$	
$\sigma_{b+t/c,0}$	$= \begin{cases} \frac{\sigma_{t/c,0}}{f_{t,0,d}} + \frac{ \sigma_{b,0} }{f_{b,0,d}} & \text{if } \sigma_{t/c,0} > 0 \\ \frac{ \sigma_{t/c,0} }{f_{c,0,d}} + \frac{ \sigma_{b,0} }{f_{b,0,d}} & \text{if } \sigma_{t/c,0} \leq 0 \end{cases}$	According to: ČSN 73 1702, (127), (128) DIN 1052, (127), (128) DIN EN 1995-1-1/NA, (NA.141), (NA.142)
$\sigma_{b+t/c,90}$	$= \begin{cases} \frac{\sigma_{t/c,90}}{f_{t,90,d}} + \frac{ \sigma_{b,90} }{f_{b,90,d}} & \text{if } \sigma_{t/c,90} > 0 \\ \frac{ \sigma_{t/c,90} }{f_{c,90,d}} + \frac{ \sigma_{b,90} }{f_{b,90,d}} & \text{if } \sigma_{t/c,90} \leq 0 \end{cases}$	
$\tau_{x'y'}$	$\frac{ \tau_{x'y'} }{f_{xy,d}}$	
$\tau_{y'z'}$	$\frac{ \tau_{y'z'} }{f_{R,d}}$	
$\text{int}(\tau_{x'z'} + \tau_{x'y'})$	$\frac{\tau_{x'z'}^2}{f_{v,d}^2} + \frac{\tau_{x'y'}^2}{f_{xy,d}^2}$	According to: ČSN 73 1702, (129) DIN 1052, (129) DIN EN 1995-1-1/NA, (NA.143)
$\text{int}(\sigma_{t/c,90} + \tau_{y'z'})$	$= \begin{cases} \frac{\sigma_{t/c,90}}{f_{t,90,d}} + \frac{ \tau_{y'z'} }{f_{R,d}} & \text{if } \sigma_{t/c,90} > 0 \\ \frac{ \sigma_{t/c,90} }{f_{c,90,d}} + \frac{ \tau_{y'z'} }{f_{R,d}} & \text{if } \sigma_{t/c,90} \leq 0 \end{cases}$	According to: ČSN 73 1702, (130), (131) DIN 1052, (130), (131) DIN EN 1995-1-1/NA, (NA.144), (NA.145)

Fonte: DLUBAL (2016, pp. 51-52).

