

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL – PCV

KAROLINNE MIOTTO

**ANÁLISE NUMÉRICA DO EFEITO *ROLLING SHEAR* EM
LAMELAS DE PAINÉIS DE CLT**

MARINGÁ
2023

KAROLINNE MIOTTO

**ANÁLISE NUMÉRICA DO EFEITO *ROLLING SHEAR* EM LAMELAS
DE PAINÉIS DE CLT**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Vanalli

MARINGÁ
2023

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá - PR, Brasil)

M669a

Miotto, Karolinne

Análise numérica do efeito *rolling shear* em lamelas de painéis de CLT / Karolinne Miotto. -- Maringá, PR, 2023.
93 f.: il. color., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Vanalli.

Coorientador: Prof. Dr. José Luiz Miotto.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2023.

1. Cross laminated timber (CLT). 2. Análise numérica. 3. Madeira laminada colada cruzada (MLCC). 4. Abaqus. 5. Rolling shear. I. Vanalli, Leandro, orient. II. Miotto, José Luiz, coorient. III. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

CDD 23.ed. 624.184

Marinalva Aparecida Spolon Almeida - 9/1094

KAROLINNE MIOTTO

**ANÁLISE NUMÉRICA DO EFEITO ROLLING SHEAR
EM LAMELAS DE PAINÉIS DE CLT**

Dissertação de Mestrado apresentada no dia 26/04/2023, julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL e aprovada em sua forma final, como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ

BANCA EXAMINADORA

LEANDRO

VANALLI:929472639

87

Assinado de forma digital por
LEANDRO VANALLI:92947263987
Dados: 2023.05.02 09:00:54
-03'00'

Prof. Dr. Leandro Vanalli

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Estadual de Maringá
Professor Orientador

Prof. Dr. José Luiz Miotto

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Estadual de Maringá
Professor Coorientador

Prof. Dr. Jorge Luis Nunes de Góes

Curso de Graduação em Engenharia Civil
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Carlos Humberto Martins

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Estadual de Maringá

AGRADECIMENTOS

À minha família, Marcelo e Aurora, por todo o amor, incentivo e paciência durante o período de desenvolvimento deste trabalho, especialmente no último mês.

Ao Prof. Dr. Leandro Vanalli, pela sugestão do tema que tanto me encantou e transformou a maneira como vejo as estruturas de madeira. Além disso, agradeço também por toda a disposição, pois ainda com toda a demanda exigida pelo cargo de Reitor, sempre foi solícito e me aconselhou ao longo destes anos de mestrado.

Ao Prof. Dr. José Luiz Miotto, pelos conhecimentos transmitidos acerca do tema, pela paciência e minuciosidade na correção e sugestão de melhorias na dissertação, e por todos os ensinamentos como professor, desde a graduação.

Ao Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes, por ter aceitado o convite de participar da minha banca examinadora, e por tanto contribuir com observações relevantes sobre a pesquisa.

Ao Prof. Dr. Carlos Humberto, que desde o primeiro ano da graduação é minha referência de bom professor, e que tanto me ensinou durante o mestrado, me dando a honra de participar da minha banca examinadora.

Ao Prof. Dr. Pablo Augusto Krahl, que me ensinou muito sobre o Abaqus, e sempre esteve disponível para solução de dúvidas. Obrigada também pelas palavras de incentivo.

À Prof. Dr^a. Gisele Cristina Antunes Martins, por me orientar durante o estágio à docência, me aconselhar e incentivar, e pelo exemplo de excelente professora.

Aos meus amigos, Adriano, André, Everton e Paulo por toda a ajuda, conselhos, risadas e parceria, que tornaram a caminhada mais leve.

Aos servidores Joseane e Juarez, por todo o trabalho realizado, pela convivência e pelos ótimos momentos vividos no departamento.

Aos demais servidores e professores da Universidade Estadual de Maringá, com quem convivi por muito tempo e que sempre se mostraram dispostos a me auxiliar. Aos meus outros amigos e familiares, pelas conversas sérias e não tão sérias. A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para que este trabalho fosse desenvolvido.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“When one is building a ship, one does not begin with gathering timber and cutting planks, but rather by arousing in people the yearning for the great wide sea.”

-Antoine de Saint

RESUMO

Um dos produtos industrializados de madeira de maior destaque, na atualidade, é a Madeira Lamelada Colada Cruzada (*Cross-Laminated Timber – CLT*), que consiste em painéis compostos por sucessivas camadas de lamelas de madeira coladas com diferentes orientações, geralmente ortogonais entre si. No processo de produção dos painéis, diferentes configurações geométricas das lamelas e padrões de desdobro podem ser adotadas, assim como diferentes espécies de madeira. Dado que as propriedades físicas e mecânicas da madeira dependem de diversos fatores naturais e que o material pode apresentar diferentes comportamento mecânicos, o desenvolvimento de um modelo numérico capaz de simular o comportamento real desse material torna-se relevante para estudos sobre desenvolvimento do produto CLT. Além disso, a resistência do painel ao efeito *rolling shear* acaba, por diversas vezes, apresentando-se como um critério limitante no dimensionamento dessas estruturas. Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo a análise numérica, por meio de simulações desenvolvidas no *software* Abaqus, da influência da geometria das lamelas e de seu padrão de desdobro na resistência ao *rolling shear* (f_r) de lamelas submetidas a carregamento perpendicular às fibras. Foram desenvolvidas simulações baseadas em um estudo paramétrico que avaliou a influência mecânica das seguintes características: razão largura/espessura (L/E) da lamela, distância da medula ao centro da lamela (r), proporção do lenho tardio na espessura do anel de crescimento, presença de sulcos e posição da medula em relação aos cantos da seção transversal da lamela. Foi observado que, quanto maior a razão L/E da lamela, maior sua f_r . Com relação à distância r , quanto menor ela for, maior a f_r da lamela, exceto quando a medula passa a estar contida na seção, sendo observada, neste caso, uma queda de resistência. O aumento da proporção do lenho tardio na espessura do anel de crescimento resultou em aumento da f_r , porém este aumento foi menos significativo. A presença de sulcos nas lamelas resultou em menor f_r , entretanto estes resultados devem ser observados com cautela, devido às limitações da modelagem. Por fim, o estudo relacionado a posição da medula reforçou a constatação de que a presença da medula na seção transversal da lamela resulta em menores f_r . De maneira geral, é possível concluir que o aumento da razão L/E, e uma seleção de determinados padrões de desdobro nas lamelas utilizadas para a fabricação de painéis de CLT podem aumentar a f_r dos painéis. Além disso, a consideração de propriedades mecânicas distintas dos lenhos inicial e tardio mostrou-se ser relevante na modelagem numérica deste tipo de estrutura.

Palavras-chave: CLT. *Rolling Shear*. Simulação Numérica. Abaqus.

ABSTRACT

One of the most prominent industrialized wood products nowadays is Cross-Laminated Timber (CLT), which consists of panels composed of successive timber layers glued together with different orientations, usually orthogonal to each other. Different geometric configurations of the lamellas and sawing patterns can be adopted in the panel production process, as well as different wood species. Given that the physical and mechanical properties of wood depend on several natural factors and that the material can present different mechanical behavior, the development of a numerical model able of simulating the real behavior of this material becomes relevant for studies on CLT product development. In addition, the resistance of the panel to the rolling shear effect ends up, several times, presenting itself as a limiting criterion in the design of these structures. Thus, the objective of this work is the numerical analysis, through simulations developed in the Abaqus software, of the influence of the geometry of the lamellae and their sawing pattern on the resistance to rolling shear (f_r) of lamellae subjected to loading perpendicular to the fibers. Simulations were developed based on a parametric study that evaluated the mechanical influence of the following characteristics: width/thickness ratio (w/t) of the lamella, distance from the pith to the center of the lamella (r), the proportion of latewood in the thickness of the growth ring, presence of grooves and position of the pith in relation to the corners of the cross-section of the lamella. It was observed that the greater the w/t ratio of the lamella, the greater its f_r . Regarding the distance r, the smaller it is, the greater the f_r of the lamella, except when the pith becomes contained in the section, in which case a drop in resistance is observed. Increasing the proportion of latewood in the growth ring thickness resulted in an increase in f_r , but this increase was less significant. The presence of grooves on the lamellae resulted in lower f_r , however, these results must be observed with caution, due to modeling limitations. Finally, the study related to the position of the pith reinforced the finding that the presence of the pith in the cross-section of the lamella results in smaller f_r . In general, it is possible to conclude that increasing the L/E ratio, and a selection of certain unfolding patterns in the lamellas used for the manufacture of CLT panels can increase the f_r of the panels. Furthermore, the consideration of distinct mechanical properties of earlywood and latewood proved to be relevant in the numerical modeling of this type of structure.

Key-words: CLT. Rolling Shear. Numerical Modelling. Abaqus.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Edifício em CLT	15
Figura 1.2 - Configuração de elementos construtivos em CLT.....	15
Figura 1.3 - Mecanismo de ruptura de lamela por rolling shear	17
Figura 2.1 - Edifício Mjøstårnet	21
Figura 2.2 - Construção de casas de CLT (a) um (b) dois pavimentos.....	21
Figura 2.3 - Anatomia de uma tora de madeira: (a) Definição de alguns parâmetros geométricos; (b) Algumas regiões de importância da seção transversal	22
Figura 2.4 - Seção transversal do lenho de pinus: corpo de prova radial do lenho, com destaque para lenhos inicial (LI) e tardio (LT) dos anéis de crescimento anuais	23
Figura 2.5 - Propriedades da madeira juvenil dentro do tronco e com cortes de tábua	23
Figura 2.6 - Distinção entre coníferas e folhosas	24
Figura 2.7 - Orientações de interesse para a análise das propriedades mecânicas da madeira	26
Figura 2.8 - Diagrama de tensão-deformação resultante do ensaio de compressão paralelo às fibras.....	26
Figura 2.9 - Comparação entre os diagramas de tensão-deformação para os ensaios de tração e de compressão paralela às fibras.....	27
Figura 2.10 - Diagrama tensão-deformação no ensaio de compressão normal às fibras	27
Figura 2.11 - Diagrama tensão-deformação na compressão paralela às fibras: (a) diagrama bilinear; (b) diagrama com três segmentos	29
Figura 2.12 - Interpretação gráfica do critério de escoamento de Hill com endurecimento isotrópico bilinear: (a) seção transversal no plano desviador e relação tensão deformação uniaxial; (b) evolução da superfície de escoamento	30
Figura 2.13 - Laminated Veneer Lumber – LVL	34
Figura 2.14 - Oriented Strand Board - OSB	35
Figura 2.15 - Madeira Lamelada Colada.....	36
Figura 2.16 - Configurações das camadas de MLCC	37
Figura 2.17 - Painéis de CLT submetidos a forças na direção perpendicular ao plano e na direção paralela ao plano	38
Figura 2.18 - Painéis de CLT com a flexão ocorrendo em uma e em duas direções.....	39
Figura 2.19 - Ligação das lamelas por meio de emendas do tipo finger-joints.....	40
Figura 2.20 - Aplicação do adesivo estrutural.....	41
Figura 2.21 - Espruce da Noruega	43

Figura 2.22 - Padrão de desdobro e orientação dos anéis de crescimento: a) definição e b) exemplos.....	48
Figura 2.23 - Eixos principais do tronco (a) e planos de rolling shear TL (b) e RL (c)	49
Figura 2.24 - Deformação de <i>rolling shear</i> em um painel de CLT de 5 camadas	50
Figura 2.25 - Distribuição de tensões em um elemento de CLT com as laterais das lamelas não coladas.....	51
Figura 2.26 - Distribuição de tensões em um elemento de CLT com as laterais das lamelas coladas.....	52
Figura 2.27 - Métodos de ensaio de cisalhamento.....	52
Figura 2.28 - Configuração do teste de cisalhamento modificado	53
Figura 2.29 - Configuração do ensaio de cisalhamento EN 408.	54
Figura 2.30 - (a) Elemento sólido hexaédrico linear (C3D8), (b) Elemento sólido hexaédrico quadrático (C3D20), (c) elemento tetraédrico linear (C3D4), (d) elemento tetraedro de segunda ordem (C3D10).....	56
Figura 3.10 - Fluxograma de análises	68
Figura 3.11 - Relação Largura (L) x espessura (E).....	69
Figura 3.12 - Distância da medula em relação ao centro do corpo de prova	69
Figura 3.13 - Proporção do lenho tardio em relação ao anel de crescimento.....	70
Figura 3.14 - Presença de Sucos.....	70
Figura 3.15 - Posição da medula.....	71
Figura 4.1 - Resultados das curvas Força x Deslocamento do ensaio de compressão na direção tangencial.....	71
Figura 4.2 - Resultados das curvas Força x Deslocamento do ensaio de compressão na direção radial.....	72
Figura 4.3 - Resultados das curvas Força x Deslocamento do ensaio de cisalhamento na direção tangencial.....	72
Figura 4.4 - Resultados das curvas Força x Deslocamento do ensaio de cisalhamento na direção radial.....	73
Figura 4.5 - Resultado do ensaio de validação do modelo com consideração dos lenhos na compressão radial	73
Figura 4.6 - Gráfico de força e deslocamento para diferentes razões E/L	75
Figura 4.7 - Gráfico de tensão de <i>rolling shear</i> (fr) e deslocamento para diferentes razões E/L	75

Figura 4.8 - Diagrama de força e deslocamento para diferentes valores de distância da medula ao centro da lamela (r).....	76
Figura 4.9 - Diagrama de tensão de <i>rolling shear</i> (fr) e deslocamento para diferentes valores de distância da medula ao centro da lamela (r)	77
Figura 4.10 - Diagrama de força e deslocamento para diferentes proporções da espessura do lenho tardio em relação a espessura do anel de crescimento	78
Figura 4.11 - Diagrama de tensão de <i>rolling shear</i> (fr) e deslocamento para diferentes proporções da espessura do lenho tardio em relação a espessura do anel de crescimento	78
Figura 4.12 - Diagrama de força e deslocamento para diferentes porcentagens da espessura da lamela ocupada pelo sulco.....	80
Figura 4.13 - Diagrama de tensão de <i>rolling shear</i> (fr) e deslocamento para diferentes porcentagens da espessura da lamela ocupada pelo sulco	80
Figura 4.14 - Diagrama de força e deslocamento para diferentes espessuras dos sulcos	81
Figura 4.15 - Diagrama de tensão de <i>rolling shear</i> (fr) e deslocamento para diferentes espessuras dos sulcos	82
Figura 4.16 - Diagrama de força e deslocamento para diferentes posições da medula com r = 15mm	83
Figura 4.17 - Diagrama de tensão de <i>rolling shear</i> (fr) e deslocamento para diferentes posições da medula para r = 15mm.....	83
Figura 4.18 - Diagrama de força e deslocamento para diferentes posições da medula com r = 60mm	84
Figura 4.19 - Diagrama de tensão de <i>rolling shear</i> (fr) e deslocamento para diferentes posições da medula para r = 60mm.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Propriedades elásticas da Espruce da Noruega	45
Tabela 2.2 - Coeficientes de Poisson	46
Tabela 3.1 - Propriedades mecânicas atribuídas ao MOH na modelagem numérica (MEF) ...	59
Tabela 3.2 - Coeficientes de Poisson	60
Tabela 3.3 - Propriedades elásticas atribuídas na modelagem	60
Tabela 3.4 - Valores de tensão de referência para do Critério de Hill.....	61
Tabela 4.1 - Valores da resistência ao <i>rolling shear</i> para diferentes razões espessura/largura da lamela	76
Tabela 4.2 - Valores da resistência ao <i>rolling shear</i> para diferentes distâncias da medula ao centro das lamelas.....	77
Tabela 4.3 - Valores da resistência ao <i>rolling shear</i> para diferentes proporções da espessura do lenho tardio em relação a espessura do anel de crescimento	79
Tabela 4.4 - Valores da resistência ao <i>rolling shear</i> para diferentes porcentagens da espessura da lamela ocupada pelos sulcos	81
Tabela 4.5 - Valores da resistência ao <i>rolling shear</i> para diferentes porcentagens da espessura da lamela ocupada pelos sulcos	82
Tabela 4.6 - Valores da resistência ao <i>rolling shear</i> para diferentes posições da medula.....	85

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 JUSTIFICATIVA.....	18
1.2 OBJETIVOS	19
1.2.1 Objetivo geral.....	19
1.2.2 Objetivos específicos	19
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	20
2.1 MADEIRA.....	20
2.1.1 Madeira como material de construção.....	20
2.1.2 Características anatômicas da madeira.....	22
2.1.3 Reologia.....	25
2.1.4 Critérios de Ruptura de Hill.....	29
2.1.5 Produtos de madeira engenheirada.....	33
2.2 CROSS LAMINATED TIMBER – CLT	37
2.2.1 Características do produto	37
2.2.2 Produção dos painéis de CLT	39
2.3 ESPRUCE DA NORUEGA	43
2.3.1 Propriedades físicas.....	44
2.3.2 Propriedades Elásticas	45
2.4 MÉTODOS DE CÁLCULO.....	46
2.4.1 Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas	47
2.4.2 Teoria do Compósito.....	47
2.4.3 Analogia de Cisalhamento.....	47
2.5 <i>ROLLING SHEAR</i>	48
2.5.1 Ensaio de <i>rolling shear</i>	52
2.5.2 Uso do método dos elementos finitos na engenharia e modelagem de CLT sob o efeito do <i>Rolling Shear</i>	54
3. METODOLOGIA	57

3.1 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS	58
3.1.1 Densidade	58
3.1.2 Propriedades Elásticas	59
3.2 Critério de falha	61
3.2 MODELAGEM NUMÉRICA DA MADEIRA.....	62
3.2.1 Modelo com incorporação dos lenhos inicial e tardio.....	65
3.2 ESTUDO PARAMÉTRICO	68
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	71
4.1 VALIDAÇÃO DO MODELO.....	71
4.2 ESTUDO PARAMÉTRICO	74
4.2.1 Variação da razão largura/espessura da lamela	74
4.2.2 Variação da distância da medula em relação ao centro da lamela	76
4.2.4 Variação da proporção da espessura do lenho tardio em relação a espessura do anel de crescimento.....	78
4.2.5 Variação da geometria dos sulcos	79
4.2.6 Variação da posição da medula.....	82
5 CONCLUSÃO	86
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	87
6 REFERÊNCIAS.....	89

1 INTRODUÇÃO

A madeira tem sido utilizada como matéria-prima na construção desde os primórdios da civilização, seja em sua forma bruta ou serrada (KUKLÍK, 2008). Com o avanço das técnicas construtivas, esse material foi amplamente empregado na construção de pontes, máquinas, instrumentos bélicos, residências, embarcações e demais obras de engenharia civil.

No Brasil cerca de 58% de seu território é coberto por florestas naturais e plantadas (MMA, 2017), o que o torna o segundo país com maior área de florestas do mundo, atrás apenas da Rússia. Estima-se que o país possua 485,8 milhões de hectares de florestas nativas e 10 milhões de hectares de florestas plantadas (IBGE, 2017).

No entanto, apesar desse potencial, a madeira ainda é um material subutilizado na fabricação de elementos estruturais. De acordo com dados de 2015 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), apenas 5,3% das construções do país são feitas em madeira, o que equivale a cerca de 3.592.673 unidades habitacionais, contrariando o potencial produtivo da madeira no Brasil. Fatores como baixa disponibilidade de informações técnicas sobre desempenho e indisponibilidade do material, corroboram para esse cenário.

Contudo, recentemente, com o desenvolvimento da madeira engenheirada, também conhecida pelo termo em inglês "*engineered wood*" esse cenário pode ser alterado. Esses produtos são altamente sofisticados e resultam da aplicação de tecnologias e processos produtivos avançados. Após a extração, a madeira é submetida a uma seleção criteriosa e a tratamentos e processos que aumentam sua qualidade e homogeneidade, resultando em um ganho geral em seu desempenho (BRANDNER; RINGHOFER; GRABNER, 2018). Entre esses produtos destacam-se a madeira lamelada colada (MLC), utilizada para vigas e pilares, e a madeira lamelada colada cruzada (MLCC), mais conhecida no mercado como CLT (do termo em inglês "Cross Laminated Timber"), que é utilizada na confecção de lajes e paredes estruturais.

O produto CLT tem ganhado destaque entre os produtos de madeira engenheirada, pois apresentam características físicas e mecânicas que possibilitam sua utilização em construções anteriormente limitadas a produtos de origem mineral, como aço, concreto e alvenaria (BRANDNER; RINGHOFER; GRABNER, 2018).

Um exemplo notável do uso da CLT na construção de edifícios é o "Brock Commons Tallwood House", conforme ilustra a Figura 1.1. Localizado em Vancouver, no Canadá, possui cerca de 54 metros de altura e 18 andares. Atualmente, essa estrutura de madeira é uma das

mais altas da América do Norte, e representa um exemplo marcante de como a madeira pode ser usada em construções contemporâneas.

Figura 1.1 - Edifício em CLT



Fonte: <https://www.flickr.com/photos/ubcpublicaffairs/albums/72157668526252206/>

Os painéis de CLT são constituídos de lamelas de madeira coladas, dispostas em camadas (usualmente 3, 5 ou 7 camadas), cuja orientação das lamelas é paralela na mesma camada, e perpendicular em camadas adjacentes, podendo possuir diferentes orientações, conforme ilustrado na Figura 1.2.

Figura 1.2 - Configuração de elementos construtivos em CLT



Fonte: Oliveira (2018)

De maneira geral, o desempenho estrutural dos painéis de CLT é influenciado pelo tamanho, formato, número de aberturas (como portas e janelas), e pela composição da seção transversal, considerando o número e a espessura das camadas, classificação da madeira, espécie, orientação das camadas e qualidade de produção (AUGUSTIN, 2008).

Nas últimas duas décadas, vários métodos vêm sendo adotados na Europa para a determinação das propriedades de resistência e rigidez de painéis de CLT. Os três métodos mais comumente utilizados são o Método Gama, o Método K e a Analogia de Cisalhamento (POPOVSKI et al., 2019).

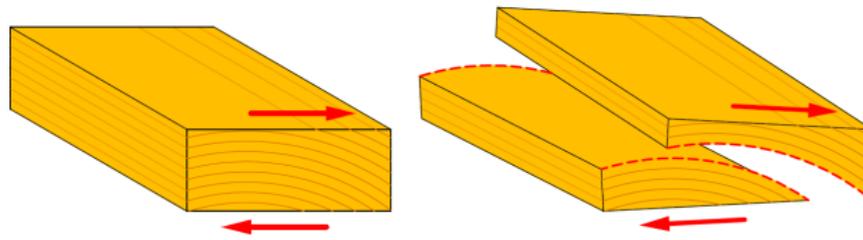
No Método Gama as propriedades de rigidez são definidas por meio da Rigidez Efetiva à Flexão (E_{Ieff}), que depende das características da seção transversal e de um fator de eficiência das conexões (γ). Enquanto, no método K as camadas são consideradas como orientadas perpendicularmente no cálculo das propriedades relacionadas à flexão. Ele se baseia na relação linear entre tensão-deformação e seções transversais planas. Além disso, considera o módulo de elasticidade na direção perpendicular às fibras.

Já a analogia de Cisalhamento considera o efeito do cisalhamento em todas as camadas do material. É comumente utilizado com a ajuda de um programa de análise de estruturas planas. A determinação destas propriedades pode ser feita utilizando-se de programas computacionais desenvolvidos especificamente para elementos de CLT, ou por meio de softwares mais gerais que aplicam o método dos elementos finitos.

Em termos de direção de carregamento, as lamelas carregadas de forma perpendicular às fibras apresentam baixa resistência à flexão, quando comparadas àquelas carregadas de forma longitudinal (AUGUSTIN, 2008). Como resultado da configuração dos painéis de CLT, algumas lamelas em regiões mais centrais dos painéis acabam sendo solicitadas perpendicularmente, o que pode ocasionar o efeito *rolling shear*, resultando em resistências relativamente baixas.

De acordo com Pereira (2014), *rolling shear* é um fenômeno que ocorre nas camadas transversais do painel durante a aplicação de carga, geralmente na flexão, devido às forças cisalhantes aplicadas no painel, mas que, nas camadas transversais, são aplicadas perpendicularmente à direção das fibras das lamelas, fazendo com que essas fibras tenham a tendência de romper as ligações e "rolar" umas sobre as outras. A Figura 1.3 ilustra esse fenômeno.

Figura 1.3 - Mecanismo de ruptura de lamela por rolling shear



Fonte: Nuernberg Junior (2020)

Conforme exposto, as tensões de cisalhamento em planos perpendiculares às fibras, chamadas de *rolling shear*, precisam ser consideradas no projeto do estado limite último e de serviço de muitos elementos estruturais de madeira. O conhecimento sobre o módulo de cisalhamento e a resistência ganhou ainda mais importância desde a invenção e o aumento do uso da CLT. Como resultado da orientação ortogonal das camadas adjacentes dentro da CLT, as tensões de cisalhamento se desenvolvem quando a CLT é submetida à flexão fora do plano.

Além disso, um fator de extrema importância a ser considerado é a presença dos lenhos da madeira. Ao longo de um ano, a árvore cresce em camadas externas e sucessivas, conhecidas como anéis de crescimento, que se sobrepõem ao redor das camadas mais antigas. Cada anel de crescimento é composto por um anel claro seguido de um anel escuro, e representa aproximadamente um ano de vida da árvore. O lenho inicial, que é formado durante o período de primavera-verão e reflete um crescimento rápido da árvore, geralmente possui maior espessura e menor densidade (fibras por mm^3) do que o lenho tardio (outono-inverno). Essa redução de densidade é acompanhada por uma diminuição na resistência mecânica.

Dessa forma, a distinção das propriedades mecânicas entre os lenhos inicial e tardio e sua modelagem são uma das principais contribuições deste trabalho. Devido ao número limitado de artigos que abordam essas diferenças até a data de elaboração deste estudo, apenas um estudo publicado por Ehrhart e Brandner (2018) realizou ensaios de tração com distinção de lenhos para a espécie em questão. Portanto, o objetivo deste estudo é aprofundar a compreensão sobre como o efeito do *rolling shear* através da modelagem dos lenhos inicial e tardio e verificar a sua influência nas propriedades de resistência e rigidez de painéis CLT quando submetidos à flexão.

1.1 JUSTIFICATIVA

A madeira é subutilizada como material estrutural no país. Embora a construção civil seja um grande consumidor desse recurso, ela é geralmente usada para fins provisórios, como em andaimes e fôrmas de escoramento para concreto, e em subsistemas da construção, como revestimentos, acabamentos e esquadrias, sendo incomum a sua utilização na estrutura principal das edificações.

De acordo com Zenid (2015) o uso de madeira proveniente de manejo sustentável ou reflorestamento na construção civil, que é um mercado com volume expressivo, pode ser visto como um instrumento de ampliação e preservação de florestas, já que tais atividades prezam pela manutenção de recursos naturais e visam ao seu uso racional. Assim, é necessária a expansão da indústria de madeira estrutural no país, para que o uso da madeira como material estrutural se torne mais popular, oferecendo vantagens construtivas e econômicas.

Um dos produtos em madeira que tem se destacado recentemente é a *Cross-Laminated Timber* (CLT), originária da Europa há cerca de duas décadas, onde vem sendo amplamente empregada. O uso da CLT como material de construção traz consigo inúmeras vantagens como, excelente desempenho estrutural, uso de matéria-prima renovável, velocidade de construção, entre outras, o que tem chamado a atenção em nível mundial. Contudo, esse produto ainda encontra resistência em relação à sua aplicação no Brasil.

Segundo Espinoza et al. (2016), em uma pesquisa conjunta realizada pela Universidade de Minnesota e pela Universidade Politécnica da Catalunha, constatou-se que o nível de conhecimento sobre o CLT entre projetistas, engenheiros e arquitetos é baixo. Conforme observado no estudo, algumas das principais barreiras para a adoção da CLT como material de construção são a incompatibilidade de normas e a baixa disponibilidade de informações técnicas, além da indisponibilidade do produto em grande parte do território brasileiro. A pesquisa destacou, ainda, a importância de se investir em mais estudos sobre o CLT, principalmente nas áreas de desempenho estrutural e de conexões, influência da variação da umidade e pesquisa de mercado.

Para que a simulação do comportamento estrutural de painéis de CLT por meio de métodos numéricos ou analíticos possa representar o comportamento real do elemento, é necessário conhecer as propriedades físicas e mecânicas da CLT e de sua matéria-prima, tais como densidade, módulo de elasticidade, modos de ruptura, além da dispersão probabilística de tais valores.

Considerando que fatores externos do ambiente de cultivo da madeira influenciam suas propriedades e que há uma carência de estudos científicos disponíveis tanto das propriedades mecânicas da madeira nacional utilizada em placas de CLT como do comportamento estrutural de tais placas produzidas industrialmente, torna-se altamente relevante a realização de pesquisas que explorem esse assunto.

Por fim, Ehrhart e Brandner (2018) defendem que as tensões cisalhantes que atuam em planos perpendiculares às fibras da madeira (também conhecidas como tensões de *rolling shear*) devem ser consideradas no dimensionamento tanto no estado limite último (ELU), quanto no estado limite de serviço (ELS). Os autores também afirmam que o conhecimento das propriedades de *rolling shear*, como sua resistência e módulo, tem se tornado cada vez mais relevante com a popularização do uso da CLT, pois é uma das principais características que afetam o desempenho mecânico dos painéis de CLT quando submetidos à flexão.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Analisar numericamente, por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF), a influência da geometria e padrões de desdobro das lamelas utilizadas para a produção de painéis de CLT na resposta de resistência ao efeito *rolling shear*.

1.2.2 Objetivos específicos

Para que o objetivo geral seja alcançado, pressupõe-se que sejam simultaneamente atendidos os seguintes objetivos específicos:

- Calibrar o modelo adotado utilizando-se de resultados numéricos e experimentais encontrados na literatura técnica atual;
- Identificar qual modelo numérico melhor simula o efeito *rolling shear* em lamelas transversais de painéis de CLT submetidas a flexão;
- Analisar a influência das características geométricas das lamelas e dos padrões de desdobro sobre a resistência ao *rolling shear*;
- Analisar a relevância de considerar as propriedades mecânicas distintas entre os lenhos inicial e tardio na análise do *rolling shear*.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 MADEIRA

2.1.1 Madeira como material de construção

A madeira é um material de construção com características singulares quando comparado a outros materiais, como o aço e o concreto, que possuem a mesma finalidade. Sua utilização apresenta benefícios sustentáveis, de conforto ambiental e de agilidade na montagem, além de apresentar altos valores de resistência mecânica. Comparada a outros materiais, a madeira é um recurso renovável e possui diversos benefícios ambientais (FALK, 2010).

A partir do início da década de 1990, o conceito de edificação sustentável (Green Building) tem se difundido, despertando uma conscientização sobre os benefícios ambientais desse tipo de construção como alternativa à construção convencional. A ênfase da edificação sustentável está na redução do consumo de energia (por meio de isolamento eficiente, ventilação natural, sistemas de ar-condicionado eficientes, entre outros) e na diminuição dos impactos negativos na saúde humana, como o controle de ventilação e umidade para minimizar a ocorrência de mofo (FALK, 2010). Nesse contexto, o uso da madeira como material de construção tem se popularizado cada vez mais, e com a ajuda de recursos tecnológicos recentes, a quantidade de produtos disponíveis no mercado aumentou, cujo desempenho mecânico, construtivo e estético tem se mostrado competitivo.

A madeira é um material que requer uma menor quantidade de energia para ser processada, desde sua colheita, fabricação, transporte, até o ponto de material ou produto pronto para o uso. Gou et al. (2017) avaliaram a CLT como uma alternativa aos materiais de construção convencionais. Eles mostraram que o CLT poderia reduzir 30% do consumo de energia durante a fase de construção e até 40% das emissões de carbono quando comparada a estrutura de concreto.

A alta relação resistência-peso e o baixo consumo energético requerido para sua produção tornam a madeira um material estrutural altamente desejável. Quando comparada às propriedades de outros materiais convencionais de construção, como o aço e o concreto, a relação resistência/massa específica da madeira é aproximadamente três vezes maior do que a do aço e dez vezes maior que a do concreto (CALIL JR; DIAS, 1997).

No município de Brumunddal, na Noruega, em março de 2019 foi concluída a construção do maior edifício de madeira reconhecido em todo o mundo até o momento. O Mjøstårnet, que pode ser visto na Figura 2.1, possui 18 andares e é suportado por pilares de

Madeira Lamelada Colada, com suas paredes e pisos constituídos de placas de *Cross Laminated Timber*. Com uma altura de 85,4 m, ele ostenta o título de maior edifício de madeira do mundo. Sua presença imponente na cidade atrai a atenção de turistas que passam pela região (BLOCK, 2019).

Figura 2.1 - Edifício Mjøstårnet



Fonte: <https://www.dezeen.com/2019/03/19/mjostarne-worlds-tallest-timber-tower-voll-arkitekter>

No Brasil, embora a quantidade de construções utilizando painéis CLT ainda seja pequena em comparação com o nível mundial, vem aumentando gradualmente desde a primeira edificação desse tipo, implantada em 2013. De acordo com Oliveira (2018), entre os anos de 2013 e 2018, foram construídas 31 edificações que utilizaram CLT de forma parcial ou total, algumas das quais podem ser vistas na Figura 2.2. No entanto, as construções atuais ainda são escassas e de dimensões reduzidas, geralmente limitadas a dois pavimentos.

Figura 2.2 - Construção de casas de CLT (a) um (b) dois pavimentos

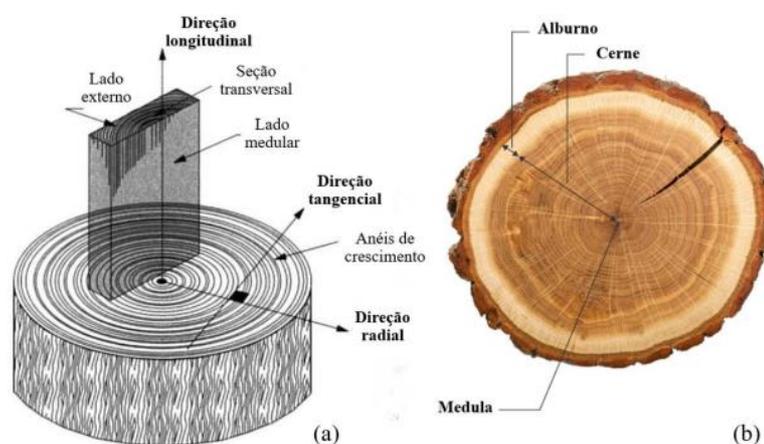


Fonte: Oliveira (2018)

2.1.2 Características anatômicas da madeira

A madeira é um composto natural de fibras que foi concebida pela natureza para resistir às cargas exercidas e fornecer o transporte eficiente de água e nutrientes. Dessa forma, a madeira serrada em escala estrutural é uma matéria-prima complexa, que apresenta desafios naturais, como nós, orientação desigual das fibras, canais de resina, entre outros (WIEDENHOEFT, 2010). A Figura 2.3 ilustra algumas definições geométricas e anatômicas relevantes relacionadas à madeira.

Figura 2.3 - Anatomia de uma tora de madeira: (a) Definição de alguns parâmetros geométricos; (b) Algumas regiões de importância da seção transversal



Fonte: Adaptado de Isaksson (2003) e Wiedenhoeft (2010)

O alburno é encarregado do transporte de líquidos e síntese bioquímica, a qual em geral é suscetível a ataques de fungos e insetos e possui densidade reduzida. A parte interna, de cor mais escura da Figura 2.3b, chama-se cerne, e caracteriza-se por carecer de células vivas e ser a porção que majoritariamente fornece sustentação à árvore.

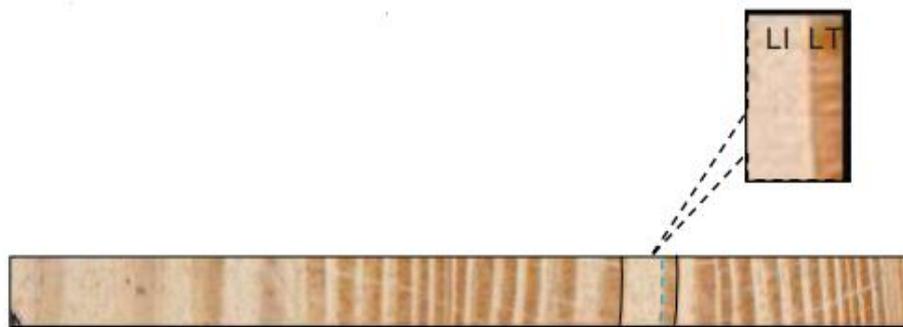
O cerne possui maior densidade, menor umidade e permeabilidade que o alburno, além de ser mais resistente a ataques biológicos devido a sua maior quantidade de extrativos tóxicos. Em algumas espécies, como o *Pinus elliotii*, nem sempre é evidente a presença de cerne, porém seu crescimento inicia aproximadamente a partir dos 14 anos de idade da árvore (DE SOUZA LIMA, 2013). Por último, aproximadamente no centro do tronco encontra-se o resquício de crescimento da árvore antes da madeira ser produzida, denominado medula, a qual possui estrutura semiesponjosa e resistência mecânica muito baixa (WIEDENHOEFT, 2010).

Ao longo de um ano, a árvore cresce em camadas externas e sucessivas, chamadas anéis de crescimento, que vão se sobrepondo ao redor das camadas mais antigas. Um anel de

crescimento é constituído por um anel “claro” mais um anel “escuro” adjacente, e representa aproximadamente um ano de vida da árvore (KRETSCHMANN, 2010)

O lenho inicial (porção clara) consiste na madeira formada no período de primavera-verão e, refletindo um crescimento rápido da árvore, possui geralmente maior espessura e menor densidade (fibras por mm^3) que o lenho tardio (porção mais escura), formada no período de outono-inverno (Figura 2.4). Essa redução de densidade é acompanhada por uma redução de resistência mecânica.

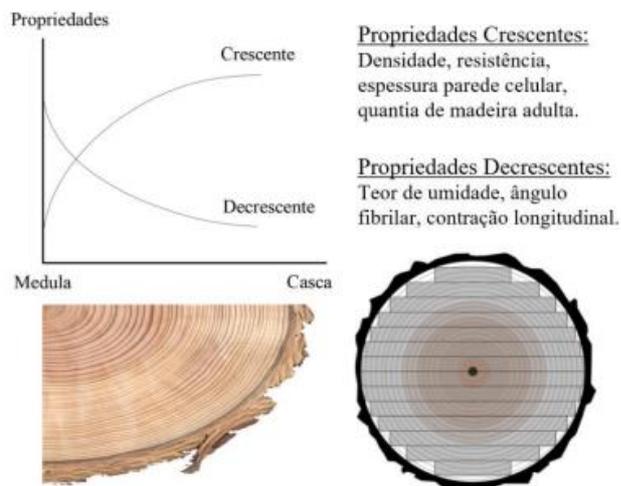
Figura 2.4 - Seção transversal do lenho de pinus: corpo de prova radial do lenho, com destaque para lenhos inicial (LI) e tardio (LT) dos anéis de crescimento anuais



Fonte: Zegarra (2011)

Durante aproximadamente os primeiros 5 – 20 anos de vida da árvore, a madeira é chamada de juvenil, cujas características físicas e anatômicas são consideravelmente diferentes da adulta, conforme ilustrado na Figura 2.5. Logo, a forma em que são cortadas as peças do tronco tem grande importância no seu desempenho estrutural futuro (KRETSCHMANN, 2010).

Figura 2.5 - Propriedades da madeira juvenil dentro do tronco e com cortes de tábua

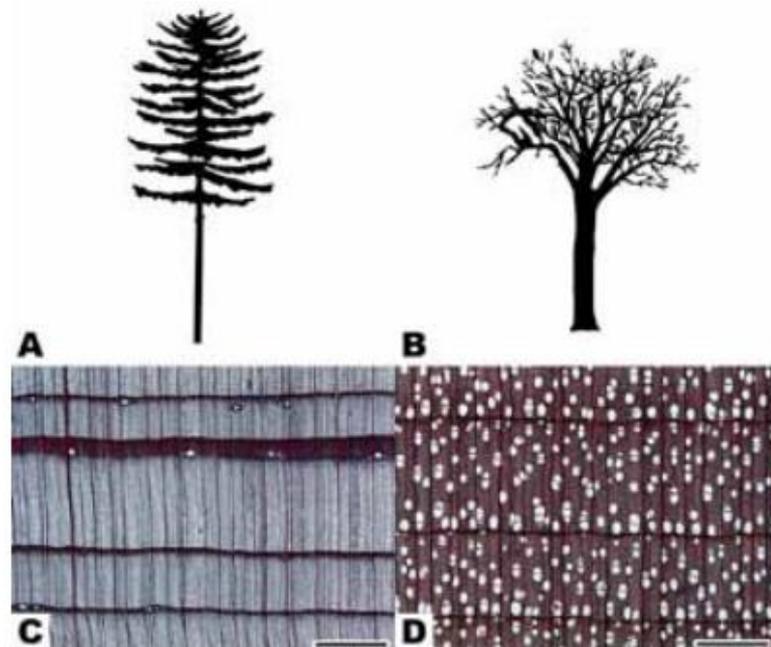


Fonte: Adaptado de Kretschmann (2010)

As coníferas e as folhosas (dicotiledôneas) são os dois grandes grupos de vegetais produtores de madeira. Dependendo desta classificação de grupo, as madeiras apresentam composição celular distinta. As coníferas possuem uma estrutura básica mais simples, por possuírem apenas dois tipos de células, sendo que a estrutura intracelular destas apresenta variação relativamente baixa. Por outro lado, as folhosas apresentam maior complexidade estrutural por possuírem um número maior de tipos de células básicas, e uma variabilidade muito maior de características intracelulares (KRETSCHMANN, 2010).

A principal distinção entre estas duas classificações gerais de madeira é que as folhosas possuem um tipo de célula característica chamada de vaso (ou poro), tipo este que não é observado nas coníferas. A Figura 2.6 é dividida em A, B, C e D, em que A representa a forma geral de uma conífera genérica, B representa a forma geral de uma folhosa genérica, C é a imagem da seção transversal de uma *Pseudotsuga mensiezii*, uma típica conífera, e D é a imagem da seção transversal de uma *Betula allegheniensis*, uma típica folhosa. As muitas estruturas brancas arredondadas são vasos poros, estruturas características às folhosas.

Figura 2.6 - Distinção entre coníferas e folhosas



Fonte: Wiedenhoef (2010)

A principal distinção entre estas duas classificações gerais de madeira é que as folhosas possuem um tipo de célula característica chamada de vaso (ou poro), tipo este que não é observado nas coníferas. A Figura 2.6 é dividida em A, B, C e D, em que A representa a forma geral de uma conífera genérica, B representa a forma geral de uma folhosa genérica, C é a

imagem da seção transversal de uma *Pseudotsuga mensiezii*, uma típica conífera, e D é a imagem da seção transversal de uma *Betula allegheniensis*, uma típica folhosa. As muitas estruturas brancas arredondadas são vasos poros, estruturas características às folhosas.

2.1.3 Reologia

Ao abordar os conceitos que dizem respeito ao comportamento mecânico da madeira, pode-se considerá-la como um material de comportamento elástico. Isso significa que a proporção com que o material se deforma diante da aplicação de uma carga permanece constante ao longo do tempo.

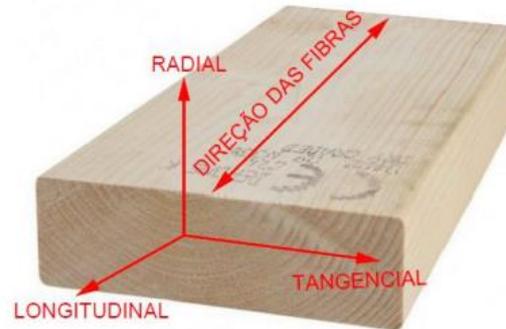
No entanto, é importante ressaltar que o comportamento real da madeira e de compósitos de madeira não apresenta uma elasticidade constante. Ao aplicar uma carga, ocorre uma deformação inicialmente elástica. A magnitude dessa deformação adicional depende de uma ampla variedade de características básicas, tais como: o alinhamento aos eixos ortotrópicos, a magnitude e o tipo de tensões, a variação e/ou duração do carregamento, a umidade da madeira e a temperatura (BODIG; JAYNE, 1993).

De acordo com Bodig e Jayne (1993), a resistência mecânica da madeira é determinada pela capacidade do material de suportar cargas quando submetido à compressão, flexão ou tração. Isso pode resultar em deformações elásticas (mudanças instantâneas e reversíveis na forma) ou deformações plásticas (mudanças irreversíveis).

Geralmente os testes de qualificação de madeiras consistem na obtenção de dados correspondentes ao carregamento lento e contínuo, aplicada a amostras de “pequenas dimensões” preparadas especialmente para os ensaios. Os ensaios normalmente realizados para determinação das características mecânicas de resistência e rigidez são executados com a aplicação de carregamentos num intervalo de tempo relativamente curto, de, no máximo, 5 minutos (USDA, 1999). Segundo Ballarin et al. (1998), esta situação difere sensivelmente da enfrentada pelos elementos estruturais em serviço, visto que, para muitos deles, o carregamento atuará durante toda a sua vida útil.

As propriedades mecânicas da madeira são influenciadas por uma série de fatores, sendo a orientação das fibras uma das mais relevantes. Estas propriedades variam de acordo com sua posição em relação à direção das fibras, sendo determinadas na direção paralela às fibras (longitudinal, 0°) e perpendicular ou normal às fibras (radial, tangencial, 90°). A Figura 2.7 ilustra as direções de interesse para a análise das propriedades mecânicas da madeira.

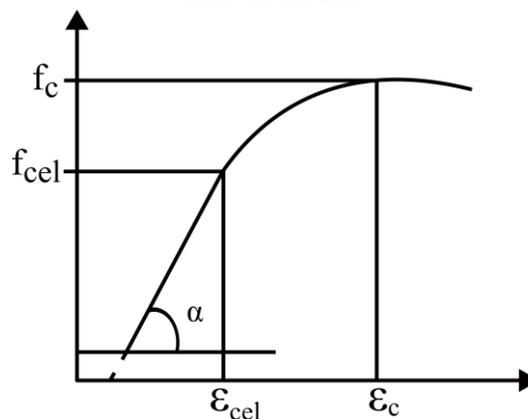
Figura 2.7 - Orientações de interesse para a análise das propriedades mecânicas da madeira



Fonte: Adaptado de MP Moran (2020)

Analisando o diagrama de tensão-deformação de um corpo de prova ensaiado sob compressão paralela às fibras, observa-se um comportamento elástico linear até a tensão limite de proporcionalidade (f_{cel}) (PFEIL; PFEIL, 2003). Os autores afirmam ainda que, a partir desse ponto, observa-se um comportamento não-linear associado à flambagem das fibras de madeira, até se atingir a resistência à compressão (f_c), tensão correspondente à máxima força aplicada ao corpo de prova durante o ensaio. A Figura 2.8 ilustra o diagrama típico de tensão-deformação de um corpo de prova submetido à compressão paralela às fibras.

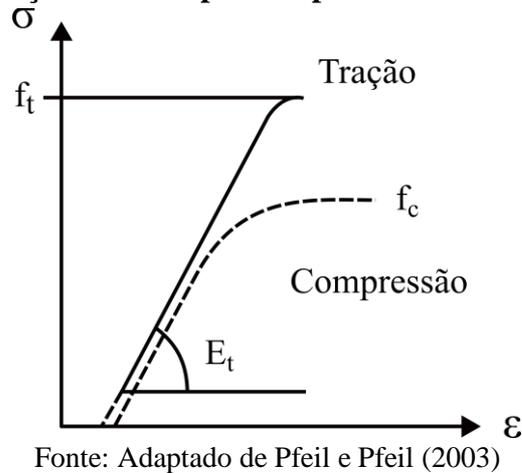
Figura 2.8 - Diagrama de tensão-deformação resultante do ensaio de compressão paralelo às fibras



Fonte: Adaptado de Pfeil e Pfeil (2003)

Segundo Pfeil e Pfeil (2003), o comportamento da madeira à tração paralela às fibras é caracterizado pelo regime linear até tensões bem próximas às de ruptura. De acordo com Calil Júnior, Lahr e Dias (2003), a ruptura nesse caso se deve ao deslizamento entre as fibras ou ainda à ruptura de suas paredes. A Figura 2.9 ilustra uma comparação entre os diagramas de tensão e deformação para os ensaios de tração e de compressão paralela às fibras.

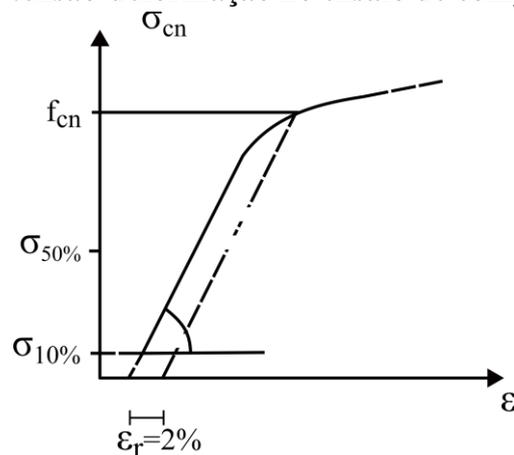
Figura 2.9 - Comparação entre os diagramas de tensão-deformação para os ensaios de tração e de compressão paralela às fibras



Como se pode observar, as tensões de tração se mostram mais elevadas, embora apresentem menores deformações. Desse modo, Pfeil e Pfeil (2003) consideram o comportamento na tração paralela às fibras como sendo frágil, ao passo em que classificam o comportamento na compressão paralela às fibras como dúctil. Quando se trata de compressão normal às fibras da madeira, observa-se uma resistência consideravelmente menor, cerca de 25% da resistência na direção paralela das fibras (CALIL JÚNIOR; LAHR; DIAS, 2003). De acordo com Pfeil e Pfeil (2003), isso ocorre porque as fibras são ocas e, quando comprimidas perpendicularmente, são esmagadas prematuramente, o que leva a uma deformação excessiva representada por um patamar no diagrama tensão-deformação.

Enquanto, no ensaio de compressão normal às fibras, a resistência é determinada pelo critério de deformação excessiva, sendo igual à tensão correspondente a uma deformação residual ϵ_r igual a 2% (Pfeil e Pfeil, 2003). A Figura 2.10 ilustra o diagrama tensão-deformação para a compressão normal às fibras.

Figura 2.10 - Diagrama tensão-deformação no ensaio de compressão normal às fibras



Fonte: Adaptado de Pfeil e Pfeil (2003)

A resistência da madeira à tração na direção normal às fibras é muito baixa, pois os esforços atuam no sentido de separá-las, havendo pequenas deformações (CALIL JÚNIOR; LAHR; DIAS, 2003). Nessa direção a resistência à tração depende basicamente da resistência da lignina como ligante entre as fibras, que pode variar de 31,4% a 27,4% para o Espruce da Noruega (WADENBÄCK et al 2004).

Conforme Calil Júnior, Lahr e Dias (2003), a direção das tensões de cisalhamento é um fator crucial que influencia a resistência da madeira. Os autores afirmam que, quando o cisalhamento ocorre no plano RT – radial/tangencial, a madeira apresenta uma alta resistência devido à ruptura causada pelo cisalhamento desses elementos. Além disso, os autores esclarecem que, nessa situação, é possível que a peça apresente problemas de resistência na compressão normal antes mesmo de sofrer rompimento por cisalhamento.

Quando as tensões de cisalhamento atuam nos planos LR - longitudinal/radial e LT - longitudinal/tangencial, Pfeil e Pfeil (2003) explicam que o mecanismo de ruptura envolve o deslizamento entre fibras adjacentes à seção de corte. Calil Júnior, Lahr e Dias (2003) complementam que, quando as tensões atuam nos planos LR e LT, também pode ocorrer o chamado *rolling shear*, que se dá pelo rolamento das fibras uma sobre as outras.

Quando a madeira é solicitada à flexão simples, ocorrem diferentes tipos de tensões: compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras, cisalhamento horizontal e, nas regiões dos apoios, compressão normal às fibras (CALIL JÚNIOR; LAHR; DIAS, 2003).

No caso da solicitação por flexão, quando as tensões normais de compressão atuantes ultrapassam o limite de proporcionalidade, a região comprimida começa a ser plastificada. Assim, a ruptura na peça é iniciada por flambagem local das fibras mais comprimidas, provocando o rebaixamento da linha neutra e aumenta as tensões nas fibras tracionadas. Consequentemente, a peça se rompe por tração nas fibras inferiores. Adicionalmente, o módulo de elasticidade E_M , obtido por meio do ensaio de flexão simples, é inferior ao valor de E_{c0} , obtido por meio do ensaio de compressão paralela, em decorrência do comportamento não homogêneo da madeira (PFEIL; PFEIL, 2003).

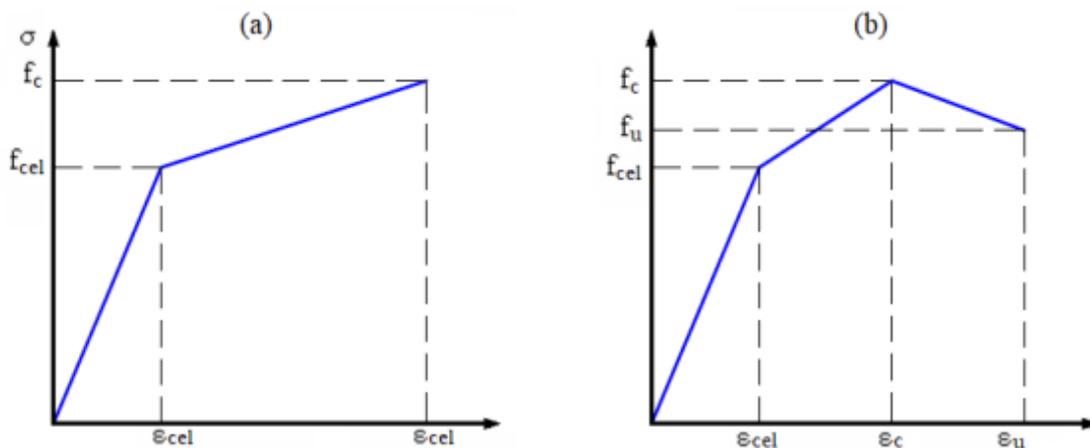
Para que se possa representar o comportamento reológico da madeira, diferentes abordagens podem ser adotadas. Miotto (2009) e Furtmüller, Giger e Adam (2008) optaram por dividir o problema em duas partes, em um diagrama bilinear. Nesse caso, a primeira parte do problema corresponde ao comportamento elástico-linear, até ser atingida uma tensão de escoamento.

mento (falha), seguida então pelo comportamento plástico. No regime elástico-linear, são atribuídas as propriedades mecânicas para cada uma das três direções principais do material. No segundo trecho, é atribuída uma tensão para o início das deformações plásticas e outra tensão, superior, associada a deformações específicas mais elevadas. As tensões de escoamento para cada uma das direções e as interações entre elas são definidas a partir de um critério de falha.

Outra abordagem é a utilização de um diagrama de tensão-deformação formado por três segmentos. Nesse caso, o primeiro segmento representa o comportamento elástico-linear, até o ponto de escoamento. A partir daí, o comportamento plástico é representado por duas outras tensões, sendo uma mais elevada, representando a tensão máxima obtida no ensaio de compressão (f_c), e outra, de valor inferior, representando a tensão em que de fato ocorre a ruptura do material (f_u).

Para essas tensões são atribuídas deformações específicas ϵ_c e ϵ_u , respectivamente. Do mesmo modo que na análise por meio do diagrama bilinear, nesse caso são atribuídas as propriedades do material correspondentes ao regime elástico para cada uma das três direções, e as tensões de escoamento em cada direção são definidas por meio do uso de um critério de falha. A Figura 2.11 ilustra o diagrama bilinear e trilinear, com as tensões e deformações específicas atribuídas para uma das direções do material: a compressão paralela às fibras.

Figura 2.11 - Diagrama tensão-deformação na compressão paralela às fibras: (a) diagrama bilinear; (b) diagrama com três segmentos



Fonte: Nuernberg Junior (2020)

2.1.4 Critérios de Ruptura de Hill

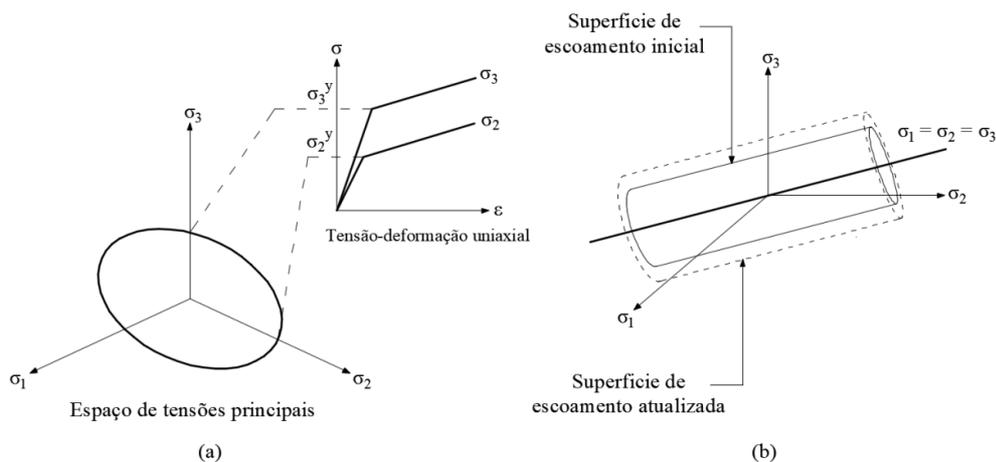
Uma das propriedades mecânicas mais relevantes dos materiais de construção é o valor de tensão última, representando a tensão em que ocorre a falha (ruptura) do material. Em alguns

casos, a falha pode ser definida como um valor de deformação excessiva. Em termos de dimensionamento de peças estruturais, são estes valores que projetistas utilizam como baliza para determinar dimensões econômicas.

Um critério de falha perfeitamente adequado para a madeira tem sido objeto de uma série de estudos. Seu comportamento ortotrópico e as diferentes resistências à tração e à compressão dificultam a adoção de um critério de falha que represente precisamente seu comportamento, sem falar na influência dos anéis de crescimento, da umidade e de defeitos naturais em seu desempenho. Cabrero et al. (2012) avaliaram a capacidade de diferentes critérios preverem a falha de corpos de prova de madeira submetidos a ensaios biaxiais, sem conseguir encontrar um critério adequado para todas as combinações de esforços.

Portanto, ao analisar materiais ortotrópicos, é necessário adotar um critério de ruptura adequado que possa prever com maior precisão as propriedades do material. Nesse sentido, um critério clássico amplamente utilizado é o proposto por Hill (1948). A superfície quadrática desse critério quando projetada no espaço de tensões principais, apresenta-se como um cilindro elíptico. O seu eixo hidrostático de tensões coincide com o eixo de Von Mises. No entanto, devido à anisotropia, a seção transversal do cilindro é elíptica, e não mais circular. Dessa forma, após o escoamento, as tensões uniaxiais evoluem de maneira bilinear, com a mesma tangente plástica, como ilustrado na Figura 2.12.

Figura 2.12 - Interpretação gráfica do critério de escoamento de Hill com endurecimento isotrópico bilinear: (a) seção transversal no plano desviador e relação tensão deformação uniaxial; (b) evolução da superfície de escoamento



Fonte: Adaptado de ANSYS, INC (2019)

Dassault Systèmes (2014), no Analysis User's Guide do software Abaqus, apresenta o equacionamento do Critério de Hill conforme a Equação (1).

$$(\sigma) = \sqrt{F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2} \quad (1)$$

Em que cada valor de σ_{ij} corresponde a uma tensão atuante no sólido e F, G, H, L, M e N são constantes obtidas por ensaios do material em diferentes direções, conforme mostrado nas Equações (2), (3), (4), (5), (6), (7) e (8), respectivamente.

$$F = \frac{(\sigma^0)^2}{2} \left(\frac{1}{\bar{\sigma}_{22}^2} + \frac{1}{\bar{\sigma}_{33}^2} - \frac{1}{\bar{\sigma}_{11}^2} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{22}^2} + \frac{1}{R_{33}^2} - \frac{1}{\bar{R}_{11}^2} \right) \quad (2)$$

$$G = \frac{(\sigma^0)^2}{2} \left(\frac{1}{\bar{\sigma}_{33}^2} + \frac{1}{\bar{\sigma}_{11}^2} - \frac{1}{\bar{\sigma}_{22}^2} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{33}^2} + \frac{1}{R_{11}^2} - \frac{1}{\bar{R}_{22}^2} \right) \quad (3)$$

$$H = \frac{(\sigma^0)^2}{2} \left(\frac{1}{\bar{\sigma}_{11}^2} + \frac{1}{\bar{\sigma}_{22}^2} - \frac{1}{\bar{\sigma}_{33}^2} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{11}^2} + \frac{1}{R_{22}^2} - \frac{1}{\bar{R}_{33}^2} \right) \quad (4)$$

$$L = \frac{3}{2} \left(\frac{\tau^0}{\bar{\sigma}_{23}^2} \right)^2 = \frac{3}{2R_{23}^2} \quad (5)$$

$$M = \frac{3}{2} \left(\frac{\tau^0}{\bar{\sigma}_{13}^2} \right)^2 = \frac{3}{2R_{13}^2} \quad (6)$$

$$N = \frac{3}{2} \left(\frac{\tau^0}{\bar{\sigma}_{12}^2} \right)^2 = \frac{3}{2R_{12}^2} \quad (7)$$

$$\tau^0 = \frac{\sigma^0}{\sqrt{3}} \quad (8)$$

Na qual, cada valor de $\bar{\sigma}_{ij}$ corresponde a uma tensão de escoamento; σ^0 é a tensão de escoamento de referência e τ^0 é uma tensão de cisalhamento de referência, a partir da qual são calculadas as variáveis inseridas no software Abaqus, respectivamente, representadas nas Equações (9), (10), (11), (12), (13) e (14).

$$R_{11} = \frac{\bar{\sigma}_{11}}{\sigma^0} \quad (9)$$

$$R_{22} = \frac{\bar{\sigma}_{22}}{\sigma^0} \quad (10)$$

$$R_{33} = \frac{\bar{\sigma}_{33}}{\sigma^0} \quad (11)$$

$$R_{12} = \frac{\bar{\sigma}_{12}}{\tau^0} \quad (12)$$

$$R_{13} = \frac{\bar{\sigma}_{13}}{\tau^0} \quad (13)$$

$$R_{23} = \frac{\bar{\sigma}_{23}}{\tau^0} \quad (14)$$

Originalmente esse critério foi formulado para descrever o comportamento macroscópico anisotrópico de chapas de aço laminadas a frio. Essas chapas apresentam uma textura e uma orientação cristalográfica preferencial, resultante do processo de laminação, que as afasta da isotropia natural do aço. Da mesma forma, devido à constituição fibrosa e direcional da madeira, diversos autores empregam esse critério para modelar numericamente o comportamento à flexão e ao embutimento de elementos de madeira serrada e engenheirada.

Miotto (2009) adotou o Critério de Hill para realizar suas simulações numéricas em elementos mistos de madeira lamelada colada e concreto. Furtmüller, Giger e Adam (2018) também utilizaram esse critério para realizar simulações de painéis de CLT.

He, Sun e Li (2018) adotaram o critério de Hill a fim de analisar as propriedades de flexão fora do plano e propriedades compressivas de painéis CLT a partir de investigação experimental e numérica. Navaratnam et al (2021) usou as constantes de Hill (F, G, H, L, M e N) para determinar o modo de falha de CLT em uma estrutura composta. Já Wu et al. (2022) utilizam o critério de Hill na análise de um modelo numérico 3D para estudar o comportamento de flambagem do CLT submetido a carregamento axial.

Furtmüller, Giger e Adam (2018) apontam uma das limitações desse critério, que é o fato de não haver distinção entre as propriedades relacionadas à tração e à compressão em cada uma das direções. Entretanto, destacam que essa limitação é aceitável, tendo em vista que as diferenças relacionadas à ortotropia da madeira são mais significativas que as diferenças relacionadas à tração e compressão.

Mendes (2020) empregou o método de Hill para investigar o comportamento estrutural de painéis de CLT submetidos a cargas perpendiculares ao seu plano. O autor examinou independentemente a flexão fora do plano, em regime elástico, e a compressão perpendicular ao plano, em regime elastoplástico. De acordo com o autor, a combinação do critério de Hill com o endurecimento isotrópico bilinear se mostrou eficaz na determinação das propriedades estruturais relevantes para o projeto, consoante a norma. Desse modo, o critério de falha revelou-se útil para avaliar a integridade estrutural das camadas do painel CLT sob diferentes níveis de carregamento.

2.1.5 Produtos de madeira engenheirada

Por muito tempo, a madeira foi utilizada como material estrutural principalmente em sistemas de pórticos, treliças e estruturas leves. Nessas estruturas, elementos de madeira serrada são empregados como elementos estruturais, porém, com vãos limitados devido à sua fabricação. O interesse por estruturas de madeira foi renovado na década de 1960, quando o mercado percebeu a capacidade real de produção em larga escala de madeira engenheirada (JESKA; PASCHA, 2014).

O termo Produto de Madeira Engenheira (PME) advém de uma tradução livre do termo técnico em inglês *Engineered Wood Product – EWP*. De acordo com Jeska e Pascha (2014) definem PME como um produto processado industrialmente para otimizar seu desempenho para o uso na construção civil, utilizando a madeira como matéria-prima. Uma das vantagens obtidas com a utilização destes produtos está na agilidade de construção. Por tratar-se de uma solução pré-fabricada, permite um menor tempo de construção, além de produzir pouco ou nenhum resíduo na obra.

Além disso, a utilização destes produtos torna as construções mais sustentáveis quando comparadas com o uso do concreto, por exemplo. O processo produtivo de materiais convencionais como o concreto e o aço produzem CO₂, gás de contribuição importante para o efeito estufa, enquanto a produção de madeira “sequestra” este mesmo gás da atmosfera. Alguns PMEs têm se tornado mais populares e são brevemente descritos a seguir.

2.1.5.1 Laminated Veneer Lumber – LVL

A LVL (conhecida como madeira micro laminada) é um material de construção fabricado a partir de madeira macia. Na primeira etapa é retirada a casca da madeira, seguido de

colagem do laminado resultante sob pressão mecânica externa. A espessura do folheado utilizado na fabricação do produto é de 3,0 mm, e a espessura final depende do número de camadas, variando entre 18 e 102 mm. É um produto bastante resistente, porém em apenas uma direção, pois suas lâminas são sobrepostas com as fibras em apenas uma direção, conforme ilustra a Figura 2.13.

Figura 2.13 - Laminated Veneer Lumber – LVL



Fonte: Ultralam INC. (2021)

2.1.5.2 Laminated Strand Lumber – LSL

O LSL (*laminated strand lumber*) ilustrado na Figura 2.14 é um composto estrutural produzido com partículas de madeira com espessura variando de 0,6 a 1,3 mm, com comprimento de 300 mm e com larguras variáveis, orientadas paralelamente (LAM; PRION, 2003). Este produto pode atingir densidade e resistência ainda maiores do que as do LVL. É composto de cerca de 95% de madeira e 5% de resina. Apresenta boa resistência à torção devido à característica de que possui lascas de madeira orientadas sob diferentes ângulos.

Figura 2.14 - Laminated Strand Lumber -LSL



Fonte: Durham INC. (2022)

Diferentemente do LVL, a matéria-prima do LSL não é limitada a toras de espécies utilizadas comercialmente: pequenas toras de espécies variadas, espécies subutilizadas e de rápido crescimento, também são aceitas no processo de produção. O LSL, dentre todos os compostos estruturais, é o que apresenta um maior rendimento na utilização da tora, em torno de 72% (NELSON, 1997).

2.1.5.3 *Oriented Strand Board* – OSB

Os painéis de partículas orientadas ou *Oriented Strand Boards*, mais conhecidos como OSB, foram desenvolvidos para suprir uma demandada característica, e não encontrada, tanto na madeira aglomerada tradicional quanto nas chapas MDF - a resistência mecânica exigida para fins estruturais (ZENID, 2009).

Os painéis são formados por camadas de partículas ou de feixes de fibras com resinas fenólicas, que são orientadas ortogonalmente e então prensadas para sua consolidação (Figura 2.14). Cada painel consiste em três a cinco camadas, orientadas em ângulo de 90 graus umas com as outras. Ainda, possível encontrar esses painéis com acabamento lixado, ou até mesmo resistentes à água. Na construção civil já é possível ver sua aplicação em obras temporárias (tapumes e alojamentos), divisórias e coberturas.

Figura 2.14 - Oriented Strand Board - OSB



Fonte: Indiamart INC. (2022)

2.1.5.5 *Medium Density Particleboard* – MDP

É produzido com a aglutinação de partículas de madeira com resinas especiais, através da aplicação simultânea de temperatura e pressão, resultando em um painel homogêneo e de grande estabilidade dimensional (ZENID, 2009). É formado por três camadas de chips ou cavacos de madeira, geralmente Pinus, sendo as duas camadas externas de pequena gramatura e a interna de gramatura maior. Essa separação dos cavacos confere estabilidade dimensional, isolamento acústico e resistência a empenamentos e deformações.

2.1.5.6 Madeira Lamelada Colada – MLC

A madeira lamelada colada (MLC), também conhecida como *Glulam* (por seu nome inglês '*Glued Laminated Timber*'), é um material estrutural fabricado através da união de segmentos individuais de madeira (lamelas), colados com adesivos industriais (geralmente adesivos de resina de melamina ou poliuretano). As peças resultantes oferecem alta durabilidade e resistência à umidade, podendo vencer grandes vãos e conformar formas únicas.

Na América do Norte e Europa, a Madeira Lamelada Colada é um produto amplamente utilizado. Entretanto, no Brasil, ainda é considerado um produto recente, embora seu uso esteja em constante crescimento. Uma das vantagens desse produto é sua alta resistência em relação à madeira serrada, alcançada por meio de um processo de classificação mecânica e visual das lamelas, no qual defeitos que possam comprometer a resistência do elemento são removidos. As lamelas sem defeitos são unidas por uma técnica de ligação chamada *finger joint* ou emenda dentada, resultando em um produto mais homogêneo (Figura 2.15).

Figura 2.15 - Madeira Lamelada Colada



Fonte: Oliveira (2018)

2.1.5.7 *Cross Laminated Timber* – CLT

Painéis de CLT consistem em diversas camadas de lamelas de madeira maciça coladas em sentido oposto e alternado, entremeadas de adesivo estrutural e à prova d'água e submetidas a grande pressão. A laminação cruzada melhora as propriedades estruturais dos painéis através da distribuição de força ao longo das fibras da madeira em ambos os sentidos, o que praticamente elimina qualquer retração significativa ou deformação dos painéis. Podem suportar grandes cargas, possibilitando construções com vários pavimentos. Por tratar-se de um dos temas centrais deste trabalho, maiores detalhes e considerações a respeito deste PME serão abordados na subseção seguinte.

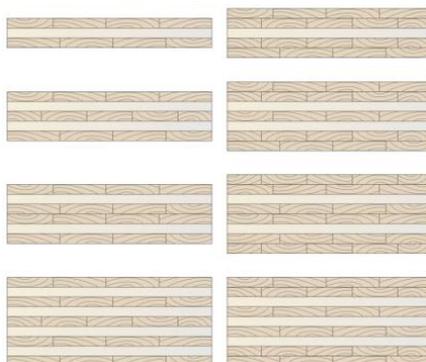
2.2 CROSS LAMINATED TIMBER – CLT

2.2.1 Características do produto

A Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC), conhecida em inglês como CLT - *Cross Laminated Timber*, é um produto de madeira engenheirada que surgiu na Europa no início dos anos 90 e tem conquistado cada vez mais popularidade, redefinindo o conceito de construção pesada em madeira. Na Europa, a produção anual de CLT cresceu rapidamente, atingindo os volumes de 25.000m³, 340.000m³ e 650.000m³ em 1996, 2010 e 2015, respectivamente, demonstrando uma ótima perspectiva para o mercado desse produto (BRANDNER et al. 2016).

A MLCC consiste em painéis com diversas camadas de lamelas de madeira coladas umas sobre as outras, geralmente formando um ângulo de 90° entre si (POPOVSKI et al., 2019). As lamelas, que são posicionadas lado a lado na mesma camada, podem ser coladas lateralmente ou não. Em algumas configurações especiais, as camadas adjacentes podem possuir as lamelas posicionadas na mesma direção, formando então uma camada dupla (Figura 2.16).

Figura 2.16 - Configurações das camadas de MLCC

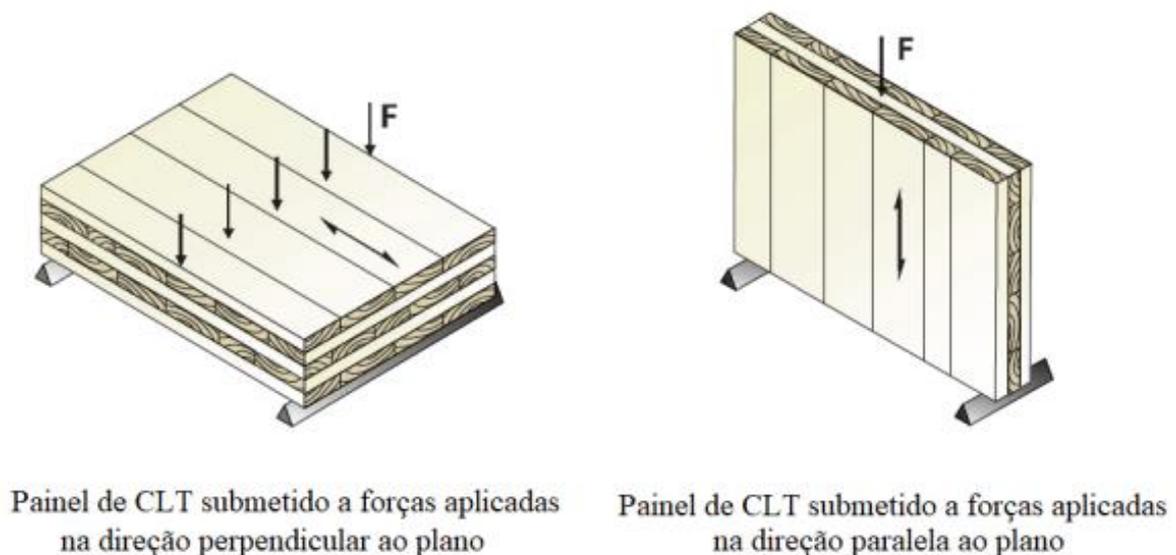


Fonte: CLT handbook (2019)

Os painéis de MLCC são geralmente fabricados com um número ímpar de camadas, comumente de três a sete camadas, podendo apresentar mais camadas em alguns casos. A espessura das lamelas pode variar de 16 mm a 51 mm, e a largura de 60 mm à 240 mm. As lamelas possuem emendas do tipo *finger joints*, utilizando adesivos. A largura dos painéis varia tipicamente de 0,6 m a 3 m, e seu comprimento geralmente de até 18 m (POPOVSKI et al., 2019).

Os painéis são utilizados como paredes estruturais, ou como lajes (Figura 2.17). Na configuração vertical (paredes), os painéis são posicionados de maneira que as lamelas das camadas externas fiquem na direção vertical, de maneira a maximizar sua capacidade de carga. Na configuração horizontal (lajes), os painéis são posicionados de maneira que a direção das lamelas das camadas externas seja paralela à direção do maior vão.

Figura 2.17 - Painéis de CLT submetidos a forças na direção perpendicular ao plano e na direção paralela ao plano



Fonte: Adaptado de Gangnom e Popovski (2011)

A prensa a vácuo utilizada na fabricação nacional possui um tamanho de 12,00 m de comprimento, por 3,00 m de largura (OLIVEIRA, 2018). Consequentemente, os painéis confeccionados podem atingir dimensões de, no máximo, 12,00 m x 3,00 m. A espessura dos painéis varia de acordo com a configuração de camadas e espessuras das lamelas utilizadas.

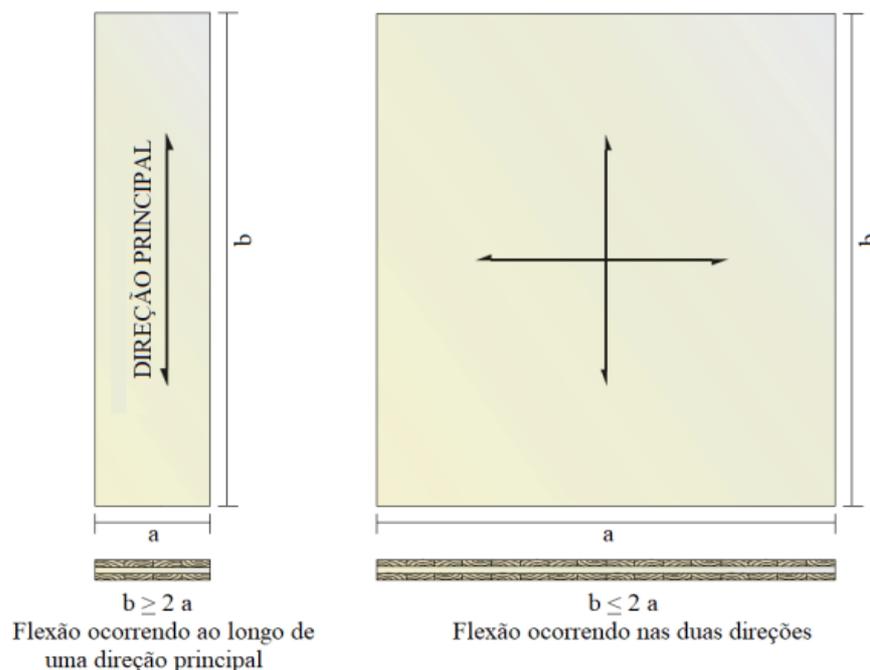
Assim, o painel mais esbelto possui espessura de 57 mm (três camadas de lamelas de 19 mm) e o mais robusto pode atingir 250 mm de espessura (sete camadas, sendo quatro de 40 mm e três de 30 mm). Outras configurações comuns são painéis de 80 mm (três camadas, sendo as duas externas com 20 mm e a interna com 40 mm), 95 mm (cinco camadas de 19 mm) e 105 mm (três camadas de 35 mm), os quais são mais utilizados para vedações verticais, e 120 mm

(três camadas de 40 mm), sendo este último empregado em maior escala em lajes (AUGUSTIN, 2008).

No que diz respeito aos painéis de CLT submetidos a forças aplicadas perpendicularmente ao seu plano, objeto desta pesquisa, dependendo da relação entre o comprimento e a largura dos painéis, a transferência dos esforços pode se dar por flexão em uma ou em duas direções (AUGUSTIN, 2008). Gangnom e Popovski (2011) afirmam que o dimensionamento em duas direções pode ser utilizado quando painéis retangulares forem apoiados nas quatro laterais e uma de suas dimensões horizontais não for superior ao dobro da outra.

Os métodos adotados para o dimensionamento dos painéis dependem dessa condição. No caso de painéis com uma das dimensões pelo menos duas vezes maior do que a outra, considera-se que a flexão ocorre em apenas uma das direções. Essa é denominada “direção principal”, correspondendo à maior dimensão do painel, em comprimento. A Figura 2.18 ilustra as duas situações, com painéis de CLT com a flexão ocorrendo em uma e em duas direções.

Figura 2.18 - Painéis de CLT com a flexão ocorrendo em uma e em duas direções



Fonte: Adaptado de Gangnom e Popovski (2011)

2.2.2 Produção dos painéis de CLT

O processo de fabricação dos painéis em CLT no Brasil inicia-se com a chegada da matéria-prima na fábrica, a qual é estocada de acordo com a demanda de fabricação (OLIVEIRA, 2018). Na fabricação nacional de CLT utiliza-se madeira de pinus como matéria-

prima, a qual, por não se constituir como uma espécie nativa do Brasil, é proveniente de florestas plantadas localizadas na região sul do país.

As lamelas podem ser impregnadas com produto preservativo ou possuir tratamento em autoclave. As lamelas de pinus, primeiramente, são submetidas à avaliação visual de controle de qualidade, verificando-se as características da madeira e removendo-se defeitos que possam prejudicar a estrutura futuramente, como grandes nós ou pedaços de cascas.

A Crosslam figura no cenário nacional como a primeira fabricante de CLT no país, sendo também produtora de MLC (Madeira Lamelada Colada). As placas de CLT que são fabricadas pela empresa são formadas por peças prismáticas de madeira serrada com espessuras que variam de 12-45mm e larguras que variam de 40-300mm.

Na Europa a norma estabelece lamelas de espessura 20, 30 e 40mm. Devido às tensões de cisalhamento entre as lamelas, a norma europeia estabelece que a largura das lamelas seja maior ou igual à 4 vezes a espessura, adotando como padrão de 150mm de largura. As peças de madeira devem ter a umidade controlada que varia de 10-14% para a colagem. Em seguida, as lamelas passam por um processo de colagem de topo com emendas do tipo *finger-joints* (Figura 2.19).

Figura 2.19 - Ligação das lamelas por meio de emendas do tipo finger-joints



Fonte: Oliveira (2018)

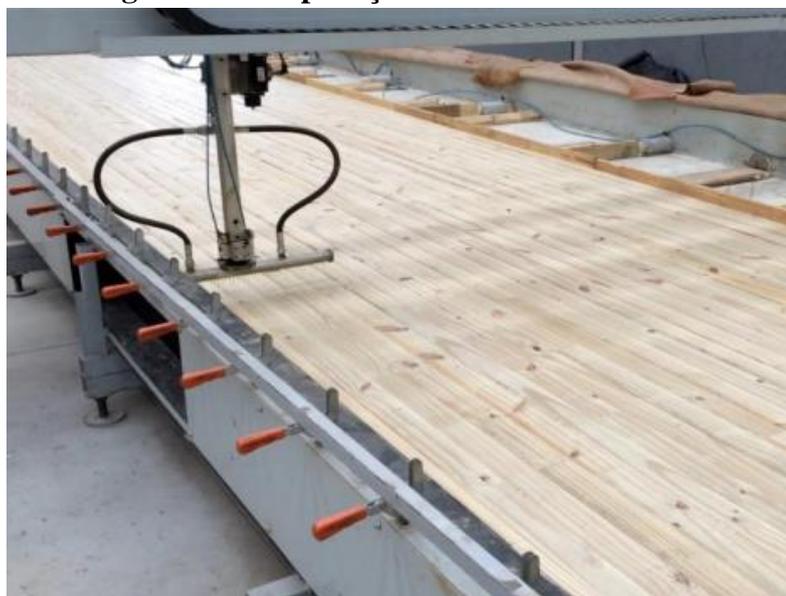
A posição dos *finger-joints* pode ser transversal ou longitudinal. Para este tipo de emenda, recomenda-se o uso de adesivos como o MUF (Melamina-Ureia-Formol), o PUR (Poliuretano Monocomponente) ou o EPI (Emulsificante-Polimero-Isocianato).

Após atingirem o comprimento necessário para o uso em camadas transversais ou longitudinais, são, em seguida, aplainadas de modo a garantir a planicidade da superfície e uniformidade dimensional. As dimensões das lamelas passam, então, a ser 14 cm de largura por espessuras padronizadas de 19 mm, 20 mm, 30 mm, 35 mm ou 40 mm. O comprimento pode chegar a 12,00 m (camadas longitudinais) ou 3,00 m (camadas transversais).

A próxima etapa do processo de fabricação é a aplicação do adesivo nas faces das lamelas. Os adesivos são aplicados com aplicadores de adesivos que regulam a quantidade de produto que será aplicado nas faces de colagem. Eles podem ser aplicados em cada lamela de maneira individual.

Normalmente correndo numa esteira rolante ou diretamente na mesa de prensagem sobre as lamelas já dispostas lado a lado. Para isso, as lamelas aplainadas são dispostas na prensa a vácuo lado a lado e orientadas em uma mesma direção, até se obter o comprimento desejado, ou a largura para o painel. É então aplicado o adesivo estrutural sobre essa primeira camada de lamelas (Figura 2.20), posicionando-se em seguida uma nova camada acima e com orientação perpendicular. O adesivo utilizado é monocomponente de poliuretano, isento de solventes ou formaldeídos, do tipo Purbond da Henkel AG®.

Figura 2.20 - Aplicação do adesivo estrutural



Fonte: Oliveira (2018)

Na etapa posterior, é realizada a prensagem dos painéis, podendo ser feitas de 3 formas, conforme informado pela fabricante Crosslam. A primeira forma é o uso da prensa hidráulica, a segunda é o uso da prensa à vácuo e a terceira (menos utilizada) é a ligação das lamelas através de parafusos, pregos e sargentos. Dependendo do equipamento, a pressão de colagem pode

chegar até 0,10-1,0 N/mm² (1,0-10,0 kgf/cm²) ou até pressões maiores podem ser atingidas com prensas hidráulicas. Prensas à vácuo trabalham numa faixa de 0,05-0,10 N/mm² (0,5-1,0 kgf/cm²).

A equação para definir a pressão ideal para o CLT pode ser definida como uma função do adesivo utilizado, espécie de madeira, geometria das lâminas, sistema de aplicação do adesivo e quantidade de adesivo aplicado. A pressão mínima de colagem para os adesivos tipo PUR, por exemplo, é estabelecida entre 0,01-0,10 N/mm² (0,1-1,0 kgf/cm²). Já para adesivos à base de Melamina (MUF), a pressão mínima deveria ficar entre 1,40-2,00 N/mm² (14,0-20,0 kgf/cm²).

Através de ensaios em laboratórios foi constatado que pressões muito altas no CLT podem danificar o adesivo e esmagar as estruturas celulares da madeira. Por isso no caso de CLTs de madeiras do tipo coníferas a pressão máxima é restringida a 1,0 N/mm² (10,0 kgf/cm²). Seguindo a norma de Madeira Lamelada Colada Européia (EN386), para lamelas de até 35mm de espessura recomenda-se a pressão máxima de colagem de 0,60 N/mm² (6,0 kgf/cm²). Acima de 35mm recomenda-se a pressão máxima de 0,80 N/mm² (8,0 kgf/cm²).

Portanto, constatou-se que ao usar o adesivo tipo PUR na fabricação de placas CLT a aplicação de pressões relativamente baixas, é totalmente satisfatória. A Crosslam informa ainda que pressões de colagem acima de 0,1 N/mm² (1,0 kgf/cm²) não melhoram significativamente a colagem, havendo pouca ou nenhuma diferença no desempenho estrutural das placas.

Ao final do processo de secagem dos adesivos, são realizados os cortes, encaixes, furos e usinagens das placas em CLT utilizando-se de fresadora CNC (comando numérico computadorizado). A fresadora pode ser axial, superficial ou volumétrica. Nacionalmente, é utilizada uma fresadora de cinco eixos, recortando o modelo tridimensional realizado previamente em um *software* de modelagem durante etapa de projeto dos painéis (OLIVEIRA, 2018).

Por fim, a última etapa do processo de fabricação dos painéis consiste no acabamento dos elementos já cortados, na qual as placas são limpas, podendo passar por lixamento prévio se for demandada uma superfície mais lisa. Além disso, todos os elementos fabricados com lamelas não tratadas em autoclave com produto preservativo, os quais serão empregados no interior da edificação, fora do contato com a umidade, recebem, ainda em fábrica, aplicação superficial de inseticida por pincelamento.

A seleção da espécie e da qualidade da madeira é feita com cautela pelo fabricante, com o objetivo de fornecer propriedades mecânicas superiores e melhor aparência nas camadas externas do CLT. Dentre as espécies de madeira comumente utilizadas para a montagem de painéis de CLT, a madeira de origem da espécie *Espruce da Noruega* foi escolhida como objeto de

estudo neste trabalho. Essa escolha deve-se à importância dessa espécie na fabricação de elementos estruturais de madeira na Europa (Ehrhart e Brandner, 2018).

2.3 ESPRUCE DA NORUEGA

A Espruce da Noruega ilustrado na Figura 2.21 é uma conífera de origem da atual região da Polônia, mas está presente em por toda a Europa. Trata-se de uma árvore de grande porte e crescimento rápido, podendo atingir alturas de 35 a 55 metros e um diâmetro de tronco de 1 a 1,5 metros.

Amplamente utilizada na indústria para produção de painéis de CLT, a madeira de Espruce da Noruega é leve, macia e facilmente divisível. Devido à sua maciez e baixo teor de resina, é fácil aplicar acabamentos e adesivos (GRABOWSKI e NIWIŃSKI, 1957). Além disso, essa madeira possui um grande apelo estético, sendo caracterizada por uma cor uniforme e clara que não escurece quando exposta à luz solar. Uma característica essencial e fundamental da madeira de Espruce da Noruega é a baixa permeabilidade do cerne, resultado da presença de nós fechados.

Figura 2.21 - Espruce da Noruega



Fonte: <https://eattheplanet.org/spruce-edible-evergreen-tree/>

Possui alta durabilidade e pode perdurar por longos períodos. Em comparação à madeira contemporânea, as amostras arqueológicas de madeira de são caracterizadas por menores teores de carboidratos e maiores teores de lignina e substâncias minerais (FENGEL, 1971; LIESE et al., 1975). A durabilidade natural dessa madeira, devidamente seca, varia de 120 a 900 anos.

Dependendo da região geográfica e das condições climáticas, essa árvore apresenta variação na largura dos anéis de crescimento anual. Conseqüentemente, é esperada variação nas propriedades físicas e mecânicas da madeira como densidade, resistência a compressão, módulo de elasticidade.

2.3.1 Propriedades físicas

A densidade é uma propriedade física fundamental que pode ser empregada para avaliar a qualidade da madeira (Trendelenburg e Mayer-Wegelin, 1955; Lvov e Klimov, 1971). Sabe-se que a densidade é um parâmetro que indica as propriedades mecânicas da madeira, apresentando uma correlação positiva (Ehrhart e Brandner, 2018). Isso significa que, quanto maior a densidade, maiores serão os valores das propriedades mecânicas desse material. Portanto, a densidade pode ser utilizada como um parâmetro indicativo da resistência mecânica e das propriedades elásticas da madeira, tornando sua consideração essencial nessa modelagem.

Ehrhart e Brandner (2018), realizaram ensaios de densidade em 36 amostras de Espruce da Noruega, e foi obtido o valor médio de 439 kg/m^3 , por meio de regressão linear. Esses ensaios foram realizados em corpos de prova com dimensão de $30 \times 120 \times 100 \text{ mm}$, contendo, desta maneira, algumas transições de camadas de lenho inicial (LI) e lenho tardio (LT) em suas seções transversais ($30 \times 120 \text{ mm}$).

Lanvermann et al. (2014) realizaram ensaios de densidade em amostras representativa de LI e LT, separadamente. Essas amostras foram retiradas de corpos de prova com dimensões de $9 \times 9 \times 47 \text{ mm}$. As amostras foram extraídas com o auxílio de um micrótomo deslizante. A espessura média das amostras foi de $282,9 \mu\text{m}$ para LI, e de $179,7 \mu\text{m}$ para LT. Os autores observaram também que, a proporção entre os diâmetros das fibras (traqueídes) que constituem a madeira nas regiões de LI e LT é de 2:1. Sendo assim, a diferença entre as espessuras médias das amostras de LI e LT é aproximadamente proporcional a diferença entre os diâmetros das fibras. Como resultados dos ensaios de densidade dessas amostras, os valores médios encontrados foram de 330 kg/m^3 para LI, e 741 kg/m^3 para LT.

2.3.2 Propriedades Elásticas

Akter, Serrano e Bader (2021), realizaram um estudo com o objetivo de investigar numericamente os estados de tensão e deformação de amostras de Espruce da Noruega, no plano RT, assim como a influência da ortotropia do material na resposta estrutural. Os resultados numéricos foram validados por meio de ensaios realizados em amostras submetidas à um aparato de ensaio biaxial. Em suas simulações numéricas, os autores atribuíram propriedades distintas para cada uma das três direções principais do material.

Keunecke, Hering e Niemz (2008) realizaram ensaios de tração em amostras de Espruce da Noruega, com a finalidade de caracterizar o comportamento elástico da espécie nas três direções principais da madeira. Os autores ainda trouxeram outros valores encontrados na literatura para efeito de comparação. A Tabela 2.1 apresenta alguns valores das propriedades elásticas do Espruce da Noruega encontrados na literatura.

Tabela 2.1 - Propriedades elásticas da Espruce da Noruega

Trabalhos	$E_L / E_R / E_T$ (MPa)	$\nu_{LR} / \nu_{LT} / \nu_{RT}$	$G_{LR} / G_{LT} / G_{RT}$ (MPa)
Horig (1933)	16200 / 699 / 400	0,019 / 0,013 / 0,24	628 / 775 / 37
Krabbe (1960)	11400 / 1110 / 430	–	742 / 686 / 36
Wommelsdorff (1966)	11300 / 980 / 429	0,049 / 0,028 / 0,26	–
Neuhaus (1981)	12000 / 818 / 420	0,056 / 0,035 / 0,31	623 / 743 / 42
Bodig e Jayne (1993)	–	0,041 / 0,033 / 0,35	–
Keunecke, Hering e Niemz (2008)	12800 / 625 / 397	0,018 / 0,014 / 0,21	617 / 587 / 53
Akter, Serrano e Bader (2021)	12000 / 830 / 545	–	–

Fonte: Autora (2023)

Com relação às propriedades elásticas distintas entre LT e LI, Lanvermann et al. (2014) realizaram ensaios de tração na direção L e T de amostras representativas dos dois lenhos. Com relação a direção L, os valores médios de MOE foram de 7500 MPa para LI, e de 20600 MPa para LT. Já com relação a direção T, os valores médios de MOE foram de 106 MPa para LI, e de 950 MPa para LT.

Bodig e Jayne (1982) apresentam os valores dos coeficientes de poisson de algumas espécies em relação aos valores de módulo de elasticidade. A Tabela 2.3 apresenta essas relações para o Espruce.

Tabela 2.2 - Coeficientes de Poisson

Poisson	Espruce
ν_{LR}	$27,99 \cdot 10^{-6} E_L$
ν_{RL}	$41,05 \cdot 10^{-6} E_R$
ν_{LT}	$23,93 \cdot 10^{-6} E_L$
ν_{TL}	$33,09 \cdot 10^{-6} E_T$
ν_{RT}	$640,05 \cdot 10^{-6} E_R$
ν_{TR}	$679,94 \cdot 10^{-6} E_T$

Fonte: Adaptado de BODIG e JAYNE (1982)

Os autores, ainda, apresentam valores das razões entre os módulos, conforme as relações:

$$E_L : E_R : E_T \approx 20 : 1,6 : 1$$

$$G_{LR} : G_{LT} : G_{RT} \approx 10 : 9,4 : 1$$

$$E_L : G_{LR} \approx 14 : 1$$

2.4 MÉTODOS DE CÁLCULO

Os componentes estruturais de CLT, como paredes e lajes, podem ser analisados e projetados utilizando-se de métodos analíticos para determinação das propriedades da seção transversal, de programas desenvolvidos especialmente para elementos de MLCC, ou de algum software geral de Método dos Elementos Finitos (MEF).

Nos últimos anos, três métodos analíticos têm sido mais comumente utilizados na análise das propriedades básicas dos painéis de CLT, sendo eles a Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas (*Gamma Method*), a Teoria do Compósito (*k-Method*) e a Analogia de Cisalhamento.

2.4.1 Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas

Este método foi originalmente desenvolvido para vigas de seções transversais compostas, formadas por peças unidas entre si por conectores mecânicos. Na Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas as propriedades de rigidez são definidas por meio da Rigidez Efetiva à Flexão (E_{Ieff}), que depende das propriedades da seção transversal e de um fator de eficiência das conexões (γ). Esse fator, por sua vez, depende das características de deslizamento dos conectores (relação s/K), sendo igual a zero quando não há conexão entre as vigas e igual a um para vigas rigidamente conectadas, como é o caso de peças colada entre si.

Para painéis de CLT, a utilização deste método requer algumas modificações, dado o fato de que não existem juntas mecânicas, mas sim uma colagem entre as camadas. As placas com orientação na direção principal são tratadas como vigas que estão suportando toda a carga e que fazem a conexão entre si através de “fixadores imaginários” os quais possuem rigidez equivalente ao módulo de elasticidade transversal no *rolling shear* (POPOVSKI et al., 2019).

2.4.2 Teoria do Compósito

Este método é bastante empregado na indústria de compensados, de modo que, originalmente, as camadas orientadas perpendicularmente à direção principal não eram levadas em conta no cálculo das propriedades relacionadas à flexão. Por isso, para ser utilizado para a análise de painéis de CLT e para levar em conta a contribuição de todas as camadas, a Teoria do Compósito teve de ser modificada, e tem como base as seguintes hipóteses: 1. A relação tensão-deformação é linear; 2. As seções transversais planas permanecem planas; 3. O Módulo de Elasticidade na direção perpendicular às fibras (E_{90}) é calculado como sendo uma fração do Módulo de Elasticidade na direção paralela às fibras ($E_{90} = E_0/30$); 4. As deformações por cisalhamento não são levadas em consideração, de modo que o método é mais indicado para painéis com uma relação entre a distância entre os apoios e a espessura alta ($L/h \geq 30$) (POPOVSKI et al., 2019).

2.4.3 Analogia de Cisalhamento

Este método é considerado o mais preciso para painéis de CLT, pois ele não negligencia o efeito do cisalhamento em nenhuma camada do material. É utilizado com a ajuda de um programa de análise de estruturas planas, podendo fazer a consideração dos diferentes módulos de elasticidade e de cisalhamento de cada camada. A grande vantagem do método de analogia do

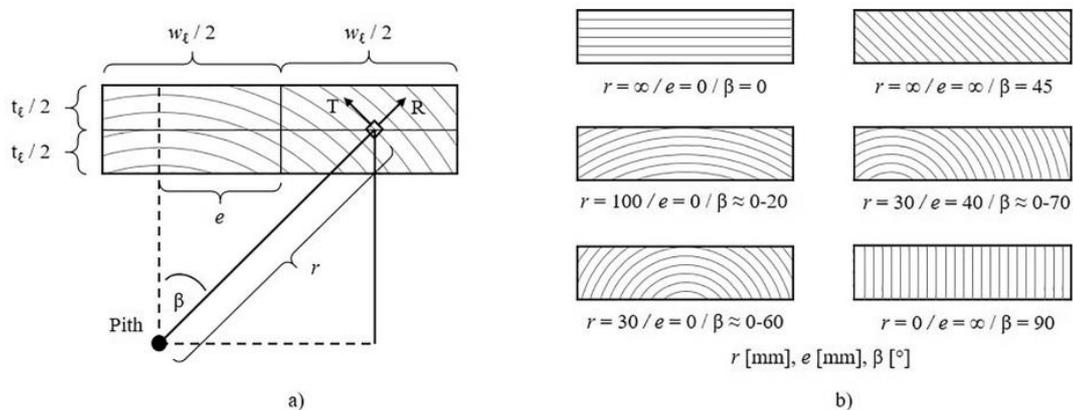
cisalhamento é sua grande versatilidade, pois sua aplicação pode ser feita para várias situações diferentes do sistema, como por exemplo, o número de camadas ou a razão entre vão e espessura (POPOVSKI et al., 2019).

2.5 ROLLING SHEAR

O *rolling shear* é um modo de ruptura da madeira em que as fibras tendem a rolar umas sobre as outras quando forças cisalhantes são aplicadas perpendicularmente às fibras no plano longitudinal (KRETSCHMANN, 2010). No entanto, a literatura atual mostra que há poucos estudos que apresentam valores de resistência ao *rolling shear*. Com base em uma quantidade limitada de pesquisas realizadas, foi observado que os valores médios dessa resistência correspondem a cerca de 18% a 28% da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras. Além disso, os valores de resistência ao *rolling shear* são muito semelhantes nos planos longitudinal-radial e longitudinal-tangencial (KRETSCHMANN, 2010).

Devido à anisotropia da madeira, os valores das propriedades de *rolling shear* obtidos por meio de ensaios representam valores aparentes desta propriedade do material. As tensões de *rolling shear* são acompanhadas de outras tensões, em particular compressão perpendicular às fibras. Devido a isto, suas propriedades devem ser interpretadas mais como propriedades do sistema estrutural do que do material. Em particular, o padrão de desdobro afeta significativamente as propriedades de *rolling shear* (EHRHART, BRANDNER, 2021). Esse padrão pode ser descrito pela orientação dos anéis de crescimento, que são definidos pelo ângulo β , pelo raio r e pela excentricidade da medula e (Figura 2.22).

Figura 2.22 - Padrão de desdobro e orientação dos anéis de crescimento: a) definição e b) exemplos

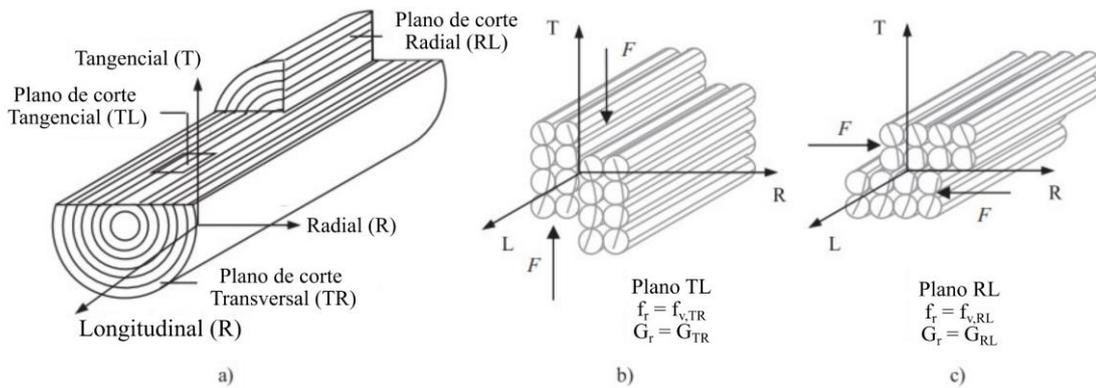


Fonte: Ehrhart e Brandner (2018)

Por se tratar de um material anisotrópico, as propriedades mecânicas da madeira variam de acordo com a direção de aplicação da carga e os planos de tensão gerados. Para descrever o comportamento elástico desse material, é preciso utilizar nove coeficientes de elasticidade independentes, conforme Ehrhart e Brandner (2021).

Geralmente, esses coeficientes estão relacionados aos três eixos principais da madeira: longitudinal (L), tangencial (T) e radial (R) (Figura 2.23.a). As tensões nos planos TL geradas por forças na direção tangencial (relacionados com a resistência $f_{v,TR}$ e o módulo G_{TR}) e as tensões nos planos RL geradas por forças na direção radial (relacionados com a resistência $f_{v,RT}$ e o módulo G_{RT}), assim como em todas as orientações intermediárias são causadoras do *rolling shear* (f_r and G_r). Na ruptura por *rolling shear*, as fibras da madeira (orientadas na direção L) “rolam” umas sobre as outras (Figura 2.23.b and c)).

Figura 2.23 - Eixos principais do tronco (a) e planos de rolling shear TL (b) e RL (c)



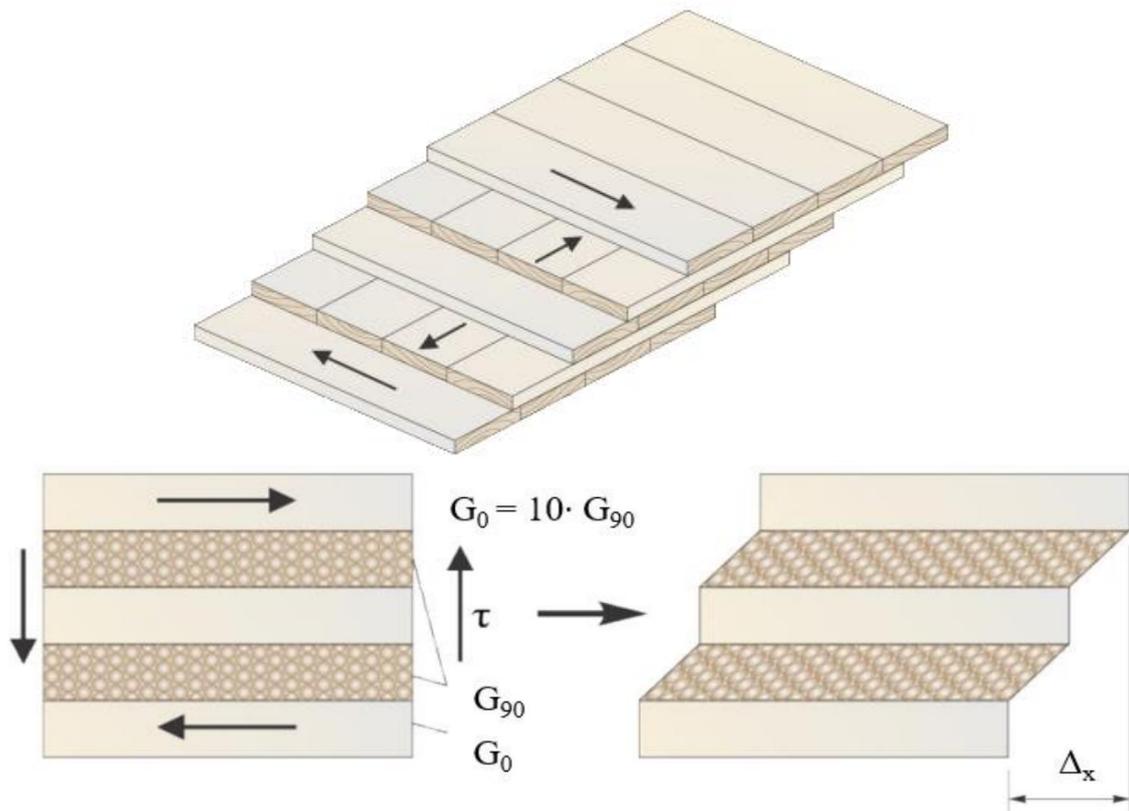
Fonte: Ehrhart e Brandner (2021)

Para o dimensionamento dos painéis de CLT, o efeito *rolling shear* precisa ser considerado tanto no dimensionamento no Estado Limite Último (ELU), pois representa um potencial mecanismo de ruptura, quanto no Estado Limite de Serviço (ELS), pois o módulo de cisalhamento no *rolling shear* geralmente é muito menor do que o módulo de cisalhamento paralelo às fibras. Consequentemente, a deformação de cisalhamento nas camadas intermediárias da CLT contribui significativamente para as deflexões globais quando a CLT é submetida à flexão fora do plano (EHRHART, BRANDNER, 2021).

A resistência de *Rolling Shear* é considerada um fator chave para o projeto e performance de painéis de CLT. Seu valor depende de diversos fatores como, espécie da madeira, densidade da camada, espessura da lamela, umidade da madeira, configuração dos anéis de crescimento, tamanho e geometria da seção transversal do painel, etc. O valor do módulo de cisalhamento de *rolling shear* G_{90} é geralmente assumido como 1/10 do valor do módulo de

cisalhamento paralelo às fibras, G (i.e. $G_{90} = G/10$). Similarmente, o módulo de elasticidade transversal, E_{\perp} , é estimado como $E/30$, enquanto o módulo de cisalhamento G é estimado como $E/16$. A Figura 2.24 ilustra o mecanismo de *rolling shear* em painéis de CLT.

Figura 2.24 - Deformação de *rolling shear* em um painel de CLT de 5 camadas



Fonte: CLT Handbook (2019)

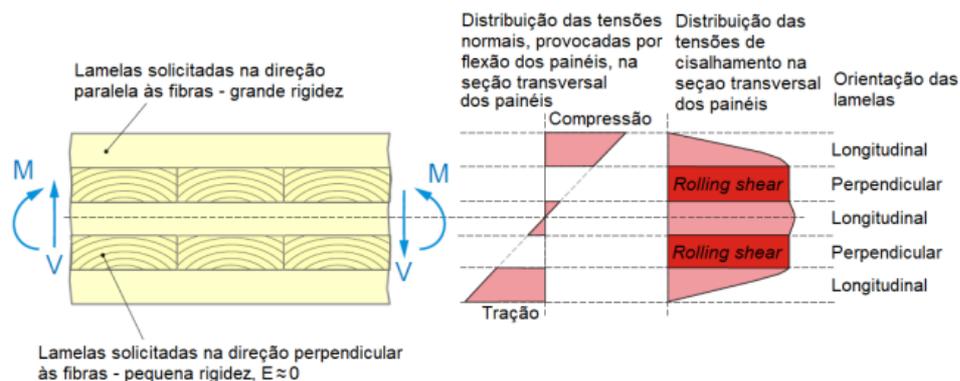
Com base nos experimentos realizados por PARK et al. (2003), verificou-se que a deformação por cisalhamento em elementos de CLT é maior do que em outros produtos de madeira engenheirada, devido ao módulo G_{90} das camadas cruzadas. A magnitude dessa deformação é influenciada pelo tipo de carregamento, relação vão-espessura e condições de apoio dos painéis. Por exemplo, em uma laje de CLT biapoiada com carregamento uniformemente distribuído e relação vão-espessura de 30, a contribuição do cisalhamento para a deflexão total é de aproximadamente 11%. No entanto, para uma relação vão-espessura de 20, essa contribuição dobra, atingindo uma proporção de 22%.

Da mesma forma, tanto a orientação das camadas de madeira quanto suas propriedades mecânicas devem ser consideradas para a obtenção dos valores de resistência e rigidez. Os

autores afirmam que a transferência de tensões normais entre as camadas com orientações perpendiculares entre si acaba sendo praticamente nula (BRANDNER et al. 2016). Segundo os autores, isso se deve às rachaduras que ocorrem numa mesma camada e ao espaçamento deixado entre as laterais das lamelas, quando elas não são coladas entre si.

Além disso, apontam que a significativa diferença entre o Módulo de Elasticidade da madeira na direção paralela às fibras e o Módulo de Elasticidade na direção perpendicular faz com que a contribuição relacionada às tensões normais seja muito pequena nas camadas com esta orientação. A Figura 2.25 ilustra a transferência de esforços normais entre camadas e a distribuição de esforços cisalhantes em um painel de CLT produzido sem a colagem lateral das lamelas.

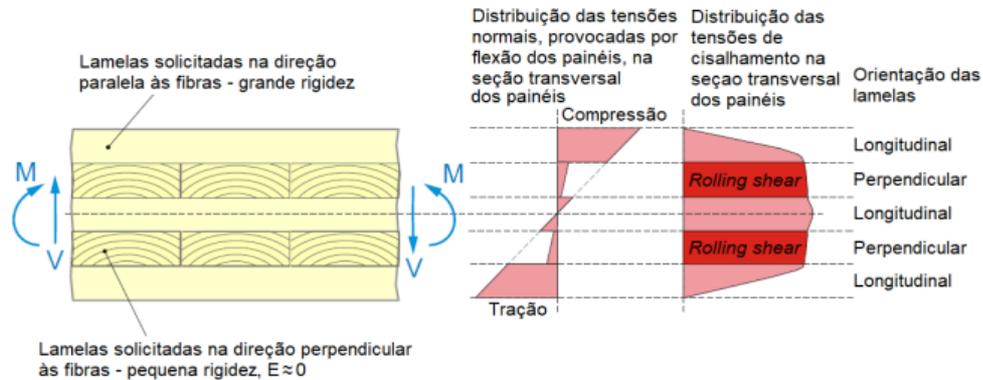
Figura 2.25 - Distribuição de tensões em um elemento de CLT com as laterais das lamelas não coladas



Fonte: adaptado de Augustin (2008)

Augustin (2008) salienta que, para painéis de CLT produzidos com colagem lateral das lamelas, pode-se considerar uma pequena contribuição das camadas ortogonais na transmissão dos esforços normais. A Figura 2.26 ilustra a distribuição de esforços em painéis de CLT com essa característica.

Figura 2.26 - Distribuição de tensões em um elemento de CLT com as laterais das lamelas coladas



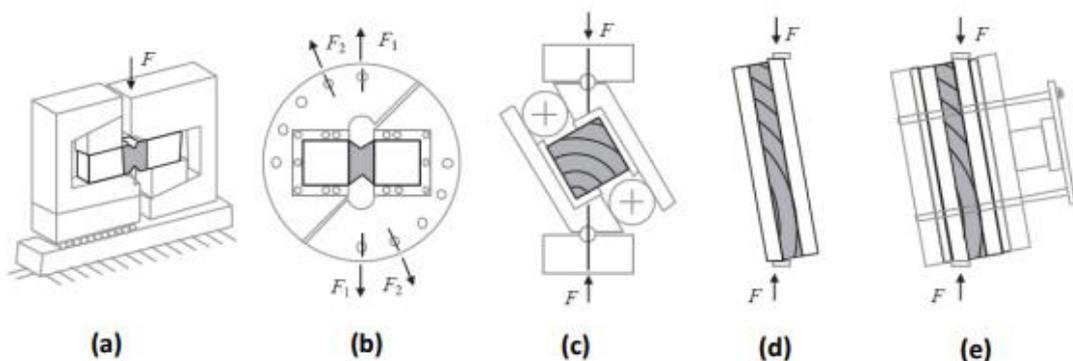
Fonte: Adaptado de Augustini (2008)

2.5.1 Ensaios de *rolling shear*

As propriedades relacionadas ao *rolling shear* podem ser obtidas por meio de testes laboratoriais. Esses testes deveriam, em teoria, submeter a madeira ao estado de tensões de cisalhamento puro. No entanto, esse estado de tensões é difícil de ser alcançado na prática. Quando se trata de painéis de CLT, a configuração do ensaio recebe atenção especial, uma vez que o estado de tensões deve representar a situação atual dentro das camadas ortogonais e lamelas do painel.

Entre os testes realizados em madeira isenta de defeitos podem ser citados os testes de cisalhamento Iosipescu, o Arcan e o Equipamento de Cubo Individual, mostrados na Figura 2.27 (a), (b) e (c), respectivamente. Esses são os três testes principais capazes de determinar o módulo de elasticidade transversal e a resistência ao *rolling shear* (EHRHART e BRANDNER, 2018).

Figura 2.27 - Métodos de ensaio de cisalhamento



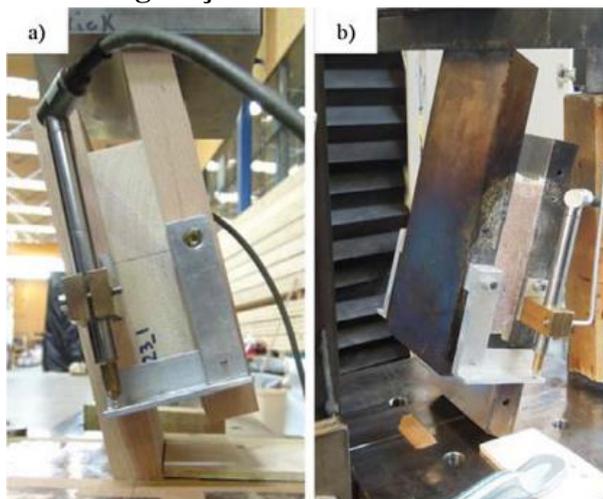
Fonte: Adaptado de Ehrhart e Brandner (2018)

Ehrhart e Brandner (2018) realizaram uma pesquisa com o objetivo de determinar a relação entre as espécies de madeira estudadas, a densidade, o padrão de desdobro, as relações de largura-espessura da lamela, configurações de ensaio e as propriedades relacionadas ao *rolling shear*. Para isso, foram testadas 6 diferentes espécies de madeira, sendo que 2 espécies estudadas foram coníferas (“*Picea abies* (L.) Karst” e “*Pinus sylvestris* L.”) e 4 foram dicotiledôneas (“*Fagus sylvatica* L.”, “*Fraxinus excelsior* L.”, “*Populus tremula* L.” e “*Betula pendula* R.”).

Para a obtenção dos valores de resistência e de módulos de elasticidade transversal relacionados ao *rolling shear* foram realizados testes de cisalhamento modificado, em que a configuração de teste foi baseada no ensaio recomendado pela norma EN 408 (2010). Adaptou-se o ensaio de tal forma que, ao invés de se utilizar duas placas de aço para transferir o carregamento, que é a recomendação da norma, foi usado para o ensaio de coníferas, duas placas de madeira dicotiledônea, como mostrado na Figura 2.28a.

No entanto, para o ensaio das peças de madeira dicotiledônea, as placas de aço foram mantidas para a transferência do carregamento, como mostrado na Figura 2.28b. Esse método de ensaio permitiu analisar os parâmetros desejados separadamente (como por exemplo, densidade, padrão de desdobro e relação largura-espessura). Além disso, foi realizada uma análise elementos finitos para confirmar a configuração de teste adequada e a distribuição das tensões de cisalhamento.

Figura 2.28 - Configuração do teste de cisalhamento modificado

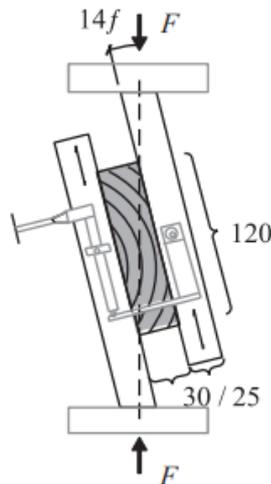


Fonte: Ehrhart e Brandner (2018)

O ensaio consiste em uma compressão inclinada em 14°, sendo a carga transferida ao corpo de prova por meio de placas de aço ou de madeira, sendo que neste último caso, a madeira

das placas de transferência de carga deve apresentar rigidez significativamente maior que a do corpo de prova (Figura 2.29). A inclinação de 14° do ensaio tem a função de fazer com que o eixo de aplicação da força passe pelo cento de gravidade da amostra.

Figura 2.29 - Configuração do ensaio de cisalhamento EN 408.



Fonte: Ehrhart e Brandner (2018)

Foi estabelecida uma série de referência para os ensaios de Ehrhart e Brandner. Nesta série, a madeira utilizada foi o Espruce-da-Noruega. A relação $w_l/t_l = 120\text{mm}/30\text{mm} = 4$ (largura/espessura), e a distância do centro da seção transversal à medula foi $d = 60\text{ mm}$. Conveniou-se para a série de referência que a excentricidade da medula é nula, resultando em configuração simétrica dos anéis de crescimento. O comprimento do corpo de prova na direção longitudinal das fibras foi de 100mm.

Ehrhart e Brandner (2018) concluíram, de maneira geral, que essas configurações de ensaio apresentam resultados satisfatórios para a determinação das propriedades de *rolling shear*. Os autores observaram também que a proporção w_l/t_l (largura/espessura) da lamela e o padrão de desdobro são os principais parâmetros que afetam o *rolling shear*.

2.5.2 Uso do método dos elementos finitos na engenharia e modelagem de CLT sob o efeito do *Rolling Shear*

Nas últimas décadas houve um grande avanço em técnicas computacionais, gerando assim uma maior velocidade e fidelidade em análises envolvendo a mecânica computacional. Conseqüentemente, houve uma grande revolução na engenharia estrutural. Antes construções inconcebíveis devido à dificuldade de prever o seu comportamento, hoje em dia se tornam obras de artes da mão de engenheiros capacitados.

Dentre as variadas técnicas numéricas capazes de simular o comportamento estrutural da CLT, destaca-se o Método dos Elementos Finitos (MEF), o qual é amplamente difundido e aceito pela comunidade científica. Uma vantagem dos métodos numéricos, com ênfase no MEF, reside na possibilidade de simular modelos estruturais mais complexos com baixo custo computacional, tornando-se cada vez mais acessível. Além disso, a evolução dos softwares é um fator crucial, uma vez que novas soluções teóricas são constantemente implementadas, tornando-os mais eficientes e eficazes na análise estrutural.

Segundo Zienkiewics (2005) e Bathe (2014), o MEF é uma importante e indispensável ferramenta de análise estrutural, sendo empregada nos mais avançados softwares de análise estrutural (ANSYS, ABAQUS, SAP 2000, dentre outros). Sua premissa básica está em transformar um meio contínuo (com infinitos pontos) em discretizado (com finitos nós). O método pode ser utilizado para indicar as tensões, deformações e deslocamentos em estruturas sólidas, planas e tridimensionais, as quais estão submetidas à esforços aplicados e deslocamentos impostos.

Diversos softwares utilizam o MEF para realizar análises estruturais, sendo possível variar o tipo de elementos empregados (como vigas, cascas e sólidos), suas funcionalidades (tais como a riqueza das funções aproximadoras, métodos de discretização, isotropia, ortotropia ou anisotropia, elasticidade ou plasticidade). Alguns desses parâmetros estão diretamente ligados ao desempenho e à precisão do software em simular as tensões, esforços, deformações e deslocamentos da estrutura de forma realista.

Para se avaliar a convergência de um programa computacional ao modelo real, é plausível comparar resultados com métodos analíticos consagrados, ou então, executar ensaios experimentais. Assim sendo, é possível validar um determinado método de análise estrutural para que seu uso possa ser extrapolado para modelos mais complexos, utilizando-se menor tempo e custo, porém, garantindo a segurança e economia necessárias para um projeto estrutural competitivo.

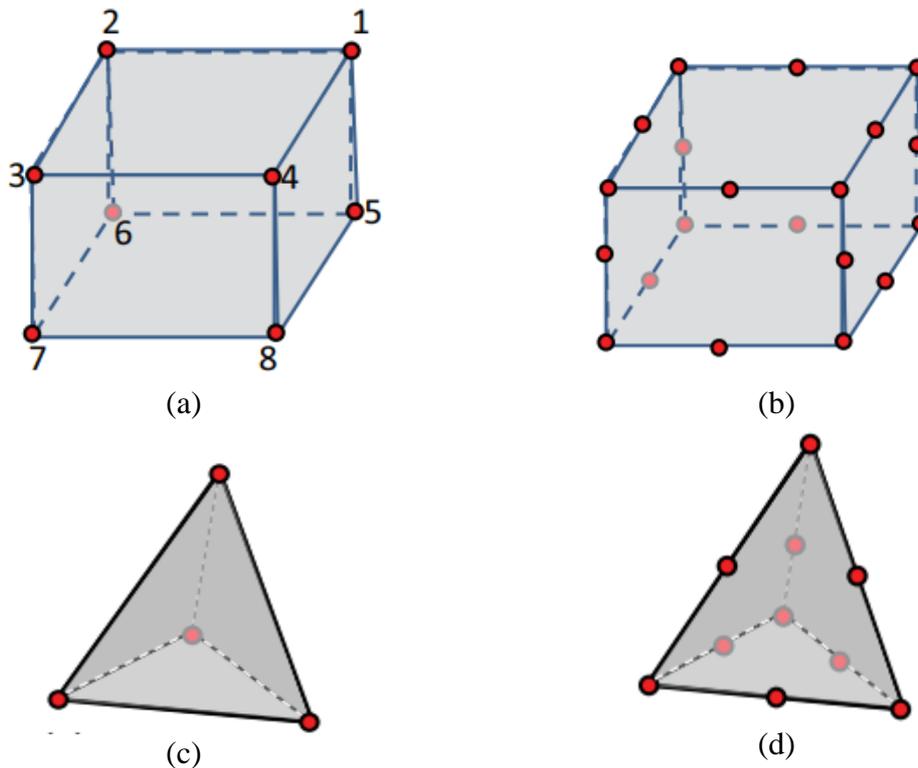
A praticidade e baixo custo computacional de elementos finitos de placa é um grande atrativo comercial para a simulação estrutural de painéis como a CLT. Entretanto, é necessário averiguar qual a precisão do método em relação ao comportamento estrutural de tais placas.

Os componentes estruturais de CLT podem ser analisados e projetados utilizando-se de métodos analíticos na determinação das propriedades da seção transversal, por meio de programas computacionais desenvolvidos especificamente para elementos de CLT, ou softwares mais gerais que aplicam o método dos elementos finitos. Segundo Chapra e Canale (2011), o Método

dos Elementos Finitos se mostra adequado para problemas com geometria irregular, condições de contorno não usuais ou composição heterogênea.

O software ABAQUS permite a realização de diferentes análises utilizando o Método dos Elementos Finitos, aceitando diferentes entradas de valores para as propriedades mecânicas para um material sólido nas três direções principais, tornando-se, portanto, adequado à necessidade de representar o comportamento ortotrópico da madeira. O software ABAQUS oferece duas opções de elementos para realizar simulações usando a técnica MEF o Elemento Tetraédrico e o Elemento Hexaédrico. Os elementos tetraédricos e hexaédricos em primeira e segunda ordem de aproximação, ou seja, linear e quadrática, respectivamente. A Figura 2.30 apresenta esses elementos em detalhes.

Figura 2.30 - (a) Elemento sólido hexaédrico linear (C3D8), (b) Elemento sólido hexaédrico quadrático (C3D20), (c) elemento tetraédrico linear (C3D4), (d) elemento tetraédrico de segunda ordem (C3D10).



Fonte: Adaptado de Bhattacharjee (2021)

Nos elementos tetraédricos lineares (C3D6), apenas um ponto de integração é utilizado para o cálculo da matriz de rigidez, enquanto nos elementos tetraédricos quadráticos (C3D10),

são utilizados quatro pontos de integração. Para os elementos hexaédricos, o ABAQUS disponibiliza duas opções: elementos com oito pontos de integração (C3D8) ou com vinte sete (C3D20).

Diversos trabalhos têm se preocupado com o efeito do *rolling shear* em painéis de CLT. Ehrhart e Brandner (2018) utilizaram modelos bidimensionais para simular o ensaio de cisalhamento de duas placas de CLT. Segundo os autores, a distribuição de tensões de cisalhamento foi homogênea nos elementos, porém as tensões normais ultrapassaram a resistência da madeira nos vértices da amostra.

Li, Dong e Lim (2019) investigaram as propriedades de resistência ao *rolling shear* de CLT, por meio de testes experimentais (testes de flexão) e modelagem numérica. Foram estudadas amostras de CLT de diferentes parâmetros de fabricação, incluindo duas espécies de madeira e três espessuras de laminação. Os autores concluíram que modelagem numérica se mostrou eficiente na avaliação da resistência ao *rolling shear* de CLT quando comparado aos dados experimentais.

Sandoli e Calderoni (2020) realizaram uma análise acerca da influência da deformação por *rolling shear* em painéis de CLT submetidos à flexão. O estudo concentrou-se na avaliação do estado limite de serviço, medindo a variação da deformação e tensão em relação a diferentes relações de largura-espessura (L/E). O trabalho comparou resultados obtidos por diferentes métodos analíticos e modelos numéricos, concluindo que a influência do *rolling shear* é significativa para painéis de CLT com relações L/E menores que 30, e negligenciável para relações maiores que 30.

Silva et al. (2023) conduziram uma análise numérica e experimental de três configurações de teste de flexão, cisalhamento vertical e cisalhamento inclinado em painéis de CLT, a fim de determinar sua rigidez e resistência ao *rolling shear*. De acordo com os autores, os modelos numéricos foram capazes de reproduzir de forma aproximada o comportamento dos espécimes nos testes de flexão, cisalhamento vertical e inclinado, durante a fase linear e para os valores de carga de ruptura máxima aplicados. Isso permitiu a avaliação do comportamento global através da curva carga versus deslocamento, bem como a análise dos aspectos localizados de interesse, como a concentração de tensões na área dos espécimes.

3. METODOLOGIA

Nesta seção serão apresentados os procedimentos metodológicos que foram realizados com o intuito de se atender os objetivos específicos.

Inicialmente, foram realizadas pesquisas em plataformas de pesquisa (CAPES periódicos, Google Scholar e CLT Knowledge database). Artigos relacionados à painéis de CLT, seu comportamento mecânico, critérios de falha adequados para se analisar a madeira, diferenças entre lenho inicial e lenho tardio e trabalhos semelhantes envolvendo simulação de painéis de CLT utilizando o Método dos Elementos Finitos foram o principal foco da pesquisa bibliográfica.

Paralelamente à busca pelas publicações que abordam a temática em estudo, houve a necessidade de se definir o programa computacional a ser empregado. Tendo em vista a adequabilidade do *software* ABAQUS para representar o comportamento ortotrópico da madeira e a licença para seu uso na universidade, optou-se por utilizá-lo para as simulações realizadas neste trabalho.

3.1 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

A seguir, serão abordados os critérios utilizados para a definição dos valores das propriedades mecânicas elásticas dos materiais atribuídos às simulações.

Foram atribuídas propriedades a três materiais distintos, sendo um representativo da madeira de Espruce da Noruega considerada como um material ortotropicamente homogêneo, ou seja, sem que houvesse distinção entre os lenhos, sendo denominado neste trabalho pelas iniciais MOH (Material Ortotropicamente Homogêneo). Os outros dois materiais foram representativos dos lenhos, sendo considerados com propriedades distintas, sendo denominados neste trabalho de LI (Lenho Inicial) e LT (Lenho Tardio). O objetivo desta consideração é de analisar a influência no comportamento mecânico da madeira quando os lenhos são considerados como materiais distintos na modelagem.

3.1.1 Densidade

Para a inserção dos valores de densidade dos materiais no ABAQUS, é necessário que os valores estejam na unidade t/mm^3 (tonelada por milímetro cúbico). Logo, os valores utilizados foram de $4,39 \times 10^{-10} t/mm^3$ para MOH, $3,30 \times 10^{-10} t/mm^3$ para LI e $7,41 \times 10^{-10} t/mm^3$ para LT.

3.1.2 Propriedades Elásticas

Para atribuir os valores destas propriedades ao MOH na modelagem numérica, foram adotados para os módulos de elasticidade os valores apresentados os valores utilizados por Akter, Serrano e Bader (2021), por tratar-se do trabalho mais recente. Já para os valores dos coeficientes de poisson e do módulo de cisalhamento, foram utilizados os valores apresentados por Keunecke, Hering e Niemz (2008). A Tabela 3.1 apresenta esses valores.

Tabela 3.1 - Propriedades mecânicas atribuídas ao MOH na modelagem numérica (MEF)

Módulo de Elasticidade (MPa)			Coeficiente de Poisson			Módulo de cisalhamento (MPa)		
E_L	E_R	E_T	ν_{LR}	ν_{LT}	ν_{RT}	G_{LR}	G_{LT}	G_{RT}
12000	830	545	0,018	0,014	0,21	617	587	53

Fonte: Autora (2023)

Com relação às propriedades elásticas distintas entre LT e LI, Lanvermann et al. (2014) realizaram ensaios de tração na direção L e T de amostras representativas dos dois lenhos. Com relação a direção L, os valores médios de MOE foram de 7500 MPa para LI, e de 20600 MPa para LT. Já com relação a direção T, os valores médios de MOE foram de 106 MPa para LI, e de 950 MPa para para LT.

Para a definição dos valores de MOE na direção R, foi utilizado como referência o trabalho de Farrugia e Perré (2000), onde os autores utilizaram um sistema de análise de imagem microscópica para aferir deformações de amostras representativas dos lenhos de Espruce da Noruega submetidas à ensaios de tração na direção radial. Os resultados obtidos foram incorporados na modelagem numérica deste trabalho, sendo atribuídos os valores de $E_R = 744$ MPa para LI, e $E_R = 1230$ MPa para LT.

Bodig e Jayne (1982) apresentam os valores dos coeficientes de poisson de algumas espécies em relação aos valores de módulo de elasticidade. A Tabela 3.2 apresenta essas relações para o Espruce.

Tabela 3.2 - Coeficientes de Poisson

Poisson	Espruce
ν_{LR}	$27,99 \cdot 10^{-6} E_L$
ν_{RL}	$41,05 \cdot 10^{-6} E_R$
ν_{LT}	$23,93 \cdot 10^{-6} E_L$
ν_{TL}	$33,09 \cdot 10^{-6} E_T$
ν_{RT}	$640,05 \cdot 10^{-6} E_R$
ν_{TR}	$679,94 \cdot 10^{-6} E_T$

Fonte: Adaptado de BODIG e JAYNE (1982)

Os autores, ainda, apresentam valores das razões entre os módulos, conforme as relações:

$$E_L : E_R : E_T \approx 20 : 1,6 : 1$$

$$G_{LR} : G_{LT} : G_{RT} \approx 10 : 9,4 : 1$$

$$E_L : G_{LR} \approx 14 : 1$$

A Tabela 3.3 apresenta os valores das propriedades elásticas que foram atribuídas aos materiais MOH, LI e LT na modelagem numérica.

Tabela 3.3 - Propriedades elásticas atribuídas na modelagem

	MOH	LI	LT
Densidade (t/mm ³)	$4,39 \times 10^{-10}$	$3,30 \times 10^{-10}$	$7,41 \times 10^{-10}$
E_L (MPa)	12000	7500	20600
E_R (MPa)	830	744	1230
E_T (MPa)	545	106	950
ν_{LR}	0.018	0,21	0,58
ν_{LT}	0.014	0,18	0,49
ν_{RT}	0.21	0,48	0,79
G_{LR} (MPa)	617	536	1471
G_{LT} (MPa)	587	504	1383
G_{RT} (MPa)	53	54	147

Fonte: Autora (2023)

3.2 Critério de falha

Um modelo constitutivo ortotrópico elastoplástico com curva bilinear foi adotado neste estudo, que foi associado ao Critério de Hill e ao endurecimento isotrópico para considerar o comportamento de endurecimento da madeira.

No caso do Critério de Hill, onde as direções longitudinal, tangencial e radial correspondem, nesta modelagem, aos eixos 1, 2 e 3 respectivamente, não é possível considerar valores de resistência diferentes para tração e compressão. Como consequência o Critério não considera rupturas frágeis que ocorrem na tração ou cisalhamento, sendo esta uma das limitações desta modelagem.

Foi inserida, ainda, uma propriedade de interação de contato entre os anéis, com valores de resistência normais, tangenciais e coesivas do material inferiores às resistências da madeira constituinte dos anéis, com o intuito de simular o comportamento da madeira do lenho inicial, de menor resistência, e por onde é observada a propagação do efeito *rolling shear*.

Os parâmetros de tensão utilizados para inserir o Critério na modelagem para o material MOH foram os utilizados por Akter, Serrano e Bader (2021) em suas simulações numéricas. Já os parâmetros de tensão para os materiais LI e LT foram os valores obtidos como resultados dos ensaios de Lanvermann et. al (2014). Um resumo destes valores de referência está apresentado na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Valores de tensão de referência para do Critério de Hill

	MOH	LI	LT
σ_{11} (MPa)	50	50	50
σ_{22} (MPa)	4,25	2,061	2,461
σ_{33} (MPa)	4,58	2,061	2,461
σ_{12} (MPa)	4,62	2,061	2,461
σ_{13} (MPa)	4,56	2,061	2,461
σ_{23} (MPa)	1,54	1,54	1,54

Fonte: Autora (2023)

Por fim, utilizando as Equações (09-14) pode-se calcular os valores dos parâmetros R utilizados para definir o Critério de Hill como critério de falha para os três materiais, nas três direções principais. Estes valores estão apresentados na Tabela 3.5.

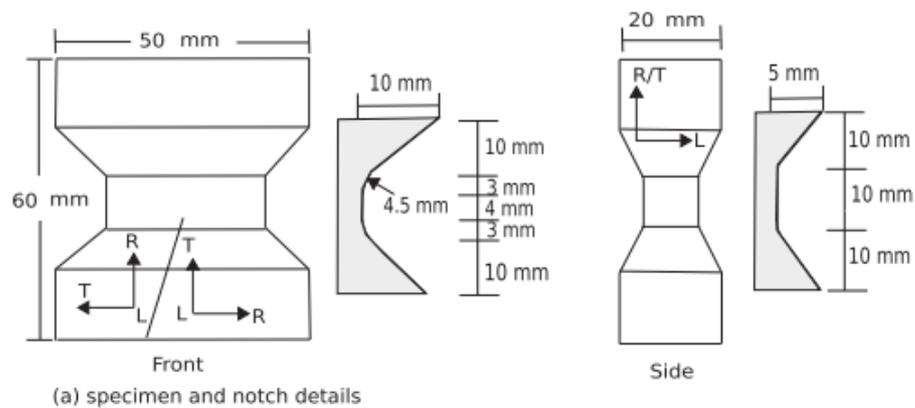
Tabela 3.5 - Parâmetros do Critério de Hill na modelagem numérica.

	MOH	LI	LT
R ₁₁	1	1	1
R ₂₂	0.09	0.04	0.05
R ₃₃	0.09	0.04	0.05
R ₁₂	0.16	0.07	0.09
R ₁₃	0.16	0.07	0.09
R ₂₃	0.05	0.05	0.05

Fonte: Autora (2023)

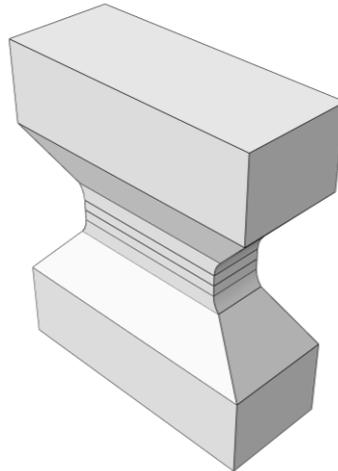
3.2 MODELAGEM NUMÉRICA DA MADEIRA

Na simulação do modelo de validação, foram reproduzidas as dimensões dos corpos de prova utilizados por Akter, Serrano e Bader (2021) para simular numericamente ensaios de carregamento perpendicular às fibras, tanto na compressão, como no cisalhamento, de acordo com a Figuras 3.1 e 3.2.

Figura 3.1 - Dimensões dos corpos de prova

Fonte: Akter, Serrano e Bader (2021)

Figura 3.2 - Representação da modelagem utilizada na validação da simulação

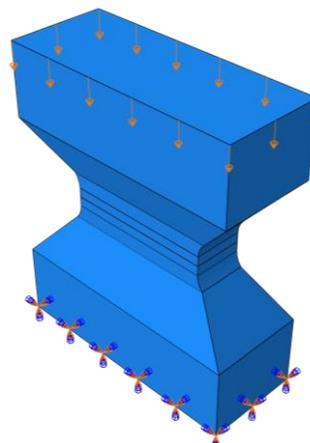


Fonte: Autora (2023)

Os ensaios de compressão e de cisalhamento foram realizados tanto na direção radial, quanto na direção tangencial. Desta forma, houve a necessidade de atribuir uma orientação às direções principais do material. Nas simulações deste trabalho, as propriedades referentes às direções longitudinal, tangencial e radial foram atribuídas aos eixos 1, 2 e 3, respectivamente. Logo, os eixos 1, 2 e 3 foram orientados de acordo a direção de interesse do ensaio realizado (tangencial ou radial). Além disso, como o intuito deste modelo de validação é de verificar o comportamento mecânico da madeira e, certificar-se de que o critério de falha foi inserido de maneira correta, optou-se por atribuir ao corpo de prova as propriedades referentes ao MOH.

Com relação às condições de contorno do ensaio de compressão, foram restringidos os deslocamentos nas três direções na base do corpo de prova e foi imposto um deslocamento correspondente à 5mm na parte superior do corpo de prova, como ilustra a Figura 3.3.

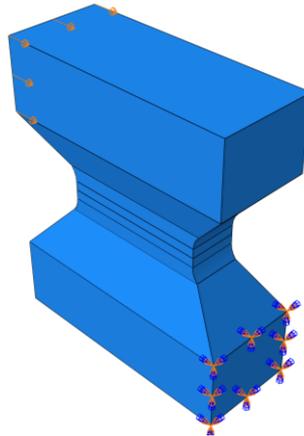
Figura 3.3 - Condições de contorno do ensaio de compressão utilizado na validação



Fonte: Autora (2023)

Com relação às condições de contorno do ensaio de cisalhamento, foram restringidos os deslocamentos nas três direções na lateral inferior do corpo de prova e foi imposto um deslocamento correspondente à 2,5 mm na lateral superior do corpo de prova, como ilustra a Figura 3.4.

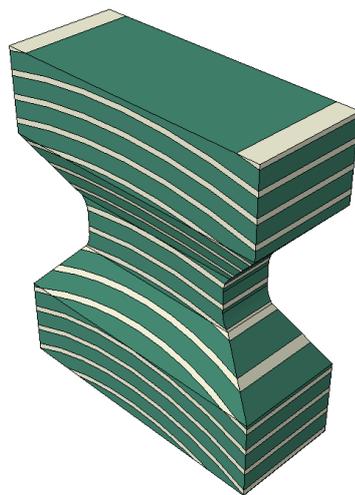
Figura 3.4 - Condições de contorno do ensaio de cisalhamento utilizado na validação



Fonte: Autora (2023)

Para que pudesse ser validado o modelo que considerasse a diferença entre os lenhos inicial e tardio, foi realizada uma simulação do ensaio de compressão radial, com atribuição das propriedades distintas do LI e LT, conforme ilustra a Figura 3.5.

Figura 3.5 - Ensaio de validação numérica com consideração da diferença de lenhos



Fonte: Autora (2023)

3.1.1 Modelo com incorporação dos lenhos inicial e tardio

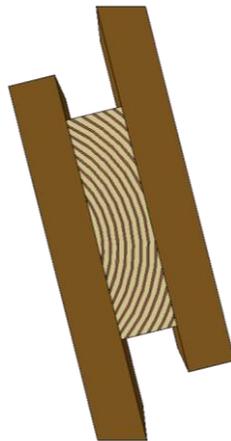
Com base em estudos anteriores (Lanvermann et al.), foi comprovado que os lenhos inicial e tardio possuem propriedades mecânicas distintas, tornando relevante a incorporação da distinção entre eles na análise numérica do comportamento mecânico da madeira. Para isso, foi desenvolvido um estudo paramétrico, que será descrito na seção seguinte, onde as características dos anéis e sua distribuição na seção transversal dos corpos de prova foram consideradas.

Inicialmente, foram criados dois materiais distintos, denominados LI (lenho inicial) e LT (lenho tardio). As propriedades mecânicas e parâmetros do critério de falha desses materiais foram definidos conforme as Tabelas 3.3 e 3.5.

De acordo com um estudo realizado em madeira da espécie Espruce da Noruega (Miina, 2000), é possível aproximar que a proporção do lenho tardio em um anel de crescimento é de $\frac{1}{4}$, enquanto a do lenho inicial é de $\frac{3}{4}$, com valores médios de 1mm e 3mm, respectivamente. Portanto, essa proporção foi definida como padrão no estudo paramétrico.

A Figura 3.6 ilustra o ensaio padrão com os parâmetros $r = 60\text{mm}$ e $e = 0$, sendo que a distinção entre os lenhos foi incorporada na modelagem numérica do ensaio padrão.

Figura 3.6 - Distinção dos lenhos na modelagem numérica

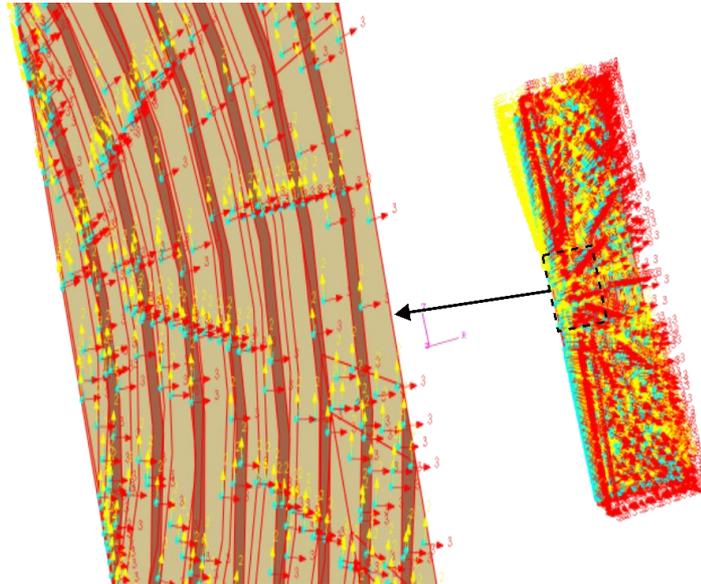


Fonte: Autora (2023)

Na madeira real existe uma zona de transição entre os lenhos, o que não foi considerado no modelo proposto, apresentando, portanto, uma limitação. Quanto à distribuição das propriedades mecânicas dos lenhos, foi adotado um sistema de coordenadas cilíndrico, permitindo

que as propriedades dos eixos longitudinal, tangencial e radial (1, 2 e 3, respectivamente) acompanhassem a distribuição cilíndrica dos eixos. A Figura 3.7 ilustra a distribuição cilíndrica das propriedades mecânicas dos lenhos adotadas no modelo.

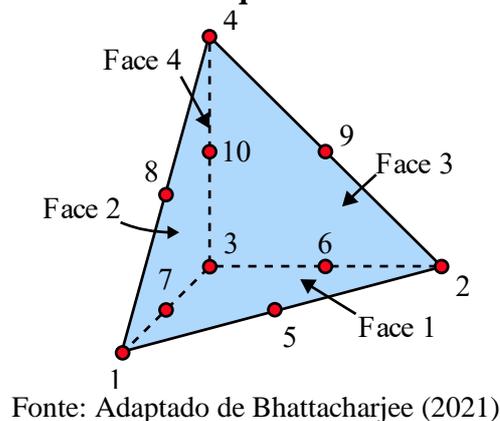
Figura 3.7 - Distribuição cilíndrica das propriedades mecânicas dos lenhos



Fonte: Autora (2023)

Nesse trabalho o modelo tridimensional da CLT em elementos finitos foi construído utilizando elementos sólidos C3D10 (um tipo de elemento tetraédrico com 10 nós), disponíveis no software ABAQUS. A Figura 3.8 ilustra de forma mais detalhada esse elemento. De acordo com Smirolto (2020), o uso do elemento C3D10 apresenta excelente acurácia para análise estruturas complexas e uma definição precisa do contato entre os elementos.

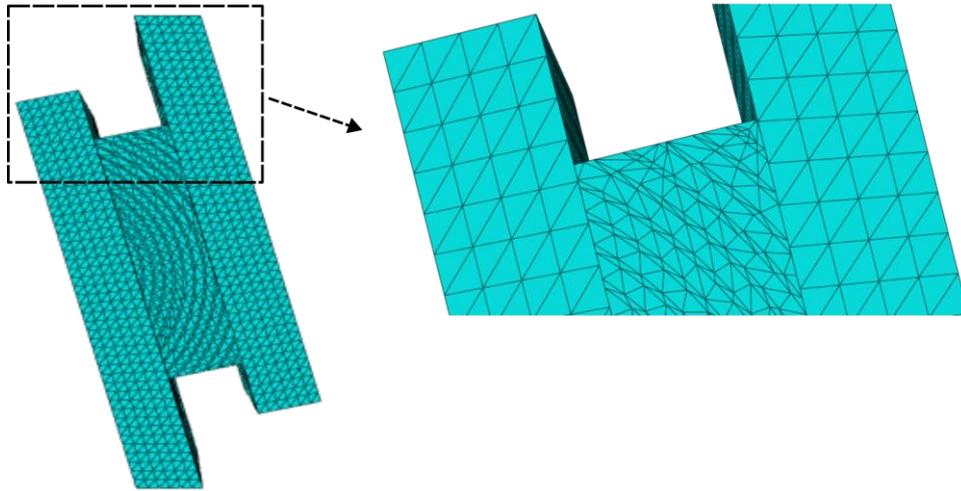
Figura 3.8 - Elemento tetraédrico quadrático com 10 nós do tipo C3D10



Fonte: Adaptado de Bhattacharjee (2021)

Após a realização de algumas simulações, constatou-se que o tamanho dos elementos ao longo dos anéis, que é de 4,5 mm, apresentava resultados satisfatórios com um custo computacional razoável. Em relação aos elementos atribuídos às placas de transferência de carga, o tamanho de 7 mm foi adotado ilustrado na Figura 3.9.

Figura 3.9 - Configuração da malha

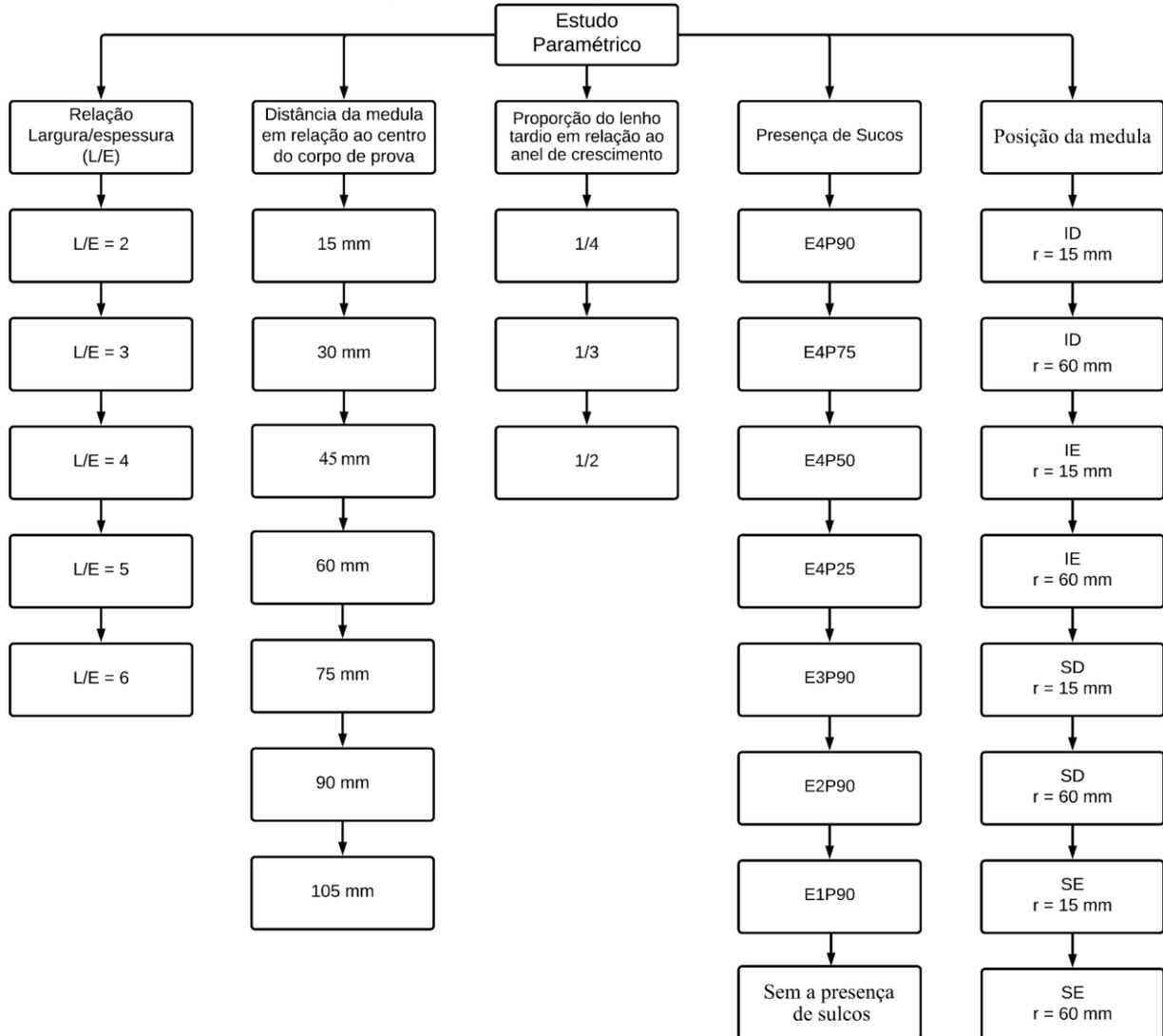


Fonte: Autora (2023)

3.2 ESTUDO PARAMÉTRICO

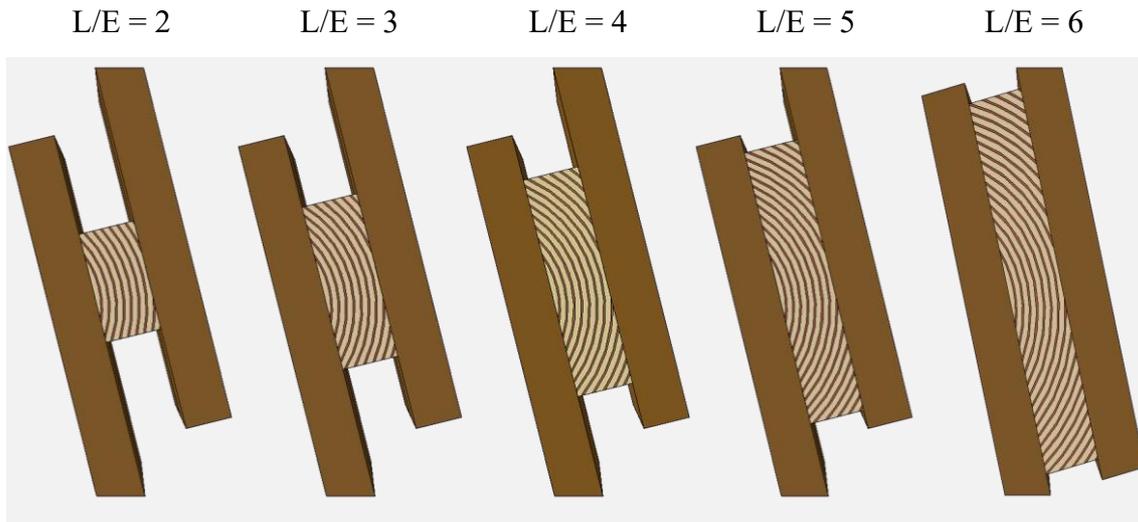
Definidos as características do ensaio padrão, foi desenvolvido um estudo paramétrico, de acordo com a Figura 3.10.

Figura 3.1 - Fluxograma de análises



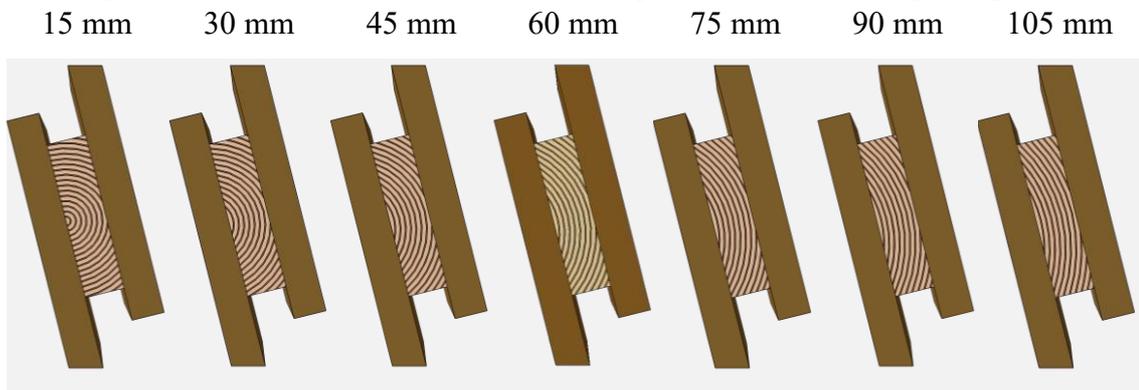
Fonte: Autora (2023)

No fluxograma referente ao estudo paramétrico desenvolvido, a primeira coluna se representa à razão entre largura e espessura. Essa razão varia entre 2, 3, 4, 5 e 6, enquanto o valor da espessura é fixado em 30 mm conforme ilustrado na Figura 3.11.

Figura 3.2 - Relação Largura (L) x espessura (E)

Fonte: Autora (2023)

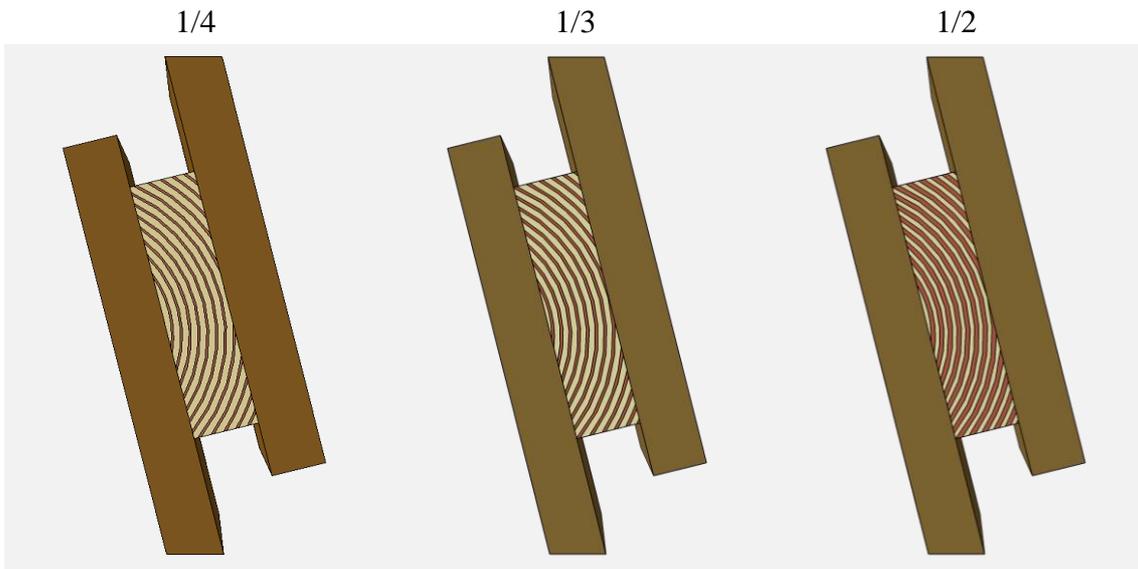
A segunda coluna corresponde à distância da medula em relação ao eixo central do corpo de prova com excentricidade nula. As distâncias utilizadas foram de $r = 15\text{mm}$, $r = 30\text{mm}$, $r = 45\text{mm}$, $r = 60\text{mm}$, $r = 75\text{mm}$, $r = 90\text{mm}$ e $r = 105\text{mm}$ conforme ilustrado na Figura 3.12.

Figura 3.3 - Distância da medula em relação ao centro do corpo de prova

Fonte: Autora (2023)

A terceira coluna do fluxograma se refere à proporção da espessura do lenho tardio em relação à espessura total do anel de crescimento anual, que é de 4 mm. As proporções utilizadas foram de $1/4$, $1/3$ e $1/2$ conforme ilustrado na Figura 3.13.

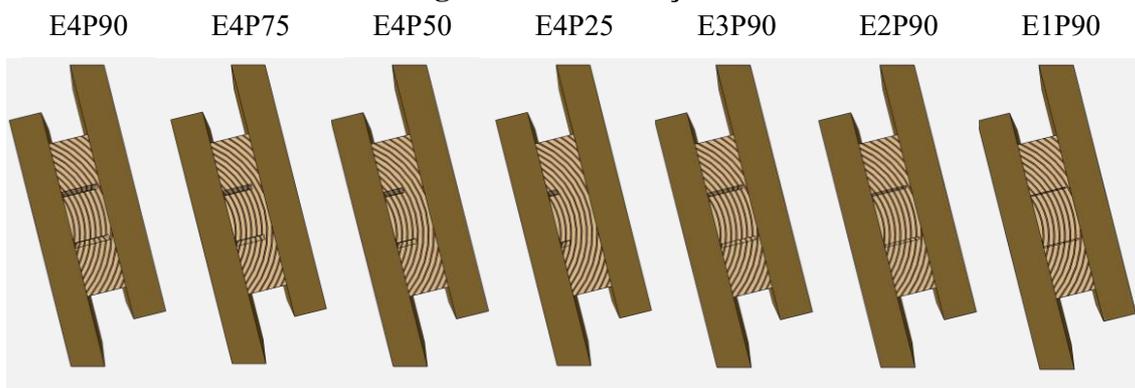
Figura 3.4 - Proporção do lenho tardio em relação ao anel de crescimento



Fonte: Autora (2023)

A quarta etapa do fluxograma apresentado corresponde à verificação da existência de sulcos na lamela ensaiada. As propriedades geométricas dos sulcos são variáveis em relação a dois parâmetros distintos: o primeiro é o parâmetro E, que diz respeito à espessura dos sulcos, medida em milímetros; o segundo é o parâmetro P, que representa a porcentagem da espessura da lamela ocupada pelos sulcos. Desse modo, sulcos com a característica E4P90, por exemplo, possuem 4 milímetros de espessura e ocupam 90% da espessura da lamela (ou seja, 27 milímetros). A Figura 3.14 apresenta uma representação esquemática dos sulcos em questão.

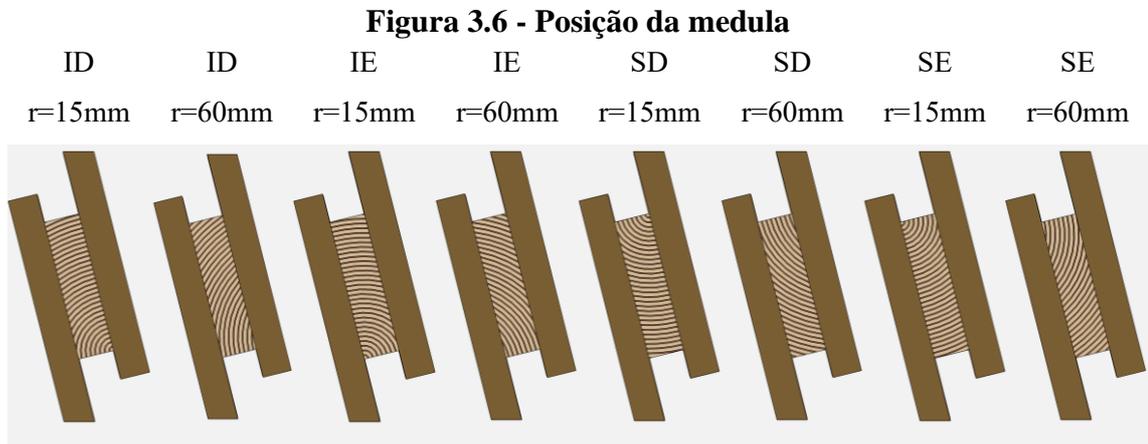
Figura 3.5 - Presença de Sulcos



Fonte: Autora (2023)

A última coluna representa à análise da posição da medula em relação aos cantos da lamela. Nessa coluna, são utilizadas legendas para indicar a posição da medula, como por exemplo: (I) para inferior, (S) para superior, (D) para direito e (E) para esquerdo. Por sua vez, $r = 15$

mm ou 60 mm representam a distância em relação ao centro da lamela, perpendicularmente ao eixo que passa pelo centro da lamela. A Figura 3.15 ilustra o estudo da variação da posição da medula em relação à lamela.



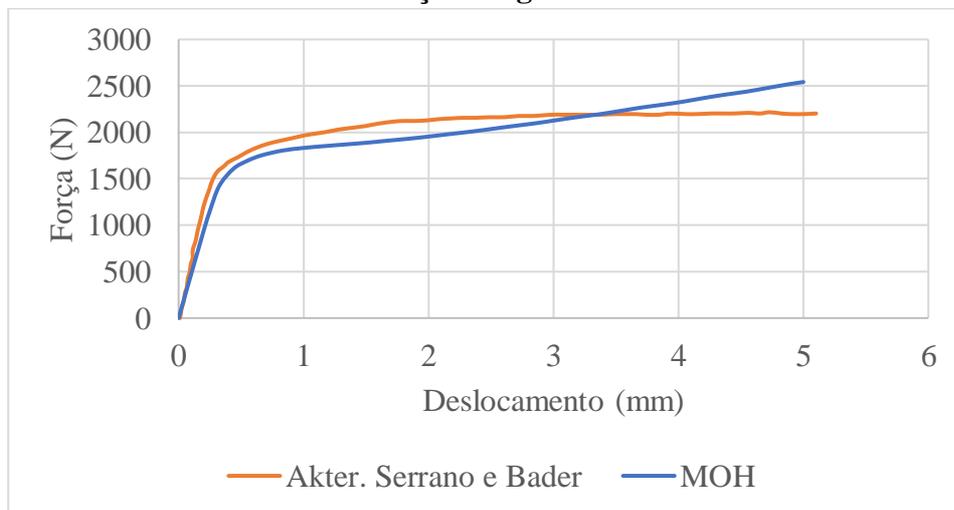
Fonte: Autora (2023)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 VALIDAÇÃO DO MODELO

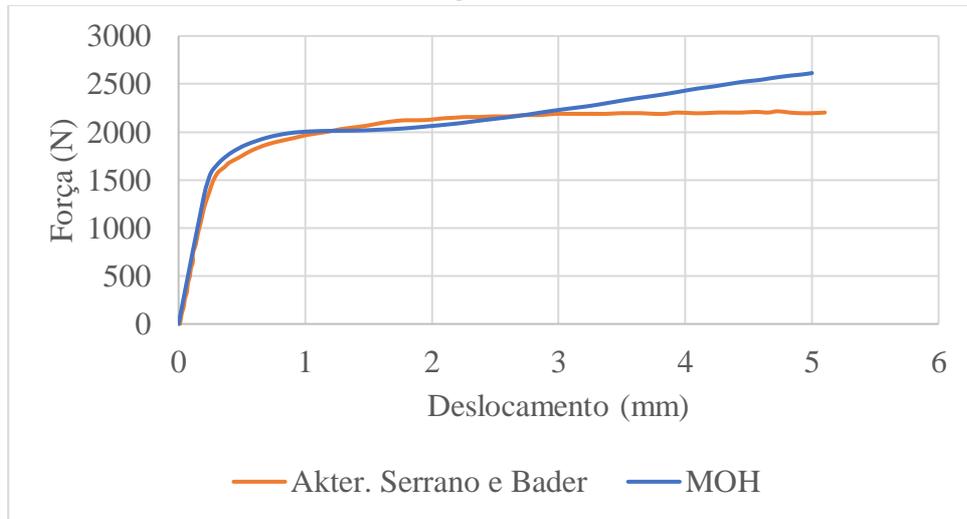
Os resultados do estudo comparativo entre os diagramas de força e deslocamento nos ensaios de compressão e cisalhamento, nas direções radial e tangencial, são apresentados nas Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4.

Figura 4.1 - Resultados das curvas Força x Deslocamento do ensaio de compressão na direção tangencial



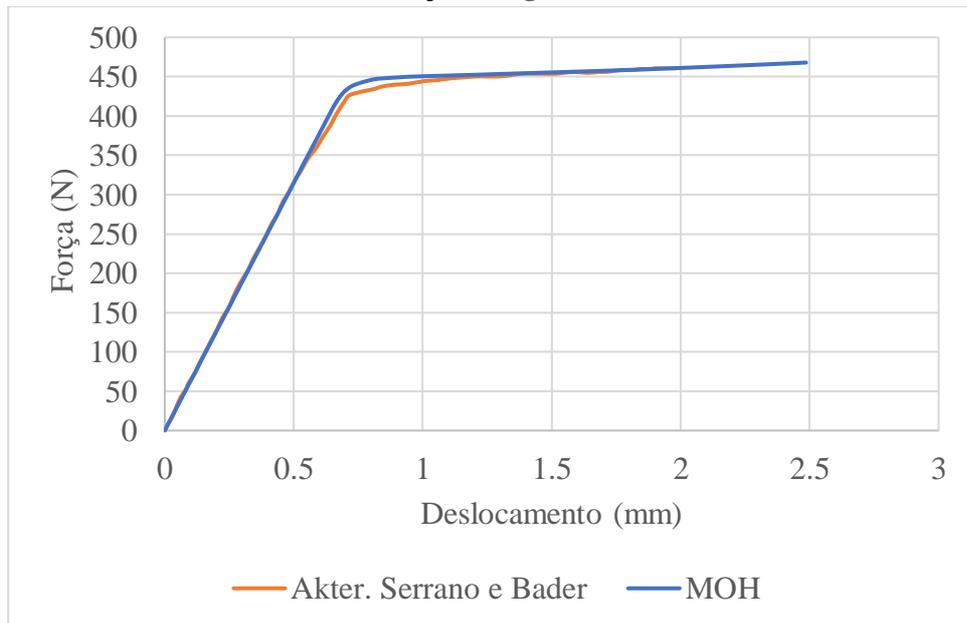
Fonte: Autora (2023)

Figura 4.2 - Resultados das curvas Força x Deslocamento do ensaio de compressão na direção radial



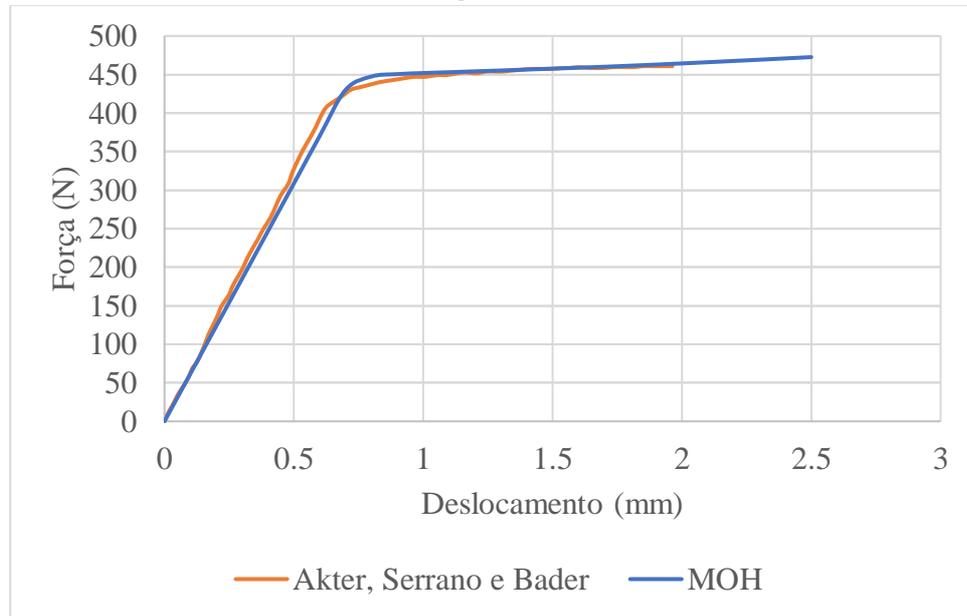
Fonte: Autora (2023)

Figura 4.3 - Resultados das curvas Força x Deslocamento do ensaio de cisalhamento na direção tangencial



Fonte: Autora (2023)

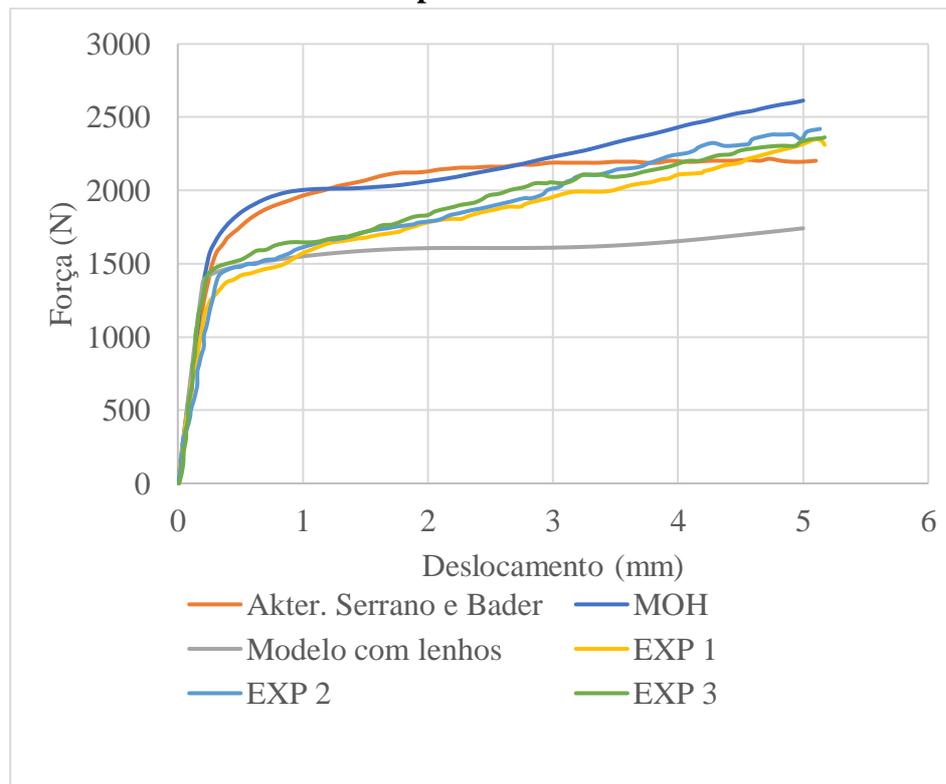
Figura 4.4 - Resultados das curvas Força x Deslocamento do ensaio de cisalhamento na direção radial



Fonte: Autora (2023)

Por sua vez, a Figura 4.5 ilustra o resultado de validação do modelo numérico com a discretização do lenho inicial e tardio.

Figura 4.5 - Resultado do ensaio de validação do modelo com consideração dos lenhos na compressão radial



Fonte: Autora (2023)

Ao comparar os resultados das curvas de Força x Deslocamento obtidos por Akter, Serano e Bader (2021) com os resultados obtidos pelo modelo proposto para este estudo, observa-se que, para os ensaios de cisalhamento, as curvas apresentaram ótima aproximação, já que se sobrepuseram em quase toda a sua extensão. Com relação às curvas resultantes dos ensaios de compressão, apresentaram boa aproximação, sendo mais próximas na região elástica.

Com relação ao ensaio de compressão com o modelo que inclui a diferenciação dos lenhos, é notável que o modelo apresentou um comportamento mais conservador para regiões de maiores deslocamentos. No entanto, o modelo apresentou um comportamento mais próximo aos resultados experimentais, especialmente na região de transição do regime elástico para o regime plástico.

Portanto, pode-se concluir que o modelo utilizado neste trabalho é representativo do comportamento do material e que o comportamento obedece ao Critério de Hill, validando o modelo e o critério de falha para aplicação em simulações subsequentes.

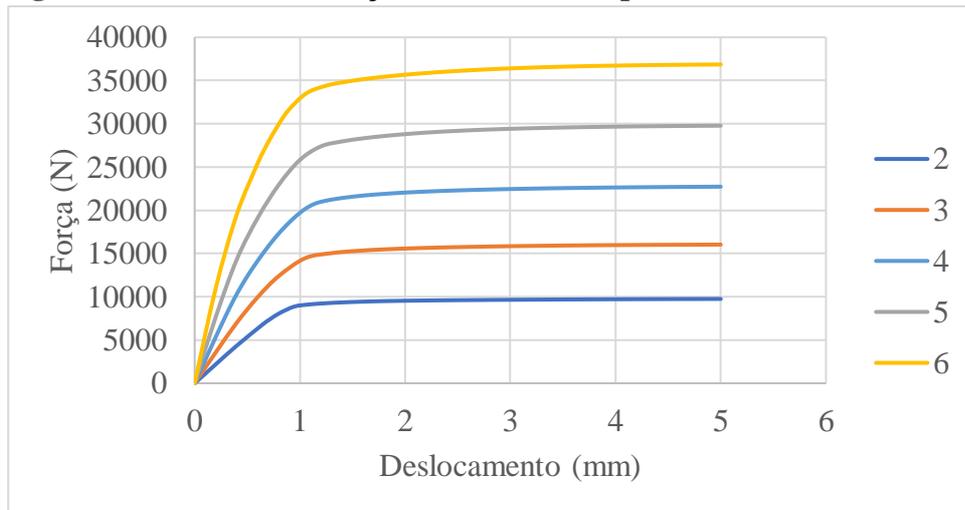
4.2 ESTUDO PARAMÉTRICO

Nesta seção, serão discutidos os resultados obtidos nas simulações numéricas desenvolvidas com as variações geométricas definidas pelo estudo paramétrico.

4.2.1 Variação da razão largura/espessura da lamela

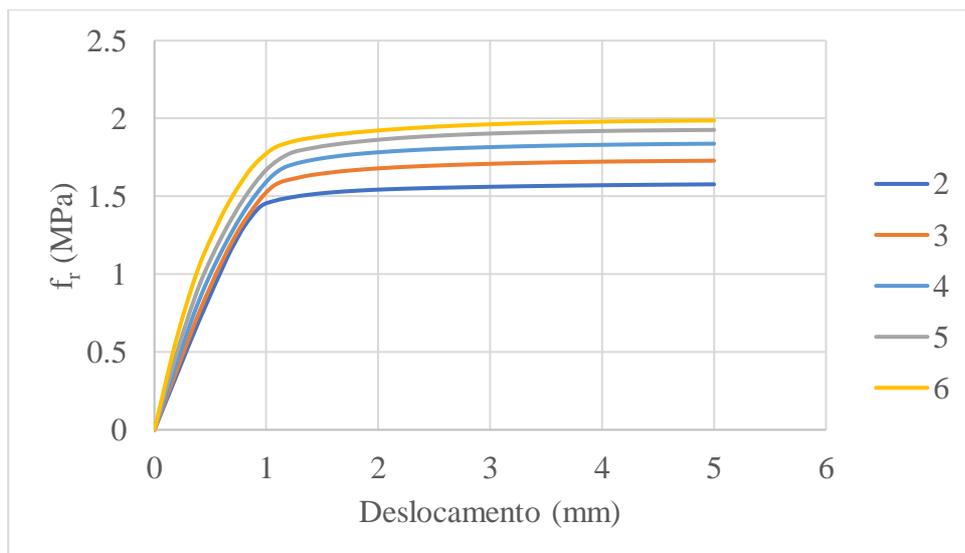
As Figuras 4.6 e 4.7 apresentam os resultados dos diagramas de força e deslocamento, e de tensão de *rolling shear* (f_r) e deslocamento, obtidos nas simulações numéricas do estudo da variação da razão largura/espessura das lamelas, para as razões de 2, 3, 4, 5 e 6.

Figura 4.6 - Gráfico de força e deslocamento para diferentes razões E/L



Fonte: Autora (2023)

Figura 4.7 - Gráfico de tensão de *rolling shear* (f_r) e deslocamento para diferentes razões E/L



Fonte: Autora (2023)

A Tabela 4.1 apresenta os valores obtidos para os valores de tensão f_r (resistência ao *rolling shear* das lamelas) no estudo da variação da razão L/E das lamelas.

Tabela 4.1 - Valores da resistência ao *rolling shear* para diferentes razões espessura/largura da lamela

Tensão de resistência ao <i>Rolling Shear</i>					
L/E	2	3	4	5	6
f_r (MPa)	1,48	1,59	1,66	1,72	1,83

Fonte: Autora (2023)

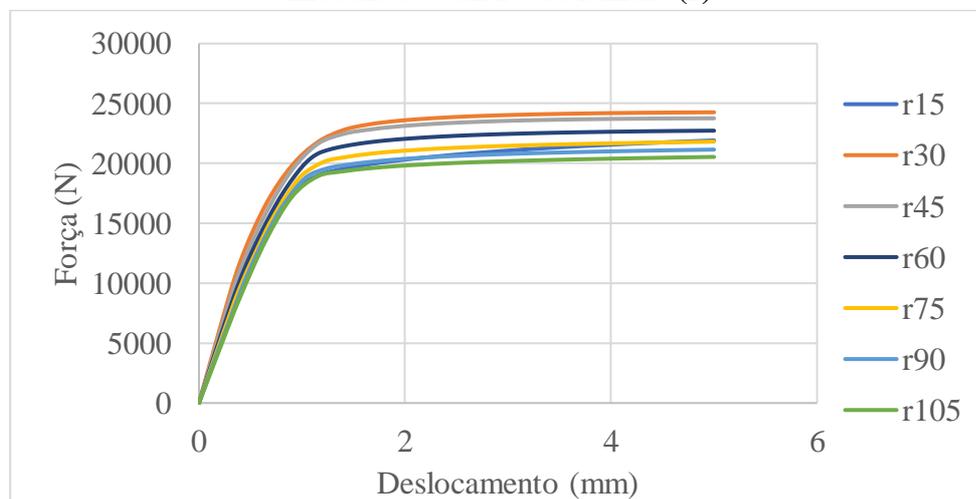
Após análise das Figuras 4.6 e 4.7, bem como da Tabela 4.1, pode-se observar que a resistência ao *rolling shear* da lamela é diretamente proporcional à razão largura/espessura. Quando comparados com os resultados obtidos pela simulação da lamela padrão ($L/E = 4$), é possível notar que a redução da razão L/E para 3 resulta em uma diminuição de 4,2% na resistência ao *rolling shear*. Caso a razão L/E seja diminuída para 2, a perda de resistência aumenta para 10,8%.

No entanto, ao aumentar a razão L/E para 5, há um acréscimo na resistência de 3,6%, enquanto para $L/E = 6$, o aumento na resistência é de 10,2%. Desta forma, aumentando a razão L/E da lamela utilizada na produção de painéis de CLT de 2 para 6, é possível notar um acréscimo em 23,6% da sua resistência ao *rolling shear* (f_r).

4.2.2 Variação da distância da medula em relação ao centro da lamela

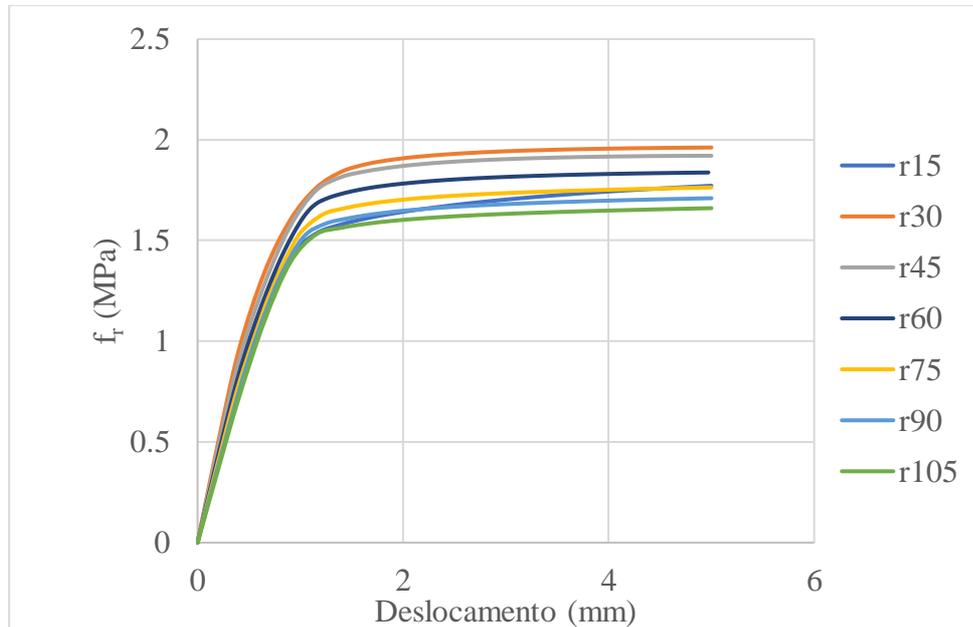
As Figuras 4.8 e 4.9 apresentam os resultados dos diagramas de força e deslocamento, e de tensão de *rolling shear* (f_r) e deslocamento, obtidos nas simulações numéricas do estudo da variação da distância da medula em relação ao centro das lamelas, para as distâncias (r) de 15mm, 30mm, 45mm, 60mm, 75mm, 90mm e 105mm.

Figura 4.8 - Diagrama de força e deslocamento para diferentes valores de distância da medula ao centro da lamela (r)



Fonte: Autora (2023)

Figura 4.9 - Diagrama de tensão de *rolling shear* (f_r) e deslocamento para diferentes valores de distância da medula ao centro da lamela (r)



Fonte: Autora (2023)

A Tabela 4.2 apresenta os valores obtidos para os valores de tensão f_r , ou resistência ao *rolling shear* no estudo da variação da distância da medula ao centro das lamelas.

Tabela 4.2 - Valores da resistência ao *rolling shear* para diferentes distâncias da medula ao centro das lamelas.

		Tensão de resistência ao <i>Rolling Shear</i>						
r (mm)		15	30	45	60	75	90	105
f_r (MPa)		1,53	1,76	1,75	1,66	1,60	1,56	1,52

Fonte: Autora (2023)

A partir da análise das Figuras 4.8 e 4.9, bem como da Tabela 4.2, é possível notar que a resistência da lamela ao *rolling shear* é inversamente proporcional à distância da medula. Com exceção da distância $r = 15\text{mm}$, que apresentou menor resistência. Uma característica que diferencia a seção com $r = 15\text{mm}$ das demais é a presença da medula na seção transversal da lamela, mesmo que em sua extremidade. Esse resultado sugere que a presença da medula na seção transversal da lamela causa uma diminuição em sua resistência f_r .

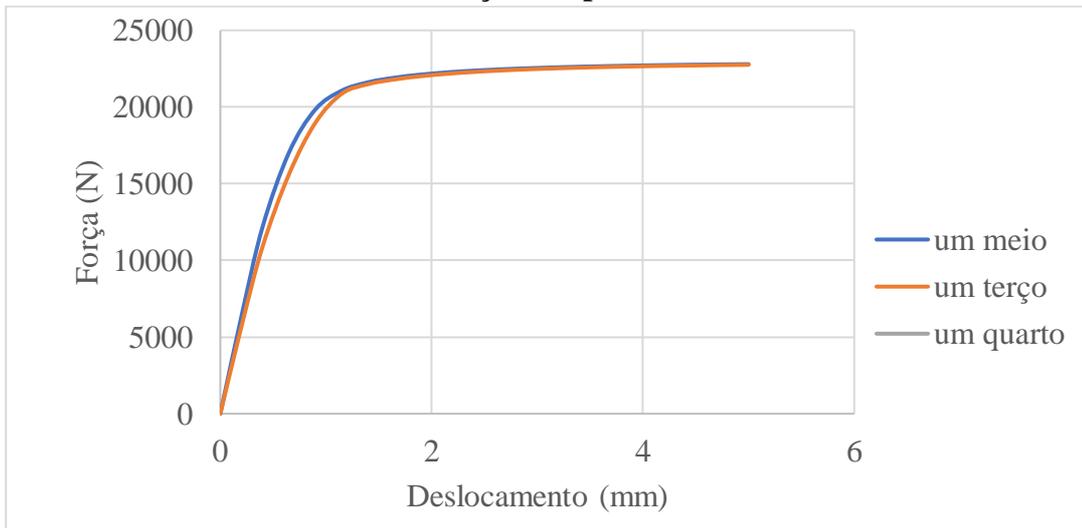
Desta forma, ao diminuir a distância da medula em relação ao centro da lamela de $r = 105\text{mm}$ para $r = 30\text{mm}$, é possível aumentar sua resistência ao *rolling shear* (f_r) em 15,8%. No entanto, os resultados mostram que a presença da medula na seção transversal da lamela causa

uma diminuição de 13,1% em comparação com a resistência para $r = 30\text{mm}$, que apresentou a maior resistência no estudo.

4.2.4 Variação da proporção da espessura do lenho tardio em relação a espessura do anel de crescimento

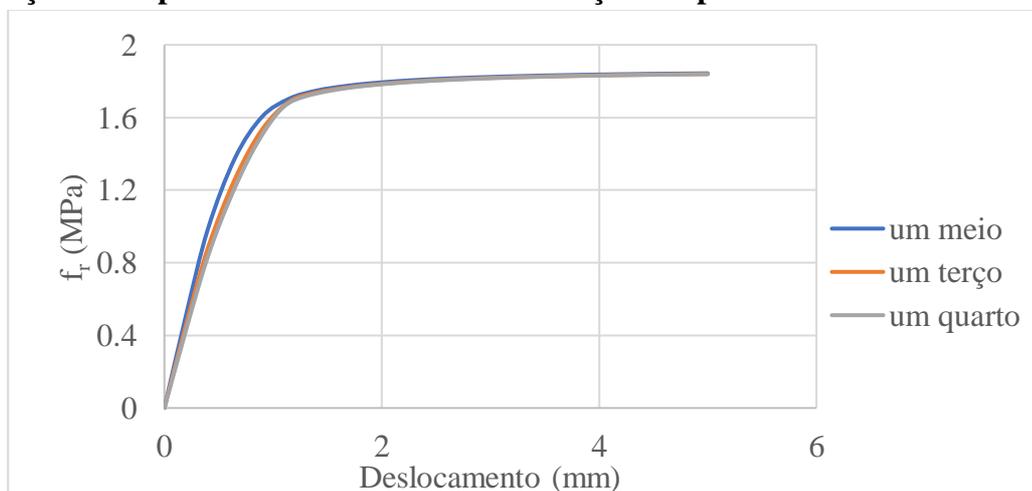
As Figuras 4.10 e 4.11 ilustram os resultados dos diagramas de força e deslocamento, bem como os diagramas de tensão de *rolling shear* (f_r) e deslocamento, obtidos nas simulações numéricas do estudo da variação da espessura do lenho tardio em relação à espessura do anel de crescimento, para as proporções de 1/4, 1/3 e 1/2.

Figura 4.10 - Diagrama de força e deslocamento para diferentes proporções da espessura do lenho tardio em relação a espessura do anel de crescimento



Fonte: Autora (2023)

Figura 4.11 - Diagrama de tensão de *rolling shear* (f_r) e deslocamento para diferentes proporções da espessura do lenho tardio em relação a espessura do anel de crescimento



Fonte: Autora (2023)

A Tabela 4.3 apresenta os valores obtidos para os valores de tensão f_r , ou resistência ao *rolling shear* no estudo da variação da proporção da espessura do lenho tardio em relação a espessura do anel de crescimento.

Tabela 4.3 - Valores da resistência ao *rolling shear* para diferentes proporções da espessura do lenho tardio em relação a espessura do anel de crescimento

Tensão de resistência ao <i>Rolling Shear</i>			
Proporção	1/4	1/3	1/2
f_r (MPa)	1,66	1,68	1,70

Fonte: Autora (2023)

A partir da análise das Figuras 4.10 e 4.11, e da Tabela 4.3, é possível observar que quanto maior a proporção da espessura do lenho tardio em relação a espessura do anel de crescimento, maior a resistência da lamela ao *rolling shear*.

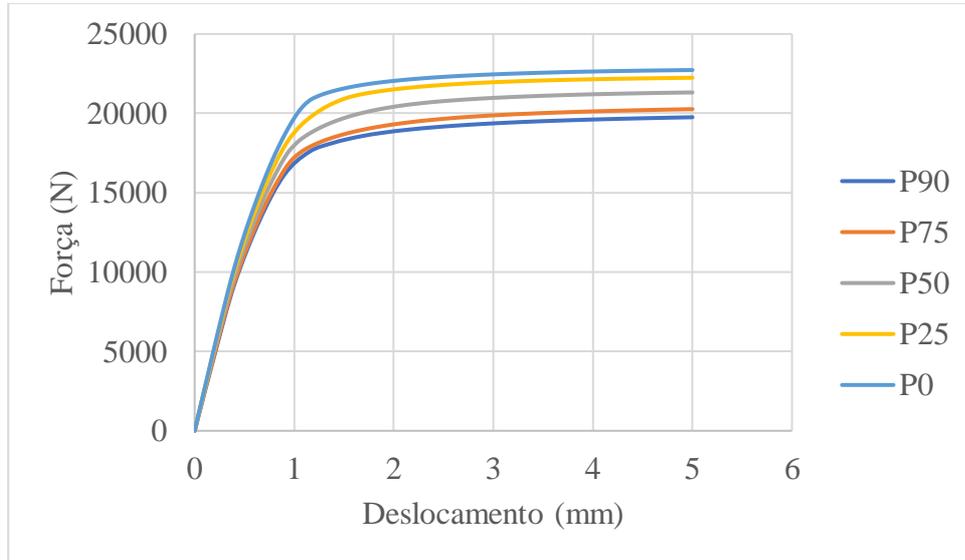
Desta forma, a resistência ao *rolling shear* das lamelas pode aumentar em 2,4% quando a proporção do lenho tardio na espessura do anel de crescimento dobra de 1/4 para 1/2.

4.2.5 Variação da geometria dos sulcos

4.2.5.1 Variação da porcentagem da espessura da lamela ocupada pelos sulcos, com espessura do sulco fixa em 4 mm.

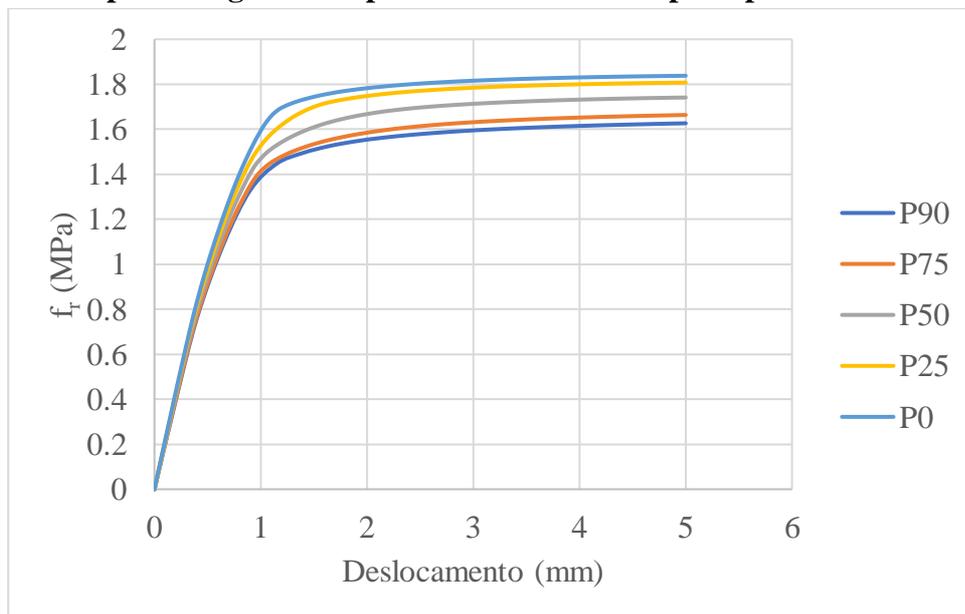
As Figuras 4.12 e 4.13 apresentam os resultados dos diagramas de força e deslocamento, e de tensão de *rolling shear* (f_r) e deslocamento, obtidos nas simulações numéricas do estudo da variação porcentagem da espessura da lamela ocupada pelos sulcos, para as porcentagens de 90%, 75%, 50%, 25% e 0% (sem presença de sulcos).

Figura 4.12 - Diagrama de força e deslocamento para diferentes porcentagens da espessura da lamela ocupada pelo sulco



Fonte: Autora (2023)

Figura 4.13 - Diagrama de tensão de *rolling shear* (f_r) e deslocamento para diferentes porcentagens da espessura da lamela ocupada pelo sulco



Fonte: Autora (2023)

A Tabela 4.4 apresenta os valores obtidos para os valores de tensão f_r , ou resistência ao *rolling shear* no estudo da variação da porcentagem da espessura da lamela ocupada pelos sulcos.

Tabela 4.4 - Valores da resistência ao *rolling shear* para diferentes porcentagens da espessura da lamela ocupada pelos sulcos

Tensão de resistência ao <i>Rolling Shear</i>					
Porcentagem	90%	75%	50%	25%	0%
fr	1,45	1,46	1,53	1,59	1,66

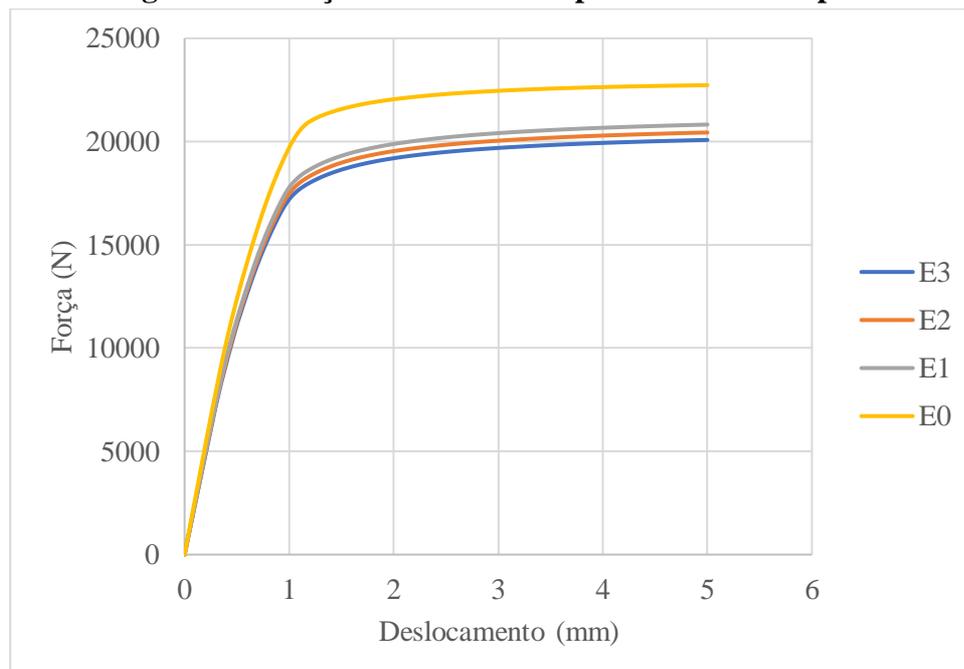
Fonte: Autora (2023)

A partir da análise das figuras 4.12 e 4.13, e da Tabela 4.4, é possível observar que quanto maior a porcentagem da espessura da lamela ocupada pelos sulcos, menor sua resistência ao *rolling shear*. Quando comparado ao resultado do ensaio padrão (sem presença de sulcos), a resistência ao *rolling shear* das lamelas com sulcos ocupando 90% de sua espessura apresentaram resistência ao *rolling shear* menos em 12,7%.

4.2.5.2 Variação da espessura dos sulcos, com porcentagem de ocupação da lamela pelo sulco fixa em 90%.

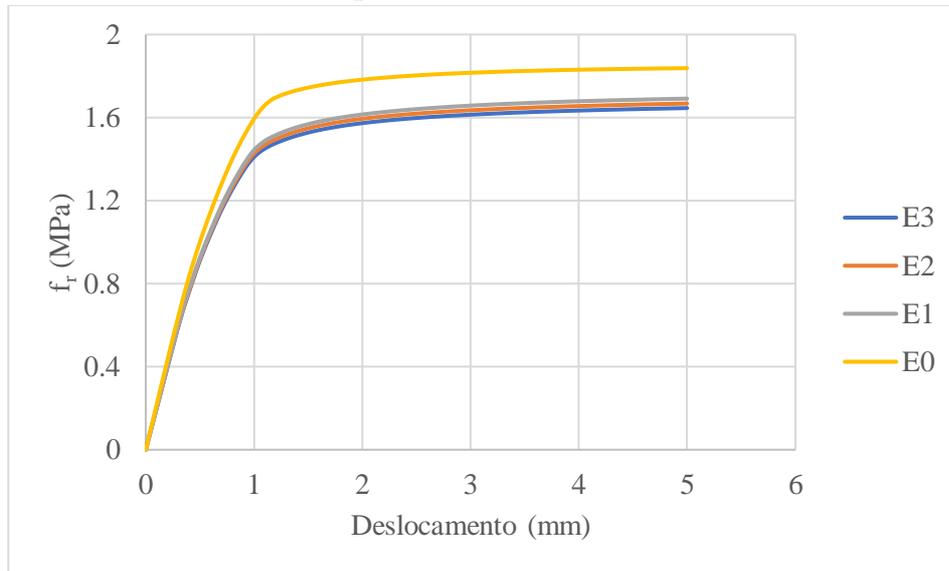
As Figuras 4.14 e 4.15 apresentam os resultados dos diagramas de força e deslocamento, e de tensão de *rolling shear* (f_r) e deslocamento, obtidos nas simulações numéricas do estudo da variação espessura dos sulcos, com porcentagem de ocupação da lamela pelo sulco fixa em 90%. As espessuras variaram em 4mm, 3mm, 2mm, 1mm e 0mm (sem a presença de sulcos)

Figura 4.14 - Diagrama de força e deslocamento para diferentes espessuras dos sulcos



Fonte: Autora (2023)

Figura 4.15 - Diagrama de tensão de *rolling shear* (f_r) e deslocamento para diferentes espessuras dos sulcos



Fonte: Autora (2023)

A Tabela 4.5 apresenta os valores obtidos para os valores de tensão f_r , ou resistência ao *rolling shear* no estudo da variação da porcentagem da espessura da lamela ocupada pelos sulcos.

Tabela 4.5 - Valores da resistência ao *rolling shear* para diferentes porcentagens da espessura da lamela ocupada pelos sulcos

Tensão de resistência ao <i>Rolling Shear</i>					
Espessura (mm)	4	3	2	1	0
f_r	1,45	1,46	1,47	1,48	1,66

Fonte: Autora (2023)

A partir da análise das Figuras 4.15 e 4.16, e da Tabela 4.6, é possível observar que quanto menor a espessura dos sulcos, maior é a resistência ao *rolling shear* da lamela. Entretanto, este aumento na resistência é pouco significativo, representando 2,1% de aumento quando a espessura dos sulcos diminuiu de 4mm para 1 mm. Com relação à simulação numérica sem a presença de sulcos, é notável que a presença de sulcos diminuiu a resistência da lamela.

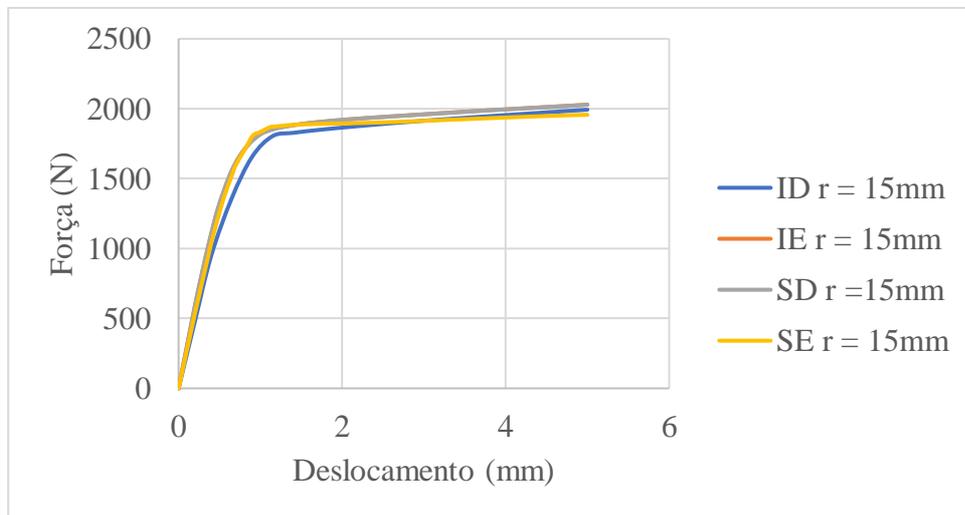
4.2.6 Variação da posição da medula

O estudo da variação da posição da medula foi dividido em dois grupos. Nos dois grupos, a posição da medula foi indicada com relação aos cantos da seção transversal da lamela. Esta indicação foi de ID (canto inferior direito), IE (canto inferior esquerdo), SD (canto superior

esquerdo) e SE (canto superior esquerdo). A diferença entre os dois grupos foi que, em um, a distância da medula ao centro da lamela foi de $r = 15\text{mm}$, ou seja, a medula foi considerada presente na seção, no canto. No outro grupo, a distância da medula ao centro da lamela foi de $r = 60\text{mm}$.

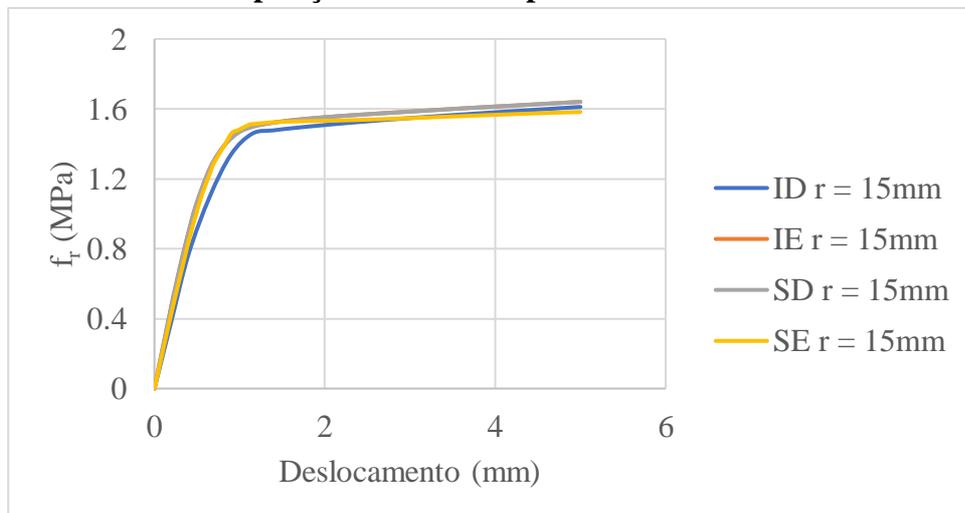
As figuras 4.16 e 4.17 apresentam os resultados dos diagramas de força e deslocamento, e de tensão de *rolling shear* (f_r) e deslocamento, obtidos nas simulações numéricas do estudo da variação da posição da medula, sendo este o grupo ID, IE, SD, e SE com distância do centro de 15mm .

Figura 4.16 - Diagrama de força e deslocamento para diferentes posições da medula com $r = 15\text{mm}$



Fonte: Autora (2023)

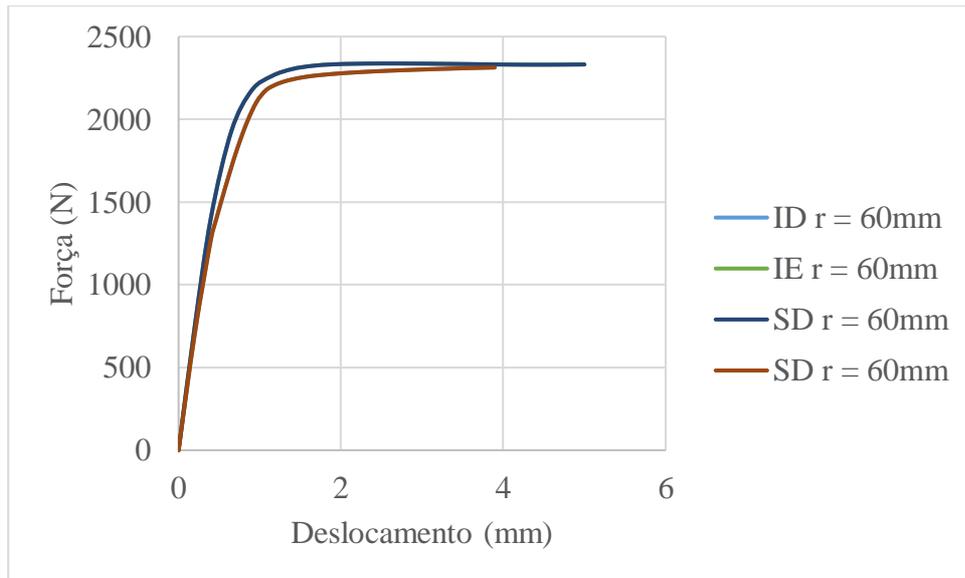
Figura 4.17 - Diagrama de tensão de *rolling shear* (f_r) e deslocamento para diferentes posições da medula para $r = 15\text{mm}$



Fonte: Autora (2023)

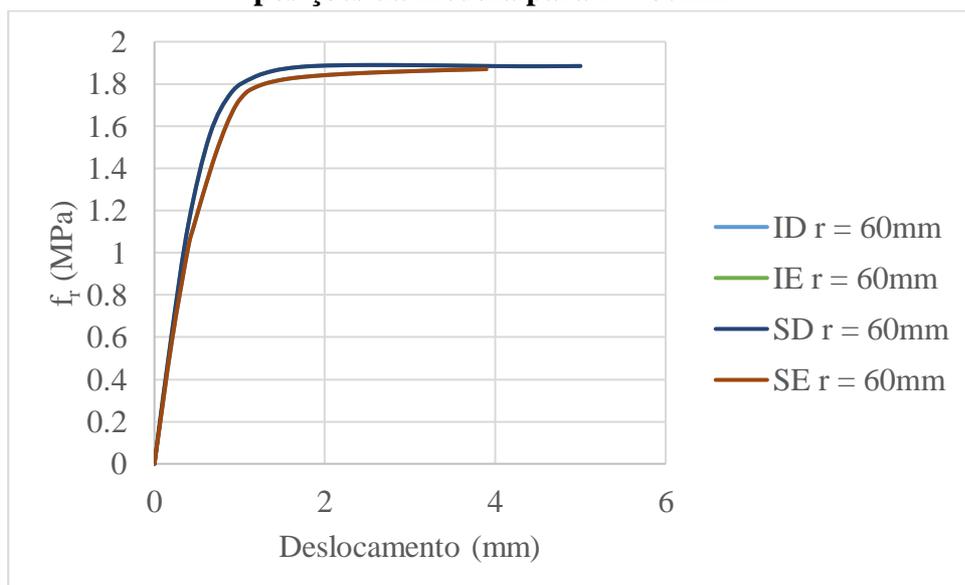
As Figuras 4.18 e 4.19 apresentam os resultados dos diagramas de força e deslocamento, e de tensão de *rolling shear* (f_r) e deslocamento, obtidos nas simulações numéricas do estudo da variação da posição da medula, sendo este o grupo ID, IE, SD, e SE com distância do centro de 60mm.

Figura 4.18 - Diagrama de força e deslocamento para diferentes posições da medula com $r = 60\text{mm}$



Fonte: Autora (2023)

Figura 4.19 - Diagrama de tensão de *rolling shear* (f_r) e deslocamento para diferentes posições da medula para $r = 60\text{mm}$



Fonte: Autora (2023)

A Tabela 4.6 apresenta os valores obtidos para os valores de tensão f_r , ou resistência ao *rolling shear* no estudo da variação da posição da medula.

Tabela 4.6 - Valores da resistência ao *rolling shear* para diferentes posições da medula

Tensão de resistência ao <i>Rolling Shear</i>				
Posição	ID	IE	SD	SE
f_r (MPa) para $r = 15\text{mm}$	1,46	1,49	1,49	1,51
f_r (MPa) para $r = 60\text{mm}$	1,77	1,83	1,83	1,77

Fonte: Autora (2023)

A partir da análise das Figuras 4.16, 4.17, 4.18 e 4.19, e da tabela 4.6, é possível observar a posição da medula na seção transversal da lamela é relevante na resistência ao *rolling shear* da peça. É possível notar novamente que, quando a medula está presente na seção, ocorre uma perda de resistência nesta configuração ($r = 15\text{mm}$) os valores de f_r são iguais para as posições IE e SD (1,49 MPa), ou seja, para as posições que estão mais próximas à linha de aplicação do carregamento. Porém, para as posições mais afastadas da linha de carregamento (ID e SE) valores variaram ligeiramente, sendo a posição ID a de menor resistência, com 1,46 MPa.

Quando a medula foi posicionada a uma distância maior ($r = 60\text{mm}$), foi observado um aumento da f_r na peça. Novamente, para as posições IE e SD, o valor da resistência foi igual (1,83 MPa). Já para as posições mais afastadas da linha de carregamento, a resistência foi menor (1,77 MPa).

Por fim, considera dando as posições que proporcionaram a seção de maior resistência e a de menor resistência, foi possível obter um aumento de resistência de 25,3%.

5 CONCLUSÃO

Os painéis de CLT vêm se apresentando como um produto inovador, permitindo a ampliação do uso da madeira como material estrutural, e a execução de edifícios de múltiplos pavimentos de maneira mais racional e sustentável. Tendo em vista o potencial brasileiro para a produção de madeira e o fato de que a indústria de CLT no Brasil ainda é relativamente nova, se comparada ao cenário mundial, existe um vasto campo a ser explorado no estudo e desenvolvimento dessa tecnologia.

Diante disso, o presente trabalho teve como objetivo a investigação do efeito *rolling shear* em lamelas de painéis de CLT sujeitas ao cisalhamento perpendicular ao plano. Para isso, foram utilizadas simulações numéricas de ensaios de cisalhamento em segmentos de lamelas, considerando a diferença mecânica dos lenhos inicial e tardio, e diferentes configurações geométricas das lamelas e dos anéis de crescimento.

Nesse intuito, o *software* ABAQUS foi utilizado para se desenvolver uma modelagem numérica, com base no Método dos Elementos Finitos, capaz de simular o comportamento mecânico das lamelas situadas em camadas intermediárias dos painéis de CLT, que estão sujeitas à cisalhamento perpendicular às fibras, e portanto, sujeitas ao efeito *rolling shear*. O modelo numérico foi validado por meio de comparação com resultados numéricos e experimentais. Apesar de o modelo conter algumas limitações, como a não consideração de diferença no comportamento mecânico de tração e compressão e de a consideração de mudança brusca entre lenho inicial e tardio, a modelagem desenvolvida foi capaz de representar de maneira próxima da realidade o comportamento mecânico do material. A partir da validação do modelo, foi possível extrapolar a capacidade de representar o comportamento do material, e investigar o comportamento sob diferentes configurações geométricas das lamelas e de posição da medula, por meio de um estudo paramétrico.

No desenvolvimento do estudo paramétrico, primeiramente foi estudado a influência da razão largura/espessura (L/E) das lamelas na sua resistência ao *rolling shear*. Foi observado que, quanto maior a razão L/E , maior a resistência, tendo a lamela aumentada sua f_r em 23,6% quando L/E aumentou de 2 para 6. Em seguida, o estudo relacionado à distância da medula em relação ao centro da lamela resultou que quanto menor a distância r , maior a resistência f_r , exceto quando a medula esteve presente na seção. A resistência f_r aumentou em 15,8% quando o r foi diminuído de 105mm para 30mm. O estudo da influência da proporção do lenho tardio em relação à espessura do anel de crescimento resultou em um aumento da resistência com o

aumento da proporção, Entretanto, este aumento não foi tão significativo, correspondendo à 2,4% quando a proporção dobrou de 1/4 para 1/2.

O estudo relacionado à presença de sulcos na lamela gerou alguns resultados interessantes. A principal função de colocar sulcos nas lamelas é de evitar o aparecimento de fissuras nos painéis. Entretanto, a presença de sulcos resultou em uma diminuição da f_r em 12,7% quando comparada ao resultado da simulação sem a presença de sulcos. O modelo desenvolvido não é capaz de simular de maneira realista o desenvolvimento de fissuras nas lamelas, devendo estes resultados serem considerados com cautela. Por fim, o estudo relacionado a posição da medula mostrou que a presença da medula na seção transversal da lamela resulta em diminuição da f_r .

De maneira geral, é possível concluir que, é possível aumentar a resistência ao *rolling shear* de lamelas de painéis de CLT aumentando sua razão L/E, e realizando uma seleção mais criteriosa das lamelas que compõem as camadas intermediárias dos painéis. A seleção deve evitar a presença de medula na seção transversal da lamela, e se possível selecionar peças com o padrão de desdobro que apresenta maior f_r . Como um menor de r , por exemplo.

Por meio dos resultados obtidos nesta pesquisa fica evidente que a consideração de propriedades mecânicas distintas entre lenho inicial e lenho tardio nas simulações numéricas possui influência significativa nos resultados dos valores de resistência ao *rolling shear*, uma vez que em todas as configurações simuladas pelo estudo paramétrico apresentaram resultados diferentes. Vale salientar que as conclusões obtidas carecem de comprovação experimental.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante das conclusões obtidas, e tendo em vista as limitações do trabalho desenvolvido, para pesquisas que tenham como objetivo a investigação do efeito *rolling shear* em lamelas de painéis de CLT submetidas ao cisalhamento perpendicular às fibras, seguem algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Realização de simulações que utilizam diferentes critérios de falha que possam ser empregados para simular o comportamento ortotrópico da madeira;
- Realização de ensaios de caracterização de madeiras utilizadas na indústria nacional para a produção de painéis de CLT, para que o estudo possa ser aplicado para o produto nacional. A caracterização deve incluir a obtenção das propriedades elásticas dos lenhos inicial e tardio, separadamente;

- Aprimoramento do modelo por meio de inclusão de mecânica da fratura, para que possam ser observadas as alterações no padrão de falha resultantes das diferentes configurações do estudo paramétrico;
- Aplicação do modelo numérico que considera a diferença mecânica entre os lenhos inicial e tardio na simulação do comportamento mecânico de painéis de CLT.

6 REFERÊNCIAS

- AICHER, S.; CHRISTIAN, Z.; HIRSCH, M. **Rolling shear modulus and strength of beech wood laminations**. *Holzforschung*, v. 70, n. 8, p. 773–781, 2016.
- AUGUSTIN, M. Wood based panels. In: LEONARDO DA VINCI. **Handbook 1: timber structures**. Educational Materials for Designing and Testing of Timber Structures (TEMTIS). 2008. cap. 6.
- BALLARIN, A.W.; TARGA, L.A.; SOBRAL, L.M. **Fluência em peças fletidas de E. citriodora e P. elliottii submetidas a níveis de carregamento elevados**. In: V Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira. Anais... Belo Horizonte, 11p, 1998.
- BATHE, Klaus-Jürgen. **Finite Element Procedures**. Watertown, Massachusetts, Prentice Hall, 2014.
- BAO, Z. **Structural composite lumber**. In: APA. *Engineered wood handbook*. New York: Mc Graw-Hill, 2002. chap. 6, p. 6.1-6.49.
- BRANDNER, R.; FLATSCHER, G.; RINGHOFER, A.; SCHICKHOFER, G.; THIEL, A.. Cross laminated timber (CLT): overview and development. **European Journal Of Wood And Wood Products**, [S.L.], v. 74, n. 3, p. 331-351, 19 jan. 2016. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00107-015-0999-5>.
- BHATTACHARJEE, Sudip S. **Finite element analysis of solids and structures**. CRC Press, 2021.
- BAI, Yu; ZHANG, Jin; SHEN, Hao. Experimental and numerical analysis of residual load-carrying capacity of cross-laminated timber walls after fire. In: **Structures**. Elsevier, 2021. p. 50-61.
- BODIG, J.; JAYNE, B.A. **Mechanics of wood and wood products**. Florida: Krieger Publishing. 1993, 712p.
- BRANDNER, R.; RINGHOFER, A.; GRABNER, M. Probabilistic models for the withdrawal behavior of single self-tapping screws in the narrow face of cross laminated timber (CLT). **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlim, v.76, i.1, p.13-30, 2018. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00107-017-1226-3>. Acesso em: 02 set. 2021.
- CABRERO, J. M.; BLANCO, C.; GEBREMEDHIN, K. G.; MARTIN-MEIZOSO, A. Assessment of phenomenological failure criteria for wood. **European Journal of Wood and Wood**

Products, Berlim, v.70, i.6, p.871-882, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00107-012-0638-3>. Acesso em 4 out. 2021.

CALIL JÚNIOR, C.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de Elementos Estruturais em Madeira**. 1. ed. São Paulo: Manole, 2003.

CALIL JR, C.; DIAS, A.A. **Uso da madeira em construções rurais**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.1, p.71-77, 1997.

CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. **Métodos Numéricos para Engenharia**. 5. ed. São Paulo: AMGH Editora Ltda. 2011.

DE SOUZA LIMA, O. **Pinus - O produto ólea resina no Brasil**. Associação dos Resinadores do Brasil. Rio de Janeiro, p. 49. 2013.

ECKER, T. W. P. **Produção e caracterização mecânica de cross laminated timber (CLT) para aplicação como placas de piso**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2017.

EN 408+A1. Timber structures – structural timber and glued laminated timber – **Determination of some physical and mechanical properties**. (CEN); 2010.

EHRHART, T., BRANDNER, R. “**Rolling Shear: Test Configurations and Properties of Some European Soft- and Hardwood Species.**” *Engineering Structures*, vol. 172, Oct. 2018, pp. 554–72. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.118>.

ESPINOZA, O. TRUJILLO, V. R. MALLO, M. F. L. BUEHLMANN, U. Cross-Laminated Timber: Status and Research Needs in Europe. **BioResources**, 11(1) 281-295.

FALK, R. H. Wood as a Sustainable Building Material. **Wood Handbook: Wood as an Engineering Material**. Centennial Edition. 2010. cap. 1.

FURTMÜLLER, T.; GIGER, B.; ADAM, C. General shell section properties and failure model for cross-laminated timber obtained by numerical homogenization. **Engineering Structures**, v. 163, p.77-92, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.02.017>. Acesso em 4 out. 2021.

GUO, Haibo et al. A comparison of the energy saving and carbon reduction performance between reinforced concrete and cross-laminated timber structures in residential buildings in the severe cold region of China. **Sustainability**, v. 9, n. 8, p. 1426, 2017.

HILL, R. A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. **Proceedings of the Royal Society London A**, Londres, v. 193, n. 1033, p. 281-297, Março 1948.

HE, M.; SUN, X.; LI, Z. Bending and compressive properties of cross-laminated timber (CLT) panels made from Canadian hemlock. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 185, p. 175-183, Outubro 2018.

ISAKSSON, T. **Structural Timber - Variability and Structural Modelling**. In: THELANDERSSON, S.; LARSEN, H. L. Timber Engineering. West Sussex: John Wiley & Sons, 2003. p. 45-66.

JESKA, S.; PASCHA, K. S. **Emergent Timber Technologies: Materials, Structures, Engineering, Projects**. Rainer: BIRKHÄUSER, 2014.

KRETSCHMANN, D. E. **Mechanical Properties of Wood**. In: _____ Wood Handbook - Wood as an engineering material. Centennial. ed. Madison: Forest Products Laboratory, 2010. Cap. 5, p. 131-132.

KUKLÍK, P. History of Timber Structures. In: LEONARDO DA VINCI. **Handbook 1: timber structures**. Educational Materials for Designing and Testing of Timber Structures (TEMTIS). 2008. cap. 1.

LEHRINGER, Christian; GABRIEL, Joseph. Review of recent research activities on one-component PUR-adhesives for engineered wood products. **Materials and Joints in Timber Structures: Recent Developments of Technology**, p. 405-420, 2014.

OLIVEIRA, G. **Cross Laminated Timber (CLT) no Brasil: processo construtivo e desempenho**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - USP. São Paulo, p. 194. 2018.

LAM, F.; PRION, H. **Engineered wood products for structural purposes**. In: THELANDERSSON, S.; LARSEN, H. J. Timber engineering. [S.l.: s.n.], 2003. p. 81-102

MENDES, Rodrigo Adolfo Benitez. **Comportamento estrutural de painéis Cross-Laminated Timber sob cargas perpendiculares ao seu plano: abordagem experimental e numérica**. 2020.

MIOTTO, J. L. **Estruturas mistas de madeira-concreto: avaliação das vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibras de vidro**. 2009. 325f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

MOODY, R. C.; HERNANDEZ, R.; LIU, J. Y. **Glued structural members**. In: _____. Wood handbook: wood as an engineering material. Madison: USDA Forest Service, 1999. chap. 11, 463 p.

MP MORAN. Timber & Joinery. **Sawn Timber**. 2020. Disponível em: <https://www.mpmoran.co.uk/75x225mm-sawn-timber-c24-grade-10353038>. Acesso em: 08 fev.2020.

NELSON, S. **Structural composite lumber**. In: _____. Engineered wood products: a guide for specifiers, designers and users. Madison: PFS Research Foundation, 1997. chap. 6, p. 6/147-6/172.

NUERNBERG JUNIOR, C. **Análise numérica de painéis de madeira laminada colada cruzada solicitados à flexão perpendicular ao plano**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2020.

OLIVEIRA, G. L. **Cross Laminated Timber no Brasil: processo construtivo e desempenho**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

PEREIRA, M.C.M. **Metodologia para estudo da caracterização estrutural de painéis de Madeira Laminada Colada Cruzada**. 107p. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

PFEIL, W.; PFEIL, M., **Estruturas de Madeira**. 6. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

POPOVSKI, M. GANGNON, S. MOHAMMAD, M. CHEN, Z. Structural design of cross-laminated timber elements. In: FPInnovations. **Canadian CLT Handbook**. Revisão de Erol Karacabeyli. Québec: Canada, 2019. cap. 3.

SANDOLI, Antonio; CALDERONI, Bruno. The rolling shear influence on the out-of-plane behavior of CLT panels: A comparative analysis. **Buildings**, v. 10, n. 3, p. 42, 2020.

WADENBÄCK, J.; CLAPHAM, D.; GELLERSTEDT, G.; VON ARNOLD, S.. Variation in content and composition of lignin in young wood of Norway spruce. **Holzforschung**, [S.L.], v. 58, n. 2, p. 107-115, 15 mar. 2004. Walter de Gruyter GmbH. <http://dx.doi.org/10.1515/hf.2004.015>.

WANG, Z. et al. Influence of technical characteristics on the rolling shear properties of cross laminated timber by modified planar shear tests. **Maderas: Ciencia y Tecnologia**, v. 20, n. 3, p. 469–478, 2018.

WIEDENHOEFT, A. **Structure and Funtion of Wood**. In: _____ Wood Handbook - Wood as an engineering material. Madison: Forest Products Laboratory, 2010. p. 62-79.

WU, Guofang et al. The Effect of the Bearing Width on the Buckling Capacity of Partially Loaded CLT Member. **Buildings**, v. 12, n. 1, p. 84, 2022.

ZEGARRA, B. E. V. **Caracterização da estrutura anatômica e da densidade do lenho das árvores de *Pinus taeda* e efeito nas propriedades tecnológicas dos painéis OSB**. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2011.

ZENID, G. J. **Madeira na Construção Civil**. 2015. Disponível em: . Acesso em: 07 nov. 2021.

ZIENKIEWICZ, Olek C.; TAYLOR, Robert L. **The finite element method for solid and structural mechanics**. Elsevier, 2005.

SMIROLDO, F. et al. High performance connections to mitigate seismic damage in cross laminated timber (CLT) structures. In: **17th World Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE**. 2020.