

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

CLAUDIO NUERNBERG JUNIOR

ANÁLISE NUMÉRICA DE PAINÉIS DE MADEIRA LAMINADA COLADA
CRUZADA SOLICITADOS À FLEXÃO PERPENDICULAR AO PLANO

MARINGÁ

2020

CLAUDIO NUERNBERG JUNIOR

**ANÁLISE NUMÉRICA DE PAINÉIS DE MADEIRA LAMINADA COLADA
CRUZADA SOLICITADOS À FLEXÃO PERPENDICULAR AO PLANO**

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. José Luiz Miotto

MARINGÁ

2020

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

N964a

Nuernberg Junior, Claudio

Análise numérica de painéis de madeira laminada colada cruzada solicitados à flexão perpendicular ao plano / Claudio Nuernberg Junior. -- Maringá, PR, 2020.
169 f.: il. color., figs., tabs.

Orientador: 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, 2020.

1. Estruturas de madeira. 2. Madeira laminada colada cruzada. 3. Método dos elementos finitos. 4. Flexão (Engenharia civil). I. Miotto, José Luiz, orient. II. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 23.ed. 624.184

CLAUDIO NUERNBERG JUNIOR

**ANÁLISE NUMÉRICA DE PAINÉIS DE MADEIRA LAMINADA COLADA CRUZADA
SOLICITADOS À FLEXÃO PERPENDICULAR AO PLANO**

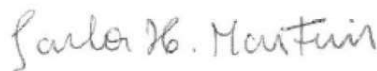
Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Maringá, como requisito parcial para a obtenção do título de mestre.

Aprovado em: 02/07/2020

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. José Luiz Miotto
Universidade Estadual de Maringá



Prof. Dr. Carlos Humberto Martins
Universidade Estadual de Maringá



Prof. Dr. Ronaldo Rigobello
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Luciane e Claudio, meus primeiros professores, pelo apoio e pelo bom exemplo que sempre me transmitiram.

À Karine, pelo incentivo, companheirismo e compreensão, especialmente neste último ano.

Ao Prof. Dr. José Luiz Miotto, pela dedicação, pelos conhecimentos transmitidos, pelas boas conversas e pela enorme paciência, ao longo de nossa convivência, desde a graduação e em especial ao longo do desenvolvimento deste novo trabalho.

Aos membros da banca, Prof. Dr. Carlos Humberto Matins e Prof. Dr. Ronaldo Rigobello, pela disposição em participar da avaliação deste trabalho e pelas sugestões apresentadas, além do conhecimento transmitido nas ocasiões em que fui aluno dos dois.

Aos amigos do mestrado, com os quais convivi e com quem aprendi e aprendo muito.

Ao Prof. Dr. Pablo Augusto Krah, que me ensinou muito sobre o software Abaqus e que deu contribuições valiosas para este trabalho.

Ao Dr. Thomas Furtmüller e Dr. Conan O'Ceallaigh, que se mostraram muito acessíveis e se dispuseram a esclarecer algumas questões referentes a suas pesquisas, mencionadas no referencial teórico.

Aos servidores e demais 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.

“Descobri como é bom chegar quando se tem paciência. E para se chegar, onde quer que seja, aprendi que não é preciso dominar a força, mas a razão. É preciso, antes de mais nada, querer.”

(Amyr Klink)

RESUMO

Um dos produtos industrializados de madeira de maior destaque, na atualidade, é a Madeira Laminada Colada Cruzada (*Cross-Laminated Timber* – CLT), que consiste em painéis compostos por sucessivas camadas de madeira coladas com diferentes orientações, geralmente ortogonais entre si. No processo de produção dos painéis, diferentes configurações geométricas podem ser adotadas, assim como diferentes espécies de madeira. O presente trabalho tem como objetivo a análise, por meio de simulações desenvolvidas no *software* Abaqus, da influência da geometria e das propriedades mecânicas da madeira no desempenho estrutural dos painéis de CLT. Inicialmente, a calibração da modelagem foi realizada com base nos resultados de ensaios de flexão na direção perpendicular ao plano obtidos por outros pesquisadores. A partir dessa modelagem foram realizadas alterações na geometria dos painéis e nas propriedades mecânicas da madeira, seguindo a metodologia de ensaio de flexão da norma CEN EN 408:2004, do seguinte modo: no primeiro grupo de painéis se manteve uma espessura total de 100 mm, variando-se o número de camadas; no segundo grupo, mantendo-se uma espessura total de 100 mm e cinco camadas, as espessuras das camadas foram alteradas conforme sua orientação; no terceiro grupo, as espessuras totais dos painéis foram alteradas; no quarto grupo, painéis com a mesma seção transversal foram simulados se utilizando diferentes comprimentos de vãos; no quinto grupo, painéis com a mesma geometria foram simulados com as propriedades mecânicas das diferentes classes de resistência apresentadas no Projeto de Norma ABNT NBR 7190:2011. A Rigidez Efetiva dos painéis foi calculada utilizando-se os resultados das simulações e a metodologia da norma CEN EN 408:2004, além outros três métodos analíticos: a Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas, a Teoria do Compósito e a Analogia do Cisalhamento. Houve maior convergência entre os valores obtidos pelo método da norma europeia e pela Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas. Percebeu-se, em linhas gerais, que maiores espessuras nas camadas orientadas na direção principal resultaram em resistências e rigidezes superiores. Além disso, os resultados obtidos para os painéis com madeiras das classes de resistência do Projeto de Norma ABNT NBR 7190:2011 se mostraram promissores. As modelagens desenvolvidas foram incapazes de estimar adequadamente as rupturas por *rolling shear*. O trabalho realizado, dentro das limitações das modelagens desenvolvidas, permitiu que fosse analisada a influência da geometria dos painéis e da classe de resistência da madeira no comportamento mecânico da CLT, atendendo assim aos objetivos da pesquisa.

Palavras-chave: CLT, Propriedades mecânicas, Rigidez à flexão, Simulações numéricas, Abaqus.

ABSTRACT

One of the most prominent industrialized wood products nowadays is the Cross-Laminated Timber (CLT), which consists of panels composed by successive timber layers glued together with different orientations, usually orthogonal to each other. In the production process, different geometrical configurations can be adopted, as well as different wood species. This work aims to analyze, by means of simulations developed using the Abaqus software, the influence of geometry and mechanical properties of wood in the structural performance of CLT panels. Initially, the calibration of the modeling was based on experimental results of bending tests of panels in the perpendicular to plane direction obtained from other researchers. From this modeling, some changes were made in the geometry of the panels, as well as changes in the mechanical properties of wood, according to the methodology of the standard CEN EN 408:2004, as follows: in the first group, panels with a total thickness of 100 mm were simulated with different numbers of layers; in the second group, keeping a total thickness of 100 mm and five layers, the thickness of the layers were changed according to their orientation; in the third group, the total thickness of the panels were changed; in the fourth group, panels with equal cross-sections but different spans were simulated; in the fifth group, panels with the same geometry were simulated using the different mechanical properties from the strength classes presented in the draft standard ABNT NBR 7190:2011. The Bending Stiffness of the panels were calculated using the results from the simulations and the method of the standard CEN EN 408:2004, as well as with three other analytical methods: the Gamma Method, the k-Method and the Shear Analogy. The values obtained with the Gamma Method were closer to those obtained using the method from the European standard. In general, panels with thicker layers oriented in the main direction presented higher strength and stiffness results. Besides that, the results of the panels simulated using the mechanical properties from the strength classes of the draft standard ABNT NBR 7190:2011 were indeed promising. The modelling were unable to correctly estimate the rolling shear failures. The work that was carried out, within the limitations of the modeling developed, made it possible to analyze the influence of the geometry of the panels and the strength classes of the wood in the mechanical behavior of the CLT panels, therefore fulfilling the research objectives.

Keywords: CLT, Mechanical properties, Bending stiffness, Numerical simulations, Abaqus.

LISTADE FIGURAS

Figura 1.1 – Comparação entre CLT e MLC.....	19
Figura 2.1 – Painel de compensado.....	27
Figura 2.2 – Painel de OSB.....	27
Figura 2.3 – Detalhe de arco de madeira laminada colada.....	28
Figura 2.4 – Detalhe de painel de LVL.....	29
Figura 2.5 – Edifício Murray Grove.....	31
Figura 2.6 – Galpão construído em CLT e MLC – Fase de construção.....	31
Figura 2.7 – Galpão construído em CLT e MLC – Após o término da construção.....	32
Figura 2.8 – Painel de CLT.....	33
Figura 2.9 – Painéis de CLT com três e cinco camadas.....	34
Figura 2.10 – Painel de CLT curvo.....	35
Figura 2.11 – Painéis de CLT submetidos a forças na direção perpendicular ao plano e na direção paralela ao plano.....	37
Figura 2.12 – Painéis de CLT com a flexão ocorrendo em uma e em duas direções.....	39
Figura 2.13 – Distribuição de tensões em um elemento de CLT com as laterais das lamelas não coladas.....	39
Figura 2.14 – Distribuição de tensões em um elemento de CLT com as laterais das lamelas coladas.....	39
Figura 2.15 – Mecanismo de ruptura de lamela de madeira por <i>rolling shear</i>	40
Figura 2.16 – Mecanismo de ruptura por rolagem das camadas de lenho inicial.....	41
Figura 2.17 – Mecanismo de ruptura por rotação das camadas transversais.....	42
Figura 2.18 – Ruptura por <i>rolling shear</i> em painel de CLT com cinco camadas.....	42
Figura 2.19 – Ruptura por <i>rolling shear</i> em painel de CLT com três camadas.....	43
Figura 2.20 – Curvas de força-deslocamento dos painéis produzidos com madeira de classe C18.....	48
Figura 2.21 – Curvas de força-deslocamento dos painéis produzidos com madeira de classe C35.....	49
Figura 2.22 – Configurações geométricas dos painéis ensaiados com diferentes orientações das camadas em relação à direção de aplicação da força.....	50
Figura 2.23 – Curvas de força-deslocamento para as três configurações de painéis.....	51

Figura 2.24 – Configuração geométrica dos painéis com alternância de 45° na orientação de lamelas adjacentes.....	51
Figura 3.1 – Configuração geométrica do ensaio para a determinação do Módulo de Elasticidade Global na flexão provocada por forças perpendiculares ao plano.....	55
Figura 3.2 – Diagrama de força x deslocamento e variáveis associadas.....	55
Figura 3.3 – Seção transversal de painel de CLT com cinco camada e variáveis associadas a sua geometria.....	57
Figura 3.4 – Diferentes situações de carregamento previstas pelo <i>k-Method</i> e equações correspondentes para o cálculo do coeficiente k_i	60
Figura 4.1 – Discretização de um sólido em elementos finitos.....	65
Figura 4.2 – Orientações de interesse para a análise das propriedades mecânicas da madeira.....	67
Figura 4.3 – Diagrama tensão-deformação resultante do ensaio de compressão paralela às fibras.....	68
Figura 4.4 – Comparação entre os diagramas de tensão-deformação para os ensaios de tração e de compressão paralelas às fibras.....	69
Figura 4.5 – Diagrama de tensão-deformação para tração e compressão na direção paralela às fibras.....	69
Figura 4.6 – Diagrama tensão-deformação no ensaio de compressão normal às fibras....	71
Figura 4.7 – Curvas tensão-deformação na compressão paralela às fibras: (a) diagrama bilinear; (b) diagrama produzido com três segmentos.....	73
Figura 5.1 – Ensaio de flexão de O’Ceallaigh, Sikora e Harte (2018) utilizados para a calibração do modelo numérico.....	83
Figura 5.2 – Configurações geométricas das simulações utilizando a simetria existente no problema experimental.....	85
Figura 5.3 – Propriedades atribuídas ao aço nas simulações.....	86
Figura 5.4 – Diagrama de tensão e deformação específica em três segmentos para a madeira <i>Sitka spruce</i> (<i>Picea sitchensis</i>), Classe C16.....	88
Figura 5.5 – Atribuição de orientação ao material no Abaqus.....	90
Figura 5.6 – Elemento C3D8.....	90
Figura 5.7 – Malha adotada em uma das simulações.....	91
Figura 5.8 – Propriedade de interação atribuída ao contato entre lamelas de uma mesma camada de madeira.....	92

Figura 5.9 – Propriedade de interação atribuída ao contato entre as peças de aço e as de madeira.....	93
Figura 5.10 – “ <i>Constraint</i> ” do tipo “ <i>Tie</i> ” atribuída ao contato entre as duas camadas superiores do painel.....	94
Figura 5.11 – Condição de contorno aplicada ao apoio metálico e as propriedades atribuídas para evitar o deslocamento vertical.....	94
Figura 5.12 – Condição de contorno “ <i>Load</i> ” utilizada para se produzir um deslocamento vertical na modelagem, simulando a aplicação de forças dos ensaios.....	95
Figura 6.1 – Gráfico de Força x Deslocamento correspondente à Calibração 1.....	102
Figura 6.2 – Resultados experimentais dos corpos de prova B-5-20.....	103
Figura 6.3 – Gráfico de Força x Deslocamento correspondente à Calibração 2.....	104
Figura 6.4 – Resultados experimentais dos corpos de prova S-3-40.....	105
Figura 6.5 – Gráfico de Força x Deslocamento correspondente à Calibração 3.....	105
Figura 6.6 – Gráfico de Força x Deslocamento para os painéis do Grupo 1.....	106
Figura 6.7 – Resultados de Rigidez Efetiva para o painel B-5-20 com vão de 2.100 mm.....	107
Figura 6.8 – Resistência à tração na direção paralela às fibras alcançada com uma força de 60,5 kN.....	108
Figura 6.9 – Tensão de escoamento alcançada com uma força de 45,7 kN.....	108
Figura 6.10 – A resistência ao <i>rolling shear</i> não chegou a ser alcançada.....	109
Figura 6.11 – Tensões de <i>rolling shear</i> atuantes com a aplicação de uma força de 30 kN.....	109
Figura 6.12 – Resultados de Rigidez Efetiva.....	110
Figura 6.13 – Resistência à tração na direção paralela às fibras alcançada com uma força de 60,5 kN.....	111
Figura 6.14 – Tensão de escoamento alcançada com uma força de 51,5 kN.....	111
Figura 6.15 – A resistência ao <i>rolling shear</i> não chegou a ser alcançada.....	112
Figura 6.16 – Resistência ao cisalhamento alcançada em alguns pontos isolados com uma força de 73,6 kN.....	112
Figura 6.17 – Tensões de <i>rolling shear</i> atuantes com a aplicação de uma força de 30 kN.....	113
Figura 6.18 – Resultados de Rigidez Efetiva.....	114
Figura 6.19 – Resistência à tração na direção paralela às fibras alcançada com uma força de 50,7 kN.....	115

Figura 6.20 – Tensão de escoamento alcançada com uma força de 37,2 kN.....	115
Figura 6.21 – A resistência ao <i>rolling shear</i> não chegou a ser alcançada.....	116
Figura 6.22 –Tensões de <i>rolling shear</i> atuantes com a aplicação de uma força de 30 kN.....	116
Figura 6.23 – Gráfico de Força x Deslocamento para os painéis do Grupo 2.....	120
Figura 6.24 – Tensões normais de ruptura – Painel B-30-5-30-5-30-5.....	122
Figura 6.25 – Tensões normais de ruptura – Painel B-10-35-10-35-10-35.....	123
Figura 6.26 – Gráfico de Força x Deslocamento para os painéis do Grupo 3.....	125
Figura 6.27 – Rigidez Efetiva para o painel B-3-20 com vão de 1.260 mm.....	126
Figura 6.28 – Resistência à tração na direção paralela às fibras alcançada com uma força de 45,4 kN.....	127
Figura 6.29 – Tensão de escoamento alcançada com uma força de 34,7 kN.....	127
Figura 6.30 – A resistência ao <i>rolling shear</i> não chegou a ser alcançada.....	128
Figura 6.31 – Resistência ao cisalhamento alcançada em alguns pontos isolados com uma força de 46 kN.....	128
Figura 6.32 – Rigidez Efetiva para o painel B-3-40 com vão de 2.520 mm.....	129
Figura 6.33 – Resistência à tração na direção paralela às fibras alcançada com uma força de 88,5 kN.....	130
Figura 6.34 – Tensão de escoamento alcançada com uma força de 67,8 kN.....	130
Figura 6.35 – A resistência ao <i>rolling shear</i> não chegou a ser alcançada.....	131
Figura 6.36 – Resistência ao cisalhamento alcançada em alguns pontos isolados com uma força de 90,4 kN.....	131
Figura 6.37 – Gráfico de Força x Deslocamento para os painéis do Grupo 4.....	135
Figura 6.38 – Ponto onde é alcançada a tensão de cisalhamento no painel B-5-20 com vão de 1.200 mm.....	138
Figura 6.39 – Resistência à tração alcançada no painel B-5-20 com vão de 3.000 mm.....	139
Figura 6.40 – Gráfico de Força x Deslocamento para os painéis do Grupo 5.....	140
Figura 6.41 – Gráficos de Força x Deslocamento para os painéis B-5-20 com propriedades das classes C16, C25 e D20.....	143
Figura 6.42 – Rigidezes Efetivas dos painéis com vão de 2.100 mm.....	145
Figura 6.43 – Forças associadas ao escoamento da madeira e à ruptura estimada dos painéis com vão de 2.100 mm.....	147

Figura A.1 – Seção transversal de um painel de CLT B-5-20, com dimensões em milímetros.....	161
Figura A.2 – Configurações geométricas do ensaio de flexão em quatro pontos para o painel B-520, com dimensões em milímetros.....	162
Figura A.3 – Gráfico de Força x Deslocamento obtido pela simulação numérica do ensaio de flexão.....	162
Figura A.4 – Seção transversal de um painel de CLT B-5-20, com indicações utilizadas no <i>Gamma Method</i> e dimensões em milímetros.....	164
Figura A.5 – Seção transversal de um painel de CLT B-5-20, com indicações utilizadas no <i>k-Method</i> e dimensões em milímetros.....	166
Figura A.5 – Seção transversal de um painel de CLT B-5-20, com indicações utilizadas na Analogia do Cisalhamento e dimensões em milímetros.....	167

LISTADE QUADROS E TABELAS

Tabela 4.1 - Relação entre valores médios e característicos com base na ASTM D2555-06.....	75
Tabela 4.2 – Classes de resistência para espécies coníferas.....	76
Tabela 4.3 – Classes de resistência para espécies folhosas (dicotiledôneas).....	77
Tabela 5.1 – Resultados obtidos em algumas pesquisas realizadas em plataformas de busca de publicações científicas.....	80
Tabela 5.2 – Resultados obtidos em algumas pesquisas realizadas na plataforma CLT <i>Knowledge Database</i>	81
Tabela 5.3 – Propriedades elásticas da madeira.....	87
Tabela 5.4 – Propriedades plásticas da madeira.....	89
Tabela 5.5 – Propriedades elásticas da madeira da classe C20.....	97
Tabela 5.6 – Propriedades plásticas da madeira da classe C20.....	98
Quadro 6.1 – Resumo das características das simulações desenvolvidas.....	99
Tabela 6.1 – Análise de convergência da malha referente à Calibração 1.....	101
Tabela 6.2 – Análise de convergência da malha referente à Calibração 2.....	103
Tabela 6.3 – Rigidezes Efetivas obtidas pela norma CEN EN 408:2004 e pela Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas.....	120
Tabela 6.4 – Rigidezes Efetivas obtidas pela norma CEN EN 408:2004 e pela Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas.....	121
Tabela 6.5 – Forças associadas ao escoamento e à ruptura dos painéis.....	122
Tabela 6.6 – Máximas tensões de <i>rolling shear</i> para uma força de 30 kN.....	124
Tabela 6.7 – Análise das Rigidezes Efetivas obtidas através das simulações com os resultados de O’Ceallaigh, Sikora e Harte (2018).....	132
Tabela 6.8 – Análise das Rigidezes Efetivas obtidas através das simulações com os resultados de Sikora, McPolin e Harte (2016).....	133
Tabela 6.9 – Rigidezes Efetivas obtidas pela norma CEN EN 408:2004 e pela Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas.....	135

Tabela 6.10 – Rigidezes Efetivas obtidas pela norma CEN EN 408:2004 e pela Teoria do Compósito e pela Analogia do Cisalhamento.....	136
Tabela 6.11 – Resultados relacionados à resistência nos painéis do Grupo 4.....	137
Tabela 6.12 – Rigidezes Efetivas obtidas pela norma CEN EN 408:2004 e pela Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas.....	140
Tabela 6.13 – Rigidezes Efetivas obtidas pela norma CEN EN 408:2004 e pela Teoria do Compósito e pela Analogia do Cisalhamento.....	141
Tabela 6.14 – Forças associadas ao escoamento e à ruptura e máximas tensões de <i>rolling shear</i> para as diferentes classes de resistência.....	142

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	18
1.1 JUSTIFICATIVA	20
1.2 OBJETIVOS.....	21
1.2.1 Objetivo geral.....	21
1.2.2 Objetivos específicos.....	22
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	22
2 MADEIRA LAMINADA COLADA CRUZADA	24
2.1 A MADEIRA COMO MATERIAL ESTRUTURAL E OS PRODUTOS INDUSTRIAIS DE MADEIRA	24
2.2 MADEIRA LAMINADA COLADA CRUZADA.....	29
2.2.1 Histórico, Perspectivas e Utilização	29
2.2.2 Características Físicas dos painéis de CLT.....	32
2.2.2.1 Geometria dos painéis	32
2.2.2.2 Espécies de madeira utilizadas	35
2.2.3 Propriedades Mecânicas de Painéis Submetidos a Forças Perpendiculares ao Plano	36
2.2.3.1 Resistência à Flexão	40
2.2.3.2 Resistência ao Cisalhamento e <i>Rolling shear</i>	40
2.2.3.3 Rigidez.....	44
2.2.4 Influência das Características Físicas dos Painéis em seu Desempenho Estrutural	46
2.2.4.1 Espessura dos Painéis, Número de Camadas e Espessura das Lamelas.....	46
2.2.4.2 Classe de Resistência da Madeira.....	47
2.2.4.3 Orientação das Lamelas.....	49
3 DETERMINAÇÕES EXPERIMENTAIS E ANALÍTICAS DA RIGIDEZ EFETIVA DOS PAINEIS DE CLT SUBMETIDOS À FLEXÃO PERPENDICULAR AO PLANO	53
3.1 DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	53
3.2 MÉTODOS ANALÍTICOS PARA A DETERMINAÇÃO DA RIGIDEZ EFETIVA.....	55
3.2.1 Teoria da Vigas Mecanicamente Unidas (<i>Gamma Method</i>).....	56
3.2.2 Teoria do Compósito (<i>k-Method</i>)	58
3.2.3 Analogia do Cisalhamento (por Kreuzinger).....	62
4 O COMPORTAMENTO MECÂNICO DA MADEIRA E SUA REPRESENTAÇÃO EM SIMULAÇÕES NUMÉRICAS	64

4.1 O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS E O SOFTWARE ABAQUS.....	64
4.2 COMPORTAMENTO MECÂNICO DA MADEIRA	66
4.2.1 Comportamento Ortotrópico.....	66
4.2.2 Comportamento Elastoplástico	67
4.2.3 Classes de Resistência, Resistência e Rigidez.....	73
4.2.4 Critérios de Falha – O Critério de Hill.....	77
5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	80
5.1 PESQUISAS REALIZADAS.....	80
5.2 ESCOLHA DO SOFTWARE, PROPRIEDADES DOS MATERIAIS E LIMITAÇÕES DAS ANÁLISES.....	81
5.3 CALIBRAÇÕES DAS MODELAGENS.....	82
5.4 DETALHAMENTO DO USO DO SOFTWARE ABAQUS	84
5.4.1 Propriedades da Madeira Segundo as Classes de Resistência do Projeto de Revisão da ABNT NBR 7190:2011.....	96
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	99
6.1 CALIBRAÇÕES	100
6.1.1 Calibração 1	101
6.1.2 Calibração 2	102
6.1.3 Calibração 3	104
6.2 GRUPO 1 – PAINÉIS DE MESMA ESPESSURA COM DIFERENTES NÚMEROS DE CAMADAS.....	106
6.2.1 Resultado do painel B-5-20 com vão de 2.100 mm	107
6.2.2 Resultado do painel B-3-33 com vão de 2.100 mm	110
6.2.3 Resultado do painel B-11-9 com vão de 2.100 mm	113
6.2.4 Análise dos Resultados do Grupo 1	117
6.3 GRUPO 2 – PAINÉIS COM CAMADAS DE DIFERENTES ESPESSURAS	119
6.4 GRUPO 3 – PAINÉIS DE DIFERENTES ESPESSURAS TOTAIS	124
6.4.1 Resultado do painel B-3-20 com vão de 1.260 mm	125
6.4.2 Resultado do painel B-3-40 com vão de 2.520 mm	129
6.4.3 Análise de Resultados do Grupo 3	132
6.5 GRUPO 4 – PAINÉIS COM VÃOS DE TAMANHOS DIFERENTES	134
6.6 GRUPO 5 – PAINÉIS CONSTITUÍDOS POR DIFERENTES CLASSES DE RESISTÊNCIA DA MADEIRA	139
6.7 ANÁLISES ADICIONAIS RELACIONADAS À RIGIDEZ E À RESISTÊNCIA DOS PAINÉIS SIMULADOS	144
6.7.1 Influência das Lamelas Orientadas Paralelamente à Direção Principal e do Número de Camadas na Rigidez Efetiva dos Painéis de CLT.....	144

6.7.2 Influência das Lamelas Orientadas Paralelamente à Direção Principal e do Número de Camadas na Resistência e Ponto de Escoamento dos Painéis de CLT	146
7 CONCLUSÃO.....	149
7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	152
REFERÊNCIAS	154
APÊNDICE A – EXEMPLO DE DETERMINAÇÃO DA RIGIDEZ EFETIVA DE PAINÉIS DE CLT	161
A.2.1 Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas (<i>Gamma Method</i>)	164
A.2.2 Teoria do Compósito (<i>k-Method</i>).....	165
A.2.3 Analogia do Cisalhamento (por Kreuzinger)	167

1 INTRODUÇÃO

A madeira é um material de origem natural que vem sendo utilizado em estruturas há milênios pelas mais diferentes culturas. Nos últimos dois séculos, diferentes produtos industriais foram desenvolvidos no intuito de melhorar as propriedades naturais da madeira e ampliar as possibilidades de sua utilização. Entre os produtos com aplicação estrutural, destacam-se a Madeira Laminada Colada, o *Laminated Veneer Lumber* (LVL) e o *Oriented Strand Board* (OSB).

Um fenômeno mais recente é a preocupação com o desenvolvimento sustentável, que passou a fazer parte do debate internacional na segunda metade do século XX e desde então vem ganhando cada vez mais espaço. Desenvolvimento sustentável é definido como o desenvolvimento que permite o atendimento das necessidades presentes sem comprometer a habilidade das futuras gerações de atenderem as suas próprias necessidades (WCED, 1987). Decisões que no passado se pautavam exclusivamente pelas vantagens financeiras, hoje têm na sustentabilidade um dos fatores a ser levado em consideração.

Se, no passado, o uso da madeira se mostrou conveniente por sua abundância e facilidade de manuseio, no presente o desenvolvimento de produtos industrializados e a crescente preocupação com a sustentabilidade no mercado da construção permitem que se tenha a perspectiva da ampliação do uso da madeira como material estrutural.

A madeira pode ser considerada um produto sustentável, na medida em que se trata de um recurso renovável, quando o manejo florestal é realizado de forma adequada. Além disso, as florestas são capazes de absorver gás carbônico e, mais do que isso, estocá-lo na forma de madeira. Quando comparada a outros materiais utilizados em estruturas – como o aço e o concreto, de origem mineral – apresenta ainda a vantagem de seu processamento demandar menos energia, além de ser biodegradável e integrar-se rapidamente aos ciclos naturais.

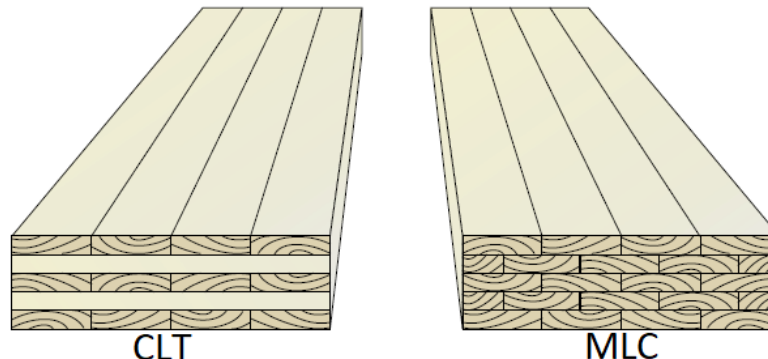
Ainda assim, sempre houve restrições relacionadas ao emprego da madeira em estruturas. Embora existam projetos de grande porte que têm a madeira como principal material estrutural, na execução de edifícios de múltiplos pavimentos existe um indiscutível predomínio dos produtos de origem mineral. Essa realidade pode começar a mudar a partir de agora, com o advento da Madeira Laminada Colada Cruzada (*Cross*

Laminated Timber – CLT), que deve permitir maior participação da madeira na execução de edifícios de múltiplos pavimentos.

A Madeira Laminada Colada Cruzada é um produto industrial que foi desenvolvido na Áustria e na Alemanha no início da década de 1990. Por permitir produção de painéis em larga escala, leves e com elevada resistência mecânica, apresenta grande versatilidade, sendo empregada principalmente na construção de paredes estruturais e de lajes.

A CLT se diferencia da Madeira Laminada Colada (MLC) quanto à direção das camadas de madeira coladas para constituir um elemento estrutural. Na MLC a madeira é colada de modo que suas sucessivas camadas tenham sempre a mesma orientação com relação à direção das fibras. Na CLT, por outro lado, as camadas de madeira são coladas com diferentes orientações, geralmente ortogonais entre si. Desse modo, enquanto a MLC se mostra adequada à execução de vigas e pilares, a CLT permite a produção de painéis com diferentes funções estruturais. A Figura 1.1 evidencia as diferenças entre a CLT e a MLC.

Figura 1.1 – Comparação entre CLT e MLC



Painel de CLT, com camadas dispostas ortogonalmente umas às outras e painel de MLC, com camadas dispostas com a mesma orientação.

Fonte: Mohammad e Munoz (2011)

Existe uma predominância no uso de madeira de coníferas para a produção de painéis de CLT, a exemplo do que ocorre na maior parte das construções em estruturas de madeira. Deve-se salientar, porém, que é possível a utilização de madeira de espécies folhosas para este mesmo fim. Além disso, o arranjo entre as camadas dos painéis diminui a influência dos defeitos da madeira, de modo que comportamentos mecânicos inferiores podem ser compensados por alterações na geometria dos painéis, permitindo a utilização de madeira com classes de resistência inferiores. Nesse sentido, é possível o emprego de

madeira de qualidade superior apenas nas regiões mais solicitadas dos painéis, resultando em conveniente aproveitamento da madeira serrada.

Por se tratar de um produto industrializado, a CLT pode ser produzida com as mais variadas geometrias. Além da possibilidade de se adotar diferentes orientações das fibras de madeira entre camadas adjacentes, o número de camadas, sua espessura e a espessura total dos painéis podem ser alteradas. Todas essas variáveis influenciam no comportamento mecânico dos painéis de CLT.

Tendo em vista as diferentes configurações possíveis para os painéis de CLT, a análise de seu comportamento exclusivamente baseada em ensaios mecânicos seria demasiadamente custosa. Por outro lado, a aplicação apenas de métodos analíticos se mostraria trabalhosa, demorada e limitada. Diante disso, as simulações numéricas são ferramentas interessantes para a previsão do comportamento mecânico dos painéis e para analisar a influência de cada uma de suas características de modo relativamente barato e simples.

Desse modo, a presente pesquisa tem por intuito utilizar um *software* baseado no Método dos Elementos Finitos para analisar o comportamento mecânico de painéis de CLT. A partir de um modelo cuja calibração tem como base resultados experimentais, outras simulações serão produzidas a fim de avaliar o efeito de mudanças na geometria e nas propriedades mecânicas da madeira no comportamento dos painéis.

1.1 JUSTIFICATIVA

A madeira é um material subutilizado para fins estruturais no Brasil, o que contrasta com a vocação do país para a sua produção. Esse material vem sendo empregado crescentemente na forma de produtos industriais, que permitem a melhora de suas propriedades naturais e uma maior variedade de usos. Desse modo, o desenvolvimento dessa indústria, ainda incipiente no Brasil, pode ser um dos caminhos para a popularização do uso da madeira como material estrutural no país.

Além disso, deve-se ressaltar a importância que existe, do ponto de vista econômico, em se associar a vocação do país para a produção de madeira a atividades que agreguem valor a essa matéria-prima. A fabricação de produtos industriais de madeira é importante para economia de países como Canadá e Indonésia. Do mesmo modo, poderia tornar o setor madeireiro ainda mais rentável no Brasil, associado ao manejo florestal adequado e ao plantio de florestas.

Para que isso aconteça, é necessário o envolvimento da academia no desenvolvimento de pesquisas relacionadas aos produtos industriais de madeira. Dentro dessa temática, é importante que se desenvolvam trabalhos levando em consideração as características das espécies produzidas no país, incluindo espécies nativas e espécies exóticas cujo plantio já é bastante difundido, como é o caso do pinus e do eucalipto.

Um dos produtos industriais de madeira que pode ser empregado de maneira mais versátil é a CLT. Entretanto, critérios para o dimensionamento de elementos estruturais utilizando CLT ainda não foram incorporados por todos os documentos normativos. É o caso da norma ABNT NBR 7190:1997, bem como do projeto de revisão dessa norma, de 2011.

Desse modo, é importante que sejam realizados estudos para se analisar o comportamento dos painéis de CLT. Uma vez que diferentes espécies, classes de resistência e configurações geométricas podem ser adotadas, a incorporação de todas essas variáveis em procedimentos experimentais pode se mostrar custosa e demorada, especialmente se levando em conta a necessidade de fabricação de painéis para ensaios.

Assim, o emprego de simulações computacionais é bastante oportuno, pois elas possibilitam a análise de diferentes tipos de painéis de modo ágil e econômico. Desse modo, a escolha do programa computacional Abaqus se deu tendo em vista a possibilidade de se inserir as propriedades mecânicas dos materiais em modelos que podem ser elaborados com geometrias variadas. Além disso, o programa permite o estabelecimento de condições de contorno e de carregamento capazes de simular diferentes ensaios realizados com elementos estruturais.

Desse modo, a proposta deste trabalho vem ao encontro dessa demanda por conhecimento relacionado à Madeira Laminada Colada Cruzada produzida no Brasil, fazendo uso de ferramentas computacionais para simular seu comportamento mecânico.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Comparar o comportamento mecânico da CLT com diferentes configurações físicas e geométricas, considerando-se lamelas sem emendas e painéis solicitados

perpendicularmente a seu plano, por meio de uma modelagem empregando o Método dos Elementos Finitos e desenvolvida em um *software* comercial.

1.2.2 Objetivos específicos

Para que o objetivo geral seja alcançado se pressupõe que sejam atingidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Desenvolver e calibrar uma modelagem em Elementos Finitos, no *software* Abaqus, capaz de representar o comportamento mecânico de um painel de CLT;
- b) Analisar alterações do comportamento mecânico dos painéis da modelagem original decorrentes de alterações em sua geometria – número de camadas, espessura das camadas, espessura total do painel e relação entre o tamanho do vão e a espessura total;
- c) Analisar alterações do comportamento mecânico dos painéis da modelagem original com base em alterações na classe de resistência da madeira;
- d) Comparar parâmetros de rigidez calculados por métodos teóricos com os resultados obtidos numericamente para os painéis simulados.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A Seção 2 aborda o uso da madeira como material estrutural e dos produtos industrializados de madeira, com destaque para a Madeira Laminada Colada Cruzada. São apresentadas informações sobre o histórico desse produto, sua utilização e características físicas. Em seguida são introduzidas suas propriedades mecânicas de resistência e de rigidez, assim como o conceito de flexão em uma direção e de flexão perpendicular ao plano. Por fim, a influência das características físicas e propriedades mecânicas da madeira nos painéis de CLT é discutida com base em uma seleção de trabalhos experimentais.

A Seção 3 trata da determinação da Rigidez Efetiva dos painéis de CLT. Primeiramente é apresentada a metodologia experimental da norma CEN EN 408:2004. Em seguida, três métodos puramente analíticos para a determinação da Rigidez Efetiva

são discutidos: a Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas (*Gamma Method*), a Teoria do Compósito (*k-Method*) e a Analogia do Cisalhamento.

Na seção 4 é discutido o comportamento mecânico da madeira e são discutidas maneiras de representá-lo através de simulações numéricas. Conceitos básicos sobre o Método dos Elementos Finitos e o comportamento ortotrópico da madeira são brevemente abordados. Também é apresentado o diagrama bilinear, para a representação do comportamento elastoplástico da madeira, assim como o diagrama com três segmentos. Informações da Norma ABNT NBR 7190:1997 e, em especial, do projeto de sua revisão, de 2011, a respeito de rigidez, resistência, valores médios e característicos e classes de resistência, fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho, também são apresentadas. A seção traz ainda uma breve explicação sobre critérios de falha para a madeira, com ênfase no Critério de Hill.

A Seção 5 traz os procedimentos metodológicos adotados. Inicia-se com uma explanação sobre as pesquisas bibliográficas realizadas, tratando também da escolha pelo *software* Abaqus. Em seguida são descritas as calibrações realizadas, com base em resultados experimentais de outros autores. A seção apresenta ainda o detalhamento da elaboração de uma modelagem no *software* Abaqus e da atribuição das propriedades mecânicas dos materiais, inclusive da madeira com base nas classes de resistência do Projeto de Norma ABNT NBR 7190:2011.

A Seção 6 apresenta os resultados das calibrações e das simulações. A discussão é desenvolvida, primeiramente, com base em cinco grupos de modelagens, determinados segundo as características dos painéis analisados. Em seguida, discutem-se aspectos gerais da rigidez e da resistência dos painéis.

Em seguida, a Conclusão apresenta uma síntese dos achados da pesquisa, apontando ainda para sugestões de trabalhos futuros.

Por fim, o Apêndice A traz um exemplo de aplicação dos métodos descritos na Seção 3 para a determinação da Rigidez Efetiva para um painel de CLT.

2 MADEIRA LAMINADA COLADA CRUZADA

Nesta seção são apresentadas informações relacionadas à Madeira Laminada Colada Cruzada, produto industrializado de madeira que é objeto de estudo do presente trabalho. A seção se inicia com uma breve discussão a respeito da madeira como material estrutural e dos produtos dela derivados. Em seguida, são trazidas informações especificamente sobre a Madeira Laminada Colada Cruzada, como seu histórico, as perspectivas de sua produção ao redor do mundo e exemplos de sua utilização. Na sequência, são abordadas as características físicas da CLT, tanto no que diz respeito a sua geometria quanto às espécies de madeira empregadas. Em seguida, discutem-se os principais aspectos relacionados às características mecânicas dos painéis em uma situação específica, que é a flexão causada por forças aplicadas na direção perpendicular ao plano. Por fim, são apresentados os resultados de diferentes estudos que analisaram a influência de características físicas dos painéis em seu desempenho estrutural.

2.1 A MADEIRA COMO MATERIAL ESTRUTURAL E OS PRODUTOS INDUSTRIAIS DE MADEIRA

Desde a pré-história o ser humano utiliza a madeira para diferentes finalidades, tendo em vista sua grande disponibilidade, nas florestas nativas, e a simplicidade de seu manuseio (WIEMANN, 2010). Entre esses usos já se encontrava o emprego da madeira em construções primitivas. De acordo com Kuklík (2008), o homem pré-histórico construiu seus primeiros abrigos com galhos de árvores entrelaçados.

Ao longo da história, a madeira continuou sendo utilizada como material estrutural. Apesar disso, segundo Pfeil e Pfeil (2003), foi apenas na primeira metade do século XX que se estabeleceram teorias aplicadas às estruturas de madeira, havendo um grande incentivo a pesquisas na área após a II Guerra Mundial.

No Brasil, percebe-se uma subutilização das estruturas de madeira, em geral restrita a estruturas de coberturas, cimbramentos e estruturas temporárias. Isso se deve, entre outras coisas, à pouca tradição de uso deste material e a alguns preconceitos ainda existentes entre os consumidores. Como fatores que dificultam o uso da madeira como material estrutural, Calil Júnior, Lahr e Dias (2003) citam a divulgação insuficiente de informações técnicas e a falta de projetos específicos, desenvolvidos por profissionais habilitados.

Essa pouca utilização contrasta com o grande potencial para a produção de madeira do país. Calil Júnior, Lahr e Dias (2003) afirmam que a produtividade de madeira na região amazônica pode chegar a 50 m³/ha/ano, enquanto que nas regiões Sul e Sudeste a produção de pinus alcança 25 m³/ha/ano e a de eucalipto atinge 30 m³/ha/ano. Para fins de comparação, os autores trazem informações referentes à produtividade de madeira em outros lugares do mundo: Finlândia (5 m³/ha/ano), Estados Unidos da América (15 m³/ha/ano) e África do Sul (18 m³/ha/ano).

A despeito da grande produtividade e da disponibilidade de território, entre 2000 e 2007 o Brasil ocupou apenas a sétima posição entre os países exportadores de madeira serrada, lista liderada pelo Canadá (PETRAUSKI *et al.*, 2012). A *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO, 2017), por sua vez, lista o Brasil como 5º maior produtor de madeira roliça, ao passo em que apresenta toda a América Latina e Caribe em posições muito modestas na produção de madeira serrada (7% da produção mundial) e painéis de madeira (5% da produção mundial). Esses dados demonstram que, mesmo produzindo uma quantidade relativamente alta de madeira, a indústria brasileira ainda agrega pouco valor a essa matéria-prima.

A madeira apresenta algumas vantagens quando comparada a outros materiais estruturais. Pfeil e Pfeil (2003), por exemplo, salientam que a relação resistência/peso da madeira é superior à do aço e do concreto, permitindo a construção de estruturas relativamente mais leves. Além disso, Calil Júnior, Lahr e Dias (2003) ressaltam que, embora seja um material combustível, a madeira apresenta uma perda de resistência mais lenta do que outros materiais em situações de incêndio. Falk (2010), por sua vez, considera a madeira um material sustentável, na medida em que o consumo de energia para a fabricação de produtos dela derivados é relativamente baixo, as florestas absorvem gás-carbônico da atmosfera e a madeira é um material renovável quando o manejo de sua produção é realizado de forma adequada.

Por outro lado, a madeira apresenta algumas desvantagens inerentes a sua origem natural. Como exemplo, Pfeil e Pfeil (2003) apresentam a degradação biológica que o material pode sofrer pela ação de fungos e insetos, que pode ser evitada por meio de tratamentos químicos e de disposições construtivas adequadas nos projetos. Calil Júnior, Lahr e Dias (2003), por sua vez, ressaltam a variação dimensional (retração e inchamento) da madeira em função de seu teor de umidade, que não ocorre da mesma maneira em todas as direções, dada a natureza ortotrópica do material. Os mesmos autores também apontam a presença de nós, medula e outros defeitos naturais nas peças para uso

estrutural, que podem afetar negativamente suas propriedades mecânicas. Outra desvantagem da madeira que não passou por processo de reconstituição ou industrialização está relacionada à limitação das dimensões dos elementos estruturais, que dependem das dimensões dos elementos anatômicos das árvores, levando quase sempre ao uso de emendas e ligações para atender às necessidades dos projetos.

Os produtos industriais de madeira surgiram como uma alternativa para superar as limitações quanto às dimensões e forma da madeira serrada ou roliça, bem como reduzir o efeito dos defeitos naturais, retração e inchamento, melhorando assim suas características naturais. Além disso, o desenvolvimento de produtos industriais permitiu o melhor aproveitamento da madeira, seja por utilizar materiais que normalmente seriam descartados pelas serrarias, seja por possibilitar o uso de árvores em condições que normalmente não seriam aproveitáveis, tais como as florestas de rápido crescimento.

Pfeil e Pfeil (2003) afirmam que a madeira compensada foi o primeiro produto industrializado de madeira, sendo formado pela colagem de lâminas finas de madeira em camadas ortogonais entre si, permitindo a formação de painéis. Segundo Stark, Cai e Carll (2010), a madeira compensada possui sempre um número ímpar de camadas, sendo as externas orientadas paralelamente à maior dimensão do painel. Os autores citam as vigas I pré-fabricadas, vigas de seção caixão e painéis de revestimento entre os principais usos da madeira compensada nas edificações.

Outro produto industrializado de madeira é o OSB (*Oriented Strand Board*). Esse produto, formado por lascas de madeira coladas e prensadas em direções diferentes, formando painéis, foi desenvolvido originalmente para produzir painéis de compensado de grau inferior, utilizando madeira de coníferas de qualidade inferior e de pequenos diâmetros (AUGUSTIN, 2008). Os painéis de OSB são utilizados nas construções em *wood frame* e *light steel frame*, revestindo paredes e contribuindo para sua estabilidade. Segundo Zhu *et al.* (2005), outro uso dos painéis de OSB é na alma de vigas compostas de madeira.

As Figuras 2.1 e 2.2 ilustram, respectivamente, detalhes dos painéis de madeira compensada e de OSB.

Figura 2.1 – Painele de compensado



Fonte: Augustin (2008)

Figura 2.2 – Painele de OSB



Fonte: Adaptado de The Engineered Wood Association (2018)

Um dos produtos industriais de madeira utilizados tanto na construção civil quanto em obras de infraestrutura é a madeira laminada colada (MLC). Malo e Angst (2008) descrevem esse produto como sendo formado pela colagem de lamelas de madeira com espessuras entre 20 e 50 mm e suas fibras orientadas na direção longitudinal. Pfeil e Pfeil (2003) afirmam que a madeira laminada colada é mais homogênea do que a madeira natural, pois os nós da madeira são partidos e distribuídos aleatoriamente ao longo da peça fabricada, e que possibilita a confecção de peças curvas ou de grandes dimensões. Miotto (2009) menciona ainda outras vantagens da MLC em relação à madeira serrada,

tais como a redução da ocorrência de rachaduras, a racionalização do uso da madeira e a possibilidade de se aplicar contraflechas nas vigas. Malo e Angst (2008) salientam que podem ser produzidas peças de madeira laminada colada com diferentes seções transversais, com comprimentos que chegam a 40 metros e que são utilizadas como vigas, pilares, arcos e pórticos.

Existem ainda produtos à base de madeira microlaminada e colada, que são produzidos com finas camadas de madeira, de 1 a 5 mm de espessura, a exemplo das utilizadas na madeira compensada (PFEIL; PFEIL, 2003). No caso da LVL (*Laminated Veneer Lumber*), as camadas de madeira são prensadas e coladas na direção longitudinal do elemento estrutural que constituem, podendo, entretanto, ser utilizadas camadas de madeira na direção ortogonal à principal para aumentar sua resistência (AUGUSTIN, 2008). Segundo Stark, Cai e Carl (2010), a LVL é normalmente utilizada como alma de vigas I em madeira. Augustin (2008) aponta que a LVL também é utilizada em painéis e em vigas maciças, em substituição à madeira serrada.

As Figuras 2.3 e 2.4 ilustram, respectivamente, detalhes de arcos de madeira laminada colada e painel de LVL.

Figura 2.3 – Detalhe de arco de madeira laminada colada



Fonte: Rewood (2019)

Figura 2.4 – Detalhe de painel de LVL



Fonte: Ultralam (2018)

2.2 MADEIRA LAMINADA COLADA CRUZADA

2.2.1 Histórico, Perspectivas e Utilização

No Brasil, a Madeira Laminada Colada Cruzada também é conhecida como Madeira Laminada Cruzada. Neste trabalho, utiliza-se o termo “Madeira Laminada Colada Cruzada” para diferenciá-la de outros produtos obtidos por justaposição de camadas sucessivas de madeira, com orientação alternada, unidas por meio de cavilhas e conectores metálicos. Internacionalmente, a Madeira Laminada Colada Cruzada é denominada *Cross-Laminated Timber* (CLT) ou ainda *X-Lam*.

A CLT é um produto estrutural de madeira que foi desenvolvido na Alemanha e na Áustria na década de 1990, com o objetivo de aproveitar peças que eram desperdiçadas pela indústria madeireira local (STAUDER, 2013). Brandner *et al.* (2016) apontam que as primeiras edificações residenciais empregando CLT como principal componente estrutural foram construídas ainda em 1993. Um esforço conjunto entre a indústria e a academia austríacas, ao longo dos anos 1990, foi responsável pelo desenvolvimento dos painéis de CLT conhecidos atualmente (FPINNOVATIONS, 2011).

Desde meados da década de 2000 a produção de CLT na Europa Central vem atingindo escala industrial (BRANDNER *et al.*, 2016). Seu crescimento fica evidente quando se levam em conta as expectativas dos fabricantes. Segundo Ebner (2017), a produção europeia de CLT foi de aproximadamente 680.000 m³/ano em 2016, com

perspectiva de se atingir 1.250.000 m³/ano em 2020, um aumento de 83%. Deve-se ressaltar, porém, que a produção de CLT ainda se concentra essencialmente na Europa. Segundo a *Food and Agriculture Organization* (2015), em 2014, 90% do volume total de CLT era fabricado na Europa, havendo a expectativa de aumento de sua produção na América do Norte e no Japão, acompanhando um significativo crescimento em seu consumo ao redor do mundo.

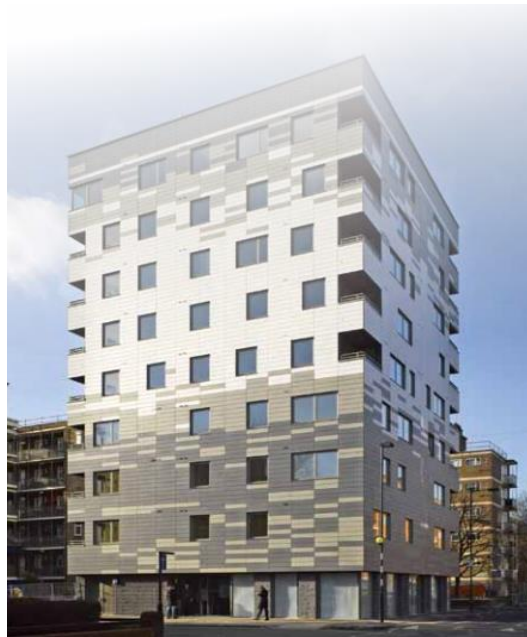
Apesar disso, percebe-se que existe um longo caminho a ser percorrido para a popularização da construção com painéis de CLT. Isso fica evidente no trabalho de Espinoza *et al.* (2016a), que traz informações sobre uma pesquisa realizada entre profissionais da construção civil europeus, que foram questionados quanto ao seu conhecimento a respeito da CLT, a percepção que tinham dos painéis e quais as principais barreiras para sua popularização. Os autores reportaram um baixo nível de conhecimento a respeito do produto e a incompatibilidade entre a CLT e as exigências dos atuais códigos de construção, além da necessidade de mais informações técnicas e pesquisas relacionadas ao comportamento estrutural dos painéis e de suas ligações.

Resultados semelhantes foram obtidos por Mallo e Espinoza (2015), que pesquisaram a percepção da comunidade de arquitetos dos Estados Unidos da América a respeito da CLT. Os autores identificaram um baixo nível de conhecimento do produto, da ordem de 58%, associado à falta de perspectiva de sua utilização em projetos.

No que diz respeito à utilização dos painéis de CLT, suas características mecânicas e geométricas permitem que a construção em madeira tenha aplicações até então limitadas a produtos de origem mineral, como o aço, o concreto e a alvenaria (BRANDNER; RINGHOFER; GRABNER, 2018). Entre esses usos, podem-se citar as edificações de múltiplos pavimentos a partir de alturas que não seriam possíveis de se atingir com os sistemas tradicionais de construção em madeira.

É o caso, por exemplo, do Edifício Murray Grove, ilustrado na Figura 2.5. Esse edifício foi construído em Londres, no ano de 2008. Trata-se de uma edificação residencial, sendo o andar térreo em concreto e os outros oito pavimentos com estrutura de piso e paredes em CLT. Segundo Crespell e Gangnon (2010), a opção pelo uso de CLT reduziu em 22 semanas a duração da obra, quando comparada a uma estrutura similar em concreto armado.

Figura 2.5 – Edifício Murray Grove



Fonte: Crespell e Gagnon (2010)

Além disso, a CLT pode ser empregada para grandes construções industriais, como é o caso de galpões. A Figura 2.6 ilustra um galpão sendo construído a partir da combinação de MLC e CLT, ao passo em que a Figura 2.7 ilustra o mesmo barracão após sua conclusão.

Figura 2.6 – Galpão construído em CLT e MLC – Fase de construção



Fonte: FPInnovations (2011)

Figura 2.7 – Galpão construído em CLT e MLC – Após o término da construção



Fonte: FPInnovations (2011)

No Brasil, a ABNT NBR 7190:1997, que estabelece os critérios para o dimensionamento de estruturas de madeira, não faz referência às estruturas em CLT, assim como seu projeto de revisão, de 2011. Mesmo assim, existem empresas brasileiras que trabalham com o projeto, a produção e a execução de estruturas em madeira laminada cruzada, que certamente se apoiam em documentos normativos e especificações técnicas internacionais para o desenvolvimento de suas atividades.

2.2.2 Características Físicas dos painéis de CLT

2.2.2.1 Geometria dos painéis

A Madeira Laminada Colada Cruzada é um produto que pode ser definido como um painel composto por lamelas que formam camadas, em geral ortogonais entre si, que são coladas umas às outras, podendo as lamelas de uma mesma camada ser coladas entre si em suas laterais (FPInnovations, 2011). Na Figura 2.8 ilustra-se um painel de CLT com cinco camadas de lamelas.

Figura 2.8 – Painel de CLT

Fonte: Buck *et al.* (2016)

Augustin (2008) afirma que, embora em painéis de CLT geralmente a orientação de uma camada de madeira seja ortogonal à de sua camada adjacente, ou seja, as camadas tenham uma alternância de 90° entre si, nem sempre essa é a configuração adotada. FPInnovations (2011) explica que, em alguns casos, duas camadas adjacentes podem ter suas lamelas posicionadas com a mesma orientação, a fim de se melhorar as propriedades mecânicas em uma determinada direção. FPInnovations (2011) ressalta ainda que é comum as camadas mais externas de madeira serem orientadas na direção do maior vão, quando os painéis são usados como lajes, ou na direção vertical, quando têm a função de paredes.

De acordo com Augustin (2008), as fibras de duas camadas adjacentes também podem ser orientadas em diferentes angulações. Buck *et al.* (2016) compararam o desempenho à flexão de painéis de CLT produzidos de modo tradicional ao de painéis cujas camadas intermediárias apresentavam 45° de alternância em relação à direção principal, obtendo, para a segunda configuração, melhoras nas propriedades mecânicas.

Augustin (2008) explica que as lamelas de madeira usadas nos painéis normalmente têm espessuras variando entre 10 e 45 mm, com largura entre 80 e 240 mm, respeitando-se uma proporção de largura/espessura superior a 4. A norma ANSI/APA PRG 320 (2018) estabelece que a espessura das lamelas deve ser de 16 a 51 mm, com largura superior a 1,75 vez a espessura nas camadas paralelas à direção principal. Também recomenda uma largura igual a 3,5 vezes a espessura, para lamelas não coladas entre si nas laterais, na direção secundária, para se evitar efeitos relacionados ao cisalhamento entre as lamelas e à fluência do material. Fink, Kohler e Brandner (2018) afirmam que existe uma tendência entre fabricantes de padronizar a espessura das lamelas em 20, 30 e 40 mm.

Vale salientar que é comum que lamelas de uma mesma camada cujas laterais não são coladas umas nas outras apresentem pequenas separações entre si. Segundo Brandner (2013), é habitual a ocorrência de separações de até 2 mm entre lamelas, nas camadas externas, e de até 4 mm, nas camadas internas. Embora não tenham um impacto significativo na resistência dos painéis, essas separações podem afetar sua estética e sua condutividade térmica (WANG; PIRVU; LUM, 2011).

FPInnovations (2011) explica que os painéis de CLT geralmente são produzidos com três a sete camadas de madeira, podendo, eventualmente, superar essa quantidade. Gangnon e Popovski (2011) reportam a produção de painéis com até onze camadas. A norma ANSI/APA PRG 320 (2018) estabelece que a espessura dos painéis não deve ser superior a 508 mm. Augustin (2008) aponta que os painéis têm a espessura limitada em 500 mm, sendo frequentemente de 100 mm, para painéis com três camadas, e de 170 mm, para painéis com cinco camadas.

Segundo FPInnovations (2011), as dimensões dos painéis costumam variar conforme o fabricante: larguras usuais de 0,6, 1,2 e 3 metros, podendo chegar a 5 metros em alguns casos; comprimento de até 18 metros; espessuras de até 400 mm. Augustin (2008) enfatiza que podem ser produzidos painéis com até 30 metros de comprimento, sendo as dimensões limitadas por fatores relacionados a sua produção, transporte e montagem. Outra informação apresentada por Augustin (2008) é que podem ser produzidos painéis de CLT curvos. A Figura 2.9 ilustra dois painéis de CLT, um deles com três camadas de madeira, o outro com cinco. A Figura 2.10, por sua vez, ilustra um painel curvo produzido em CLT.

Figura 2.9 – Painéis de CLT com três e cinco camadas



Fonte: Espinoza *et al.* (2016b)

Figura 2.10 – Painel de CLT curvo



Fonte: Adaptado de ELEMENT5 (2018)

2.2.2.2 Espécies de madeira utilizadas

A norma ANSI/APA PRG 320 (2018) permite o uso de madeira de qualquer espécie conífera com densidade específica igual ou superior a 0,35 para a produção dos painéis de CLT, desde que respeitados outros requisitos relacionados às suas propriedades mecânicas. Essa norma permite o uso de combinações de espécies diferentes em um mesmo painel. Augustin (2008), por sua vez, explica que geralmente é utilizada a madeira das partes mais externas da seção transversal dos troncos, que em geral apresenta melhores propriedades mecânicas.

Brandner *et al.* (2016) afirmam que normalmente os painéis de CLT são produzidos com madeira de coníferas, da classe C24, conforme as classes de resistência da norma CEN EN 338:2009, quando apenas uma classe de madeira é empregada. Os autores afirmam ainda que, quando se utiliza uma combinação de madeiras de classes diferentes, as camadas com orientação longitudinal costumam ser da classe C24, ao passo em que as de orientação transversal usualmente são das classes C16 ou C18. Nos trabalhos de O’Ceallaigh, Sikora e Harte (2018) e Sikora, McPolin e Harte (2016) foram produzidos painéis com madeira de *Sitka Spruce* (*Picea sitchensis*), da Classe C16, e os resultados obtidos pelos autores apontaram que o uso dessa espécie de madeira, com essa classe de resistência, embora não seja a prática mais difundida na indústria, mostrou-se adequado para painéis de CLT. Brandner (2013) afirma que a espécie atualmente mais utilizada na produção de CLT é o pinheiro-da-noruega (*Picea abis*).

Sobre o uso de espécies folhosas para a produção de painéis, Espinoza e Buehlmann (2018) analisaram uma série de publicações, concluindo que essa alternativa é viável e poderia inclusive melhorar o comportamento mecânico do produto,

possibilitando até mesmo a diminuição das seções transversais dos painéis em alguns casos. Ainda sobre esse assunto, Kramer, Barbosa e Sinha (2014) avaliaram o uso da madeira de uma espécie híbrida de álamo (*Populus x.*) – árvore folhosa com madeira de baixa densidade – para a produção de painéis de CLT, que atenderam aos requisitos de resistência, mas apresentaram baixa rigidez e, conseqüentemente, deformações excessivas. Liao *et al.* (2017), por sua vez, ensaiaram painéis de CLT produzidos com madeira de eucalipto (espécies *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*) de pequeno diâmetro, obtendo propriedades mecânicas semelhantes às dos painéis disponíveis no mercado. Desse modo, o uso de madeira folhosa para a produção de CLT é uma possibilidade a ser explorada.

Brandner (2013) sugere ainda que produtos industrializados de madeira, tais como LVL e OSB, possam vir a ser utilizados em substituição a alguma das camadas de madeira na produção dos painéis de CLT.

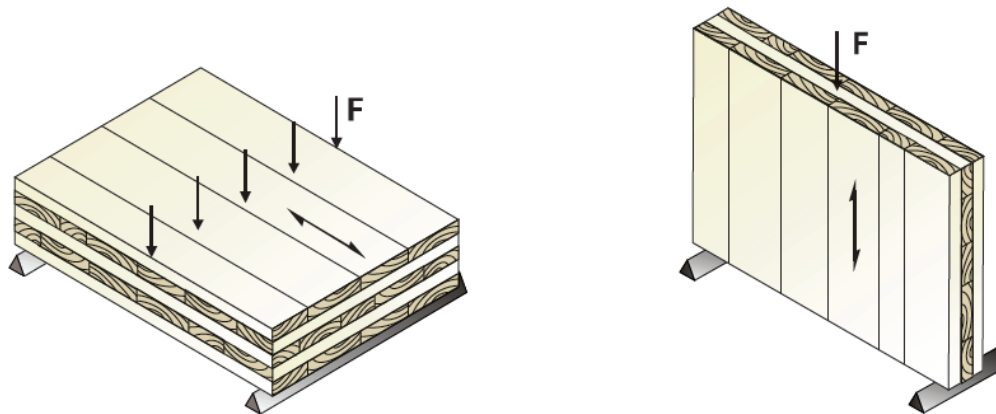
2.2.3 Propriedades Mecânicas de Painéis Submetidos a Forças Perpendiculares ao Plano

Como consequência da orientação cruzada das camadas de madeira, os painéis de Madeira Laminada Colada Cruzada podem ser utilizados com diferentes funções estruturais. Por isso, os tipos de solicitações a que estão submetidos e as propriedades mecânicas associadas a seu desempenho estrutural dependem da função estrutural dada aos painéis.

Entre as utilizações possíveis para os painéis de Madeira Laminada Colada Cruzada estão elementos de coberturas e pisos. Nessas situações, os painéis são submetidos a forças aplicadas perpendicularmente aos seus planos, que podem ser concentradas ou distribuídas, provocando flexão. Na língua inglesa, esse tipo de solicitação dos painéis de CLT é denominado “*perpendicular to the plane*” ou, mais comumente, “*out-of-plane direction*”. Por outro lado, no caso de serem utilizados como paredes estruturais, os painéis de CLT são submetidos a forças na direção paralela ao plano, que em inglês é chamada “*in-plane direction*”.

A Figura 2.11 ilustra as duas diferentes situações, com os painéis sujeitos a forças aplicadas na direção perpendicular ao plano e na direção paralela ao plano.

Figura 2.11 – Painéis de CLT submetidos a forças na direção perpendicular ao plano e na direção paralela ao plano



Painel de CLT submetido a forças aplicadas na direção perpendicular ao plano

Painel de CLT submetido a forças aplicadas na direção paralela ao plano

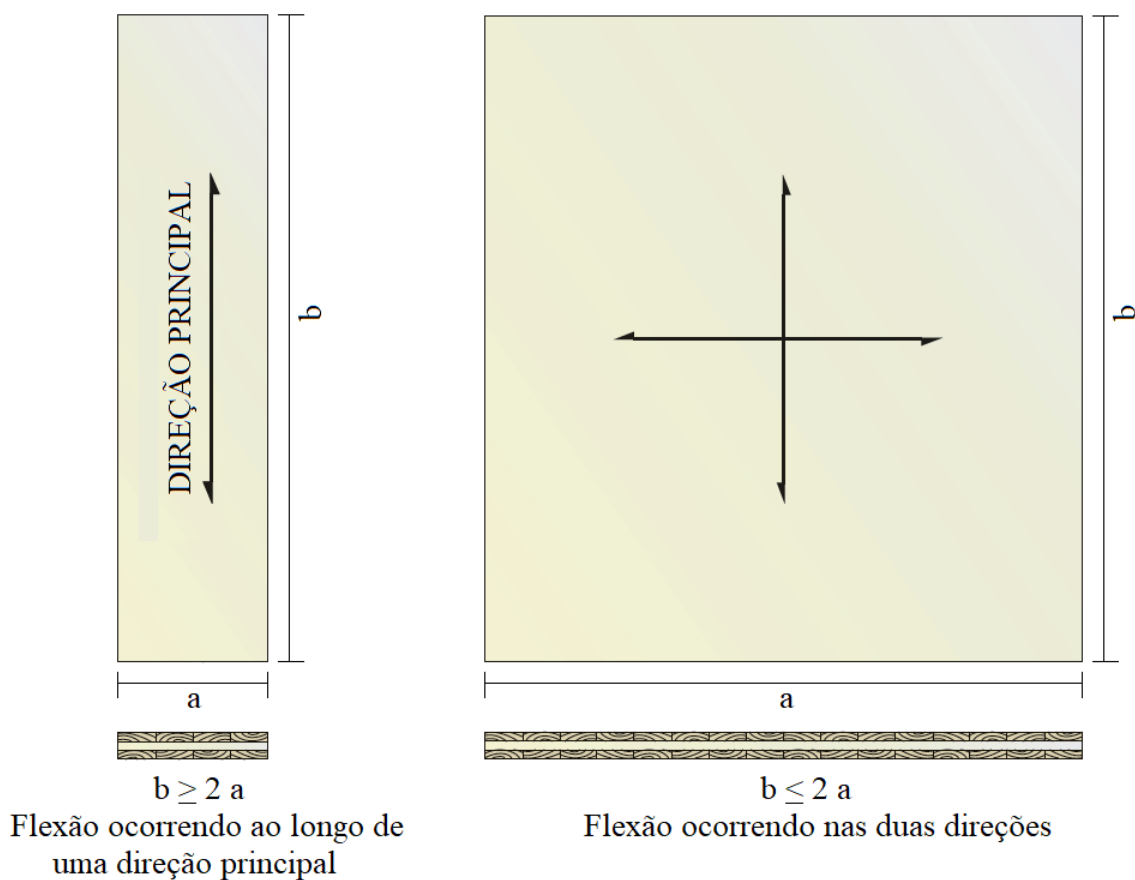
Fonte: adaptado de Gangnom e Popovski (2011)

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 2.12 ilustra as duas situações, com painéis de CLT com a flexão ocorrendo em uma e em duas direções.

Figura 2.12 – Painéis de CLT com a flexão ocorrendo em uma e em duas direções

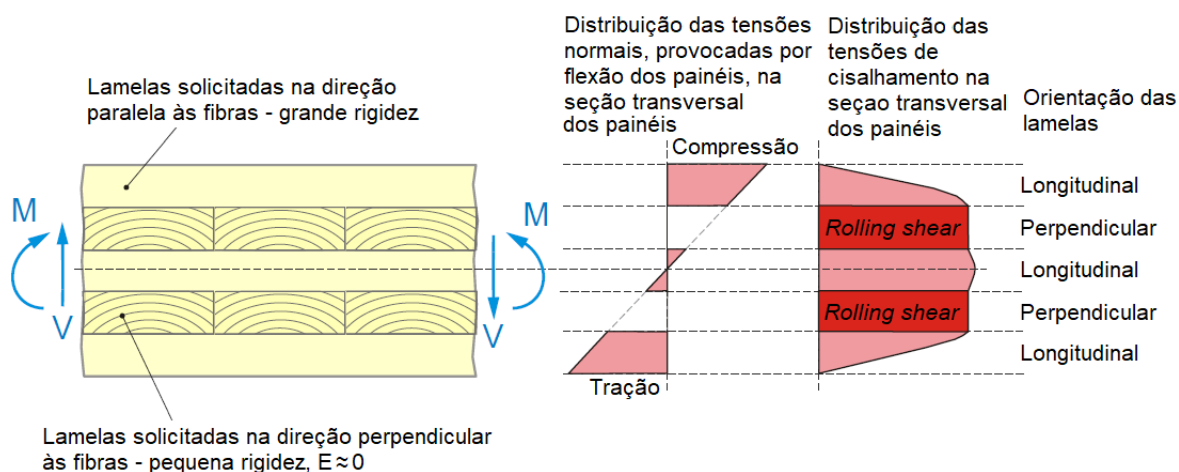


Fonte: adaptado de Gangnom e Popovski (2011)

Segundo Brandner *et al.* (2016), tanto a orientação das camadas de madeira quanto suas propriedades mecânicas devem ser levadas em conta para a obtenção dos valores de resistência e de rigidez. Os autores afirmam que a transferência de tensões normais entre as camadas com orientações perpendiculares entre si acaba sendo praticamente nula. Segundo os autores, isso se deve a rachaduras que ocorrem dentro de uma 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 2.13 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.

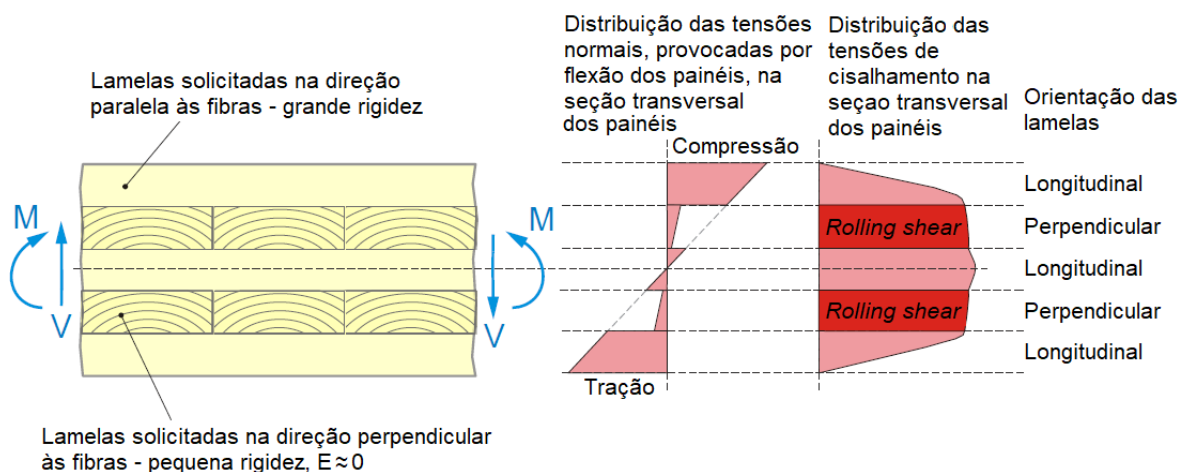
Figura 2.13 – Distribuição de tensões em um elemento de CLT com as laterais das lamelas não coladas



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 2.14 ilustra a distribuição de esforços em painéis de CLT com essa característica.

Figura 2.14 – Distribuição de tensões em um elemento de CLT com as laterais das lamelas coladas



Fonte: adaptado de Augustin (2008)

Nesta seção são discutidas as principais propriedades mecânicas dos painéis relacionadas à flexão perpendicular ao plano.

2.2.3.1 Resistência à Flexão

Gangnon e Popovski (2011) ressaltam que, para fins de normatização, é necessário se caracterizar as propriedades de resistência dos painéis, no intuito de se garantir ao menos valores mínimos para sua utilização.

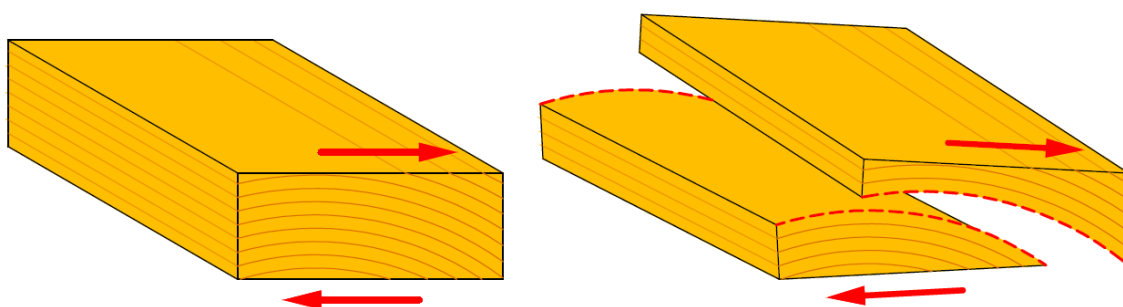
Segundo Brandner *et al.* (2016), em um elemento de CLT com características geométricas homogêneas, as tensões normais mais relevantes correspondem à máxima tensão de flexão, que pode estar associada a tensões de tração e de compressão, na direção paralela às fibras da madeira, atuantes nas camadas mais externas do painel paralelas à direção principal dos esforços.

Fink, Kohler e Brandner (2018), por sua vez, apontam que a resistência à flexão dos painéis CLT é mais afetada pelas propriedades mecânicas da madeira do que a resistência ao *rolling shear*. Para os autores, a exemplo do que ocorre com a madeira laminada colada, a resistência à flexão dos painéis de CLT está relacionada à resistência à tração paralela às fibras da madeira das camadas mais externas.

2.2.3.2 Resistência ao Cisalhamento e *Rolling shear*

Calil Júnior, Lahr e Dias (2003) explicam que o cisalhamento por rolagem, ou *rolling shear*, acontece quando a direção das tensões é perpendicular à direção das fibras e elas atuam em um plano paralelo às fibras, provocando o rolamento das fibras uma sobre as outras. A Figura 2.15 ilustra esse fenômeno do *rolling shear* ocorrendo em uma lamela e provocando a sua ruptura pelo deslizamento entre os anéis de crescimento da seção transversal de madeira.

Figura 2.15 – Mecanismo de ruptura de lamela de madeira por *rolling shear*



Fonte: O Autor

Brandner *et al.* (2016) explicam que a tensão de cisalhamento máxima ocorre na linha neutra dos painéis de CLT. Entretanto, afirmam os autores, tendo em vista a orientação alternada entre as camadas de madeira, tanto o cisalhamento das camadas paralelas à direção principal de esforços quanto o *rolling shear* das camadas perpendiculares devem ser verificados.

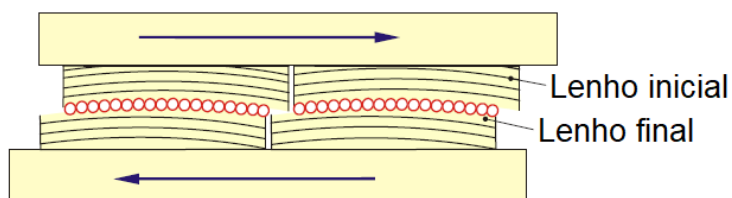
Jeles, Varevac e Rajcic (2018), por sua vez, afirmam que na flexão perpendicular ao plano dos painéis de CLT também ocorrem tensões de cisalhamento na direção paralela aos planos nas lamelas orientadas na direção principal. Os autores apontam que, nesse caso, deve ser levada em conta a resistência ao cisalhamento na direção paralela às fibras.

Franzoni *et al.* (2015) ressaltam que o principal problema relacionado à flexão dos painéis de CLT é sua baixa resistência ao cisalhamento transversal nas camadas orientadas perpendicularmente à direção principal, que resulta em rupturas frágeis causadas pelo fenômeno do *rolling shear*.

Essa afirmação vai ao encontro de Augustin (2008), que explica que as propriedades mecânicas da madeira na direção perpendicular às fibras são consideravelmente inferiores às observadas na direção paralela. Como consequência, afirma o autor, as camadas de madeira nos painéis de CLT que são solicitadas na direção perpendicular às fibras, sujeitas a tensões de tração, compressão e ao chamado *rolling shear*, são responsáveis por reduzir a resistência dos painéis.

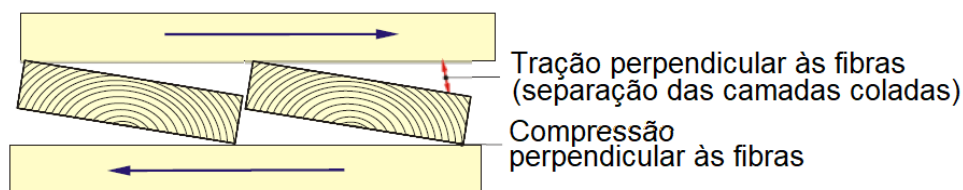
Augustin (2008) afirma que em ensaios cisalhamento de painéis de CLT por meio de flexão as rupturas se iniciam nas camadas perpendiculares à direção principal. Segundo o autor, dois mecanismos contribuem para esse fenômeno: o *rolling shear*, com a rolagem das zonas de lenho inicial nas lamelas dessas camadas, e a rotação das lamelas dessas camadas. As Figuras 2.16 e 2.17, respectivamente, ilustram esses mecanismos de ruptura.

Figura 2.16 – Mecanismo de ruptura por rolagem das camadas de lenho inicial



Fonte: Adaptado de Augustin (2008)

Figura 2.17 – Mecanismo de ruptura por rotação das camadas transversais



Fonte: Adaptado de Augustin (2008)

Fink, Kohler e Brandner (2018) afirmam que painéis de CLT produzidos com madeira dotada de um elevado Módulo de Elasticidade têm maior probabilidade de apresentar ruptura por *rolling shear*. Hochreiner *et al.* (2013) corroboram essa observação. Salientam, entretanto, que o *rolling shear* nem sempre é o fator limitante para o desempenho dos painéis submetidos à flexão na direção perpendicular ao plano, ainda que para painéis produzidos com madeiras mais resistentes esse fenômeno ocorra com maior frequência.

As Figuras 2.18 e 2.19 ilustram a ruptura por *rolling shear* em painéis de CLT com cinco e três camadas, respectivamente.

Figura 2.18 – Ruptura por *rolling shear* em painel de CLT com cinco camadas



Fonte: O’Ceallaigh, Sikora e Harte (2018)

Figura 2.19 – Ruptura por *rolling shear* em painel de CLT com três camadas



Fonte: O’Ceallaigh, Sikora e Harte (2018)

Segundo Zhou *et al.* (2014), as propriedades de *rolling shear* dependem da espécie, da orientação dos anéis de crescimento, da geometria da peça, da área de colagem, entre outros fatores. Augustin (2008) aponta que, para os painéis de CLT, a maior proximidade entre os anéis de crescimento, a colagem na lateral das lamelas, maiores pressões empregadas na prensagem durante a fabricação e a presença de esforços de compressão perpendicular ao plano influenciam positivamente no comportamento relacionado ao *rolling shear*.

Brandner *et al.* (2016) apresentam uma alternativa relacionada às dimensões das lamelas para se diminuir os efeitos decorrentes do *rolling shear*. Segundo os autores, uma largura mínima de quatro vezes a espessura deve ser adotada para se evitar o uso de fatores de redução da resistência relacionados ao *rolling shear*. Augustin (2008) também aponta que um aumento da largura das lamelas em relação a sua espessura influencia positivamente com relação ao *rolling shear*.

Brandner *et al.* (2016) sugerem o uso de dois valores para a resistência característica ao *rolling shear*: 1,40 MPa para lamelas com largura maior ou igual a quatro vezes sua espessura e 0,80 MPa para lamelas com largura menor do que quatro vezes sua espessura. Para fins de comparação, Zhou *et al.* (2014) obtiveram uma resistência ao *rolling shear* de 1,09 MPa em seus ensaios com madeira de abeto negro (*Picea mariana*).

2.2.3.3 Rigidez

A rigidez à flexão dos painéis de CLT é importante, tendo em vista que o projeto das estruturas de madeira é frequentemente governado por critérios definidos pelos Estados Limites de Utilização (GANGNON; POPOVSKI, 2011). Isso significa que é necessário o conhecimento das propriedades de rigidez para se evitar a ocorrência de deformações e vibrações excessivas nas estruturas. Augustin (2008), por exemplo, sugere que, para se evitar efeitos dinâmicos indesejados, as deformações causadas por cargas permanentes, desconsiderando-se efeitos de fluência, sejam limitadas a 5 mm nos painéis de CLT utilizados em coberturas e pisos.

A rigidez à flexão de painéis de CLT pode ser obtida experimentalmente utilizando-se as prescrições da norma CEN EN 408:2010 (FINK; KOHLER; BRANDNER, 2018). O procedimento consiste em um ensaio de flexão em quatro pontos, em que é realizada a medida da deformação local ou global do corpo de prova, a depender do método adotado, para se obter a Rigidez Efetiva (EI_{ef}) dos painéis, que é o produto do Momento de Inércia de sua seção transversal pelo seu Módulo de Elasticidade Efetivo. Mais informações a respeito da obtenção da Rigidez Efetiva dos painéis de CLT são apresentadas na seção 3 e no Apêndice A do presente trabalho.

De acordo com Gangnon e Popovski (2011), as deformações por cisalhamento nos painéis de CLT submetidos à flexão por forças perpendiculares ao plano diminuem na medida em que a relação entre a distância entre os apoios e sua espessura aumenta. Segundo os autores, há pesquisas que apontam que as deformações por cisalhamento podem ser negligenciadas quando a razão entre o vão e a espessura é maior ou igual a 30, havendo estudos que indicam valores menores para essa condição. Os autores salientam que uma razão entre a distância entre os apoios e a espessura menor tende a ser pouco econômica e altamente influenciada pelas deformações de cisalhamento, ao passo em que uma relação maior pode ser demasiadamente afetada por vibrações e efeitos de fluência.

ANSI (2012) explica que tanto o Módulo de Elasticidade Verdadeiro ($E_{verdadeiro}$) quanto o Módulo de Elasticidade Aparente ($E_{aparente}$) são obtidos por meio de ensaios de flexão. A diferença é que para o $E_{verdadeiro}$ as deflexões são medidas entre pontos onde não há a indução de tensões de cisalhamento. Desse modo, $E_{verdadeiro}$ leva em consideração que parte das deflexões nos ensaios de flexão se deve a tensões de cisalhamento, ao passo em que na obtenção do $E_{aparente}$ todas as deflexões são atribuídas à flexão. Em decorrência disso, segundo o texto, o $E_{verdadeiro}$ é maior do que o $E_{aparente}$, que costuma ser o valor

fornecido por normas e fabricantes de produtos industrializados de madeira, embora nem sempre seja esse o caso. A razão entre os dois valores depende da relação entre a espessura e a distância entre os apoios da peça ensaiada e das propriedades mecânicas da madeira. Desse modo, a razão de 0,95, apresentada no texto, pode chegar a 0,85, por exemplo, a depender das características da peça ensaiada.

Wallner-Novak, Koppelhuber e Pock (2014) afirmam que as deformações por cisalhamento geralmente correspondem a um valor inferior a 30% das deformações causadas pela flexão dos painéis. Desse modo, as tensões de flexão representam uma parcela mais significativa das deformações do que as tensões de cisalhamento.

No que diz respeito às deformações causadas por tensões de cisalhamento, é necessário se levar em consideração as propriedades de Módulo de Elasticidade Transversal (G) e Módulo de *Rolling Shear* (G_R).

De acordo com Gangnon e Popovski (2011), o Módulo de Elasticidade Transversal (G) de produtos de madeira costuma ser estimado como um valor entre 1/12 e 1/20 do Módulo de Elasticidade Verdadeiro ($E_{\text{verdadeiro}}$). Esse valor depende da espécie de madeira analisada.

Sobre o Módulo de *Rolling Shear*, Augustin (2008) afirma que seu valor é de aproximadamente 50 MPa. Fellmoser e Blass (2004) apresentam uma estimativa de que o Módulo de *Rolling Shear* é igual a aproximadamente 10% do Módulo de Elasticidade Transversal para madeiras de coníferas. Gangnon e Popovski (2011), confrontando as duas estimativas, concluíram que o valor de 50 MPa se mostra bastante conservador. Para fins de comparação, Zhou *et al.* (2014) obtiveram um Módulo de *Rolling Shear* de 136 MPa em seus ensaios com madeira de abeto negro (*Picea mariana*).

Gangnon e Popovski (2011) apresentam três métodos analíticos para a determinação da Rigidez Efetiva dos painéis de CLT submetidos à flexão perpendicular ao plano: a Teoria de Vigas Mecanicamente Unidas (*Mechanically Jointed Beams Theory*), também chamada de Método Gama (*Gamma Method*); a Teoria do Compósito (*Composite Theory*), também conhecida como Método k (*k-Method*); e Analogia de Cisalhamento (*Shear Analogy*). Os três métodos são explicados na seção 3 do presente trabalho, e um exemplo de aplicação de cada um deles é mostrado no Apêndice A. Deve-se salientar que esses métodos são válidos para painéis em que a flexão ocorre em apenas uma das direções.

2.2.4 Influência das Características Físicas dos Painéis em seu Desempenho Estrutural

2.2.4.1 Espessura dos Painéis, Número de Camadas e Espessura das Lamelas

O’Ceallaigh, Sikora e Harte (2018) utilizaram ensaios de flexão (B – *bending*) e de cisalhamento (S – *shear*) para comparar o desempenho de painéis de CLT, produzidos com *Sitka Spruce* (*Picea sitchensis*), com diferentes geometrias: três camadas de espessura 20 mm (B-3-20 e S-3-20); cinco camadas de espessura 20 mm (B-5-20 e S-5-20); e três camadas de espessura 40 mm (B-3-40 e S-3-40). Os resultados dos ensaios de flexão indicaram que a resistência à flexão diminuiu com o aumento da espessura dos painéis. Do mesmo modo, os resultados dos ensaios de cisalhamento indicaram que a resistência ao *rolling shear* também foi reduzida com o aumento da espessura dos painéis. Vale salientar ainda que houve uma menor variação entre os resultados dos ensaios dos corpos de prova com cinco camadas, ocasionando inclusive as maiores resistências características à flexão dentre as três geometrias. Os autores sugerem que esse fato decorre do efeito de homogeneização, que é mais acentuado nos painéis que possuem um maior número de camadas e reduz a influência dos defeitos da madeira em seu desempenho. Além disso, os autores encontraram maiores valores de Rigidez Efetiva para os painéis mais espessos.

Sikora, McPolin e Harte (2016) analisaram a influência da espessura de painéis de CLT, produzidos com madeira de *Sitka Spruce* (*Picea sitchensis*), em seu desempenho mecânico por meio de ensaios de flexão e de cisalhamento. Foram utilizadas quatro configurações de painéis: três camadas de 20 mm de espessura (B-3-20 e S-3-20); três camadas de 24 mm de espessura (B-3-24 e S-3-24); três camadas de 40 mm de espessura (B-3-40 e S-3-40); e cinco camadas de 20 mm de espessura (B-5-20 e S-5-20). Os ensaios de flexão permitiram concluir que um aumento na espessura dos painéis contribuiu para o aumento de sua rigidez, mas que resultou em menores resistências à flexão, fenômeno que os autores julgaram que ainda precisa ser mais bem analisado. Por outro lado, os painéis mais espessos também tiveram sua ruptura associada a maiores momentos fletores. Os ensaios de cisalhamento, por sua vez, permitiram concluir que um aumento na espessura dos painéis provocou uma redução em sua resistência ao cisalhamento.

Franke (2016) realizou uma série de ensaios em painéis de CLT produzidos com madeira de faia – uma espécie folhosa – a fim de avaliar seu desempenho mecânico. O

autor apontou que, com o aumento do número de camadas e a diminuição das espessuras das lamelas, as tensões cisalhantes se mostraram mais uniformemente distribuídas e apresentaram um menor valor máximo. Foram ensaiados corpos de prova com lamelas de espessuras variáveis: 33, 20, 10 e 2,4 milímetros. Os resultados experimentais dessa pesquisa indicaram que a resistência ao *rolling shear* aumentou na medida em que a espessura das lamelas diminuiu, até 10 mm, havendo uma perda de resistência para a espessura de 2,4 mm. Além disso, analisando os modos de falha, percebeu-se que os painéis com camadas menos espessas apresentaram apenas ruptura por *rolling shear*, enquanto que nos painéis com camadas mais espessas também ocorreram rupturas por tração perpendicular às fibras.

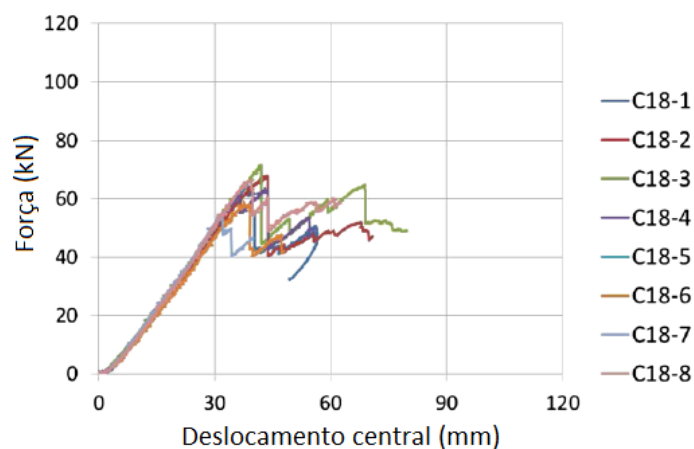
Pang e Jeong (2019) analisaram o efeito da espessura de painéis de CLT e do tamanho de seus vãos (relação L/h , em que L é o tamanho do vão e h é espessura total do painel) em seu comportamento mecânico quando submetidos à flexão, com painéis produzidos com painéis feitos de lariço japonês (*Larix kaempferi*) e pinus (*Pinus koraiensis*). Os autores observaram, para valores de L/h de 24, o predomínio da ruptura por tração na camada de madeira inferior, como modo de falha, ao passo em que para $L/h = 12$, predominaram as rupturas por *rolling shear* e, em alguns casos, cisalhamento. Concluíram ainda que para o caso de $L/h = 24$, as deformações resultantes das tensões de cisalhamento eram praticamente desprezíveis. Outro ponto observado foi que a capacidade de carga dos painéis se mostrou maior nos painéis mais espessos, ou seja, painéis com seção transversal mais alta foram capazes de suportar forças e momentos fletores maiores antes da ruptura.

2.2.4.2 Classe de Resistência da Madeira

Hochreiner *et al.* (2013) realizaram uma série de ensaios de flexão com três grupos de painéis de CLT, produzidos cada um deles com madeira de abeto de classes de resistência diferentes, a saber: C18, C24 e C35, conforme a classificação da norma CEN EN 338:2009. Todos os painéis ensaiados tinham dimensões 1500x1500x57 mm, sendo compostos por três camadas com 19 mm de espessura, apoiados nas quatro laterais. O carregamento foi aplicado no centro dos painéis, e se realizou o monitoramento dos ensaios com um sistema de correlação de imagens digitais.

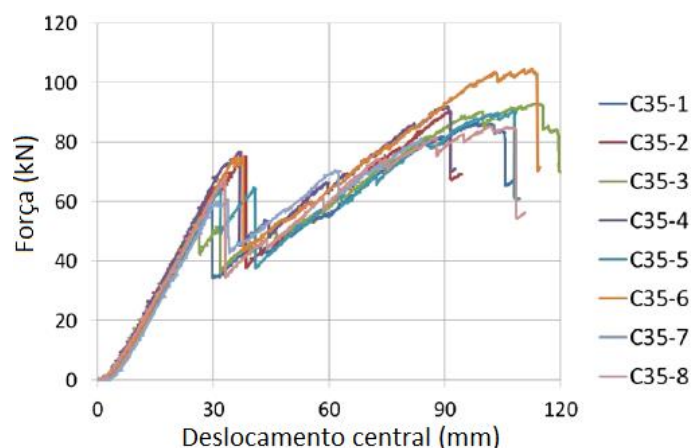
Os autores perceberam que a classe de resistência da madeira influenciou a rigidez dos painéis, sendo que aqueles de madeira C35 apresentaram o maior módulo de elasticidade. Do mesmo modo, os painéis produzidos com madeira de classe de resistência mais elevada demonstraram maior capacidade de carga, embora essa variável não tenha apresentado nenhuma correlação como limite elástico dos painéis, que não foi influenciado pelas classes de resistência dos painéis. Analisando-se as curvas força-deslocamento, percebeu-se um padrão, em que após se atingir o limite elástico, ocorreram bruscas reduções nas forças aplicadas, seguidas por aumentos ao longo do regime plástico. Para os painéis de classe C18, as forças identificadas no regime plástico se mostraram sempre inferiores ao limite elástico, enquanto que para os painéis de classe C35 se observaram ganhos de resistência significativos. Nesse sentido, os painéis de classe C24 apresentaram um comportamento intermediário, havendo ganhos de resistência para alguns dos corpos de prova. As Figuras 2.20 e 2.21 ilustram as curvas de força-deslocamento para as classes de resistência C18 e C35, respectivamente.

Figura 2.20 – Curvas de força-deslocamento dos painéis produzidos com madeira de classe C18



Fonte: adaptado de Hochreiner *et al.* (2013)

Figura 2.21 – Curvas de força-deslocamento dos painéis produzidos com madeira de classe C35



Fonte: adaptado de Hochreiner *et al.* (2013)

Os autores analisaram ainda os modos de falha e concluíram que eles foram influenciados pela resistência da madeira. Para os painéis produzidos com madeira de classe C18, predominou a ruptura por tração das lamelas, ocorrendo também rupturas por *rolling shear*. Nos painéis de classe C24, observou-se uma menor ocorrência de ruptura por tração. Os painéis de classe C35, por outro lado, por serem produzidos com uma madeira mais resistente, tiveram ruptura predominantemente por *rolling shear*, que se propagou por uma área maior do que nos outros painéis. Isso permitiu uma melhor redistribuição de esforços internos e assegurou assim sua maior capacidade de resistir às solicitações.

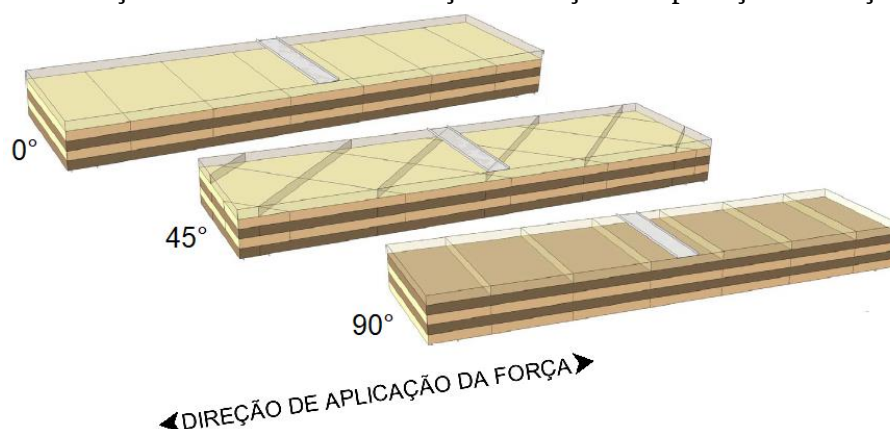
Desse modo, os autores concluíram que o desempenho dos painéis de CLT dependeria de seu modo de falha e não poderia ser previsto apenas pela classificação da madeira utilizada. Salientaram ainda que, na escolha dos materiais para a fabricação dos painéis de CLT e em seu dimensionamento, deveriam ser considerados os modos de falha: sugeriram que ou se utilize madeira de maior resistência, evitando-se rupturas por tração, e se considere o ganho de resistência do painel no regime plástico, ou se utilize madeira menos resistente e se considere apenas sua resistência no regime elástico.

2.2.4.3 Orientação das Lamelas

Durante sua pesquisa, Furtmüller, Giger e Adam (2018) realizaram ensaios de flexão em três pontos em painéis de CLT com três diferentes configurações. Todos os painéis foram produzidos com cinco camadas de lamelas com 20 mm de espessura,

orientadas perpendicularmente entre si. A diferença entre eles consistia na orientação das camadas em relação à direção principal: no primeiro grupo as camadas externas e centrais foram orientadas a 0° ; no segundo grupo, a 45° ; no terceiro grupo, a 90° . A Figura 2.22 ilustra as três diferentes orientações.

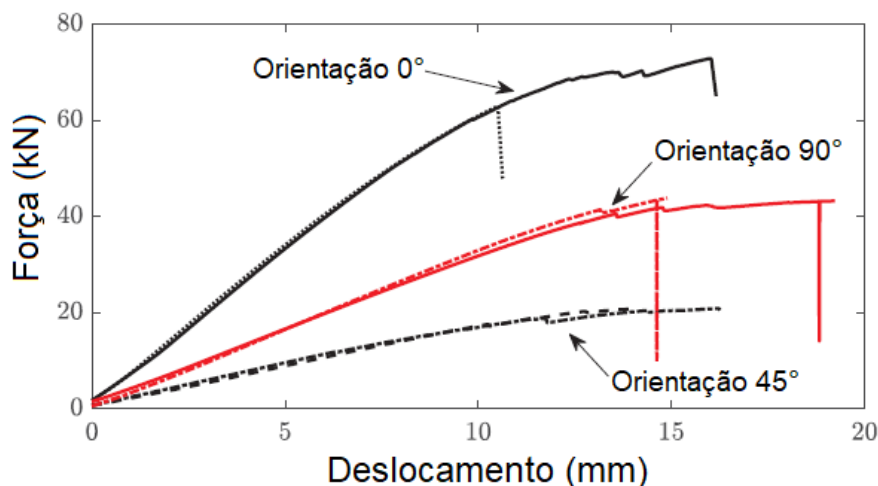
Figura 2.22 – Configurações geométricas dos painéis ensaiados com diferentes orientações das camadas em relação à direção de aplicação da força



Fonte: Adaptado de Furtmüller, Giger e Adam (2018)

Analisando os resultados dos ensaios, os autores perceberam que a orientação das camadas externas influenciou de maneira bastante significativa a rigidez e a resistência dos painéis. Os painéis orientados a 0° apresentaram melhor desempenho em ambos os aspectos, o que, segundo os autores, deveu-se ao fato de o principal mecanismo de transferência de esforços na flexão em uma direção para a CLT ser a orientação das camadas externas. Os painéis orientados a 45° , por outro lado, apresentaram o pior desempenho, justificado pelos autores pelas mudanças de direção da transmissão de esforços e pela fricção na direção vertical entre as lamelas. Foram observadas rupturas por *rolling shear* em todos os corpos de prova, ocorrendo ainda rupturas por tração nas camadas externas dos painéis orientados a 0° . A Figura 2.23 ilustra as curvas de força-deslocamento para os dois corpos de prova de cada uma das três configurações analisadas.

Figura 2.23 – Curvas de força-deslocamento para as três configurações de painéis



Fonte: Adaptado de Furtmüller, Giger e Adam (2018)

Buck *et al.* (2016) também analisaram a influência da orientação das lamelas no desempenho de painéis de CLT. Os autores produziram dois tipos de painéis para serem ensaiados à flexão: painéis convencionais, com alternância de 90° na orientação entre camadas adjacentes e painéis com alternância de 45° na orientação entre camadas adjacentes. Com cinco camadas de espessura 19 mm, todos os painéis apresentavam orientação paralela à direção principal nas camadas externas. A Figura 2.24 ilustra a configuração geométrica dos painéis com alternância de 45°.

Figura 2.24 – Configuração geométrica dos painéis com alternância de 45° na orientação de lamelas adjacentes



Fonte: Buck *et al.* (2016)

A expectativa dos autores era a de melhorar as propriedades dos painéis ao aumentar o alinhamento das camadas de madeira à direção principal. De fato, os painéis com alternância de 45° apresentaram maior capacidade de carga e rigidez à flexão do que os painéis convencionais. Quanto aos modos de falha, houve ruptura por tração das lamelas em ambas as configurações, ao passo em que as rupturas por *rolling shear* foram mais frequentes nos painéis tradicionais. Nos painéis com alternância de 45° se percebeu

também a ocorrência de cisalhamento na direção longitudinal das lamelas orientadas diagonalmente.

Considerando-se o resultado de ambos os estudos, percebe-se que a orientação das camadas influencia no comportamento mecânico dos painéis. Vale salientar a importância da orientação das camadas externas com relação à direção principal, uma vez que nos ensaios de Furtmüller, Giger e Adam (2018) os painéis orientados a 45° apresentaram um desempenho inferior aos demais, ao passo que na pesquisa de Buck *et al.* (2016), seu desempenho se mostrou superior. A principal diferença entre os dois casos é que, no primeiro deles, nenhuma camada era orientada paralelamente em relação à direção principal, enquanto que no segundo caso as camadas externas e central tinham essa orientação, com a alternância sendo feita apenas nas camadas intermediárias.

Desse modo, verifica-se que diferentes pesquisas vêm sendo realizadas, analisando a influência de variáveis relacionadas à geometria dos painéis de CLT e às características dos materiais utilizados para sua produção em seu desempenho. Os trabalhos supracitados contribuem para a melhor compreensão do comportamento mecânico da CLT. Além disso, suas conclusões podem servir de subsídio para análises de resultados de outros experimentos ou mesmo de simulações computacionais, como é o caso da presente pesquisa.

3 DETERMINAÇÕES EXPERIMENTAIS E ANALÍTICAS DA RIGIDEZ EFETIVA DOS PAINEIS DE CLT SUBMETIDOS À FLEXÃO PERPENDICULAR AO PLANO

Nesta seção são apresentados procedimentos para a determinação da Rigidez Efetiva dos painéis de CLT submetidos à flexão na direção perpendicular ao plano. Primeiramente, explica-se como é realizada a determinação experimental da Rigidez Efetiva. Em seguida, são apresentados os procedimentos analíticos que foram utilizados para a determinação do Módulo de Elasticidade dos painéis: a Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas (*Gamma Method*), a Teoria do Compósito (*k-Method*) e a Analogia de Cisalhamento.

3.1 DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO MÓDULO DE ELASTICIDADE

A norma europeia CEN EN 16351:2015 determina como devem ser realizados os ensaios de flexão de painéis de CLT na direção perpendicular ao plano. Ela apresenta uma ilustração das configurações geométricas recomendadas para os ensaios, que consistem em ensaios de flexão em quatro pontos, com dois apoios e dois pontos de aplicação de força, simétricos. Estabelece ainda que, para painéis produzidos com lamelas cuja relação entre a base e a espessura é inferior a 4, podem ser adotadas as configurações geométricas apresentadas na norma CEN EN 408:2010.

Em seu artigo, estudando a influência da espessura dos painéis de CLT em suas propriedades mecânicas, Sikora, McPolin e Harte (2016) utilizaram como padrão o equacionamento apresentado na norma CEN EN 408:2010, independentemente da relação entre as medidas da espessura e da largura das lamelas. Os pesquisadores trabalharam tanto com a Rigidez Efetiva Global (considerando as deformações no vão todo) quanto com a Rigidez Efetiva Local (considerando apenas as deformações na região entre os pontos de aplicação das forças). Os autores concluíram que a Rigidez Efetiva Global, obtida experimentalmente, tem um valor mais próximo ao obtido pelos métodos analíticos, quando comparada à Rigidez Efetiva Local, ainda que sendo inadequada para painéis mais curtos, que sofrem mais efeitos do cisalhamento.

O’Ceallaigh, Sikora e Harte (2018) também realizaram ensaios de flexão em painéis de CLT na direção perpendicular ao plano. Em seu trabalho, obtiveram tanto a

Rigidez Efetiva Global quanto a Rigidez Efetiva Local dos corpos de prova. Os autores concluíram que a Rigidez Efetiva Global, obtida experimentalmente, tem uma maior concordância com os valores obtidos pelos diferentes métodos analíticos. Vale ainda salientar que as curvas de força-deslocamento apresentadas em seu artigo foram produzidas utilizando os resultados de deslocamento medidos globalmente, ou seja, considerando-se os deslocamentos que ocorreram em todo o vão existente entre os apoios.

Considerando-se a necessidade de se padronizar as análises, optou-se por utilizar a metodologia apresentada na norma CEN EN 408:2010 para a determinação do Módulo de Elasticidade. Levando-se em conta que as calibrações foram realizadas com base nos deslocamentos globais apresentados no trabalho de O’Ceallaigh, Sikora e Harte (2018), como será explicado em seção subsequente, e que os resultados experimentais de Rigidez Efetiva Global, com base no Módulo de Elasticidade Global, são mais parecidos como os obtidos pelos métodos analíticos, optou-se por se avaliar os deslocamentos globais nas simulações e se adotar o equacionamento para o Módulo de Elasticidade Global.

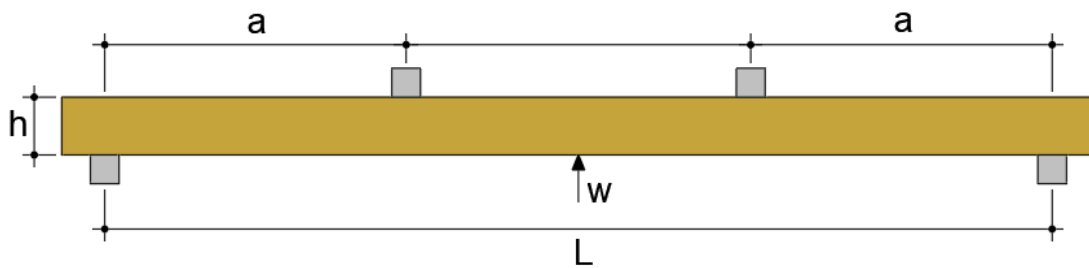
Tendo em vista a dificuldade para a obtenção da versão atualizada da norma CEN EN 408:2010, tornou-se necessária a utilização da versão publicada em 2004. A norma CEN EN 408:2004 apresenta a Equação [3.1], utilizada para o cálculo do Módulo de Elasticidade Global:

$$E_{m,g} = \frac{L^3(F_2 - F_1)}{bh^3(w_2 - w_1)} \left[\left(\frac{3a}{4L} \right) - \left(\frac{a}{L} \right)^3 \right] \quad [3.1]$$

Em que: $E_{m,g}$ é o Módulo de Elasticidade Global (em N/mm²); L é o tamanho do vão entre os apoios (em mm); b é a largura da seção transversal do painel (em mm); h é a altura da seção transversal do painel (em mm); a é a distância entre o apoio e o ponto de aplicação de força mais próxima (em mm); F_1 é o valor de uma força aplicada ao painel durante o ensaio (em N); F_2 é outro valor de força aplicada ao painel (superior a F_1 , em N); w_1 é o deslocamento medido no painel provocado pela força F_1 (em mm); e w_2 é o deslocamento medido no painel provocado pela força F_2 (em mm).

Na Figura 3.1 apresenta-se a configuração geométrica do ensaio para a determinação do Módulo de Elasticidade Global na flexão provocada por forças aplicadas na direção perpendicular ao plano, conforme a CEN EN 408:2004. Nela também são apresentadas as principais variáveis utilizadas na Equação [3.1].

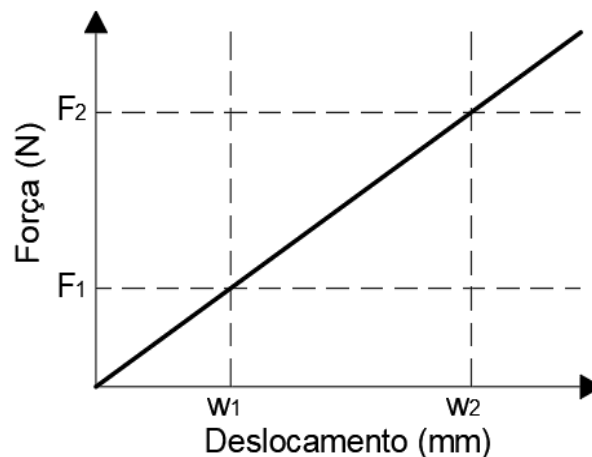
Figura 3.1 – Configuração geométrica do ensaio para a determinação do Módulo de Elasticidade Global na flexão provocada por forças perpendiculares ao plano



Fonte: adaptado de CEN EN 408 (2004)

Na Figura 3.2 é apresentado um diagrama de força-deslocamento típico de ensaio de flexão em quatro pontos, conforme apresentado na norma CEN EN 408:2004, em que são mostradas as variáveis de forças e deslocamentos apresentadas na Equação [3.1].

Figura 3.2 – Diagrama de força x deslocamento e variáveis associadas



Fonte: adaptado de CEN EN 408 (2004)

3.2 MÉTODOS ANALÍTICOS PARA A DETERMINAÇÃO DA RIGIDEZ EFETIVA

Nesta subseção são apresentados três dos métodos analíticos empregados para a estimativa da Rigidez Efetiva à flexão de painéis de CLT submetidos a forças aplicadas na direção perpendicular ao plano: a Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas (*Gamma Method*), a Teoria do Compósito (*k-Method*) e a Analogia de Cisalhamento. As informações apresentadas nesta seção têm, como referência principal, Gangnon e Popovski (2011). Quando utilizadas, outras referências serão devidamente mencionadas.

Essas teorias se mostram adequadas para a determinação das propriedades de rigidez e de resistência de painéis de CLT submetidos à flexão ao longo de uma direção principal. Para painéis submetidos à flexão em duas direções, outras metodologias se mostram mais adequadas, conforme ressaltam Gangnon e Popovski (2011).

Deve-se salientar que exemplos de aplicação de cada um desses métodos serão apresentados no Apêndice A, ocasião em que serão demonstrados os cálculos utilizados nos procedimentos metodológicos para um dos painéis analisados.

3.2.1 Teoria da Vigas Mecanicamente Unidas (*Gamma Method*)

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 (EI_{eff}), 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 a aplicação do método aos painéis de CLT, considera-se que as lamelas orientadas na direção principal dos painéis são vigas conectadas entre si e as únicas responsáveis por suportar os esforços causados pelas forças atuantes. Considera-se também que as ligações entre essas vigas são realizadas pelas lamelas com orientação perpendicular à principal, que funcionariam como conectores mecânicos, e cuja rigidez é igual à deformação por cisalhamento dessas camadas. Nesse caso, a razão s/K seria, para cada camada orientada perpendicularmente, dada pela Equação [3.2]:

$$\frac{s}{K_i} = \frac{h_i}{G_R b} \quad [3.2]$$

Em que: G_R é o Módulo de *Rolling Shear* (em MPa); h_i é a espessura das camadas na direção perpendicular à principal (em mm); b é a espessura do painel (em mm); s é o espaçamento entre os conectores (não sendo o caso dos painéis de CLT, em mm); e K_i é o módulo de deslizamento dos conectores mecânicos (não sendo também o caso dos painéis de CLT, em N/mm).

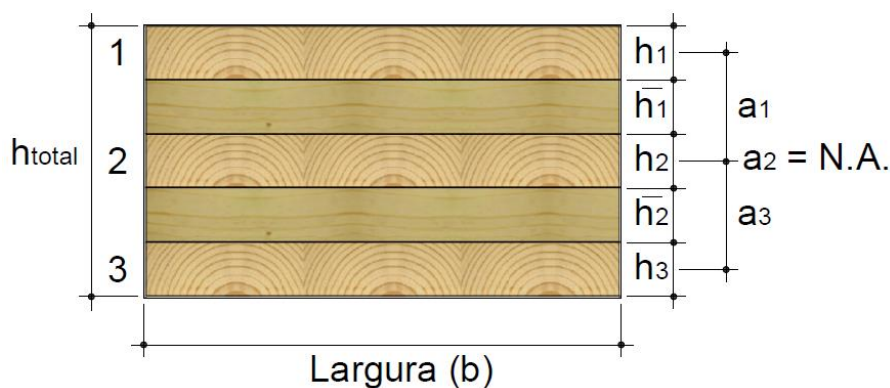
A determinação da Rigidez Efetiva (EI_{eff}) pela Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas é realizada por meio da Equação [3.3]:

$$(EI)_{eff} = \sum_{i=1}^n (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2) \quad [3.3]$$

Em que: $(EI)_{eff}$ é a Rigidez Efetiva dos painéis (em N mm²); n corresponde ao número de camadas; i corresponde a cada uma das camadas; E_i é o Módulo de Elasticidade de cada uma das camadas (em MPa); I_i corresponde ao Momento de Inércia em cada uma das camadas (em mm⁴); γ_i é o fator de eficiência de conexão entre as camadas; A_i é a área da seção transversal de cada uma das camadas (em mm²); e a_i é a distância entre o centroide de cada camada e a camada central (em mm).

A Figura 3.3 ilustra uma seção transversal de um painel de CLT com cinco camadas de madeira e a representação gráfica das variáveis apresentadas na Equação [3.3].

Figura 3.3 – Seção transversal de painel de CLT com cinco camadas e variáveis associadas a sua geometria



Fonte: adaptado de Gangnon e Popovski (2011)

As Equações de [3.4] a [3.8] complementam a aplicação da Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas para um painel de CLT composto de cinco camadas, como o apresentado na Figura 3.4.

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \left(\pi^2 \frac{E_1 A_1}{L^2} \frac{\bar{h}_1}{G_R b} \right)} \quad [3.4]$$

$$\gamma_3 = \frac{1}{1 + \left(\pi^2 \frac{E_3 A_3}{L^2} \frac{\bar{h}_3}{G_R b} \right)} \quad [3.5]$$

$$a_1 = \frac{h_1}{2} + \bar{h}_1 + \frac{h_2}{2} \quad [3.6]$$

$$a_3 = \frac{h_2}{2} + \bar{h}_2 + \frac{h_3}{2} \quad [3.7]$$

$$a_2 = \frac{\gamma_1 E_1 A_1 \left(\frac{h_1}{2} + \bar{h}_1 + \frac{h_2}{2} \right) - \gamma_3 E_3 A_3 \left(\frac{h_2}{2} + \bar{h}_2 + \frac{h_3}{2} \right)}{\sum_i^3 (\gamma_i E_i A_i)} \quad [3.8]$$

Em que: E_i é o Módulo de Elasticidade de cada uma das camadas (em MPa); n corresponde ao número de camadas; i corresponde a cada uma das camadas; as demais medidas são inseridas em mm e mm² e os coeficientes γ são adimensionais.

Vale salientar que o método pode ser utilizado para painéis compostos por camadas de diferentes espessuras e produzidas com madeira de diferentes Módulos de Elasticidade.

Uma das limitações da Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas é desconsiderar as deformações por cisalhamento que ocorrem nas camadas orientadas paralelamente à direção principal. Desse modo, sua utilização é mais recomendada para painéis com uma relação entre a distância entre os apoios e a espessura alta ($L/h \geq 30$). Outra limitação é ter sido desenvolvido para painéis biapoiados, sendo possível, entretanto, adaptar o valor da distância entre os apoios (L) para outras situações.

3.2.2 Teoria do Compósito (*k-Method*)

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 painéis com uma relação entre a distância entre os apoios e a espessura alta ($L/h \geq 30$).

Na Teoria do Compósito, adota-se um coeficiente k_i , de modificação da resistência e da rigidez, que leva em consideração as características dos carregamentos com relação às orientações dos painéis. Desse modo, é possível se obter as propriedades relacionadas à flexão dos painéis para diferentes tipos de carregamento.

A Figura 3.4 ilustra os tipos de carregamento dos painéis, associando-os às equações aplicadas para a determinação do coeficiente k_i em cada um dos casos, e a imagem de uma seção transversal com as características geométricas de interesse para a utilização das equações.

Figura 3.4 – Diferentes situações de carregamento previstas pelo *k-Method* e equações correspondentes para o cálculo do coeficiente k_i

	$k_1 = 1 - \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0}\right) \cdot \frac{a_{m-2}^3 - a_{m-4}^3 + \dots \pm a_1^3}{a_m^3}$ Flexão na direção perpendicular ao plano, aplicada em painéis com as camadas externas orientadas paralelamente à direção principal
	$k_2 = \frac{E_{90}}{E_0} + \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0}\right) \cdot \frac{a_{m-2}^3 - a_{m-4}^3 + \dots \pm a_1^3}{a_m^3}$ Flexão na direção perpendicular ao plano, aplicada em painéis com as camadas externas orientadas perpendicularmente à direção principal
	$k_3 = 1 - \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0}\right) \cdot \frac{a_{m-2} - a_{m-4} + \dots \pm a_1}{a_m}$ Flexão na direção paralela ao plano, aplicada em painéis com as camadas externas orientadas paralelamente à direção principal
	$k_4 = \frac{E_{90}}{E_0} + \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0}\right) \cdot \frac{a_{m-2} - a_{m-4} + \dots \pm a_1}{a_m}$ Flexão na direção paralela ao plano, aplicada em painéis com as camadas externas orientadas perpendicularmente à direção principal
	Seção transversal de painel de CLT com cinco camadas com dimensões utilizadas no cálculo do coeficiente k_i cotadas

Fonte: adaptado de Gangnon e Popovski (2011)

O coeficiente k_1 é então utilizado para converter as propriedades de resistência e rigidez da madeira em propriedades do painel. A Equação [3.9] é utilizada para se obter o Módulo de Elasticidade dos painéis submetidos à flexão causada por forças perpendiculares ao plano, com as lamelas das camadas externas orientadas paralelamente à direção principal.

$$E_{b,0,eff} = E_0 k_1 \quad [3.9]$$

Em que: $E_{b,0,eff}$ é o Módulo de Elasticidade na flexão causada por forças perpendiculares ao plano e com as camadas externas orientadas paralelamente à direção principal (em MPa); E_0 é o Módulo de Elasticidade na direção paralela às fibras da madeira (em MPa); e k_1 é o coeficiente de modificação das propriedades mecânicas para a flexão perpendicular ao plano em painéis com as camadas externas orientadas paralelamente à direção principal, conforme a Figura 3.4.

Desse modo, a Rigidez Efetiva de um painel de CLT submetido à flexão causada por forças aplicadas na direção perpendicular ao plano e com as camadas externas orientadas paralelamente à direção principal dos esforços, obtida pelo *k-Method*, pode ser calculada pela Equação [3.10]

$$(EI)_{eff} = E_{b,0,eff} I = E_0 k_1 I \quad [3.10]$$

Em que: $(EI)_{eff}$ é a Rigidez Efetiva do painel (em Nmm²); e I é o Momento de Inércia do painel com relação ao eixo sobre o qual ocorre a flexão (em mm⁴).

Uma das limitações da Teoria do Compósito é apenas permitir a estimativa da rigidez de painéis compostos por camadas cujas lamelas possuem o mesmo Módulo de Elasticidade. Outro fator que pode conduzir a equívocos é a recomendação da adoção de $E_{90}=E_0/30$, que não corresponde aos resultados obtidos experimentalmente para diferentes espécies de madeira, não se refletindo também nas Classes de Resistência e nos métodos para a estimativa de E_{90} em caracterizações simplificadas, como será discutido em seção posterior deste texto. Além disso, como já mencionado, a Teoria do Compósito não é indicada para painéis cuja relação entre a distância entre os apoios e a espessura pequena.

3.2.3 Analogia do Cisalhamento (por Kreuzinger)

Este é considerado o método de dimensionamento mais preciso para painéis de CLT, permitindo a estimativa das propriedades de resistência e de rigidez para painéis compostos por camadas de espessuras variadas e diferentes propriedades mecânicas. O método leva em consideração, ainda, as deformações causadas pelas tensões de cisalhamento.

Na Analogia do Cisalhamento, os painéis são divididos em duas vigas, A e B. À Viga A é atribuída a soma das resistências à flexão de cada uma das lamelas com relação às suas próprias linhas neutras. À Viga B, por sua vez, são atribuídas a parte correspondente ao Teorema dos Eixos Paralelos das resistências à flexão, a resistência ao cisalhamento do painel e a flexibilidade das conexões. As duas vigas são associadas por elementos com rigidez infinita, de modo que suas deflexões são iguais. Sobrepondo-se os momentos fletores e tensões de cisalhamento das duas vigas, é possível se obter os resultados correspondentes ao painel. O método permite a determinação das tensões normais e de cisalhamento em cada uma das camadas.

No cálculo da rigidez efetiva do painel, considera-se que a rigidez da Viga A corresponde à soma da rigidez à flexão de cada uma das camadas. A Rigidez Efetiva da Viga A é calculada por meio da Equação [3.11]:

$$B_A = \sum_{i=1}^n E_i I_i = \sum_{i=1}^n E_i b_i \frac{h_i^3}{12} \quad [3.11]$$

Em que: B_A é a Rigidez Efetiva da Viga A (em Nmm²); E_i é o Módulo de Elasticidade de cada uma das camadas que compõem o painel (em N/mm²); I_i é o Momento de Inércia de cada uma das camadas que compõem o painel (em mm⁴); b_i é a largura de cada uma das camadas (em mm); e h_i é a espessura de cada uma das camadas (em mm).

A Rigidez Efetiva da Viga B é calculada utilizando-se o Teorema dos Eixos Paralelos, por meio da Equação [3.12]:

$$B_B = \sum_{i=1}^n E_i A_i z_i^2 \quad [3.12]$$

Em que: B_B é a Rigidez Efetiva da Viga B (em Nmm²); E_i é o Módulo de Elasticidade de cada uma das camadas que compõem o painel (em N/mm²); A_i é área da seção transversal de cada uma das camadas (em mm²); z_i é a distância entre o centroide de cada uma das camadas e a linha neutra do painel (em mm).

Assim, Equação [3.13] apresenta o cálculo da rigidez efetiva de um painel de CLT pela Analogia do Cisalhamento:

$$(EI)_{eff} = B_A + B_B = \sum_{i=1}^n E_i b_i \frac{h_i^3}{12} + \sum_{i=1}^n E_i A_i z_i^2 \quad [3.13]$$

Em que: $(EI)_{eff}$ é a Rigidez Efetiva do painel (em N mm²).

4 O COMPORTAMENTO MECÂNICO DA MADEIRA E SUA REPRESENTAÇÃO EM SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

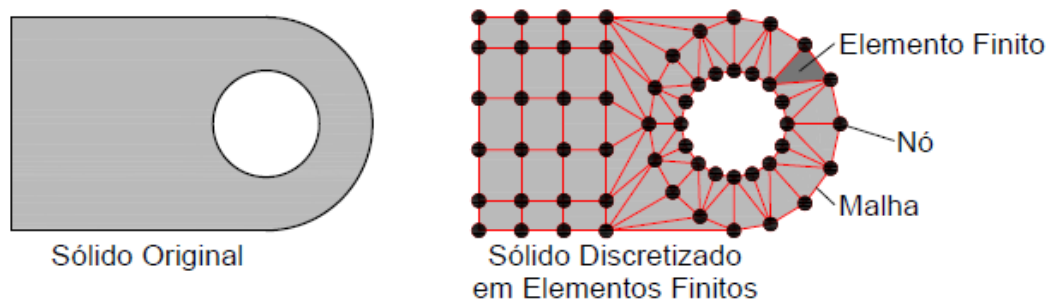
Nesta seção são apresentadas informações relacionadas às simulações numéricas que serão realizadas para se avaliar o comportamento dos painéis de CLT. A primeira subseção consiste em uma breve apresentação do *software* Abaqus e do uso do Método dos Elementos Finitos. Na subseção subsequente, são trazidas informações necessárias para a simulação do comportamento mecânico da madeira. A primeira explicação é sobre o comportamento ortotrópico da madeira, que deve ser compreendido para a atribuição das propriedades do material. Em seguida, é abordado o comportamento elastoplástico da madeira, discutindo-se maneiras de representa-lo nas simulações. Por fim, explica-se o Critério de Hill, critério de falha adotado para verificar o escoamento dos materiais simulados.

4.1 O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS E O SOFTWARE ABAQUS

Existem diferentes métodos para a resolução de Equações Diferenciais Parciais. Entre eles está o Método dos Elementos Finitos, que pode ser utilizado em diferentes aplicações. 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.

Segundo Assan (2003), o Método dos Elementos Finitos permite a divisão de um domínio de integração contínuo em um número finito de pequenas regiões, chamadas elementos finitos. Desse modo, afirma o autor, o meio contínuo é dividido em um conjunto de elementos discretos. O autor explica que essa divisão é denominada rede de elementos finitos e é formada por uma malha que pode ser aumentada ou diminuída, fazendo com que os elementos variem de tamanho. Segundo o autor, os pontos de interseção dessas linhas são denominados nós.

A Figura 4.1 apresenta a discretização de um sólido contínuo em uma rede de elementos finitos, indicando a malha, os nós e um dos elementos.

Figura 4.1– Discretização de um sólido em elementos finitos

Fonte: O Autor

Assim, o Método dos Elementos Finitos permite que em vez de se tentar obter uma função admissível que satisfaça as condições de contorno para todo o domínio, as funções admissíveis sejam definidas dentro do domínio de cada um dos elementos finitos (ASSAN, 2003). Segundo Chapra e Canale (2011), a solução do problema é então obtida pela junção, ou “montagem”, das soluções de cada um dos elementos. Os autores afirmam que o processo de montagem é governado pelo conceito de continuidade, ou seja, as soluções para elementos vizinhos são compartilhadas. Desse modo, segundo os autores, os valores das incógnitas nos nós compartilhados por dois elementos adjacentes são iguais e a solução total se torna contínua.

Diferentes tipos de elementos podem ser utilizados para se discretizar um problema, dependendo de suas características. Os tipos de elementos podem ser divididos em famílias. Como exemplo, Cook (1995) apresenta elementos lineares (barras e vigas), elementos planos (triângulo de deformação constante, triângulo de deformação linear, quadrilátero bilinear, quadrilátero quadrático), elemento sólidos (tetraedro de deformação constante, tetraedro de deformação linear, hexaedro trilinear, hexaedro quadrático), entre outros.

Assan (2003) apresenta a Equação [4.1] para a aplicação do Método dos Elementos Finitos para um elemento:

$$k v = r \quad [4.1]$$

Em que, para problemas de análise estrutural: k é a matriz de rigidez do elemento, v são as variáveis nodais (deslocamentos e rotações) e r é o vetor das cargas nodais equivalentes.

É possível solucionar analiticamente diferentes problemas utilizando o Método dos Elementos Finitos. Entretanto, essa alternativa se mostra inviável para problemas mais complexos ou com um número muito grande de elementos. Para permitir o uso dessa técnica de modo mais eficiente, diferentes programas computacionais estão disponíveis, empregando o Método dos Elementos Finitos para a solução de problemas estruturais e de naturezas variadas.

Um desses programas é o Abaqus, produzido pela empresa Dessault Systèmes, que se encontra em sua versão 2019, e que permite a realização de diferentes análises utilizando o Método dos Elementos Finitos. No presente trabalho, utilizou-se o software Abaqus versão 14.5.

4.2 COMPORTAMENTO MECÂNICO DA MADEIRA

Nesta subseção são apresentadas e discutidas brevemente algumas propriedades mecânicas da madeira. Essas propriedades devem ser compreendidas para que as simulações realizadas consigam representar adequadamente o comportamento do material. Além disso, a compreensão das propriedades mecânicas se faz necessária para que se compreendam também as limitações dos modelos utilizados.

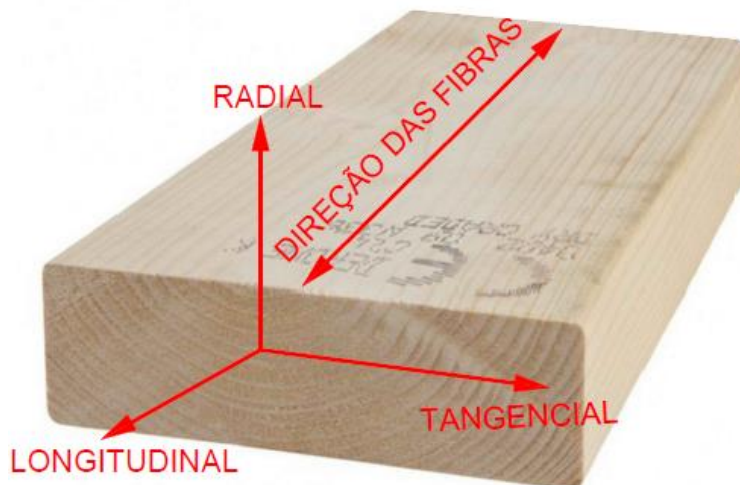
4.2.1 Comportamento Ortotrópico

A madeira é um material de origem natural. Por conta disso, suas propriedades mecânicas são influenciadas por uma série de fatores, a começar pela espécie vegetal da qual é extraída. Outros fatores que influenciam no comportamento estrutural são a velocidade de crescimento da árvore, a posição de onde a peça foi extraída, a existência de nós ou defeitos na amostra, a qualidade de seu processo de secagem, entre outros.

Entre as características mais relevantes, deve-se destacar a disposição dos elementos anatômicos responsáveis pela resistência da madeira, sendo as fibras, no caso das folhosas, e as traqueídes, no caso das coníferas (CALIL JÚNIOR; LAHR; DIAS, 2003). As propriedades mecânicas são convenientemente agrupadas e analisadas tendo como referência a direção das fibras. Desse modo, são determinadas na direção paralela às fibras (longitudinal, 0°) e perpendicular ou normal às fibras (radial, tangencial, 90°). Na maior parte das vezes, não é estabelecida uma diferença entre as propriedades nas direções radial e tangencial, por conta da dificuldade dessa diferenciação a olho nu em

algumas espécies e também em decorrência da posição em que foi extraída a amostra. A Figura 4.2 ilustra as direções de interesse para a análise das propriedades mecânicas da madeira.

Figura 4.2 – Orientações de interesse para a análise das propriedades mecânicas da madeira

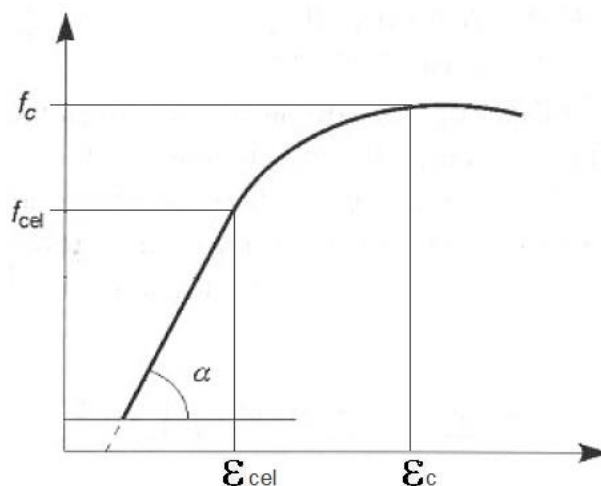


Fonte: Adaptado de MP Moran (2020)

4.2.2 Comportamento Elastoplástico

A resistência à compressão paralela às fibras é determinada por meio de ensaios de curta duração, envolvendo o carregamento e o descarregamento de corpos de prova de madeira, e posteriormente calculando-se suas deformações e as respectivas tensões a que são submetidos. Analisando-se 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. Ainda segundo Pfeil e Pfeil (2003), as deformações sofridas na compressão paralela às fibras caracterizam sua ruptura como dúctil. A Figura 4.3 ilustra o diagrama típico de tensão-deformação de um corpo de prova submetido à compressão paralela às fibras.

Figura 4.3 – Diagrama tensão-deformação resultante do ensaio de compressão paralela às fibras

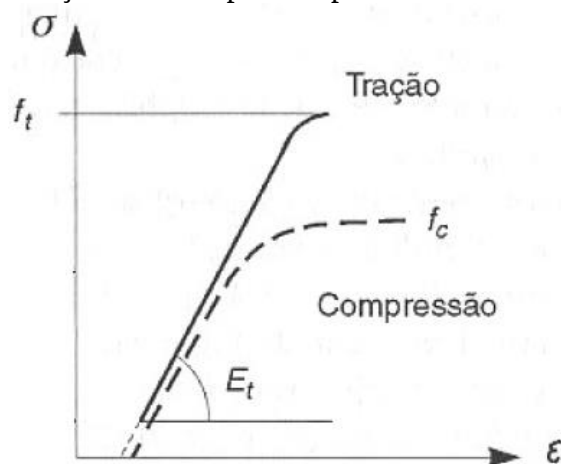


Fonte: Adaptado de Pfeil e Pfeil (2003)

Deve-se salientar que é do ensaio de compressão paralela às fibras que se obtém o Módulo de Elasticidade E_{c0} , utilizado em grande parte dos procedimentos de cálculo para o dimensionamento estrutural. Esse valor é obtido tomando-se como base as tensões e deformações a 10% e a 50% da força de ruptura estimada para o ensaio (PFEIL; 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, havendo apenas pequenas deformações. Desse modo, os autores afirmam que, ainda que nesse caso sejam obtidas resistências superiores às da compressão paralela às fibras, devido à pequena deformabilidade, a ruptura da madeira por tração é considerada frágil. 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 4.4 apresenta uma comparação entre os diagramas de tensão e deformação para os ensaios de tração e de compressão paralela às fibras.

Figura 4.4 – Comparação entre os diagramas de tensão-deformação para os ensaios de tração e de compressão paralelas às fibras

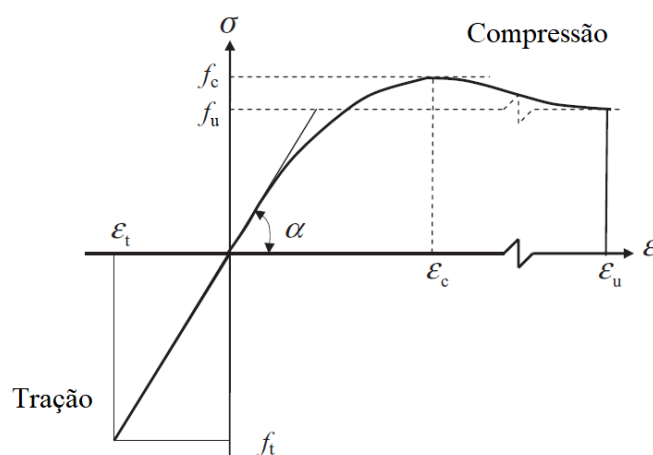


Fonte: Adaptado de Pfeil (2003)

Como se pode observar na Figura 4.4, 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.

Porteous e Kermani (2007), por sua vez, apresentam um diagrama de tensão-deformação para a madeira na direção paralela às fibras, considerando seu comportamento tanto na tração quanto na compressão, conforme ilustra a Figura 4.5.

Figura 4.5 – Diagrama de tensão-deformação para tração e compressão na direção paralela às fibras



Fonte: Adaptado de Porteous e Kermani (2007)

Em que:

f_c : Tensão máxima na compressão;

f_u : Tensão em que ocorre a ruptura na compressão;

f_t : Tensão máxima na tração;

ε_c : Deformação específica associada a f_c ;

ε_u : Deformação específica associada a f_u ;

ε_t : Deformação específica associada a f_t .

Nesse diagrama, o Módulo de Elasticidade da madeira, na direção paralela às fibras, é considerado igual tanto na tração quanto na compressão axial. Além disso, no ramo correspondente à compressão, o diagrama apresenta a tensão de compressão máxima e a tensão em que efetivamente ocorre a ruptura, bem como as deformações específicas correspondentes.

Porteous e Kermani (2007) apresentam ainda as relações expressas nas Equações [4.2] e [4.3]:

$$f_u = 0,85 f_c \quad [4.2]$$

$$\varepsilon_u = 3 \varepsilon_c \quad [4.3]$$

Em que: f_c é a resistência à compressão axial; f_u é a tensão correspondente à ruptura do corpo de prova; ε_u é a deformação específica causada pela tensão f_u e ε_c é a deformação específica causada pela tensão.

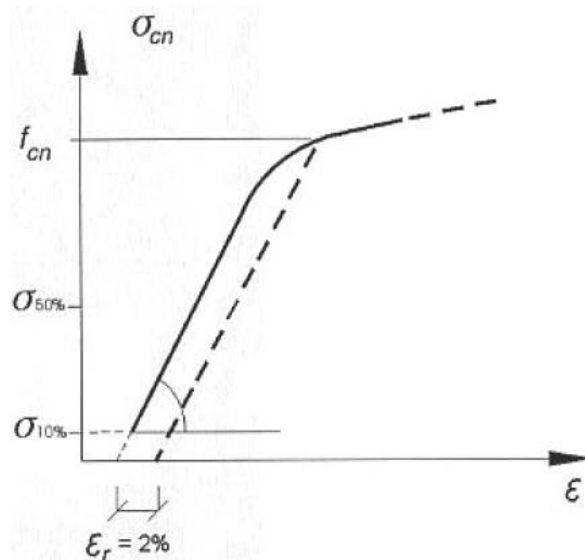
Ainda no que diz respeito à compressão axial, Johansson (2016) aponta que as deformações específicas provocadas pelas tensões de compressão axial máximas (ε_c) são da ordem de 0,8% a 1,2%.

Com relação à compressão normal às fibras, o que se observa são resistências bastante inferiores, da ordem de 25% da resistência na direção normal (CALIL JÚNIOR; LAHR; DIAS, 2003). Segundo Pfeil e Pfeil (2003), isso se deve ao fato de as fibras serem ocas e, quando comprimidas na direção perpendicular, serem esmagadas precocemente, deformando-se de maneira excessiva, o que é representado por um patamar no diagrama tensão-deformação.

Pfeil e Pfeil (2003) afirmam que no ensaio de compressão normal às fibras a resistência é definida por um critério de deformação excessiva, sendo igual à tensão

correspondente a uma deformação residual ε_r igual a 2%. A Figura 4.6 apresenta o diagrama tensão-deformação para a compressão normal às fibras.

Figura 4.6 – 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). Segundo Pfeil e Pfeil (2003), nessa direção a resistência à tração depende basicamente da resistência da lignina como ligante entre as fibras.

Segundo Calil Júnior, Lahr e Dias (2003), a direção do plano de atuação das tensões de cisalhamento tem influência direta na resistência da madeira. Os autores afirmam que, quando o cisalhamento é na direção normal às fibras, a madeira apresenta alta resistência pelo fato de a ruptura se dar pelo cisalhamento desses elementos. Os autores explicam ainda que, nesse caso, é provável que antes de a peça romper por cisalhamento já apresente problemas de resistência na compressão normal.

Quando o plano de atuação das tensões de cisalhamento é paralelo às fibras, 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 também pode acontecer o *rolling shear*, que se dá pelo rolamento das fibras uma sobre as outras, quando a direção das tensões é perpendicular à direção das fibras.

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, começa a ocorrer a plastificação da região comprimida, de modo que a ruptura na peça se inicia por flambagem local das fibras mais comprimidas, provocando o rebaixamento da linha neutra e aumentando as tensões nas fibras tracionadas (PFEIL; PFEIL, 2003). Desse modo, afirmam os autores, a peça se rompe por tração nas fibras inferiores.

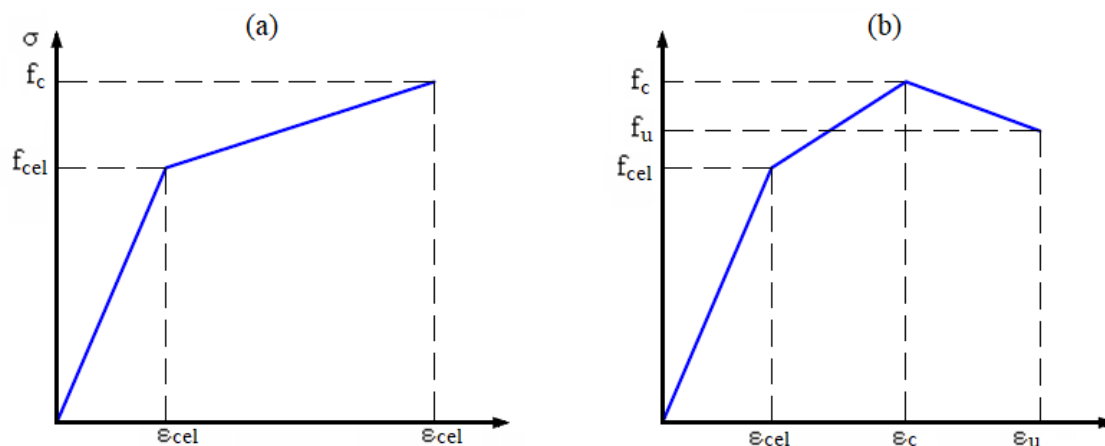
O módulo de elasticidade E_M , obtido por meio do ensaio de flexão simples, é inferior ao valor de E_{c0} , em decorrência do comportamento não homogêneo da madeira.

Diferentes abordagens podem ser adotadas para se representar o comportamento reológico da madeira. 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 (falha), seguida então pelo comportamento plástico. No regime elástico-linear, são atribuídas as propriedades mecânicas para cada uma das três direções 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, como será explicado na seção subsequente do texto.

Outra possibilidade existente é a adoção 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 4.7 ilustra o diagrama bilinear e o diagrama produzido com a utilização de três segmentos, com as tensões e deformações específicas atribuídas para uma das direções do material: a compressão paralela às fibras.

Figura 4.7 – Curvas tensão-deformação na compressão paralela às fibras: (a) diagrama bilinear; (b) diagrama produzido com três segmentos



Fonte: O Autor

4.2.3 Classes de Resistência, Resistência e Rigidez

O projeto, a execução e o controle das estruturas de madeira, no Brasil, são regulados pela norma ABNT NBR 7190:1997 – Projeto de Estruturas de Madeira. A norma apresenta os procedimentos experimentais para a determinação das propriedades de rigidez e de resistência de amostras de madeira visando ao seu emprego no projeto das estruturas de madeira e, posteriormente, orientando a aquisição do material para a construção. Atualmente, a norma se encontra em processo de revisão, de modo que nesta seção é tomado como base, principalmente, o documento Projeto de Revisão da Norma NBR 7190:2011.

Primeiramente, é importante salientar que o Projeto de Revisão da ABNT NBR 7190:2011 estabelece uma condição de referência relacionada ao teor de umidade da madeira sendo avaliada. Pfeil e Pfeil (2003) explicam que as propriedades mecânicas da madeira variam muito em função da umidade, apresentando resultados inferiores com o aumento do teor de umidade, até atingirem valores praticamente constantes na umidade correspondente ao ponto de saturação das fibras. Desse modo, o projeto de norma estabelece a umidade padrão de 12% para a avaliação das propriedades mecânicas. Ensaaios realizados em amostras com diferentes teores de umidade devem ter seus valores corrigidos para a umidade de referência.

O Projeto de Revisão da ABNT NBR 7190:2011 define rigidez de um material como sendo o valor médio de seu Módulo de Elasticidade, determinado na fase de

comportamento elástico-linear. O documento estabelece que o Módulo de Elasticidade na direção paralela às fibras (E_{w0}) é medido no ensaio de compressão paralela às fibras, enquanto que o Módulo de Elasticidade na direção normal às fibras (E_{w90}) é medido no ensaio de compressão normal às fibras. Segundo o Projeto de Revisão, pode-se considerar o Módulo de Elasticidade na direção paralela às fibras como sendo o mesmo, tanto para esforços de tração quanto para esforços de compressão. O documento permite ainda que, na falta de determinação experimental específica, adote-se um valor de E_{w90} igual a 5% do valor de E_{w0} .

Para o Módulo de Elasticidade Transversal (G), também conhecido como Módulo de Cisalhamento, a norma permite o uso da relação representada pela Equação [4.4].

$$G_{ef} = E_{c0,ef}/15 \quad [4.4]$$

Em que: G_{ef} é o valor efetivo do Módulo de Cisalhamento e $E_{c0,ef}$ é o valor efetivo do Módulo de Elasticidade à compressão na direção paralela às fibras, que nada mais é do que o valor médio corrigido pelos coeficientes de modificação (k_{mod}).

Segundo a ABNT NBR 7190:1997, na impossibilidade de se realizar o ensaio de compressão axial, o Módulo de Elasticidade pode ser estimado por meio de ensaios de flexão. Nesses ensaios, obtém-se o Módulo Aparente de Elasticidade na Flexão (E_M). Para coníferas, a norma admite a relação apresentada na Equação [4.5]:

$$E_M = 0,85E_{c0} \quad [4.5]$$

Enquanto que para espécies folhosas, admite-se a relação apresentada na Equação [4.6]:

$$E_M = 0,90E_{c0} \quad [4.6]$$

Em que: E_M é o Módulo Aparente de Elasticidade na Flexão e E_{c0} é o Módulo de Elasticidade na Compressão paralela às fibras.

A ABNT NBR 7190:1997 define resistência como sendo a aptidão de a madeira suportar tensões. Explica ainda que a resistência é determinada pela máxima tensão que pode ser aplicada a corpos de prova isentos de defeitos, até o aparecimento de fenômenos

além dos quais há restrição de emprego do material em elementos estruturais, tais como a ruptura ou deformação excessiva.

É interessante ressaltar que a ABNT NBR 7190:1997 faz uso de valores característicos para as propriedades de resistência da madeira. Sobre esse assunto, Pfeil e Pfeil (2003) explicam que, pelo fato de a madeira ser um material de origem natural e sujeito à influência de uma série de fatores ambientais, as propriedades mecânicas obtidas experimentalmente para uma mesma espécie tendem a apresentar variações. Os resultados dos ensaios, afirmam os autores, são valores médios, que devem ser corrigidos com base em seu coeficiente de variação para se fixar valores de resistência mínima, o que em geral significa que apenas 5% dos resultados ficam abaixo desse valor, chamado de característico. Desse modo, a ABNT NBR 7190:1997 admite que a resistência característica seja calculada pela Equação [4.7].

$$f_{wk} = f_{wm} - 1,645s_w \quad [4.7]$$

Em que: f_{wk} é o valor característico de uma resistência, f_{wm} é o valor médio experimentalmente obtido para essa resistência e s_w é o desvio-padrão dos resultados experimentais. A norma ASTM D2555-06 apresenta os valores de coeficiente de variação para algumas das propriedades mecânicas da madeira. A partir desses valores e da Equação [4.7], elaborou-se a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Relação entre valores médios e característicos com base na ASTM D2555-06

Propriedade	Coeficiente de Variação	f_{wk} / f_{wm}
Resistência à Flexão (f_M)	16%	0,74
Módulo de Elasticidade (E)	22%	0,64
Tensão de Compressão Paralela às Fibras ($f_{c,0}$)	18%	0,71
Tensão de Cisalhamento Paralela às Fibras ($f_{v,0}$)	14%	0,77
Tensão de Compressão Perpendicular às Fibras ($f_{c,90}$)	28%	0,54

Fonte: Adaptado de ASTM International (2006)

O Projeto de Revisão da ABNT NBR 7190:2011 permite ainda a adoção da seguinte relação entre as resistências característica e média, conforme Equação [4.8].

$$f_{wk} = 0,70f_{wm} \quad [4.8]$$

Em que: f_{wk} é o valor característico de uma determinada resistência e f_{wm} corresponde ao valor médio experimentalmente obtido para essa resistência.

Segundo Carlito, Lahr e Dias (2003), para espécies de madeira não conhecidas, exige-se a caracterização completa, enquanto que para espécies pouco conhecidas pode ser adotada uma caracterização mínima da resistência. Para espécies usuais, o Projeto de Revisão da norma indica a caracterização simplificada, que consiste no ensaio de resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c,0}$). A partir desse valor, o projeto de norma permite a adoção de algumas relações entre diferentes resistências, destacando-se aqui a Equações [4.9], utilizada no presente trabalho.

$$f_{c,90,k}/f_{c,0,k} = 0,25 \quad [4.9]$$

Em que: $f_{c,0,k}$ é a resistência característica à compressão paralela às fibras e $f_{c,90,k}$ é a resistência característica à compressão normal às fibras.

O Projeto de Revisão da ABNT NBR 7190:2011 permite o enquadramento de peças de madeira em classes de resistência. Desse modo, afirmam Calil Júnior, Lahr e Dias (2003), diferentes espécies com propriedades similares podem ser utilizadas para o atendimento das especificações de um determinado projeto. A Tabela 4.2 apresenta as classes de resistência para coníferas de acordo com o Projeto de Revisão da norma.

Tabela 4.2 – Classes de resistência para espécies coníferas

Classes	$f_{c,0k}$ (MPa)	$f_{v,0k}$ (MPa)	$E_{c,0m}$ (MPa)	$\rho_{aparente}$ (kg/m ³)
C20	20	4	3.500	500
C25	25	5	8.500	550
C30	30	6	14.500	600

Fonte: ABNT (2011)

A Tabela 4.3, por sua vez, apresenta as classes de resistência para madeira folhosa (dicotiledônea), conforme o mesmo Projeto de Revisão da norma.

Tabela 4.3 – Classes de resistência para espécies folhosas (dicotiledôneas)

Classes	$f_{c,0k}$ (MPa)	$f_{v,0k}$ (MPa)	$E_{c,0m}$ (MPa)	$\rho_{aparente}$ (kg/m ³)
D20	20	4	9.500	650
D30	30	5	14.500	800
D40	40	6	19.500	950
D50	50	7	22.000	970
D60	60	8	24.500	1000

Fonte: ABNT (2011)

4.2.4 Critérios de Falha – O Critério de Hill

É comum que os elementos estruturais, em situações de serviço, estejam submetidos a estados de tensões diferentes daqueles analisados em ensaios de caracterização dos materiais, como a tração ou compressão axial. Uma vez que é inviável se realizar ensaios para todas as condições possíveis, foram desenvolvidas teorias que associam as tensões nas diferentes direções e seu efeito sobre um determinado material. São os chamados critérios de falha (ou de ruptura).

Ugural e Fenster (1979) definem falha, em termos gerais, como um estado em que o elemento estrutural não tem mais o comportamento desejado. Nesse sentido, entende-se que a falha de um material pode se caracterizar por deformações permanentes, fraturas, ou até mesmo deformações elásticas excessivas. Os critérios de falha existem para estabelecer limites para as tensões a que um elemento estrutural pode estar submetido, a fim de se garantir a não ocorrência de falhas.

Ao longo do tempo, muitos foram os critérios de falha propostos, sendo cada um deles mais ou menos indicado para se analisar o comportamento de determinados materiais. Entre os mais conhecidos estão a Teoria da Tensão de Cisalhamento Máxima (Critério de Tesca-Guest) e a Teoria da Energia de Distorção (Critério de Mises), mais adequadas para materiais dúcteis, e a Teoria da Tensão Normal Máxima (Critério de Rankine), mais adequada para materiais frágeis (COLLINS, 1993).

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.

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

Segundo Miotto (2009), o Critério de Hill é capaz de representar o comportamento ortotrópico da madeira, considerando diferentes tensões de plastificação nas direções principais do material. 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. Estes afirmam 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.

Dassault Systèmes (2014), no *Analysis User's Guide* do software Abaqus, apresenta o equacionamento do Critério de Hill conforme a Equação [4.10]:

$$f(\sigma) = \sqrt{F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2} \quad [4.10]$$

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 segue:

$$F = \frac{(\sigma^0)^2}{2} \left(\frac{1}{\bar{\sigma}_{22}^2} + \frac{1}{\bar{\sigma}_{33}^2} - \frac{1}{\bar{\sigma}_{11}^2} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{22}^2} + \frac{1}{R_{33}^2} - \frac{1}{R_{11}^2} \right) \quad [4.11]$$

$$G = \frac{(\sigma^0)^2}{2} \left(\frac{1}{\bar{\sigma}_{33}^2} + \frac{1}{\bar{\sigma}_{11}^2} - \frac{1}{\bar{\sigma}_{22}^2} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{33}^2} + \frac{1}{R_{11}^2} - \frac{1}{R_{22}^2} \right) \quad [4.12]$$

$$H = \frac{(\sigma^0)^2}{2} \left(\frac{1}{\bar{\sigma}_{11}^2} + \frac{1}{\bar{\sigma}_{22}^2} - \frac{1}{\bar{\sigma}_{33}^2} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{11}^2} + \frac{1}{R_{22}^2} - \frac{1}{R_{33}^2} \right) \quad [4.13]$$

$$L = \frac{3}{2} \left(\frac{\tau^0}{\bar{\sigma}_{23}} \right)^2 = \frac{3}{2R_{23}^2} \quad [4.14]$$

$$M = \frac{3}{2} \left(\frac{\tau^0}{\bar{\sigma}_{13}} \right)^2 = \frac{3}{2R_{13}^2} \quad [4.15]$$

$$N = \frac{3}{2} \left(\frac{\tau^0}{\bar{\sigma}_{13}} \right)^2 = \frac{3}{2R_{13}^2} \quad [4.16]$$

$$\tau^0 = \frac{\sigma^0}{\sqrt{3}} \quad [4.17]$$

Em que: 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, da maneira que se segue:

$$R_{11} = \frac{\bar{\sigma}_{11}}{\sigma^0} \quad [4.18]$$

$$R_{22} = \frac{\bar{\sigma}_{22}}{\sigma^0} \quad [4.19]$$

$$R_{33} = \frac{\bar{\sigma}_{33}}{\sigma^0} \quad [4.20]$$

$$R_{12} = \frac{\bar{\sigma}_{12}}{\tau^0} \quad [4.21]$$

$$R_{13} = \frac{\bar{\sigma}_{13}}{\tau^0} \quad [4.22]$$

$$R_{23} = \frac{\bar{\sigma}_{23}}{\tau^0} \quad [4.23]$$

Nesta seção foram expostas as principais características relacionadas ao comportamento mecânico da madeira. A partir da compreensão desse comportamento, algumas simplificações para a elaboração de uma modelagem numérica também foram apresentadas. De posse disso, foi possível se desenvolver uma modelagem e realizar sua calibração, que é assunto da seção subsequente do presente trabalho. Além disso, a compreensão das simplificações adotadas permitirá uma análise adequada dos resultados, bem como a definição das limitações do trabalho proposto.

5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Nesta seção são apresentadas as atividades realizadas no intuito de se atender os objetivos específicos do trabalho. Inicia-se relatando as pesquisas realizadas, tratando também de questões relacionadas à escolha do *software* utilizado. As calibrações realizadas são descritas, detalhando-se também as ferramentas utilizadas no ambiente do *software* e as propriedades atribuídas aos materiais. Por fim, é trazida uma explicação sobre como foram inseridas as propriedades das classes de resistência da madeira existentes no Projeto de Revisão da ABNT NBR 7190:2011.

5.1 PESQUISAS REALIZADAS

Ao longo dos anos de 2018 e de 2019, buscas em plataformas de pesquisa foram realizadas para se obter informações relacionadas aos diferentes temas presentes no trabalho proposto. Para isso, foram utilizadas as plataformas CAPES Periódicos, Google *Scholar* e CLT *Knowledge Database*. Artigos relacionados à Madeira Laminada Colada Cruzada, ao seu comportamento mecânico, aos critérios de falha adequados para se analisar a madeira e a trabalhos semelhantes envolvendo a simulação de painéis de CLT utilizando o Método dos Elementos Finitos foram o principal foco da pesquisa bibliográfica.

A Tabela 5.1 mostra o resultado de pesquisas realizadas nas plataformas CAPES Periódicos e Google *Scholar*, limitadas a trabalhos publicados a partir de 1990.

Tabela 5.1 – Resultados obtidos em algumas pesquisas realizadas em plataformas de busca de publicações científicas

Plataforma	Termos pesquisados				
	"Cross-laminated timber"	"Cross-laminated timber" Abaqus	"Cross-laminated timber" "mechanical properties"	"Cross-laminated timber" production	"Cross-laminated timber" "failure criteria"
CAPES Periódicos	1.220	65	358	382	22
Google Scholar	6.930	369	1.840	3.980	137

Fonte: O Autor

A Tabela 5.2, por sua vez, mostra o resultado de pesquisas realizadas na plataforma *CLT Knowledge Database*, também limitadas a trabalhos publicados a partir de 1990.

Tabela 5.2 – Resultados obtidos em algumas pesquisas realizadas na plataforma *CLT Knowledge Database*

Termos pesquisados		
Abaqus	Mechanical Properties	Production
24	77	74

Fonte: O Autor

Outras publicações foram consultadas, bem como referências bibliográficas relacionadas a estruturas de madeira, a painéis de CLT, ao Método dos Elementos Finitos, ao *software* Abaqus e aos critérios de falha. O conteúdo desse material foi incorporado ao trabalho de modo a permitir a compreensão dos assuntos correlatos ao trabalho realizado e a subsidiar o desenvolvimento da metodologia proposta.

5.2 ESCOLHA DO SOFTWARE, PROPRIEDADES DOS MATERIAIS E LIMITAÇÕES DAS ANÁLISES

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 versatilidade do *software* Abaqus, a licença para seu uso na universidade e o fato de haver outros trabalhos que utilizaram esse programa para a simulação de painéis de CLT, optou-se por utilizá-lo para as simulações realizadas neste trabalho. Atividades relacionadas ao aprendizado e aprimoramento do uso do *software* foram desenvolvidas logo após a definição pelo seu uso.

O *software* Abaqus permite que sejam inseridas propriedades mecânicas para um material sólido nas três direções principais. Desse modo, mostrou-se adequado à necessidade de representar o comportamento ortotrópico da madeira. Entretanto, o *software* não possibilita a diferenciação entre o comportamento do material quando submetido à tração ou à compressão no regime elástico, havendo aí uma limitação a ser observada.

As propriedades mecânicas requeridas para as simulações consistem nos Módulos de Elasticidade (E), Coeficientes de Poisson (ν) e Módulos de Elasticidade Transversais

(G). Ao todo, nove valores relacionados ao comportamento elástico do material tiveram de ser inseridos no *software*, uma vez que cada uma das propriedades mecânicas faz referência a uma das direções do material.

Como o Critério de Hill está disponível no *software* Abaqus e existe bibliografia que subsidia sua aplicação à madeira e aos produtos industriais de madeira, decidiu-se adotá-lo para as simulações do presente trabalho. As configurações do programa permitem que sejam adotadas tensões de escoamento diferentes para cada uma das direções. Novamente, existe a limitação relacionada ao fato de não se diferir as propriedades do material com relação a tensões de tração e de compressão.

O limite de elasticidade foi definido pelo *software* Abaqus através do Critério de Hill. As variáveis inseridas no *software* correspondem às Equações [4.17] a [4.23].

O *software* Abaqus permite ainda que se analise o comportamento de um material no regime plástico. Desse modo, pôde-se inserir o diagrama de tensão e deformação específica, a fim de representar o comportamento da madeira. Vale salientar, porém, que também para o regime plástico não se permite a adoção de comportamentos diferentes para a tração e a compressão.

Para o comportamento plástico dos materiais, foram inseridas informações sobre tensões e deformações específicas nesse regime.

5.3 CALIBRAÇÕES DAS MODELAGENS

No intuito de se verificar a viabilidade da realização das simulações dos painéis de CLT, optou-se por realizar, primeiramente, uma calibração com base em um artigo em que as ferramentas do *software* Abaqus foram utilizadas para esse tipo de simulação.

A primeira calibração foi realizada com base no trabalho de Furtmüller, Giger e Adam (2018), que também utilizaram o *software* Abaqus para o desenvolvimento de uma simulação de painéis de CLT. Os mesmos critérios adotados pelos autores foram utilizados para o desenvolvimento de uma modelagem de painel de CLT com forças aplicadas perpendicularmente a seu plano, provocando a flexão na direção principal. Em seguida, realizou-se a análise de algumas características relacionadas às condições de contato, à não-linearidade geométrica dos elementos e ao refinamento da malha, de modo a tentar reduzir o tempo de duração do processamento de cada simulação. Para se verificar a efetividade da calibração, os resultados dos diagramas de força e deslocamento obtidos

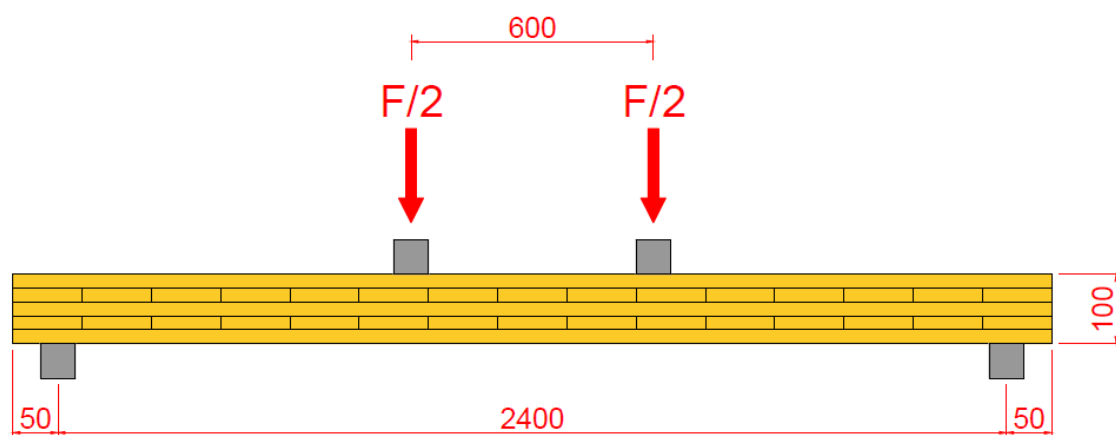
por meio da modelagem foram comparados aos resultados experimentais apresentados no artigo.

Na etapa seguinte, foi escolhido um trabalho de referência, que posteriormente foi utilizado como base para a realização das análises com a finalidade de se atingir os objetivos específicos desta pesquisa.

Desse modo, uma segunda calibração foi realizada, tendo como base o trabalho de O’Ceallaigh, Sikora e Harte (2018). A segunda modelagem foi desenvolvida no *software* Abaqus se utilizando as mesmas características de contato e uma discretização de malha semelhante à da modelagem referente à primeira calibração. As propriedades físicas da madeira foram atribuídas ao material, com base nas informações do trabalho supracitado e embasada também em outras referências bibliográficas. A geometria da modelagem e as condições de contorno tiveram de ser adaptadas à finalidade proposta. Novamente foi analisada a possibilidade de se avaliar não-linearidades geométricas e se obteve também um refinamento de malha que permitisse simulações com um custo computacional aceitável.

Os ensaios de flexão de O’Ceallaigh, Sikora e Harte (2018) utilizados na segunda calibração foram conduzidos com painéis B-5-20. Isso significa que se tratavam de painéis formados por cinco camadas, cada uma delas com espessura de 20 mm. O vão entre os apoios dos painéis era de 2.400 mm. A Figura 5.1 ilustra as características desses ensaios, com as forças aplicadas na direção perpendicular ao plano, provocando sua flexão na direção principal.

Figura 5.1 – Ensaios de flexão de O’Ceallaigh, Sikora e Harte (2018) utilizados para a calibração do modelo numérico



Dimensões em milímetros; F = Força total aplicada

Fonte: O Autor

Os experimentos de O’Ceallaigh, Sikora e Harte (2018) foram realizados utilizando-se painéis produzidos com madeira de *Sitka Spruce* (*Picea sitchensis*), classificada como C16, de acordo com a norma CEN EN 338:2009.

Novamente, os diagramas de força e deslocamento obtidos na modelagem foram comparados aos diagramas experimentais, presentes no artigo, para se verificar a efetividade da calibração.

A terceira calibração também foi realizada com base no trabalho de O’Ceallaigh, Sikora e Harte (2018). Para isso, uma nova modelagem foi desenvolvida, mantendo-se os procedimentos empregados na segunda calibração, tomando-se como referência outros corpos de prova, fabricados com uma geometria diferente. A modelagem foi baseada nos corpos de prova S-3-40, ou seja, constituídos por três camadas, cada uma delas com 40 mm de espessura, também submetidos à flexão em um ensaio de quatro pontos, como o apresentado na Figura 5.1, mas com diferenças relacionadas à geometria. O vão entre os apoios, nesse ensaio, foi de 1440 mm, enquanto que a distância entre os pontos de aplicação das forças foi de 720 mm. Os diagramas de força e deslocamento obtidos a partir da modelagem foram, novamente, comparados aos diagramas obtidos experimentalmente pelos autores e apresentados no artigo de referência.

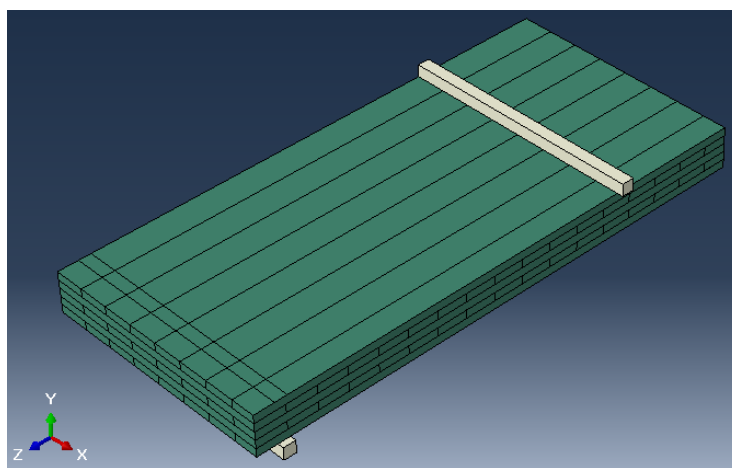
Desse modo, com a modelagem devidamente calibrada para diferentes geometrias, foi possível avançar para as demais modelagens propostas. Para se analisar as alterações no comportamento mecânico dos painéis, tomou-se como base o modelo experimental baseado nos ensaios de O’Ceallaigh, Sikora e Harte (2018). A partir dessa modelagem, já calibrada, foram realizadas alterações na geometria dos painéis e em suas propriedades mecânicas. As análises foram então realizadas com base nos resultados das modelagens desenvolvidas.

5.4 DETALHAMENTO DO USO DO SOFTWARE ABAQUS

Esta subseção consiste em uma explicação a respeito das ferramentas do *software* Abaqus e das informações utilizadas para o desenvolvimento de uma das modelagens produzidas para simular os ensaios realizados por O’Ceallaigh, Sikora e Harte (2018). Esse mesmo procedimento foi utilizado para as modelagens de painéis com diferentes propriedades geométricas.

Para reduzir o custo computacional, optou-se por dividir o problema experimental pela metade. Por meio do uso de condições de contorno, foi possível se valer da simetria do problema para a construção da modelagem. Desse modo, foi necessário elaborar uma modelagem com apenas um dos apoios e uma das barras utilizadas para a aplicação das forças, de modo que apenas metade do comprimento do painel precisou ser inserido na simulação. A Figura 5.2 ilustra essa geometria.

Figura 5.2 – Configurações geométricas das simulações utilizando a simetria existente no problema experimental



Fonte: O Autor

Após a construção da modelagem, foram atribuídas as propriedades dos materiais. As barras utilizadas para o suporte e a aplicação dos esforços foram consideradas como sendo de aço, para o qual foi atribuído um comportamento elástico-linear, por meio da opção “Elastic”, com $E = 200.000 \text{ MPa}$ e $\nu = 0,3$. A Figura 5.3 ilustra as propriedades atribuídas ao aço.

Figura 5.3 – Propriedades atribuídas ao aço nas simulações

Edit Material

Name: Steel

Description:

Material Behaviors

Elastic

General Mechanical Thermal Electrical/Magnetic Other

Elastic

Type: Isotropic

☐ Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

Moduli time scale (for viscoelasticity): Long-term

☐ No compression

☐ No tension

Data

	Young's Modulus	Poisson's Ratio
1	200000	0.3

OK Cancel

Fonte: O Autor

Em seu trabalho experimental, O’Ceallaigh, Sikora e Harte (2018) utilizaram madeira da espécie *Sitka Spruce* (*Picea sitchensis*), classificada mecanicamente como da classe C16, conforme a norma CEN EN 338:2009. As propriedades mecânicas da madeira utilizada foram obtidas com base em três fontes: a norma CEN EN 338:2009, Glass e Zelinka (2010) e Fellmoser e Blass (2004). Considerou-se que o material apresentava um comportamento ortotrópico, com propriedades elásticas diferentes em cada uma das direções. No *software* essas propriedades foram atribuídas individualmente, utilizando-se opção “Elastic” com o tipo de comportamento “Engineering Constants”. Os valores atribuídos às propriedades elásticas da madeira são relacionados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Propriedades elásticas da madeira

Propriedade	Valor	Fonte
Módulo de Elasticidade na Dir. 1 (E_1)	8.000 MPa	CEN EN 338:2009
Módulo de Elasticidade na Dir. 2 (E_2)	270 MPa	CEN EN 338:2009
Módulo de Elasticidade na Dir. 3 (E_3)	270 MPa	CEN EN 338:2009
Coeficiente de Poisson na Dir. 1,2 (ν_{12})	0,372	Glass e Zelinka (2010)
Coeficiente de Poisson na Dir. 1,3 (ν_{13})	0,467	Glass e Zelinka (2010)
Coeficiente de Poisson na Dir. 2,3 (ν_{23})	0,435	Glass e Zelinka (2010)
Módulo de Elasticidade Transversal na Dir. 1,2 (G_{12})	500 MPa	CEN EN 338:2009
Módulo de Elasticidade Transversal na Dir. 1,3 (G_{13})	500 MPa	CEN EN 338:2009
Módulo de Elasticidade Transversal na Dir.2,3 (G_{23})	50 MPa	Fellmoser e Blass (2004)

Fonte: O Autor

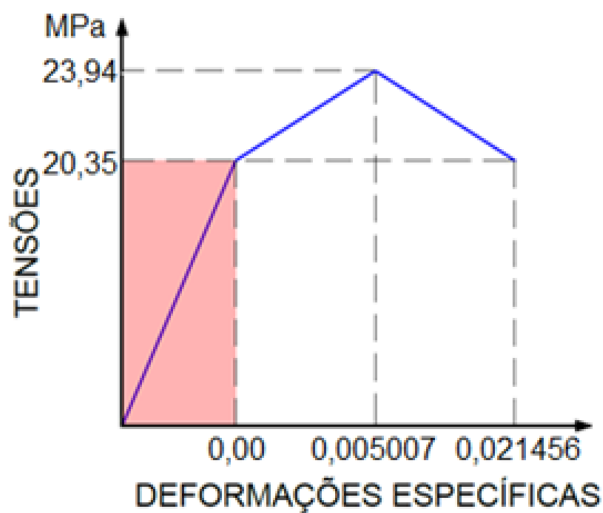
As deformações plásticas foram introduzidas na forma de um diagrama em três segmentos, como anteriormente explicado, utilizando-se a opção “*Plastic*”. Adotou-se como tensão de escoamento de referência o valor de 20,35 MPa. Esse valor corresponde à resistência à compressão na direção paralela às fibras, apresentada na norma CEN EN 338:2009, para madeiras da classe C16, após dois ajustes. O primeiro deles consistia em corrigir o valor original, de 17 MPa, correspondente à resistência característica, para uma resistência média de 23,94 MPa, com base nas relações apresentadas na Tabela 4.1. O segundo, em corrigir esse valor com base no diagrama apresentado na Figura 4.7 e na Equação [4.2]. Considerou-se que o valor de início do escoamento aproximadamente igual ao de f_u , de modo que o valor de f_{com} foi multiplicado por 0,85, resultando em 20,35 MPa, adotado como tensão de escoamento de referência (σ°). A esse valor de σ° foi atribuído o início das deformações plásticas.

Para o segundo valor de tensões no diagrama, correspondente à tensão máxima de compressão, foi adotado o valor já obtido para a resistência média à compressão na direção paralela às fibras. Com base no diagrama da Figura 4.7 e em Johansson (2016), atribuiu-se a essa tensão uma deformação específica de 0,8%, ou seja, de 0,008. Nessa etapa da entrada de dados, o *software* Abaqus exige que seja inserida apenas a parcela plástica das deformações específicas. Desse modo, o valor inserido foi 0,005007.

O terceiro valor de tensões, correspondente à tensão de ruptura da madeira na compressão paralela às fibras (f_u), já calculado, foi adotado como 20,35 MPa. A essa tensão foi atribuída uma deformação específica três vezes maior do que a obtida para a tensão máxima de compressão, conforme a Equação [4.3], chegando-se a um valor de 0,024. Novamente, inseriu-se apenas a parcela correspondente a deformações plásticas, de modo que o valor inserido foi 0,021456.

A Figura 5.4 ilustra o diagrama de três segmentos adotado para representar o comportamento da madeira na compressão paralela às fibras. A hachura em vermelho representa o regime elástico, cujas propriedades já haviam sido atribuídas anteriormente.

Figura 5.4 – Diagrama de tensão e deformação específica em três segmentos para a madeira *Sitka spruce* (*Picea sitchensis*), Classe C16



Fonte: O Autor

O Critério de Hill foi introduzido ao modelo por meio da função “*Potential*”. Com essa função também foram atribuídas diferentes tensões de escoamento para cada uma das direções, tendo como base a tensão σ° . As variáveis inseridas no *software*, conforme as Equações [4.17] a [4.23], bem como as tensões de escoamento correspondentes, são apresentadas na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Propriedades plásticas da madeira

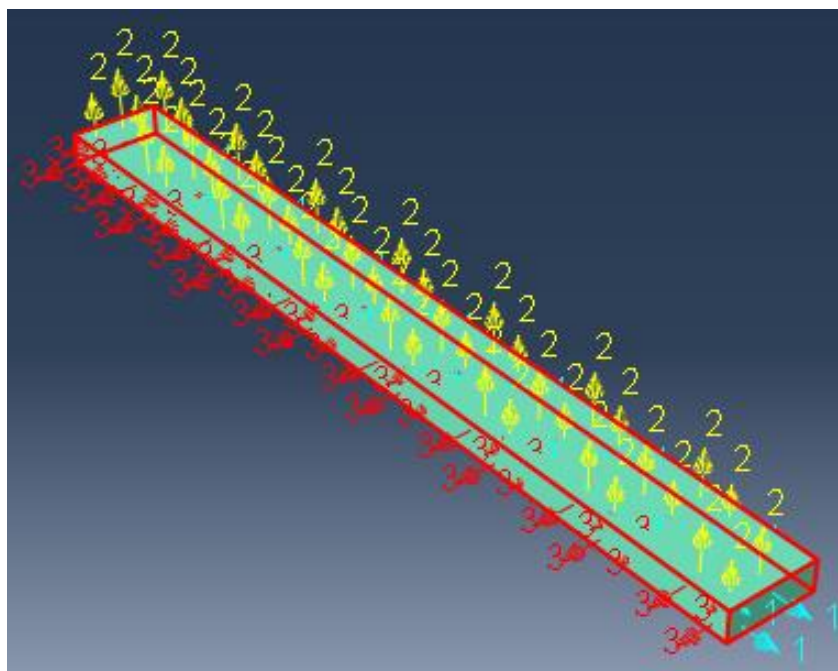
Propriedade	Valor	Variável	Valor Atribuído	Fonte
Tensão de normal de escoamento na direção paralela às fibras ($f_{c,0,a}$)	20,35 MPa	R_{11}	1,0	CEN EN 338:2009
Tensão normal de escoamento na direção normal às fibras ($f_{c,90,a}$)	3,46 MPa	R_{22}	0,17015	CEN EN 338:2009
Tensão normal de escoamento na direção normal às fibras ($f_{c,90,a}$)	3,46 MPa	R_{33}	0,17015	CEN EN 338:2009
Tensão de cisalhamento de escoamento na direção paralela às fibras ($f_{v,a}$)	3,53 MPa	R_{12}	0,3006	CEN EN 338:2009
Tensão de cisalhamento de escoamento na direção paralela às fibras ($f_{v,a}$)	3,53 MPa	R_{13}	0,3006	CEN EN 338:2009
Tensão de <i>Rolling Shear</i> de escoamento ($f_{r,a}$)	0,883 MPa	R_{23}	0,0752	Brandner et al. (2016)

Fonte: O Autor

Vale salientar que, mesmo se considerando que o escoamento ocorre apenas na compressão paralela às fibras, houve a necessidade de se atribuir tensões de escoamento aos outros esforços, como exigência do Critério de Hill.

Para se garantir a adequada representação do comportamento ortotrópico da madeira, houve a necessidade de se definir uma orientação para os materiais atribuídos a cada uma das partes da modelagem. Na aba “*Properties*”, selecionou-se “*Assign Material Orientation*”. Selecionando-se a parte do modelo desejada, pôde-se então atribuir a orientação do material. A Figura 5.5 ilustra a orientação do material em uma das lamelas modeladas, evidenciando as direções 1, 2 e 3.

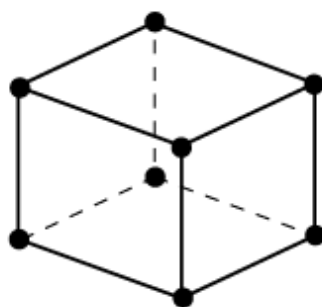
Figura 5.5 – Atribuição de orientação ao material no Abaqus



Fonte: O Autor

As malhas foram produzidas utilizando-se elementos sólidos hexagonais, denominados C3D8, que são caracterizados por serem hexaédricos e com oito nós. Em cada um dos nós, os elementos contam com três graus de liberdade: translações nas direções X, Y e Z. Adotou-se uma integração linear. A Figura 5.6 ilustra o elemento C3D8.

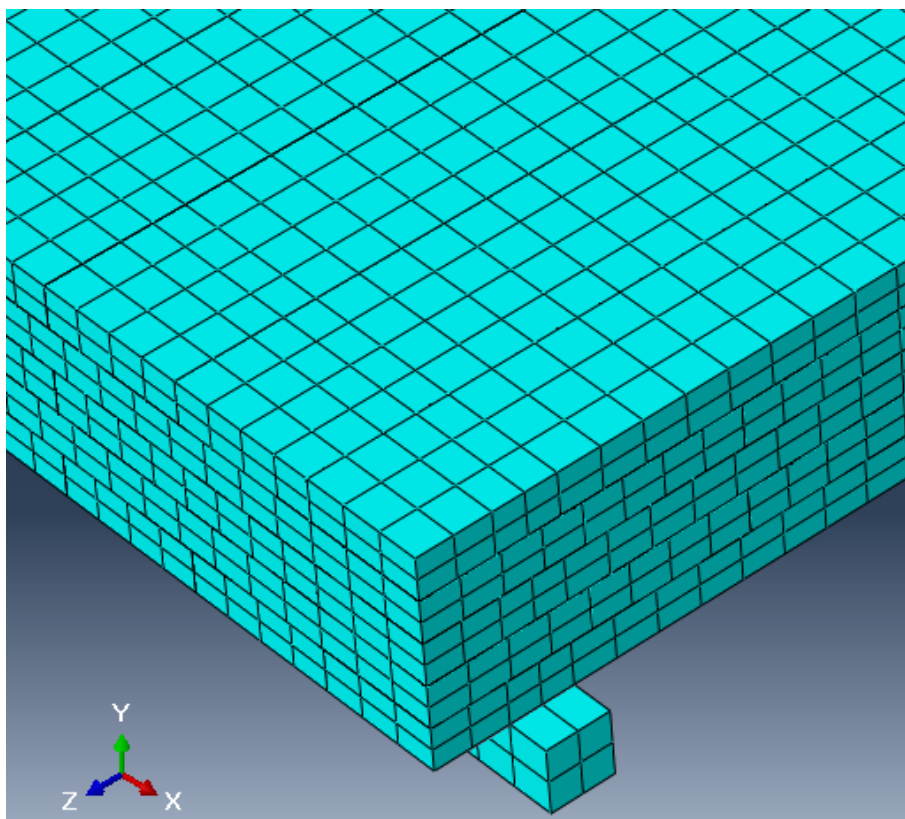
Figura 5.6 – Elemento C3D8



Fonte: Dassault Systèmes, 2014

A Figura 5.7 ilustra a malha gerada para uma das modelagens.

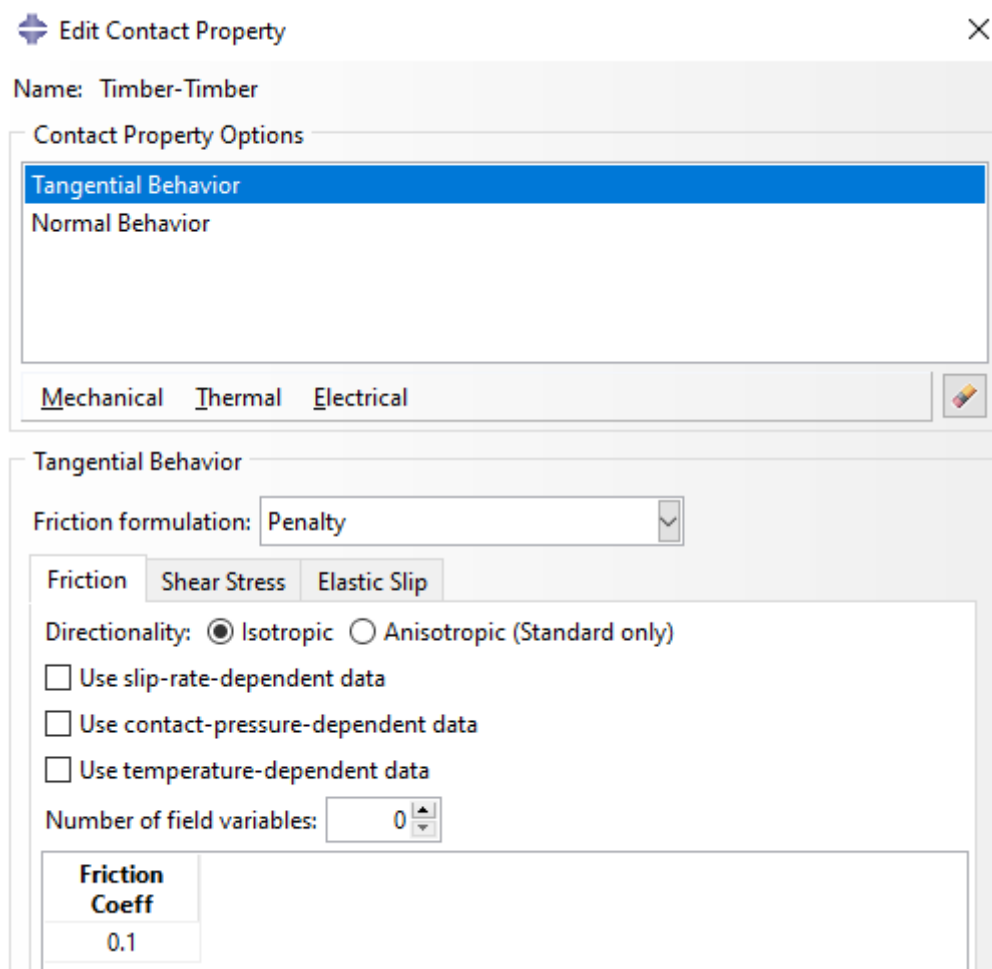
Figura 5.7 – Malha adotada em uma das modelagens



Fonte: O Autor

Algumas simplificações relacionadas ao contato entre os elementos foram realizadas em todas as simulações. Como nos painéis simulados não havia colagem lateral das lamelas de uma mesma camada, nas simulações se considerou seu contato com um pequeno coeficiente de atrito (de 0.1), correspondente ao contato entre as lamelas de madeira e resquícios da colagem entre as camadas que eventualmente podem entrar em contato com a superfície entre as lamelas. Para isso, criou-se uma “*Interaction Property*” denominada “*Timber-Timber*”, do tipo “*Contact*”, adotando-se um “*Tangential Behavior*” do tipo “*Penalty*”, com “*Friction Coefficient*” igual a 0,1. A Figura 5.8 ilustra a propriedade criada e o comportamento a ela atribuído.

Figura 5.8 – Propriedade de interação atribuída ao contato entre lamelas de uma mesma camada de madeira

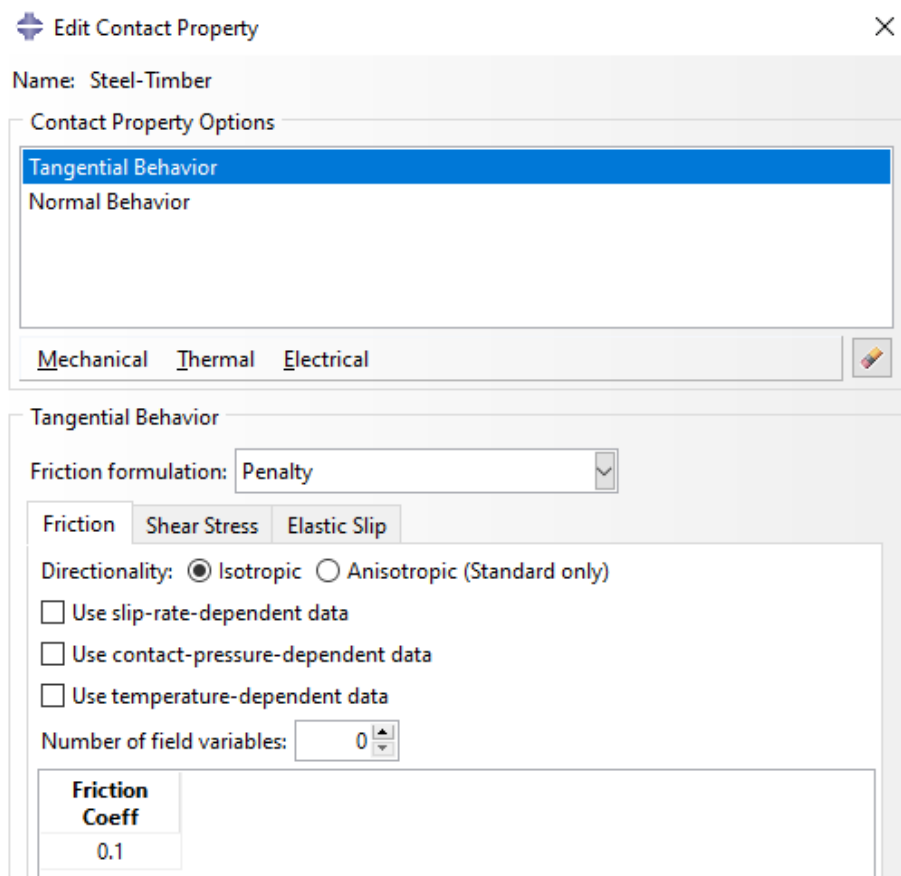


Fonte: O Autor

Além disso, a mesma propriedade “*Timber-Timber*” permitiu ainda a separação entre os elementos depois do contato, adotando-se um “*Normal Behavior*” de “*Hard Contact*” com a opção “*Allow separation after contact*”.

O contato entre as peças metálicas utilizadas como suporte e na aplicação de força e as peças de madeira foi representado pela “*Interaction Property*” “*Steel-Timber*”. Nesse caso, adotou-se também um “*Tangential Behavior*” com um pequeno atrito entre as partes, representado por um “*Friction Coefficient*” equivalente a 0,1. A opção pela adoção dessa propriedade vai ao encontro das recomendações de Furtmüller, Giger e Adam (2018). A Figura 5.9 ilustra essa propriedade de interação com o comportamento a ela atribuído.

Figura 5.9 – Propriedade de interação atribuída ao contato entre as peças de aço e as de madeira

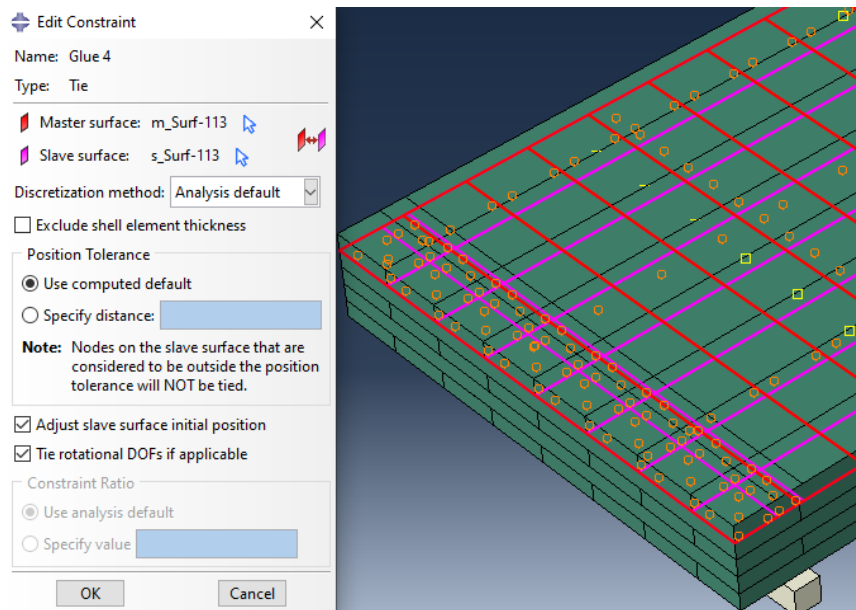


Fonte: O Autor

Na ligação “*Steel-Timber*”, adotou-se o mesmo “*Normal Behavior*” da ligação “*Timber-Timber*”.

Para o contato entre as camadas adjacentes de madeira, adotou-se um terceiro tipo de interação. A simplificação, nesse caso, foi considerar as camadas perfeitamente coladas entre si. Para isso, foram criadas quatro propriedades do tipo “*Constraint*”, com a opção “*Tie*”. Cada uma delas correspondia ao contato entre duas camadas adjacentes de madeira. A Figura 5.10 ilustra as propriedades dessa interação e a região em que ela foi atribuída.

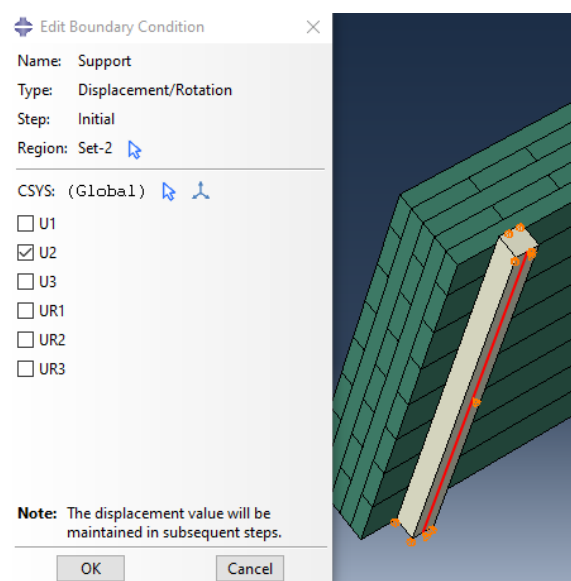
Figura 5.10 – “Constraint” do tipo “Tie” atribuída ao contato entre as duas camadas superiores do painel



Fonte: O Autor

Algumas condições de contorno foram adotadas para os modelos. Além da já mencionada condição de simetria, foram empregadas condições de contorno nas partes metálicas do modelo para evitar deslocamentos laterais nas barras de aço. A Figura 5.11 ilustra o apoio metálico com uma condição de contorno que impede seu deslocamento na direção vertical (direção 2).

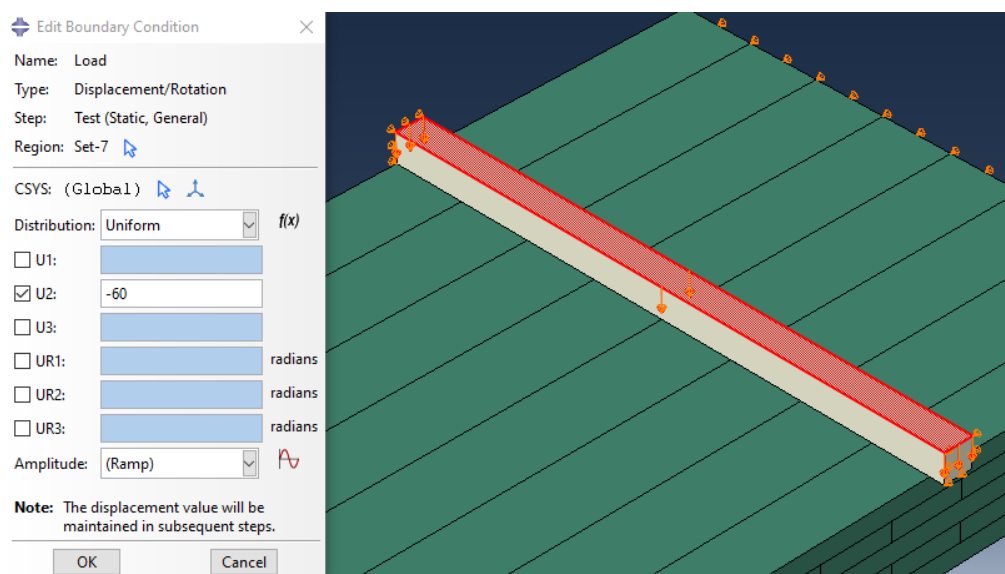
Figura 5.11 – Condição de contorno aplicada ao apoio metálico e as propriedades atribuídas para evitar o deslocamento vertical



Fonte: O Autor

A aplicação das forças também foi simulada por meio de condições de contorno. Para isso, criou-se um “Step” denominado “Test”. Nesse “Step”, inseriu-se uma condição de contorno adicional, denominada “Load”. Essa condição de contorno foi atribuída ao topo da parte correspondente à peça metálica usada para a aplicação das forças, correspondendo a um deslocamento de -60 mm na direção vertical. Esse valor foi adotado por se julgar, analisando-se os resultados experimentais apresentados no trabalho de referência, que um deslocamento dessa magnitude seria capaz de representar o comportamento mecânico do painel de CLT, incluindo as deformações plásticas, o suficiente para comparar a sua curva de força-deslocamento com as dos painéis ensaiados pelos autores. A Figura 5.12 ilustra a condição de contorno “Load”, a superfície a que foi atribuída e suas propriedades.

Figura 5.12 – Condição de contorno “Load” utilizada para se produzir um deslocamento vertical na modelagem, simulando a aplicação de forças dos ensaios



Fonte: O Autor

A opção pelo uso de uma condição de contorno e de um deslocamento, em vez da utilização de uma força aplicada ou de uma pressão, teve como justificativa a tentativa de se captar o comportamento pós-pico na modelagem.

5.4.1 Propriedades da Madeira Segundo as Classes de Resistência do Projeto de Revisão da ABNT NBR 7190:2011

Algumas das simulações desenvolvidas tiveram como objetivo utilizar as propriedades correspondentes às diferentes classes de resistência da madeira, segundo o Projeto de Revisão da ABNT NBR 7190:2011, para a análise do comportamento mecânico dos painéis de CLT. Para isso, nesta subseção, são apresentadas as informações inseridas na simulação de um painel de CLT produzido com madeira da classe C20, como exemplo do procedimento desenvolvido para se obter as propriedades mecânicas necessárias para as demais classes de resistência.

As propriedades elásticas desse material foram obtidas com base em três fontes: o Projeto de Revisão da ABNT NBR 7190:2011, Glass e Zelinka (2010) e Augustin (2008).

As propriedades da madeira C20 foram extraídas da Tabela 4.2. Portanto, seu Módulo de Elasticidade à Compressão (de 3.500 MPa) foi corrigido, por meio da Equação [4.5], para o valor de 2.975 MPa. O Módulo de Elasticidade na direção normal às fibras, por sua vez, foi estimado em 5% desse valor, como determinado no Projeto de Revisão da norma. O Módulo de Elasticidade Transversal foi obtido por meio da Equação [4.4].

Quanto aos coeficientes de Poisson, para a madeira C20, utilizou-se a média dos valores de coeficientes de Poisson das diferentes espécies coníferas apresentados por Glass e Zelinka (2010). Para o caso das madeiras de folhosas, foi utilizada a média dos valores para folhosas apresentados de acordo com esses mesmos autores.

No que diz respeito ao Módulo de *Rolling Shear*, duas referências distintas foram adotadas. Inicialmente foi utilizado um valor correspondente a 10% do Módulo de Elasticidade Transversal, conforme Fellsmoser e Blass (2004). Para algumas espécies essa estimativa resultava em um valor demasiadamente pequeno. Nesses casos, um valor mínimo de 50 MPa, conforme apresentado por Augustin (2008), foi utilizado. As propriedades elásticas da madeira da classe C20 são apresentadas na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Propriedades elásticas da madeira da classe C20

Propriedade	Valor	Fonte
Módulo de Elasticidade na Dir. 1 (E_1)	2.975 MPa	ABNT (2011)
Módulo de Elasticidade na Dir. 2 (E_2)	148,75 MPa	ABNT (2011)
Módulo de Elasticidade na Dir. 3 (E_3)	148,75 MPa	ABNT (2011)
Coeficiente de Poisson na Dir. 1,2 (ν_{12})	0,3525	Glass e Zelinka (2010)
Coeficiente de Poisson na Dir. 1,3 (ν_{13})	0,3652	Glass e Zelinka (2010)
Coeficiente de Poisson na Dir. 2,3 (ν_{23})	0,4259	Glass e Zelinka (2010)
Módulo de Elasticidade Transversal na Dir. 1,2 (G_{12})	198,33 MPa	ABNT (2011)
Módulo de Elasticidade Transversal na Dir. 1,3 (G_{13})	198,33 MPa	ABNT (2011)
Módulo de Elasticidade Transversal na Dir.2,3 (G_{23})	50 MPa	Augustin (2008)

Fonte: O Autor

As deformações plásticas novamente foram introduzidas na forma de um diagrama em três segmentos. Adotou-se como tensão de escoamento de referência o valor de 23,94 MPa, que corresponde ao escoamento na direção paralela às fibras. Esse valor foi obtido a partir da resistência à compressão na direção paralela às fibras, apresentada Projeto de Revisão da ABNT NBR 7190:2011, para madeiras da classe C20, passando por dois ajustes. O primeiro deles consistiu em corrigir o valor original, de 20 MPa, correspondente à resistência característica, conforme a Tabela 4.2, para uma resistência média de 28,17 MPa, com base nas relações apresentadas na Tabela 4.1. O segundo, em corrigir esse valor com base no diagrama apresentado na Figura 4.7 e na Equação [4.2]. Considerou-se o valor de início do escoamento aproximadamente igual ao de f_u , de modo que o valor de f_{com} foi multiplicado por 0,85, resultando em 23,94 MPa, adotado como tensão de escoamento de referência (σ°). A esse valor de σ° foi atribuído o início das deformações plásticas.

Para o segundo valor de tensões no diagrama, correspondente à tensão máxima de compressão, foi adotado o valor já obtido para a resistência média à compressão na direção paralela às fibras. Com base no diagrama da Figura 4.7 e em Johansson (2016), atribuiu-se a essa tensão uma deformação específica de 0,8%, ou seja, de 0,008, com uma parcela plástica de 0,0001.

O terceiro valor de tensões, correspondente à tensão de ruptura da madeira na compressão paralela às fibras (f_u), já calculado, foi adotado como 23,94 MPa. A essa tensão foi atribuída uma deformação específica três vezes maior do que a obtida para a tensão máxima de compressão, conforme a Equação [4.3], chegando-se a um valor de 0,024, com uma parcela plástica de 0,01596.

A resistência característica à compressão na direção normal às fibras foi obtida por meio da Equação [4.9], passando pelo mesmo processo de conversão para valores médios com base na Tabela 4.1 e ajuste por meio da Equação [4.2].

A resistência característica ao cisalhamento foi extraída da Tabela 4.2, passando pelos mesmos ajustes. A resistência característica ao *rolling shear*, por sua vez, foi adotada como 0,80 MPa, conforme Brandner *et al.* (2016), passando pelos mesmos ajustes para se chegar ao valor inserido nas propriedades do material no *software*.

Com o Critério de Hill também foram atribuídas diferentes tensões de escoamento para cada uma das direções, tendo como base a tensão σ° . As variáveis inseridas no *software*, conforme as Equações [4.17] a [4.23], bem como as tensões de escoamento correspondentes, são apresentadas na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Propriedades plásticas da madeira da classe C20

Propriedade Original	Valor Original	Variável	Valor Atribuído	Fonte
Tensão de normal de escoamento na direção paralela às fibras ($f_{c,0,a}$)	23,94 MPa	R_{11}	1,0	ABNT (2011)
Tensão normal de escoamento na direção normal às fibras ($f_{c,90,a}$)	7,87 MPa	R_{22}	0,3287	ABNT (2011)
Tensão normal de escoamento na direção normal às fibras ($f_{c,90,a}$)	7,87 MPa	R_{33}	0,3287	ABNT (2011)
Tensão de cisalhamento de escoamento na direção paralela às fibras ($f_{v,a}$)	4,42 MPa	R_{12}	0,3194	ABNT (2011)
Tensão de cisalhamento de escoamento na direção paralela às fibras ($f_{v,a}$)	4,42 MPa	R_{13}	0,3194	ABNT (2011)
Tensão de <i>Rolling Shear</i> de escoamento ($f_{r,a}$)	0,883 MPa	R_{23}	0,0639	Brandner et al. (2016)

Fonte: O Autor

Novamente, deve-se salientar que, mesmo se considerando que o escoamento ocorre apenas na compressão paralela às fibras, houve a necessidade de se atribuir tensões de escoamento aos outros esforços, como exigência do Critério de Hill.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentadas as três calibrações realizadas para se definir as características adotadas para simular o comportamento mecânico de painéis de CLT submetidos à flexão provocada por forças aplicadas perpendicularmente ao plano. Os resultados foram comparados aos obtidos nos trabalhos experimentais tomados como base.

Também são apresentadas e discutidas as modelagens desenvolvidas, a partir das calibrações, para se investigar a influência da geometria dos painéis de CLT em seu comportamento mecânico. Nessas modelagens foram analisados ensaios de flexão em painéis com números de camadas diferentes, espessuras variadas, camadas com espessuras diferentes entre si e vãos diferentes.

Por fim, também são apresentadas e discutidas as modelagens desenvolvidas a fim de se investigar o comportamento dos painéis de CLT produzidos com as classes de resistência presentes no Projeto de Revisão da ABNT NBR 7190:2011.

O Quadro 6.1 apresenta um resumo das características de cada um dos painéis simulados.

Quadro 6.1 – Resumo das características das simulações desenvolvidas

Grupo	Painel	Madeira	Espessura e Lamelas (mm)	Vão (mm)
Geral	B-5-20	C16 (EN 338:2009)	100 (5*20)	2.100
Grupo 1	B-3-33	C16 (EN 338:2009)	99 (3*33)	2.100
	B-11-9	C16 (EN 338:2009)	99 (11*9)	2.100
Grupo 2	B-30-5-30-5-30	C16 (EN 338:2009)	100 (3*30+2*5)	2.100
	B-24-14-24-14-24	C16 (EN 338:2009)	100 (3*24+2*14)	2.100
	B-16-26-16-26-16	C16 (EN 338:2009)	100 (3*16+2*26)	2.100
	B-10-35-10-35-10	C16 (EN 338:2009)	100 (3*10+2*35)	2.100
Grupo 3	B-3-20	C16 (EN 338:2009)	60 (3*20)	1.260
	B-3-40	C16 (EN 338:2009)	120 (3*40)	2.520
Grupo 4	B-5-20 – 1.200	C16 (EN 338:2009)	100 (5*20)	1.200
	B-5-20 – 1.800	C16 (EN 338:2009)	100 (5*20)	1.800
	B-5-20 – 3.000	C16 (EN 338:2009)	100 (5*20)	3.000
	B-5-20 – 3.600	C16 (EN 338:2009)	100 (5*20)	3.600
Grupo 5	B-5-20 – C20	C20 (ABNT 2011)	100 (5*20)	2.100
	B-5-20 – C25	C25 (ABNT 2011)	100 (5*20)	2.100
	B-5-20 – C30	C30 (ABNT 2011)	100 (5*20)	2.100
	B-5-20 – D20	D20 (ABNT 2011)	100 (5*20)	2.100
	B-5-20 – D30	D30 (ABNT 2011)	100 (5*20)	2.100
	B-5-20 – D40	D40 (ABNT 2011)	100 (5*20)	2.100
	B-5-20 – D50	D50 (ABNT 2011)	100 (5*20)	2.100
	B-5-20 – D60	D60 (ABNT 2011)	100 (5*20)	2.100

Fonte: O Autor

As simulações foram realizadas utilizando-se o *software* Abaqus, versão 14.5. O computador utilizado possui 12 Gb de memória RAM e um processador Intel Core i7-6.500 CPU, com 22.59 GHz, 2 núcleos e 4 processadores lógicos. O sistema operacional do computador e o *software* Abaqus foram instalados em uma unidade de SSD, onde também foram salvos os modelos numéricos e arquivos relacionados às simulações.

A Rigidez Efetiva dos painéis foi calculada com base no método apresentado na norma CEN EN 408:2004. Esses resultados foram comparados aos obtidos pela Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas (*Gamma Method*), pela Teoria do Compósito (*k-Method*) e pela Analogia do Cisalhamento.

Uma vez que as modelagens não foram capazes de representar o comportamento dos painéis após a aplicação de uma força de valor máximo, ou seja, não foram capazes de simular o comportamento pós-pico dos painéis, uma adaptação foi necessária para se analisar o modo de falha e o escoamento dos painéis. As análises das forças aplicadas associadas aos fenômenos do escoamento e da ruptura do material se deu pela comparação entre as tensões atuantes nos painéis e os valores de referência de tensão de escoamento e tensão máxima da madeira.

É importante salientar que, tendo em vista essa metodologia, o tamanho e o número dos incrementos utilizados nas simulações influenciou nos resultados obtidos. Essas variáveis podem ter levado a uma superestimativa das forças associadas ao escoamento da madeira e à ruptura dos painéis, uma vez que estas foram obtidas com base no incremento em que se observou a ocorrência de tensões maiores que valores de referência. O uso de incrementos menores poderia permitir se visualizar esse fenômeno acontecendo com a aplicação de forças menores, correspondentes a valores intermediários entre os incrementos que foram utilizados. Entretanto, essa análise demandaria um maior custo computacional.

6.1 CALIBRAÇÕES

Na sequência apresentam-se o desenvolvimento e resultados das três calibrações realizadas para se ajustar e avaliar o método que orientaria a modelagem dos painéis de CLT.

6.1.1 Calibração 1

A primeira calibração foi realizada com o objetivo de se replicar o modelo numérico produzido por Furtmüller, Giger e Adam (2018). Diferentes simulações foram produzidas com a finalidade de se obter um modelo capaz de reproduzir os resultados dos ensaios de flexão com um custo computacional aceitável, o que foi avaliado tendo em vista o tempo de duração das simulações. Os resultados experimentais contidos no trabalho de Furtmüller, Giger e Adam (2018) já foram apresentados na Figura 2.23.

A calibração foi desenvolvida com base nos resultados experimentais desses autores para o painel com orientação 0°, ou seja, com as lamelas externas orientadas paralelamente à direção principal do painel. Diferentes simulações foram realizadas até se chegar em uma modelagem que apresentasse resultados compatíveis com os experimentais com um baixo custo computacional.

Em suas simulações, Furtmüller, Giger e Adam (2018) utilizaram uma malha com elementos hexagonais com arestas de 5 mm. O tempo de processamento da simulação com essa mesma malha, de 11.911 segundos, mostrou-se demasiadamente elevado, tendo em vista a quantidade de simulações a serem desenvolvidas no trabalho. Diante disso, realizou-se uma análise de convergência, comparando-se os resultados obtidos com simulações utilizando diferentes tamanhos de malhas e seu custo computacional. A Tabela 6.1 mostra as características das diferentes malhas adotadas na análise de convergência e seus respectivos tempos de processamento.

Tabela 6.1 – Análise de convergência da malha referente à Calibração 1

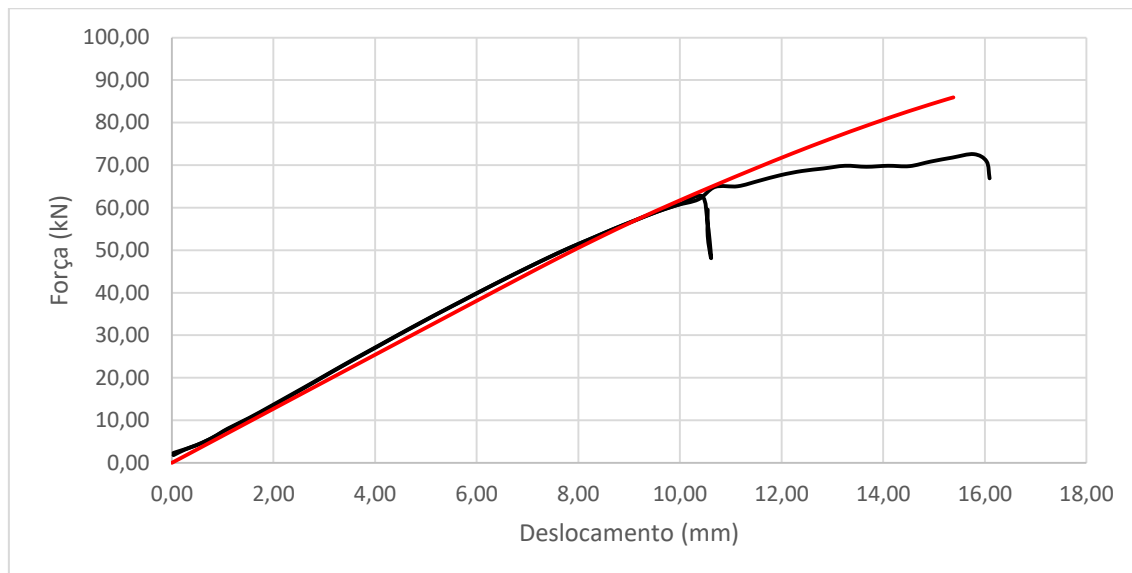
Simulação e Malha	Número de Elementos	Número de Nós	Tempo de Processamento (s)
Simulação 1 – Malha com Elementos de 5x5x5 mm	162.920	226.437	11.911
Simulação 2 – Malha com Elementos de 5x5x10 mm	43.138	64.186	1.377
Simulação 3 – Malha com Elementos de 10x10x10 mm	23.434	40.110	490

Fonte: O Autor

O resultado final foi uma simulação com tempo de duração de 490 segundos, utilizando 23.434 elementos do tipo C3D8, com 40.110 nós, com integração completa.

A Figura 6.1 ilustra o resultado dessa simulação (curva vermelha), juntamente com os resultados experimentais dos dois painéis analisados (curvas pretas).

Figura 6.1 – Gráfico de Força x Deslocamento correspondente à Calibração 1



Fonte: O Autor

Percebeu-se que as simulações conduziram a resultados compatíveis com os obtidos experimentalmente pelos autores na região elástica. A partir de um determinado ponto, houve uma diminuição das forças associadas ao deslocamento, que não pôde ser reproduzida na simulação desenvolvida. Isso pode ser explicado pelo fato de terem sido adotadas as propriedades mecânicas apresentadas no artigo de Furtmüller, Giger e Adam (2018). Os autores não ensaiaram as lamelas da madeira, obtendo as propriedades mecânicas a partir de métodos estatísticos.

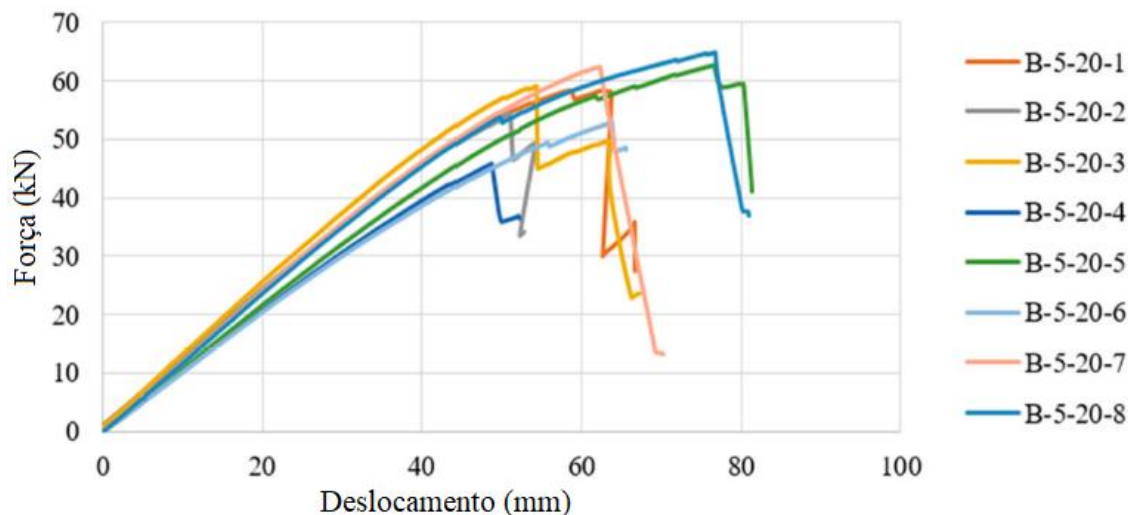
6.1.2 Calibração 2

A segunda calibração foi realizada com o objetivo de simular os ensaios experimentais apresentados no trabalho de O’Ceallaigh, Sikora e Harte (2018). O modelo numérico obtido serviu como base para a realização dos outros objetivos propostos neste trabalho.

A Figura 6.2 ilustra alguns dos resultados experimentais de O’Ceallaigh, Sikora e Harte (2018) para oito corpos de prova do tipo B-5-20, produzidos com cinco camadas

de 20 mm de espessura e submetidos a ensaios de flexão com forças aplicadas na direção perpendicular ao plano, com um vão de 2.400 mm.

Figura 6.2 – Resultados experimentais dos corpos de prova B-5-20



Fonte: adaptado de O'Ceallaigh, Sikora e Harte (2018)

Assim como na Calibração 1, realizou-se uma análise de convergência a fim de se obter um tempo de processamento viável para as demais simulações. As simulações desenvolvidas nessa etapa são apresentadas na Tabela 6.2.

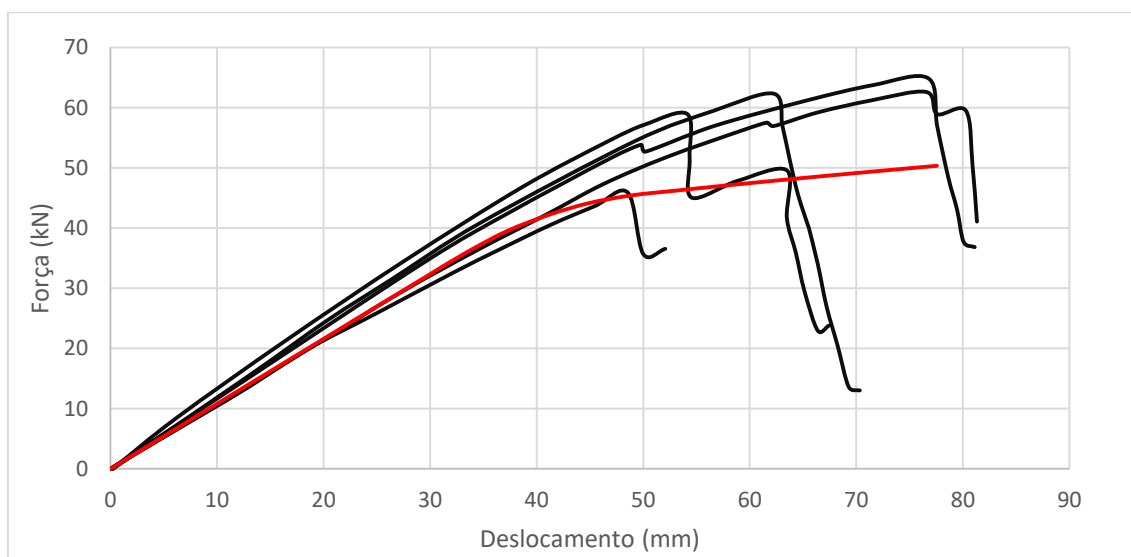
Tabela 6.2 – Análise de convergência da malha referente à Calibração 2

Simulação e Malha	Número de Elementos	Número de Nós	Tempo de Processamento (s)
Simulação 1 – Malha com Elementos de 10x10x10 mm	117.912	212.762	7.629
Simulação 2 – Malha com Elementos de 20x20x10 mm	38.934	76.508	1.274

Fonte: O Autor

O resultado final foi uma simulação com tempo de duração de 1.274 segundos, utilizando 38.934 elementos do tipo C3D8, com 76.508 nós, com integração completa.

A Figura 6.3 ilustra o resultado final da calibração (curva vermelha), juntamente com alguns resultados experimentais dos dois painéis analisados (curvas pretas).

Figura 6.3 – Gráfico de Força x Deslocamento correspondente à Calibração 2

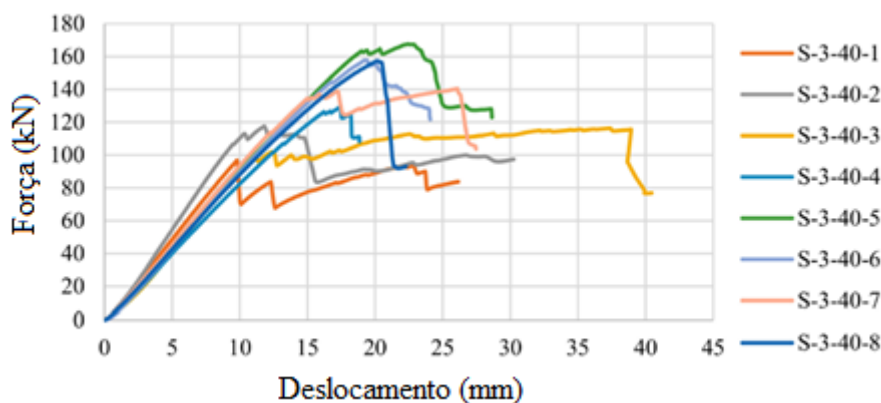
Fonte: O Autor

Constatou-se que, diante da grande dispersão dos resultados experimentais, a calibração foi capaz de representar a mesma tendência de comportamento dos painéis ensaiados. No regime elástico a simulação demonstrou uma capacidade maior de representar o comportamento experimental dos painéis.

6.1.3 Calibração 3

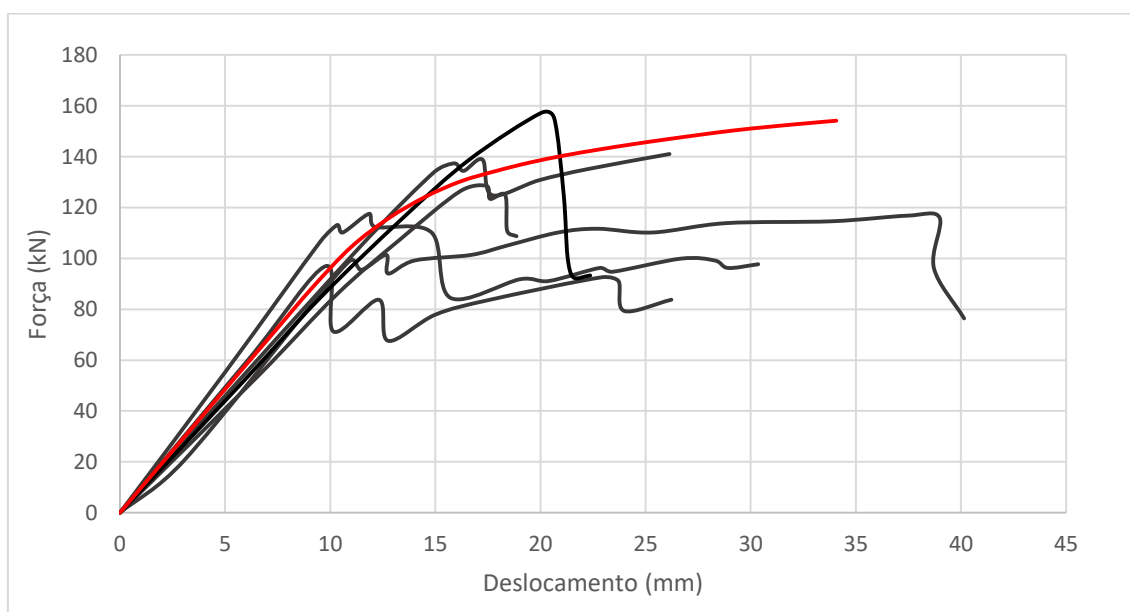
A terceira calibração também foi desenvolvida com base nos resultados experimentais apresentados no trabalho de O’Ceallaigh, Sikora e Harte (2018), mantendo-se o método desenvolvido na Calibração 2.

A Figura 6.4 ilustra alguns dos resultados experimentais de O’Ceallaigh, Sikora e Harte (2018) para oito corpos de prova do tipo S-3-40, produzidos com três camadas de 40 mm de espessura e submetidos a ensaios de flexão causada por forças aplicadas na direção perpendicular ao plano, com um vão de 1.440 mm.

Figura 6.4 – Resultados experimentais dos corpos de prova S-3-40

Fonte: adaptado de O’Ceallaigh, Sikora e Harte (2018)

O resultado final da calibração foi uma simulação com duração de 269 segundos, utilizando 11.768 elementos do tipo C3D8, com 21.601 nós, com integração completa. A Figura 6.5 ilustra o resultado final da calibração (curva vermelha), juntamente com alguns resultados experimentais dos painéis analisados (curvas pretas).

Figura 6.5 – Gráfico de Força x Deslocamento correspondente à Calibração 3

Fonte: O Autor

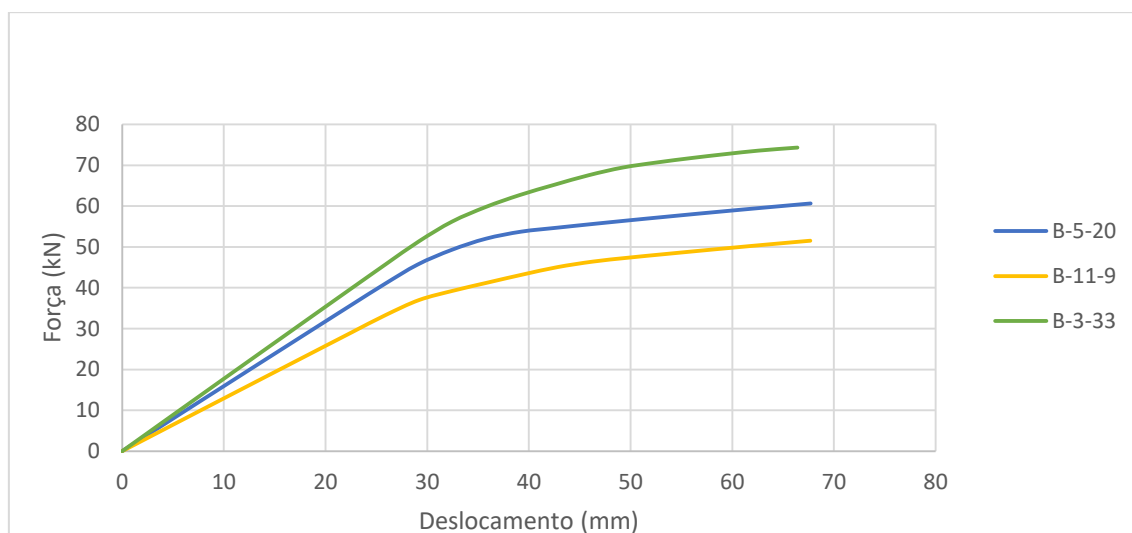
Novamente, a modelagem foi capaz de representar a tendência de comportamento dos painéis ensaiados, considerando-se a grande dispersão dos resultados experimentais. No regime elástico a simulação demonstrou uma capacidade maior de representar o comportamento experimental dos painéis.

6.2 GRUPO 1 – PAINÉIS DE MESMA ESPESSURA COM DIFERENTES NÚMEROS DE CAMADAS

Neste grupo de simulações são comparados os resultados para os painéis B-5-20, B-3-33 e B-11-9, que contam com espessuras totais praticamente iguais (de 100 mm ou 99 mm). O vão entre os apoios dos três painéis é de 2.100 mm. Para as propriedades mecânicas da madeira, foi adotada como referência a classe C16 da norma CEN EN 338:2009.

A Figura 6.6 ilustra os gráficos de Força x Deslocamento para os três painéis simulados.

Figura 6.6 – Gráfico de Força x Deslocamento para os painéis do Grupo 1



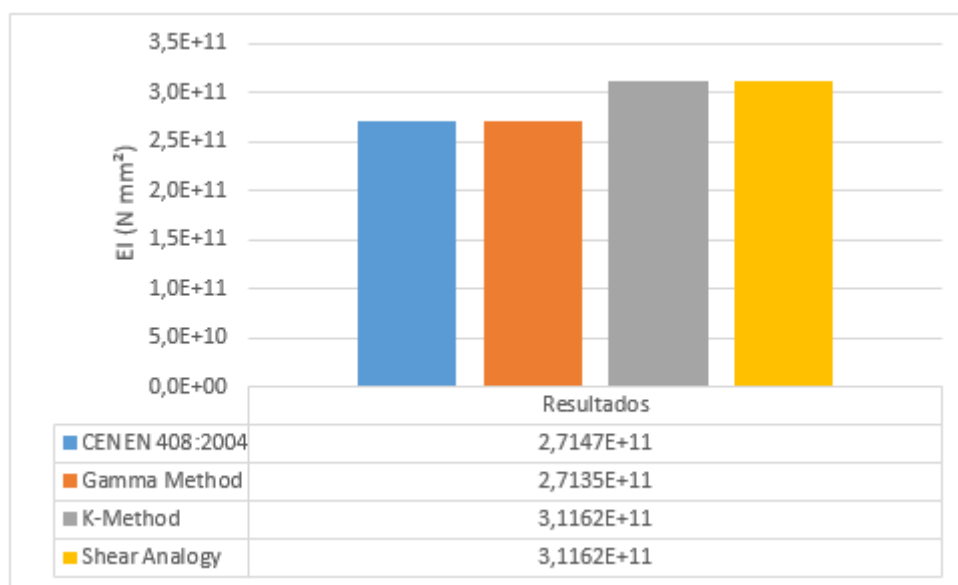
Fonte: O Autor

Vale salientar que o painel B-5-20 com vão de 2.100 mm tem suas imagens e todos seus resultados relacionados ao escoamento, à ruptura e ao *rolling shear* apresentados nesta subseção. Mesmo assim, seus resultados fazem parte das análises de outros grupos de simulações, por se tratar da modelagem obtida diretamente das calibrações, com pequenas mudanças para atender às exigências da norma CEN EN 408:2004.

6.2.1 Resultado do painel B-5-20 com vão de 2.100 mm

Os resultados de Rigidez Efetiva para o painel B-5-20 com vão de 2.100 mm, calculados pelo método da norma CEN EN 408:2004, pela Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas (*Gamma Method*), pela Teoria do Compósito (*k-Method*) e pela Analogia do Cisalhamento (*Shear Analogy*) são ilustrados na Figura 6.7.

Figura 6.7 – Resultados de Rigidez Efetiva para o painel B-5-20 com vão de 2.100 mm



Fonte: O Autor

As diferenças percentuais entre os valores de Rigidez Efetiva calculados para o painel B-5-20, quando comparado o resultado analítico obtido segundo a norma CEN EN 408:2004 aos obtidos por cada um dos outros métodos são:

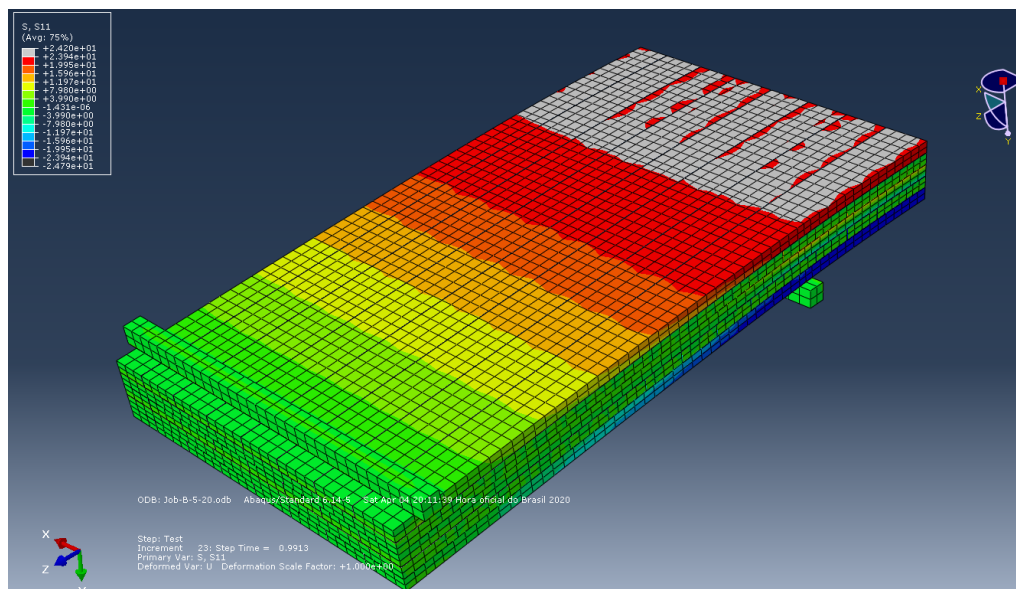
Teoria das Viga Mecanicamente Unidas (*Gamma Method*): -0,04%;

Teoria do Compósito (*k-Method*): 14,79%;

Analogia do Cisalhamento (*Shear Analogy*): 14,79%.

A resistência à tração na direção paralela às fibras foi alcançada no incremento 23, correspondente à aplicação de uma força de 60,5 kN, conforme ilustra a Figura 6.8.

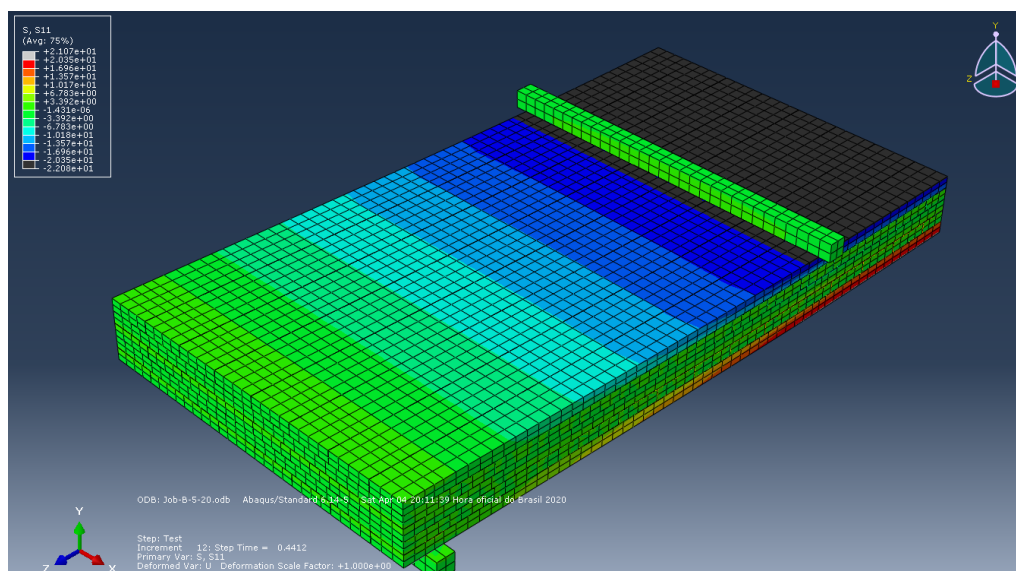
Figura 6.8 – Resistência à tração na direção paralela às fibras alcançada com uma força de 60,5 kN



Fonte: O Autor

A tensão de escoamento na direção paralela às fibras foi alcançada no incremento 12, correspondente à aplicação de uma força de 45,7 kN, conforme ilustra a Figura 6.9.

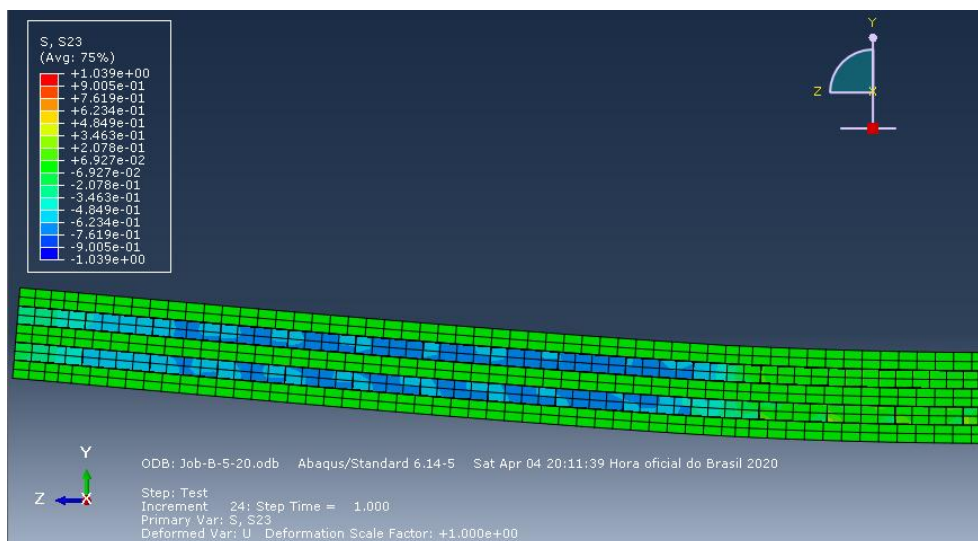
Figura 6.9 – Tensão de escoamento alcançada com uma força de 45,7 kN



Fonte: O Autor

A tensão de *rolling shear* máxima foi de 0,813 MPa. Portanto, a resistência ao *rolling shear* não chegou a ser alcançada, conforme ilustra a Figura 6.10.

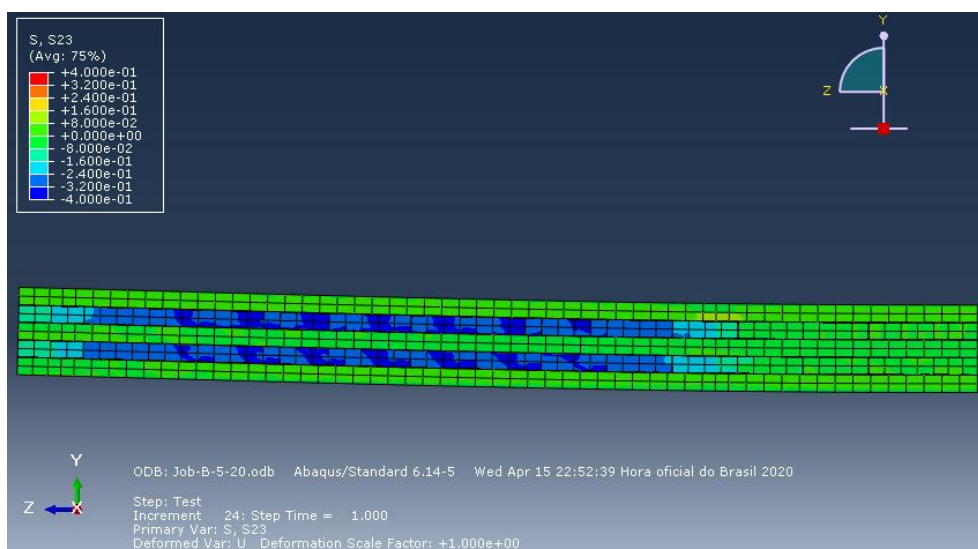
Figura 6.10 – A resistência ao *rolling shear* não chegou a ser alcançada



Fonte: O Autor

Com a aplicação de uma força de 30 kN, as maiores tensões de *rolling shear* obtidas foram de 0,392 MPa, abaixo da resistência ao *rolling shear* dos painéis, conforme é ilustrado pela Figura 6.11.

Figura 6.11 – Tensões de *rolling shear* atuantes com a aplicação de uma força de 30 kN

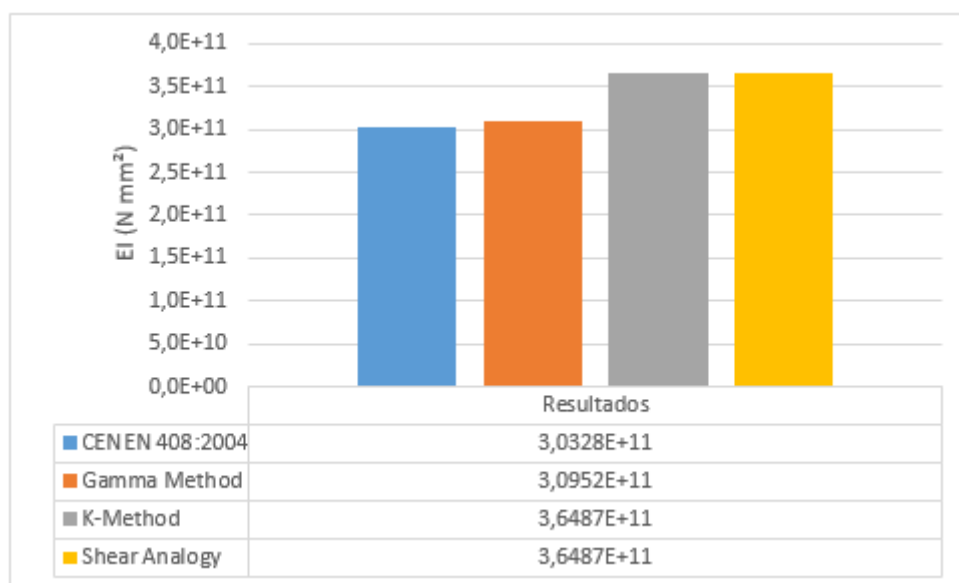


Fonte: O Autor

6.2.2 Resultado do painel B-3-33 com vão de 2.100 mm

Os resultados de Rigidez Efetiva para o painel B-3-33 com vão de 2.100 mm, calculados pelo método da norma CEN EN 408:2004, pela Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas (*Gamma Method*), pela Teoria do Compósito (*k-Method*) e pela Analogia do Cisalhamento (*Shear Analogy*) são ilustrados na Figura 6.12.

Figura 6.12 – Resultados de Rigidez Efetiva



Fonte: O Autor

As diferenças percentuais entre os valores de Rigidez Efetiva calculados para o painel B-3-33, quando comparado o resultado analítico obtido segundo a norma CEN EN 408:2004 aos obtidos por cada um dos outros métodos são:

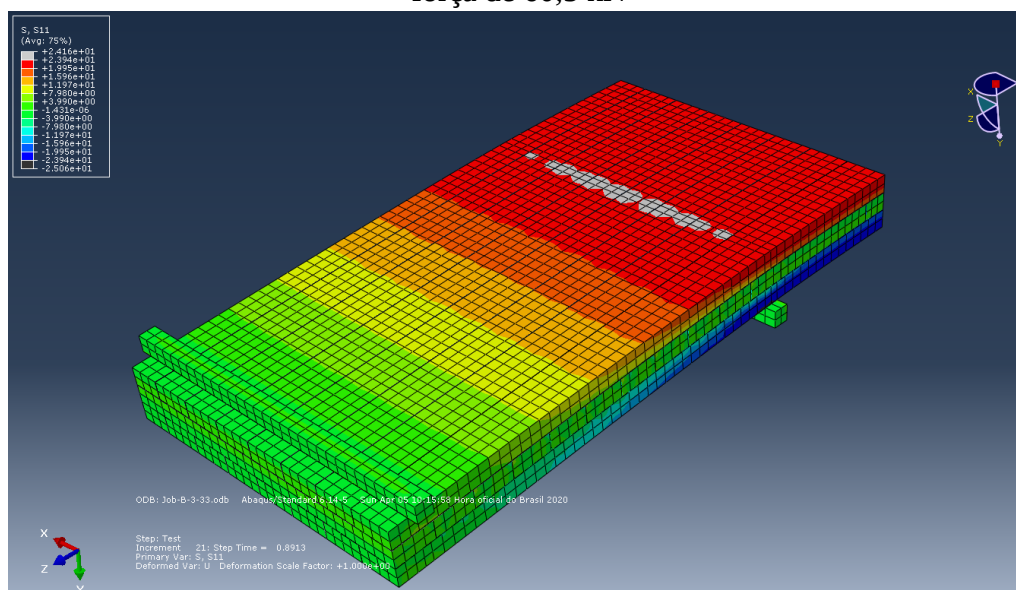
Teoria das Viga Mecanicamente Unidas (*Gamma Method*): 2,06%;

Teoria do Compósito (*k-Method*): 20,31%;

Analogia do Cisalhamento (*Shear Analogy*): 20,31%.

A resistência à tração na direção paralela às fibras foi alcançada no incremento 21, correspondente à aplicação de uma força de 72,7 kN, conforme ilustra a Figura 6.13.

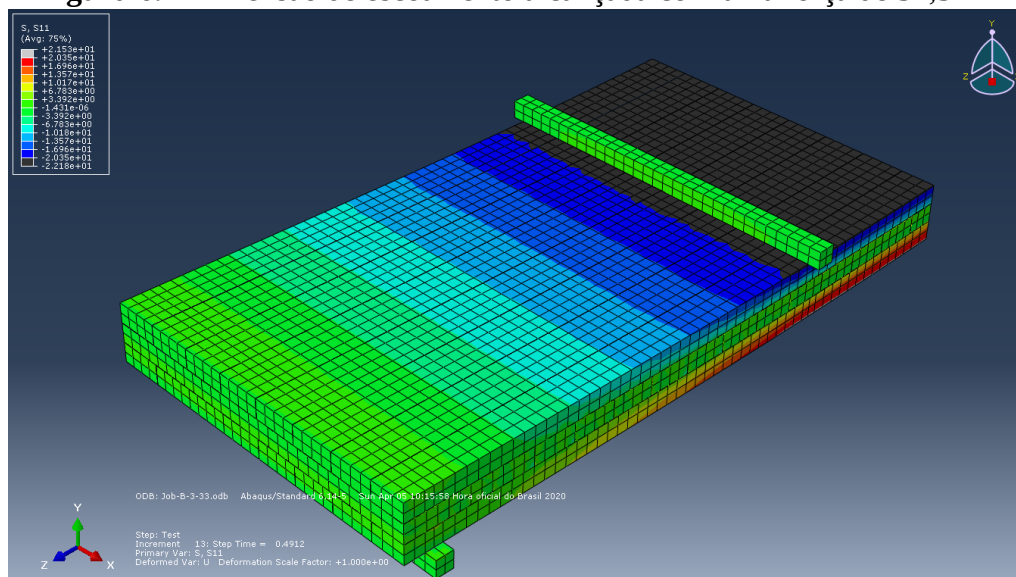
Figura 6.13 – Resistência à tração na direção paralela às fibras alcançada com uma força de 60,5 kN



Fonte: O Autor

A tensão de escoamento na direção paralela às fibras foi alcançada no incremento 13, correspondente à aplicação de uma força de 51,5 kN, conforme ilustra a Figura 6.14.

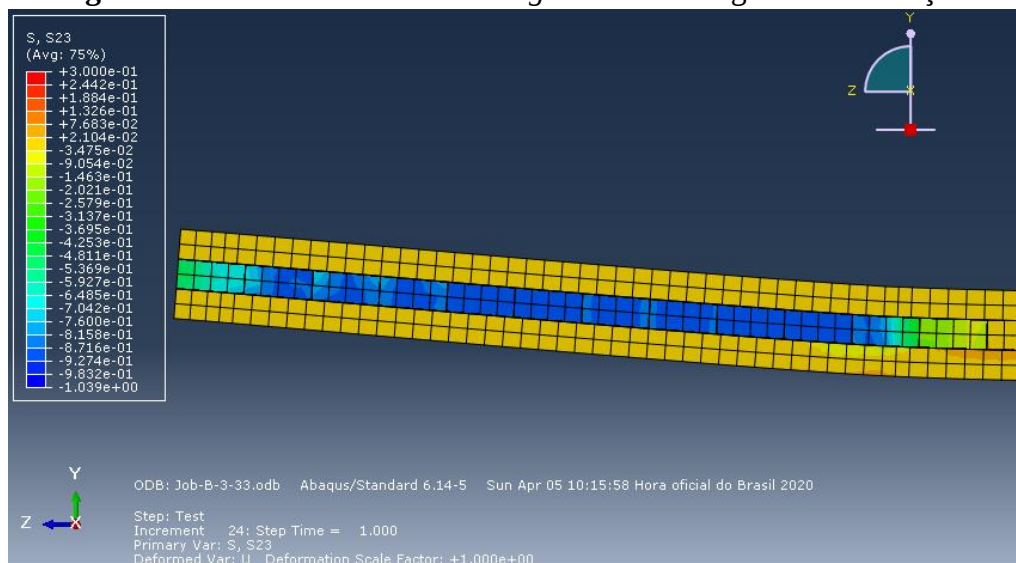
Figura 6.14 – Tensão de escoamento alcançada com uma força de 51,5 kN



Fonte: O Autor

A resistência ao *rolling shear* não chegou a ser alcançada, como ilustra a Figura 6.15.

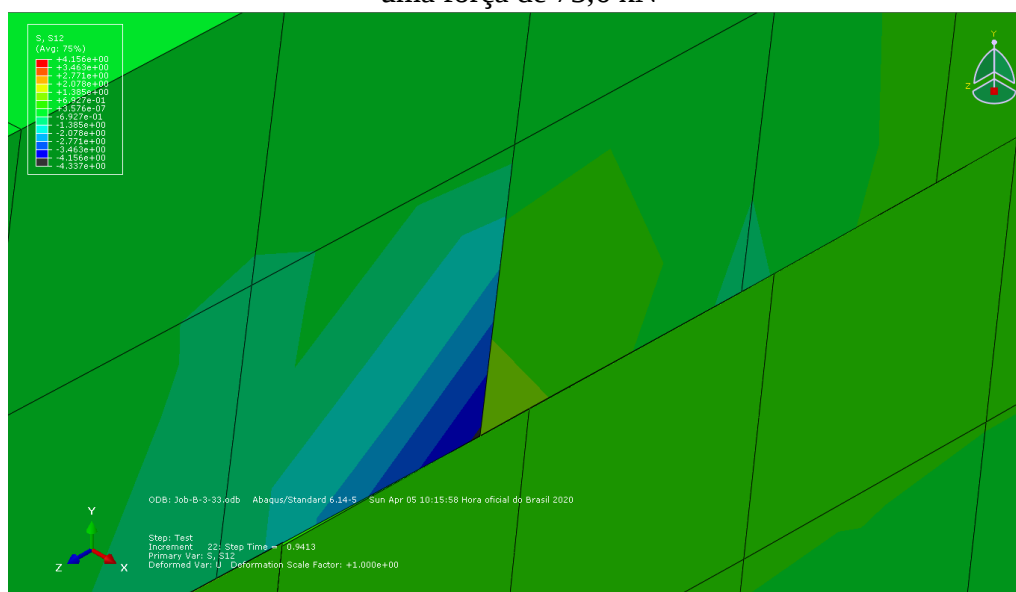
Figura 6.15 – A resistência ao *rolling shear* não chegou a ser alcançada



Fonte: O Autor

A resistência ao cisalhamento nas lamelas foi alcançada em alguns pontos isolados a partir do incremento 22, correspondente à aplicação de uma força de 73,6 kN, como ilustra a Figura 6.16.

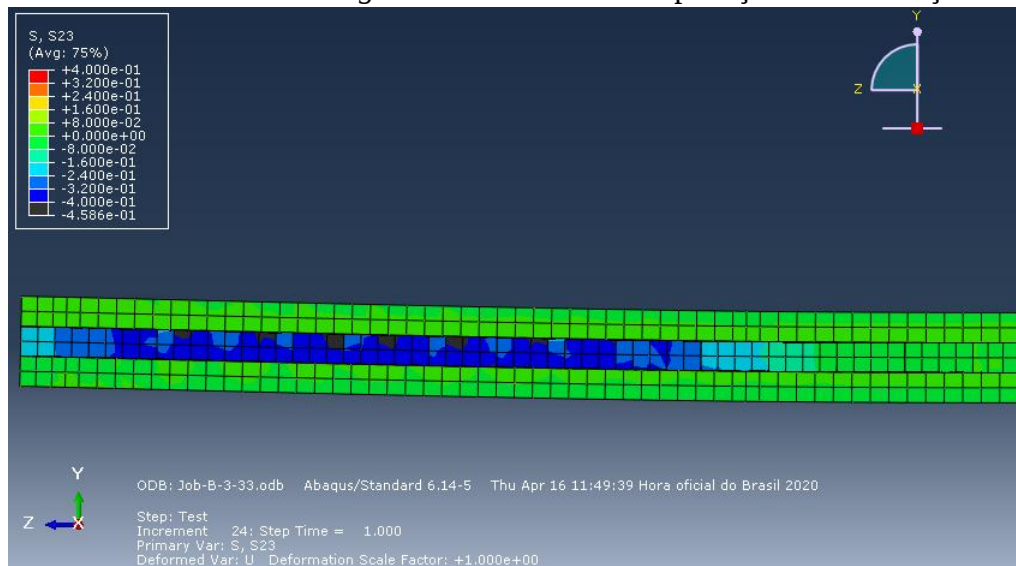
Figura 6.16 – Resistência ao cisalhamento alcançada em alguns pontos isolados com uma força de 73,6 kN



Fonte: O Autor

Com a aplicação de uma força de 30 kN, as maiores tensões de *rolling shear* obtidas foram de 0,459 MPa, abaixo da resistência ao *rolling shear* dos painéis, conforme é ilustrado pela Figura 6.17.

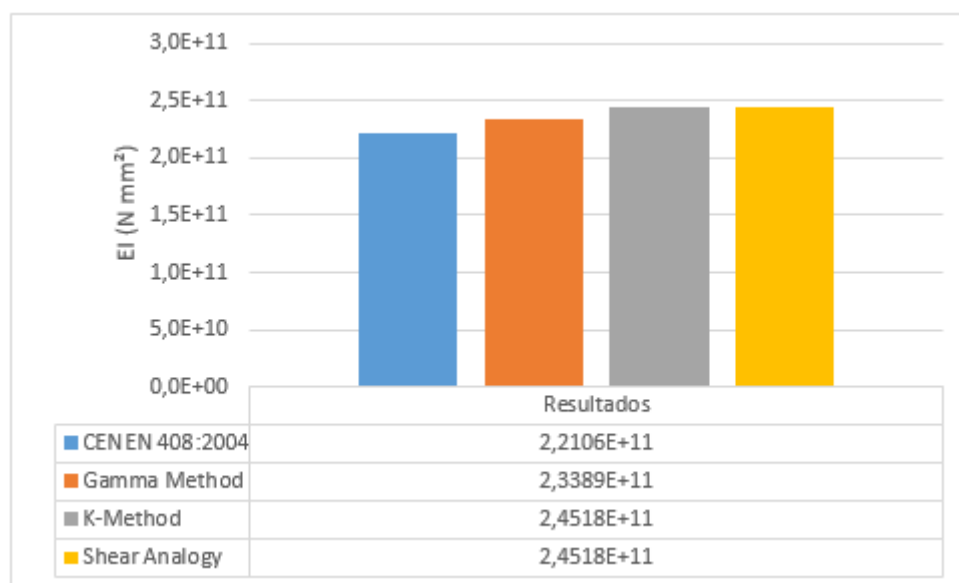
Figura 6.17 –Tensões de *rolling shear* atuantes com a aplicação de uma força de 30 kN



Fonte: O Autor

6.2.3 Resultado do painel B-11-9 com vão de 2.100 mm

Os resultados de Rigidez Efetiva para o painel B-11-9 com vão de 2.100 mm, calculados pelo método da norma CEN EN 408:2004, pela Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas (*Gamma Method*), pela Teoria do Compósito (*k-Method*) e pela Analogia do Cisalhamento (*Shear Analogy*) são ilustrados na Figura 6.18.

Figura 6.18 – Resultados de Rigidez Efetiva

Fonte: O Autor

As diferenças percentuais entre os valores de Rigidez Efetiva calculados para o painel B-11-9, quando comparado o resultado analítico obtido segundo a norma CEN EN 408:2004 aos obtidos por cada um dos outros métodos são:

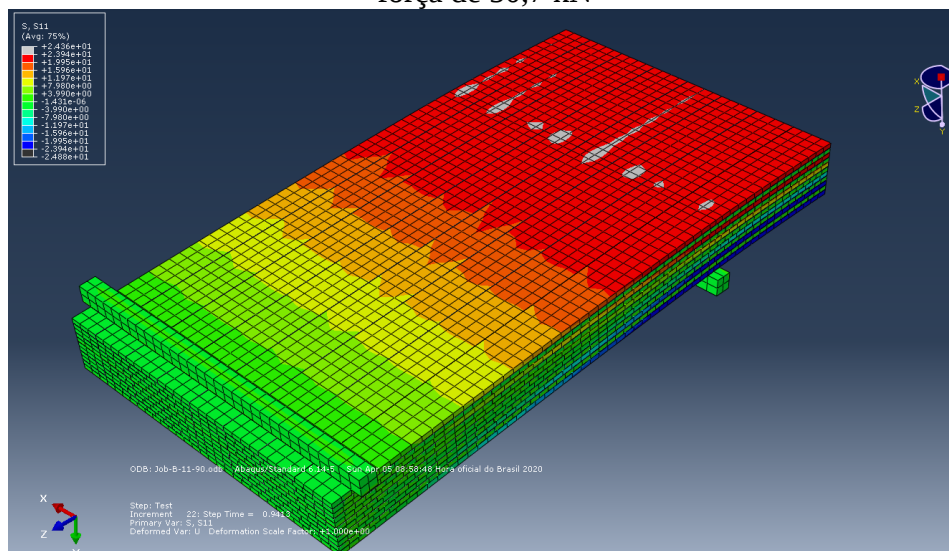
Teoria das Viga Mecanicamente Unidas (*Gamma Method*): 5,80%;

Teoria do Compósito (*k-Method*): 10,91%;

Analogia do Cisalhamento (*Shear Analogy*): 10,91%.

A resistência à tração na direção paralela às fibras foi alcançada no incremento 22, correspondente à aplicação de uma força de 50,7 kN, conforme ilustra a Figura 6.19.

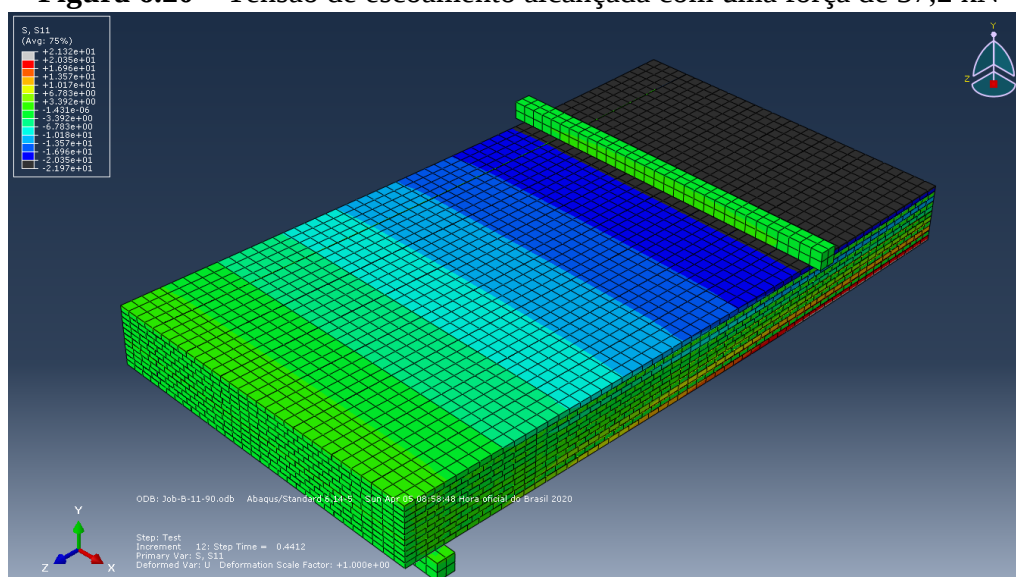
Figura 6.19 – Resistência à tração na direção paralela às fibras alcançada com uma força de 50,7 kN



Fonte: O Autor

A tensão de escoamento na direção paralela às fibras foi alcançada no incremento 12, correspondente à aplicação de uma força de 37,2 kN, conforme ilustra a Figura 6.20.

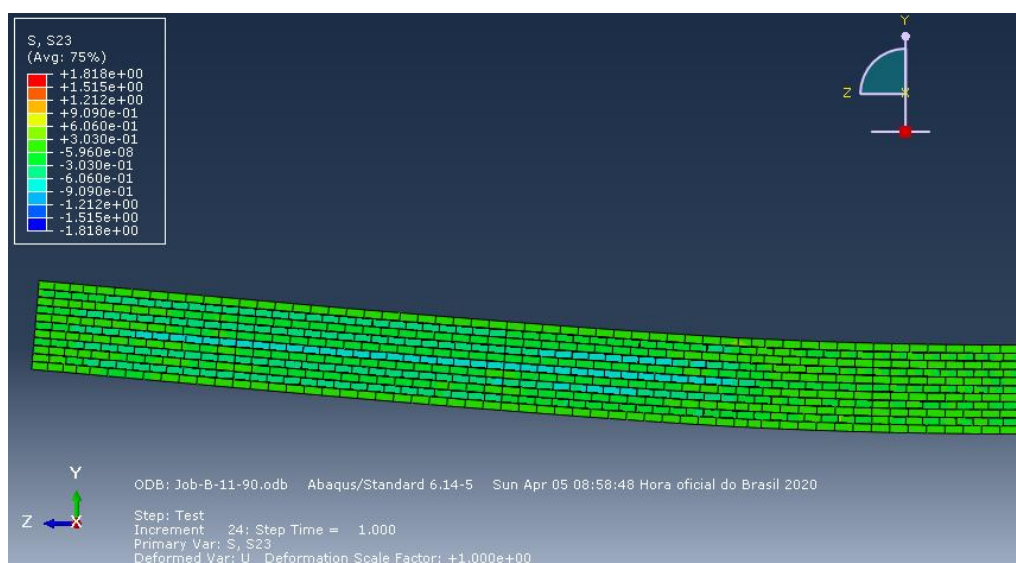
Figura 6.20 – Tensão de escoamento alcançada com uma força de 37,2 kN



Fonte: O Autor

A resistência ao *rolling shear* não chegou a ser alcançada, como ilustra a Figura 6.21.

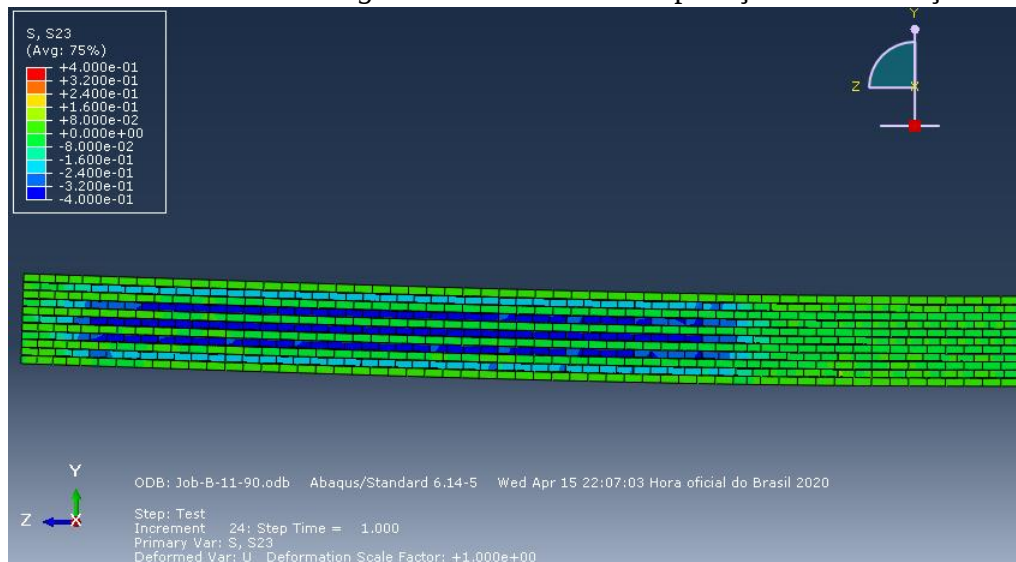
Figura 6.21 – A resistência ao *rolling shear* não chegou a ser alcançada



Fonte: O Autor

Com a aplicação de uma força de 30 kN, as maiores tensões de *rolling shear* obtidas foram de 0,394 MPa, abaixo da resistência ao *rolling shear* dos painéis, conforme é ilustrado pela Figura 6.22.

Figura 6.22 – Tensões de *rolling shear* atuantes com a aplicação de uma força de 30 kN



Fonte: O Autor

6.2.4 Análise dos Resultados do Grupo 1

O painel B-3-33 apresentou uma maior Rigidez Efetiva ($3,0328 \cdot 10^{11}$ Nmm²), seguido pelo painel B-5-20 ($2,7147 \cdot 10^{11}$ Nmm²), enquanto a Rigidez Efetiva do painel B-11-9 foi a menor entre os três ($2,2106 \cdot 10^{11}$ Nmm²), quando calculadas pelo método da norma CEN EN 408:2004. Isso pode ser explicado pelo fato de haver uma maior proporção da seção transversal orientada paralelamente à direção principal dos esforços (66%, 60% e 54%, respectivamente, para os painéis B-3-33, B-5-20 e B-11-9). O Módulo de Elasticidade da madeira na direção paralela às fibras é muito superior ao correspondente à direção normal às fibras, podendo ser estimado como 20 vezes maior, conforme o Projeto de Revisão da ABNT NBR 7190:2011. Desse modo, a maior proporção de fibras orientadas paralelamente à direção principal estaria relacionada ao aumento na rigidez dos painéis.

É importante se observar que em um ensaio físico o efeito de homogeneização, como mencionado por O’Ceallagh, Sikora e Harte (2018), poderia influenciar positivamente o desempenho dos painéis com um maior número de camadas. Entretanto, como nas modelagens desenvolvidas neste trabalho as propriedades da madeira foram consideradas homogêneas, isto é, não foi feita nenhuma consideração que representasse a ocorrência de nós e defeitos, uma parte da contribuição do efeito de homogeneização não pôde ser confirmada nos resultados numéricos.

No que diz respeito à comparação entre os resultados analíticos, percebe-se que a Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas (*Gamma Method*) se mostrou mais precisa na estimativa da Rigidez Efetiva, quando comparado à Teoria do Compósito (*k-Method*) e à Analogia do Cisalhamento. As diferenças entre os valores obtidos pelo método da CEN EN 408:2004 e os demais métodos analíticos foram de -0,04%, 2,06% e 5,80%, respectivamente, para os painéis B-5-20, B-3-33 e B-11-9, com a Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas. Para a Teoria dos Compósitos e a Analogia do Cisalhamento, que apresentaram os mesmos resultados, as diferenças foram de 14,79%, 20,31% e 10,91%, respectivamente.

As tensões normais se concentraram nas camadas mais externas dos painéis, orientadas paralelamente à direção principal dos esforços. No caso do painel B-11-9, além das camadas externas, a terceira e a nona camadas também foram solicitadas por tensões normais de magnitude semelhante às observadas nas camadas mais externas. Isso pode ser explicado pelo fato de a distância entre os centros geométricos dessas camadas e a

linha neutra do painel serem relativamente parecidas. Com isso, justifica-se a realização de classificação visual e mecânica das lamelas, de modo que aquelas de melhor qualidade sejam distribuídas nas zonas de maior solicitação.

Comparando-se a propagação de tensões capazes de provocar o escoamento na direção paralela às fibras, percebe-se que as forças necessárias para a ocorrência desse fenômeno foram significativamente diferentes nos três casos estudados. No painel B-3-33 pode-se considerar que o escoamento se propagou pelas lamelas com uma força aplicada de 56,3 kN. Para o painel B-5-20, isso se deu com 45,7 kN, ao passo em que para o painel B-11-9 foi necessária uma força de 37,2 kN. O mesmo se observou com relação às forças capazes de alcançar a resistência na direção paralela às fibras: no painel B-3-33, esse nível de tensões foi observado com a aplicação de 72,7 kN; no painel B-5-20, com 60,5 kN; no painel B-11-9, com 50,7 kN. Isso pode ser explicado pela diferença na espessura das camadas de madeira mais solicitadas por esforços normais na flexão, de modo que uma maior espessura contribui para uma maior capacidade de carga.

No que diz respeito às tensões de cisalhamento, durante as simulações não foram atingidas as resistências ao *rolling shear* em nenhum dos três painéis. Vale salientar que no painel B-11-9 se considerou uma resistência ao *rolling shear* superior a dos outros dois painéis, por conta da relação entre a espessura e a largura das lamelas. Enquanto para os dois primeiros painéis se adotou uma resistência ao *rolling shear* de 1,039 MPa, no painel B-11-9 se adotou o valor foi de 1,818 MPa. Nesse painel também se observou que, entre as cinco camadas centrais, as três camadas orientadas perpendicularmente à direção principal apresentaram tensões de *rolling shear* de magnitudes semelhantes, com valores mais elevados na camada central.

No painel B-3-33, a resistência ao cisalhamento na direção perpendicular às fibras foi alcançada, de forma pontual, nas lamelas superiores, em regiões próximas à interface com as lamelas da camada central. Esse fenômeno se observou com a aplicação de forças superiores a 73,5 kN. Nas simulações dos outros dois painéis não se percebeu que a resistência ao cisalhamento fosse alcançada.

Considerando-se que as resistências na direção paralela às fibras foram alcançadas antes das resistências ao *rolling shear*, é possível se estimar que a ruptura dos três painéis se daria pela tração ou compressão da madeira na direção paralela às fibras. Esse resultado, entretanto, é apenas uma conjectura, tendo em vista que a modelagem desenvolvida não leva em conta as diferenças entre o comportamento da madeira na

tração e na compressão, e tampouco considera as variáveis relacionadas a falhas no processo de produção dos painéis, defeitos e heterogeneidades dos materiais.

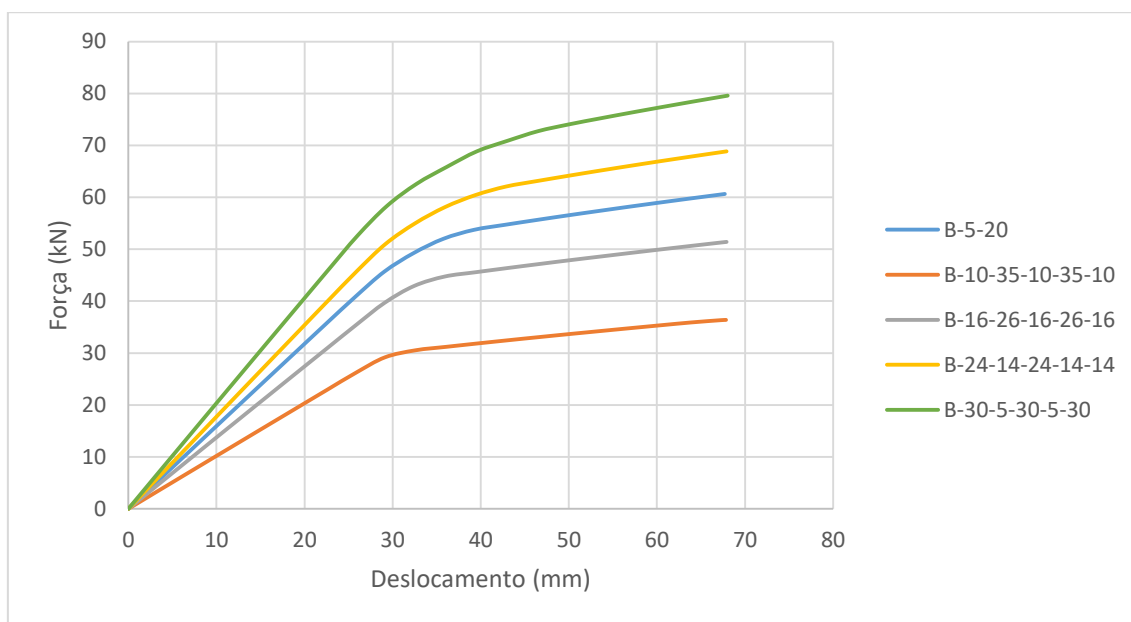
Analisando-se as forças aplicadas associadas à ruptura nos painéis em cada um dos casos, é possível se estabelecer que o painel B-3-33 apresenta a maior capacidade carga entre os três painéis, seguido pelo painel B-5-20 e o painel B-11-9.

Quando submetidos à aplicação de uma mesma força, de 30 kN, as tensões de *rolling shear* atuantes nas lamelas orientadas perpendicularmente à direção principal se mostraram ligeiramente inferiores no painel B-11-9 (0,394 MPa), quando comparadas ao painel B-3-33 (0,459 MPa). Isso vai ao encontro da afirmação de Franke (2016), que relaciona um maior número de camadas a uma atenuação de suas tensões de *rolling shear*. Com relação ao painel B-5-20, a tensão de *rolling shear* máxima observada para uma força aplicada de 30 kN foi de 0,392 MPa, o menor dos três valores. Isso pode ser explicado pelo fato de a camada central desse painel, onde ocorrem os maiores valores de tensões de cisalhamento, ser orientada paralelamente à direção principal, ao contrário do que ocorre nos dois outros painéis.

6.3 GRUPO 2 – PAINÉIS COM CAMADAS DE DIFERENTES ESPESSURAS

Neste grupo de simulações são comparados os resultados para os painéis B-10-35-10-35-10, B-16-26-16-26-16, B-24-14-24-14-24 e B-30-5-30-5-30. Esses painéis contam com espessuras totais de 100 mm, com vão entre os apoios de 2.100 mm. Para as propriedades mecânicas da madeira, foi adotada como referência a classe C16 da norma CEN EN 338:2009.

A Figura 6.23 ilustra os gráficos de Força x Deslocamento para esses quatro painéis. Vale salientar que o painel B-5-20 com vão de 2.100 mm tem sua curva de Força x Deslocamento também ilustrada na Figura 6.23 e faz parte da discussão dos resultados deste grupo, embora os detalhes dos resultados desse painel tenham sido apresentados no Grupo 1.

Figura 6.23 – Gráfico de Força x Deslocamento para os painéis do Grupo 2

Fonte: O Autor

A Tabela 6.3 apresenta os resultados de Rigidez Efetiva calculados por meio da metodologia apresentada na norma CEN EN 408:2004 e pela Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas. A tabela apresenta ainda a diferença percentual entre esses valores.

Tabela 6.3 –Rigidezes Efetivas obtidas pela norma CEN EN 408:2004 e pela Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas

Configuração Geométrica	Rigidez Efetiva CEN EN 408:2004 (N mm ²)	Rigidez Efetiva Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas (N mm ²)	Diferença (%)
B-30-5-30-5-30	3,4793 10 ¹¹	3,5804 10 ¹¹	2,90
B-24-14-24-14-24	3,0347 10 ¹¹	3,0572 10 ¹¹	0,74
B-16-26-16-26-16	2,3524 10 ¹¹	2,3472 10 ¹¹	-2,71
B-10-35-10-35-10	1,7432 10 ¹¹	1,6960 10 ¹¹	-0,22

Fonte: O Autor

A Tabela 6.4 apresenta os resultados de Rigidez Efetiva calculados por meio da metodologia apresentada na norma CEN EN 408:2004. Também apresenta os resultados de Rigidez Efetiva calculados pela Teoria do Compósito e pela Analogia do Cisalhamento, que por serem valores coincidentes em todos os casos foram agrupados

em uma única coluna. A tabela apresenta ainda a diferença percentual entre os valores da segunda e da terceira colunas.

Tabela 6.4 –Rigidezes Efetivas obtidas pela norma CEN EN 408:2004 e pela Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas

Configuração Geométrica	Rigidez Efetiva CEN EN 408:2004 (N mm²)	Rigidez Efetiva Teoria do Compósito e Analogia do Cisalhamento (N mm²)	Diferença (%)
B-30-5-30-5-30	3,4793 10 ¹¹	3,7606 10 ¹¹	8,08
B-24-14-24-14-24	3,0347 10 ¹¹	3,4222 10 ¹¹	12,77
B-16-26-16-26-16	2,3524 10 ¹¹	2,7305 10 ¹¹	13,26
B-10-35-10-35-10	1,7432 10 ¹¹	1,9744 10 ¹¹	16,08

Fonte: O Autor

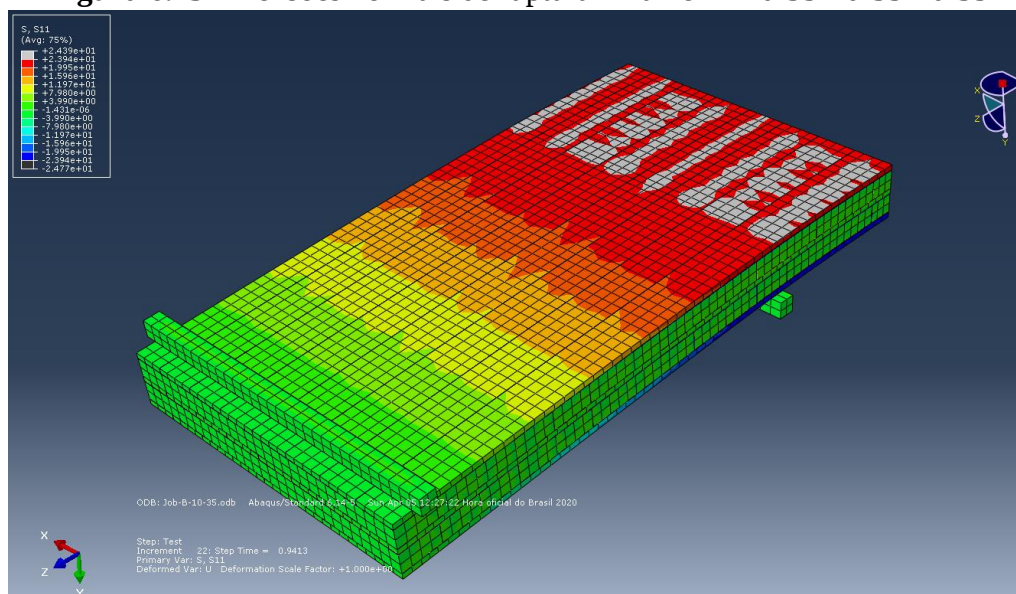
Comparando-se as cinco geometrias dos painéis deste grupo, foram obtidos maiores resultados para a Rigidez Efetiva nos painéis cujas espessuras das camadas orientadas paralelamente à direção principal também eram maiores, sem nenhuma exceção. Considerando-se que as dimensões da seção transversal são iguais em todos os casos, assim como as propriedades relacionadas à rigidez do material, as diferenças nas rigidezes dos painéis decorrem das modificações nas espessuras das camadas orientadas paralelamente à direção principal, conforme já enfatizado anteriormente.

Comparando-se os resultados calculados pelo método proposto pela CEN EN 408:2004 com aqueles obtidos pelos outros métodos analíticos, percebeu-se que, para os quatro painéis, a Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas apresentou as menores discrepâncias. Para esse método, as diferenças foram sempre inferiores a 3%, ao passo em que a Teoria do Compósito e a Analogia do Cisalhamento apresentaram diferenças entre 8% e 17%.

A Tabela 6.5 apresenta as forças associadas aos fenômenos de ruptura e de escoamento nos painéis do Grupo 2.

Fonte: O Autor

Figura 6.25 – Tensões normais de ruptura – Painel B-10-35-10-35-10-35



Fonte: O Autor

Em nenhuma das simulações se percebeu que a resistência ao *rolling shear* tenha sido alcançada. Vale salientar que a resistência ao *rolling shear* foi considerada superior nas camadas orientadas transversalmente dos painéis B-30-5-30-5-30 e B-24-14-24-14-24, pois possuem relação $b/h > 4$. Para esses painéis, considerou-se uma resistência ao *rolling shear* de 1,818 MPa, enquanto que para os demais painéis se considerou uma resistência ao *rolling shear* de 1,039 MPa.

Desse modo, para os níveis de esforços analisados, a resistência na direção paralela às fibras foi alcançada, ao contrário da resistência ao *rolling shear*. É possível se considerar, portanto, que a ruptura nos painéis estaria associada às tensões normais decorrentes da flexão, observadas as limitações das modelagens desenvolvidas. Assim, como os painéis com camadas mais espessas orientadas na direção principal alcançaram a resistência na direção paralela às fibras apenas quando submetidos a forças de maior intensidade, é possível se afirmar que a capacidade de carga dos painéis também é beneficiada por um aumento na espessura das camadas orientadas paralelamente à direção principal.

A Tabela 6.6 apresenta as tensões de *rolling shear* nos painéis do Grupo 2, quando aplicada uma mesma força de 30 kN nas simulações, e a proporção da resistência ao *rolling shear* alcançada nas camadas transversais.

Tabela 6.6 – Máximas tensões de *rolling shear* para uma força de 30 kN

Configuração Geométrica	Máxima tensão de <i>rolling shear</i> (MPa)	Proporção da resistência ao <i>rolling shear</i> alcançada (%)
B-30-5-30-5-30	0,370	20,35
B-24-14-24-14-24	0,356	19,58
B-16-26-16-26-16	0,395	38,02
B-10-35-10-35-10	0,408	39,27

Fonte: O Autor

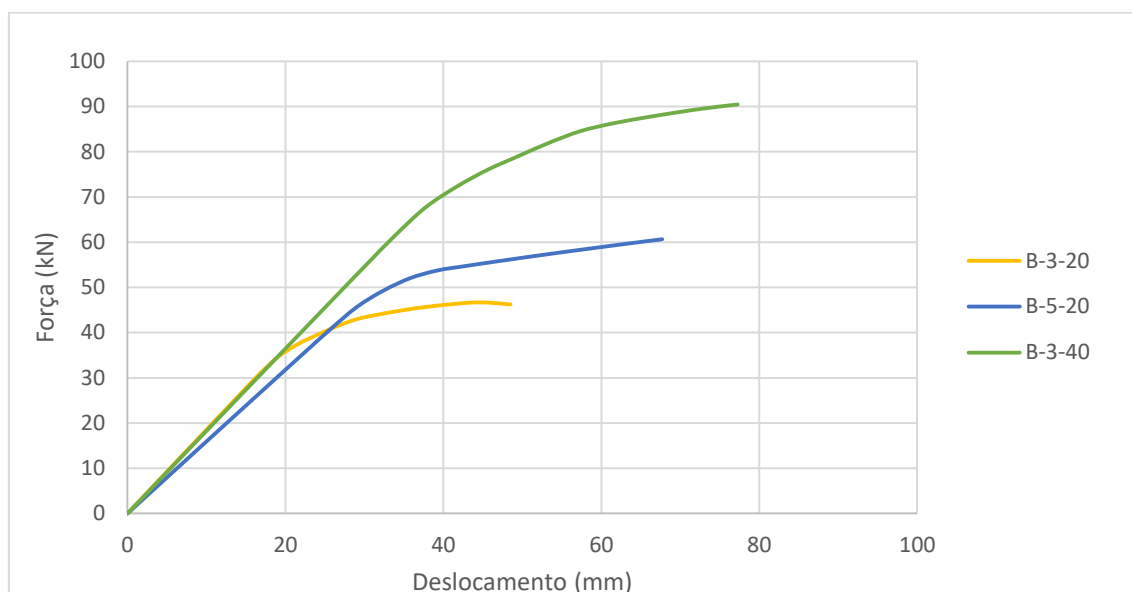
Observou-se ainda que, com a aplicação de uma força de 30 kN, as maiores tensões de *rolling shear* ocorreram no painel B-10-35-10-35-10, com o valor de 0,408 MPa. Esse valor ainda é significativamente inferior à resistência ao *rolling shear* das lamelas orientadas perpendicularmente à direção principal, de 1,039 MPa, correspondendo a 39,27% desse valor. Entretanto, vale salientar que essas tensões atuantes são superiores às obtidas para o painel B-30-5-30-5-30, de 0,370 MPa. Considerando-se que, pela relação entre a largura e a espessura da seção transversal das lamelas, a resistência ao *rolling shear* desse painel é mais elevada, de 1,818 MPa, a tensão atuante corresponde a 20,35% desse valor. Percebe-se, assim, que do ponto de vista dessa propriedade, existem duas vantagens associadas à redução da espessura das camadas orientadas perpendicularmente à direção principal: para uma mesma força aplicada, percebe-se uma menor tensão atuante e uma maior resistência do material.

6.4 GRUPO 3 – PAINÉIS DE DIFERENTES ESPESSURAS TOTAIS

Neste grupo de simulações são comparados os resultados para os painéis B-3-20 e B-3-40. Esses painéis contam com espessuras de 60 mm, com vão de 1.260 mm, e de 120 mm, com vão de 2.520 mm. Para as propriedades mecânicas da madeira, foi adotada como referência a classe C16 da norma CEN EN 338:2009.

A Figura 6.26 mostra os gráficos de Força x Deslocamento para esses três painéis. Vale salientar que o painel B-5-20 com vão de 2.100 mm tem sua curva de Força x Deslocamento também ilustrada na mesma figura e faz parte da discussão dos resultados deste grupo, embora os detalhes dos resultados desse painel tenham sido apresentados no Grupo 1.

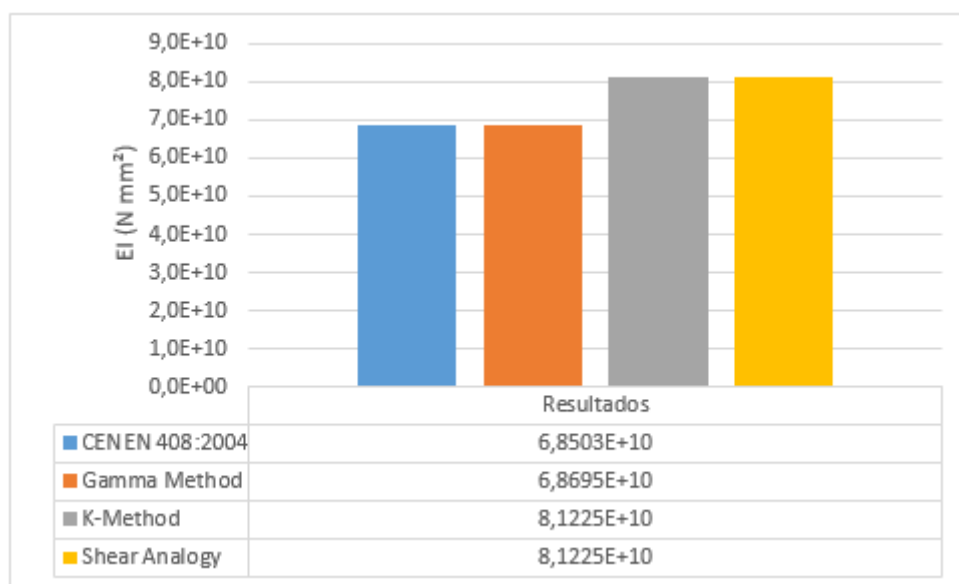
Figura 6.26 – Gráfico de Força x Deslocamento para os painéis do Grupo 3



Fonte: O Autor

6.4.1 Resultado do painel B-3-20 com vão de 1.260 mm

Os resultados de Rigidez Efetiva para o painel B-3-20 com vão de 1.260 mm, calculados pelo método da norma CEN EN 408:2004, pela Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas (*Gamma Method*), pela Teoria do Compósito (*k-Method*) e pela Analogia do Cisalhamento (*Shear Analogy*) são ilustrados na Figura 6.27.

Figura 6.27 – Rigidez Efetiva para o painel B-3-20 com vão de 1.260 mm

Fonte: O Autor

As diferenças percentuais entre os valores de Rigidez Efetiva calculados para o painel B-3-20, quando comparado o resultado analítico obtido segundo a norma EN CEN 408:2004 aos obtidos por cada um dos outros métodos são:

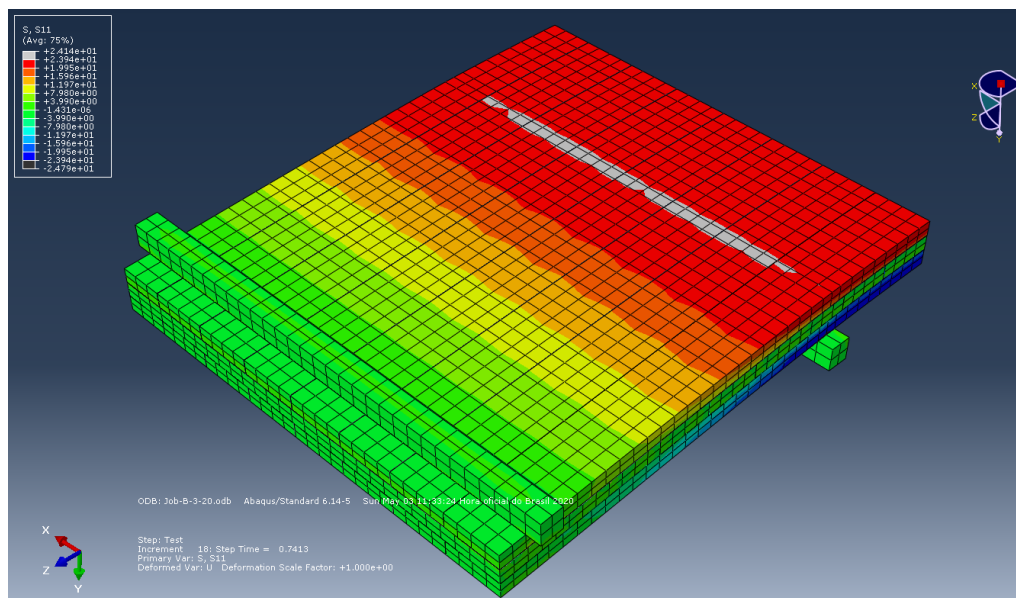
Teoria das Viga Mecanicamente Unidas (*Gamma Method*): 0,28%;

Teoria do Compósito (*k-Method*): 18,57%;

Analogia do Cisalhamento (*Shear Analogy*): 18,57%.

A resistência à tração na direção paralela às fibras foi alcançada no incremento 18, correspondente à aplicação de uma força de 45,4 kN, conforme ilustra a Figura 6.28.

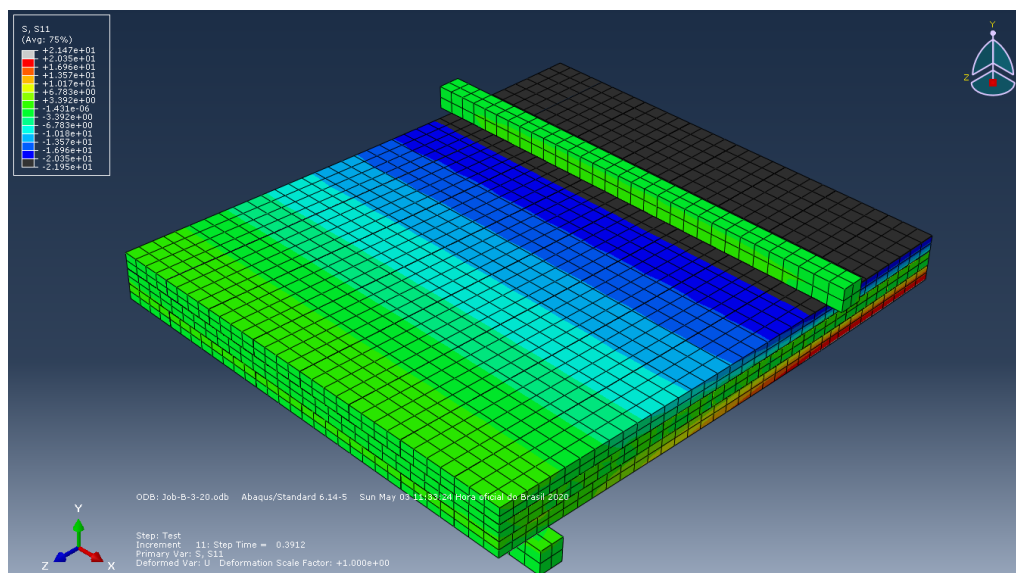
Figura 6.28 – Resistência à tração na direção paralela às fibras alcançada com uma força de 45,4 kN



Fonte: O Autor

A tensão de escoamento na direção paralela às fibras foi alcançada no incremento 12, correspondente à aplicação de uma força de 34,7 kN, conforme ilustra a Figura 6.29.

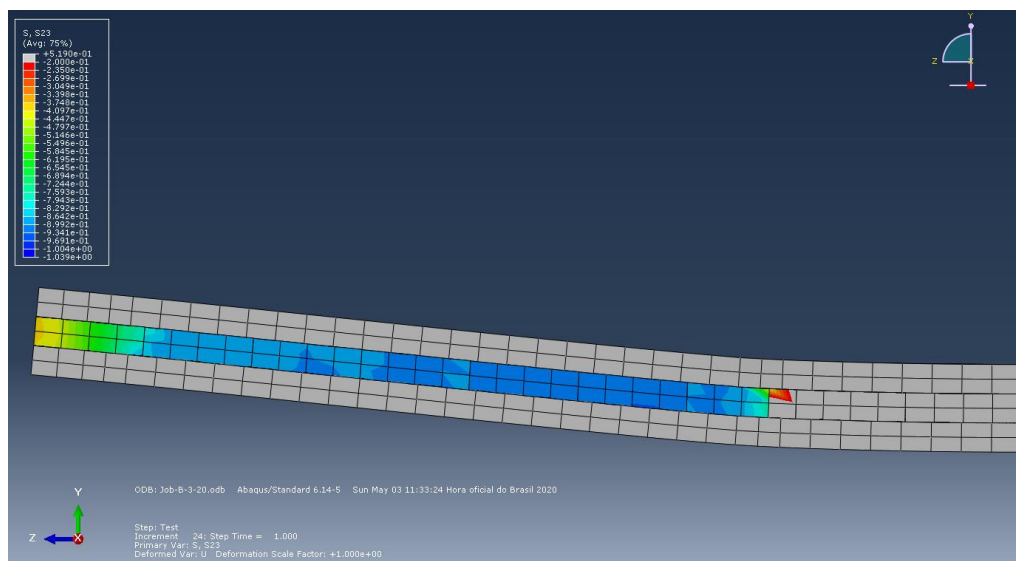
Figura 6.29 – Tensão de escoamento alcançada com uma força de 34,7 kN



Fonte: O Autor

A resistência ao *rolling shear* não chegou a ser alcançada, conforme ilustra a Figura 6.30.

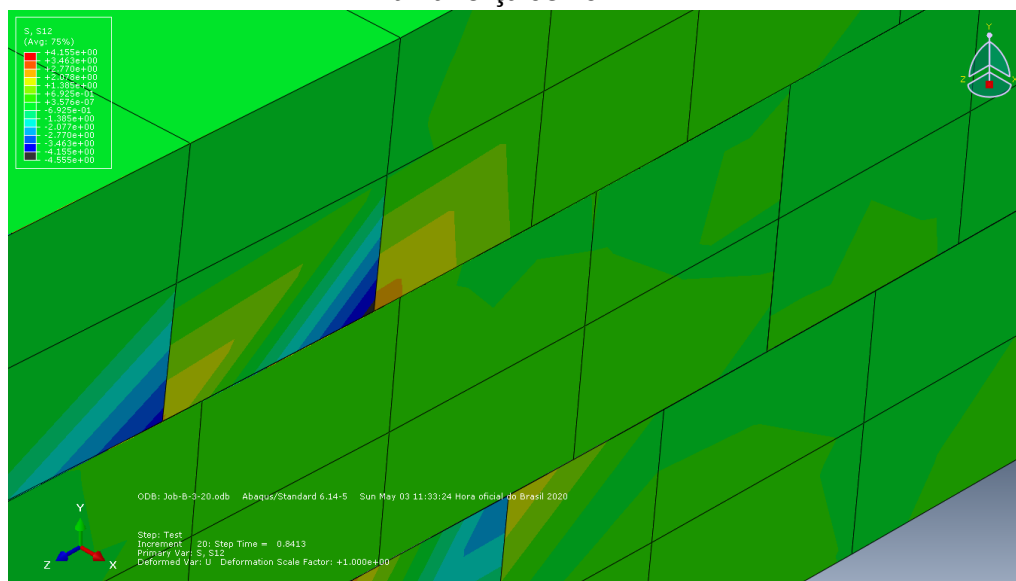
Figura 6.30 – A resistência ao *rolling shear* não chegou a ser alcançada



Fonte: O Autor

A resistência ao cisalhamento nas lamelas foi alcançada em alguns pontos isolados a partir do incremento 20, correspondente à aplicação de uma força de 46 kN, como ilustra a Figura 6.31.

Figura 6.31 – Resistência ao cisalhamento alcançada em alguns pontos isolados com uma força de 46 kN

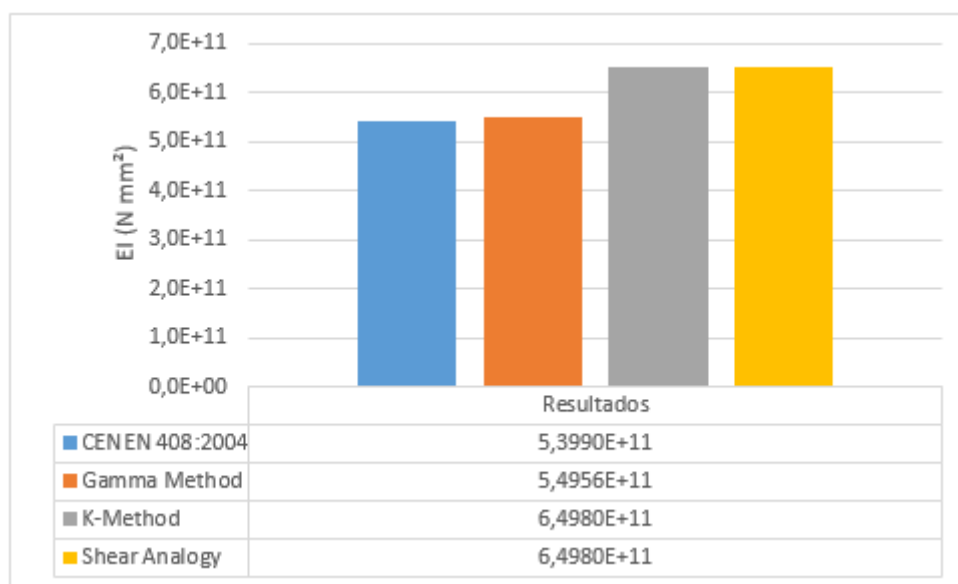


Fonte: O Autor

6.4.2 Resultado do painel B-3-40 com vão de 2.520 mm

Os resultados de Rigidez Efetiva para o painel B-3-40 com vão de 2.520 mm, calculados pelo método da norma CEN EN 408:2004, pela Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas (*Gamma Method*), pela Teoria do Compósito (*k-Method*) e pela Analogia do Cisalhamento (*Shear Analogy*) são ilustrados na Figura 6.32.

Figura 6.32 – Rigidez Efetiva para o painel B-3-40 com vão de 2.520 mm



Fonte: O Autor

As diferenças percentuais entre os valores de Rigidez Efetiva calculados para o painel B-3-40, quando comparado o resultado analítico obtido segundo a norma CEN EN 408:2004 aos obtidos por cada um dos outros métodos são:

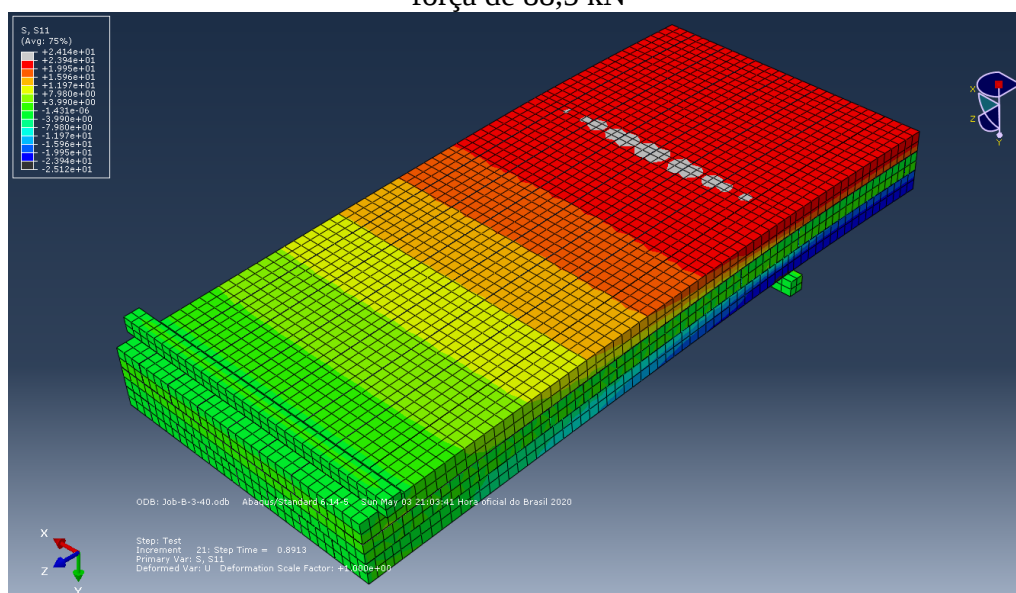
Teoria das Viga Mecanicamente Unidas (*Gamma Method*): 1,79%;

Teoria do Compósito (*k-Method*): 20,36%;

Analogia do Cisalhamento (*Shear Analogy*): 20,36%.

A resistência à tração na direção paralela às fibras foi alcançada no incremento 21, correspondente à aplicação de uma força de 88,5 kN, conforme ilustra a Figura 6.33.

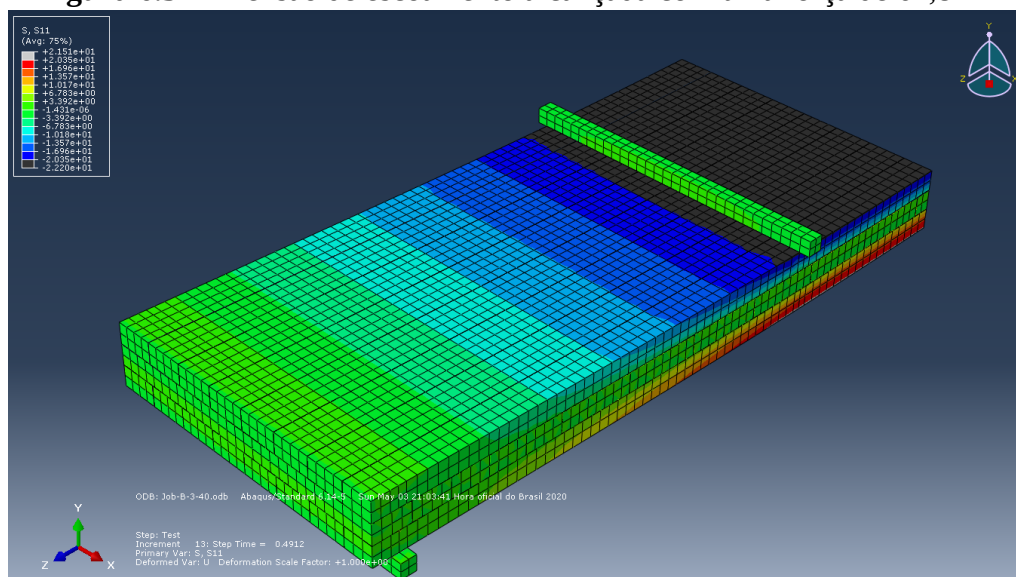
Figura 6.33 – Resistência à tração na direção paralela às fibras alcançada com uma força de 88,5 kN



Fonte: O Autor

A tensão de escoamento na direção paralela às fibras foi alcançada no incremento 13, correspondente à aplicação de uma força de 67,8 kN, conforme ilustra a Figura 6.34.

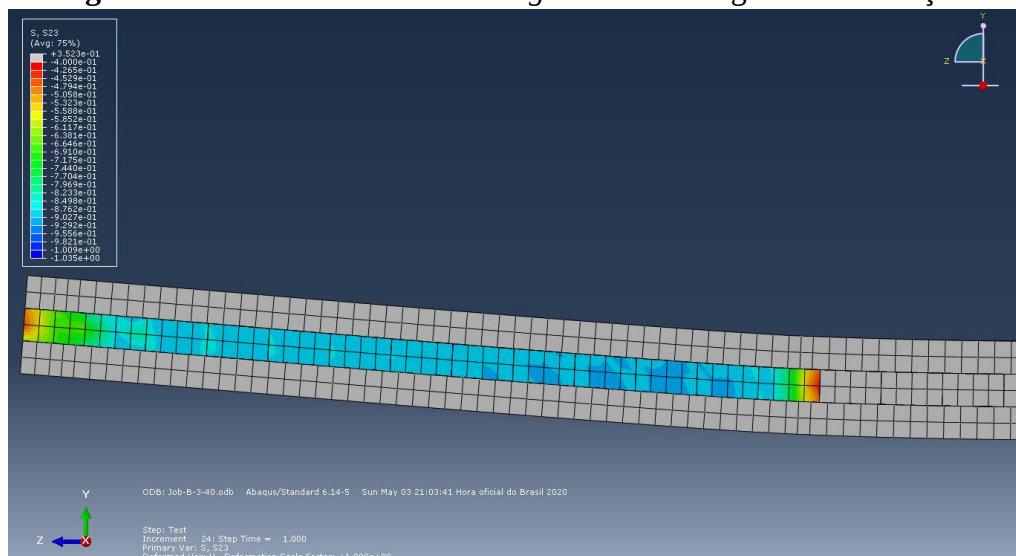
Figura 6.34 – Tensão de escoamento alcançada com uma força de 67,8 kN



Fonte: O Autor

A resistência ao *rolling shear* não chegou a ser alcançada, conforme ilustra a Figura 6.35.

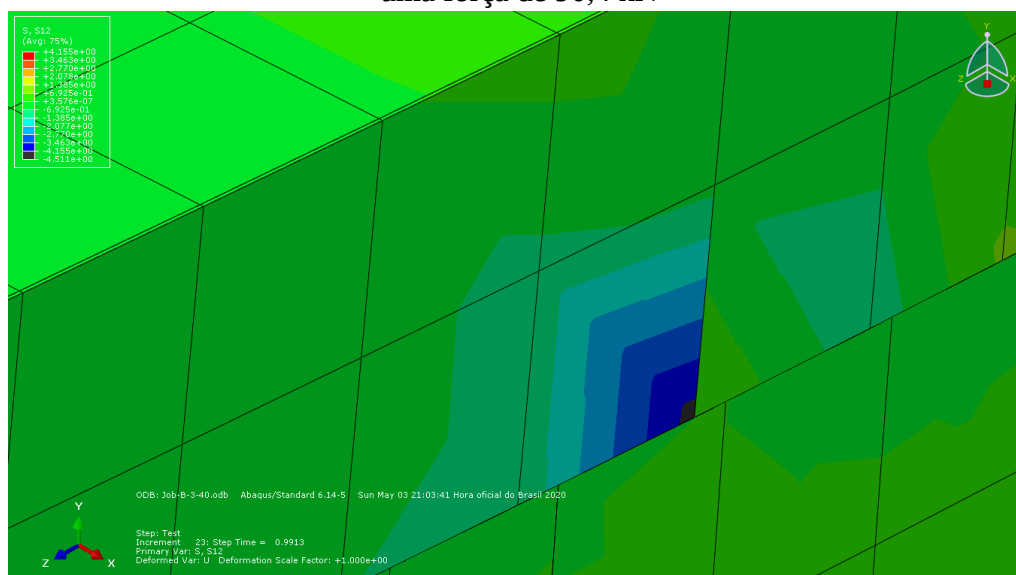
Figura 6.35 – A resistência ao *rolling shear* não chegou a ser alcançada



Fonte: O Autor

A resistência ao cisalhamento nas lamelas foi alcançada em alguns pontos isolados a partir do incremento 23, correspondente à aplicação de uma força de 90,4 kN, como ilustra a Figura 6.36.

Figura 6.36 – Resistência ao cisalhamento alcançada em alguns pontos isolados com uma força de 90,4 kN



Fonte: O Autor

6.4.3 Análise de Resultados do Grupo 3

Comparando-se o valor obtido para a Rigidez Efetiva dos painéis analisados neste grupo, percebe-se que o painel B-3-40 apresentou o maior valor ($5,3990 \cdot 10^{11} \text{ N mm}^2$), seguido pelo painel B-5-20 ($2,7147 \cdot 10^{11} \text{ N mm}^2$) e pelo painel B-3-20 ($6,8503 \cdot 10^{10} \text{ N mm}^2$). Isso pode ser explicado pela grande influência da espessura dos painéis no valor do momento de inércia.

O’Ceallaigh, Sikora e Harte (2018) analisaram a Rigidez Efetiva de painéis com as mesmas configurações geométricas deste grupo e produzidos com madeira da classe C16. Na Tabela 6.7 são relacionados os resultados das simulações e os resultados experimentais desses autores, comparando-se os valores da Rigidez Efetiva por metro de seção transversal. O uso da Rigidez Efetiva por metro se deve ao fato de os painéis analisados possuírem larguras diferentes. A tabela também apresenta a diferença entre os valores obtidos por simulações e os valores experimentais, na forma percentual, tomando como base os valores experimentais.

Tabela 6.7 – Análise das Rigidezes Efetivas obtidas através das simulações com os resultados de O’Ceallaigh, Sikora e Harte (2018)

Configuração	EI (N mm ²) Simulação CEN EN 408:2004	EI/m (N mm ² /m) Simulação CEN EN 408:2004	EI/m (Nmm ² /m) Experimental	Diferença (%)
Painel B-3-20	$6,850 \cdot 10^{10}$	$1,17 \cdot 10^{11}$	$1,25 \cdot 10^{11}$	6,13
Painel B-5-20	$2,715 \cdot 10^{11}$	$4,64 \cdot 10^{11}$	$5,10 \cdot 10^{11}$	9,06
Painel B-3-40	$6,850 \cdot 10^{11}$	$1,11 \cdot 10^{12}$	$1,02 \cdot 10^{12}$	-8,48

Fonte: O Autor

Do mesmo modo, Sikora, McPolin e Harte (2016) também realizaram ensaios utilizando-se essas mesmas configurações geométricas para painéis produzidos com madeira da classe C16. A Tabela 6.8 traz a comparação entre os resultados de Rigidez Efetiva obtidos através das simulações numéricas com os resultados desses autores.

Tabela 6.8 – Análise das Rigidezes Efetivas obtidas através das simulações com os resultados de Sikora, McPolin e Harte (2016)

Configuração	EI (N mm ²) Simulação CEN EN 408:2004	EI/m (N mm ² /m) Simulação CEN EN 408:2004	EI/m (Nmm ² /m) Experimental	Diferença (%)
Painel B-3-20	6,850 10 ¹⁰	1,17 10 ¹¹	1,37 10 ¹¹	14,26
Painel B-5-20	2,715 10 ¹¹	4,64 10 ¹¹	5,45 10 ¹¹	14,85
Painel B-3-40	6,850 10 ¹¹	1,11 10 ¹²	1,09 10 ¹²	-1,98

Fonte: O Autor

As comparações entre os valores de Rigidez Efetiva das simulações e os resultados experimentais dos dois artigos resultaram em erros inferiores a 15%. Desse modo, tem-se uma aferição da precisão da estimativa dessa propriedade mecânica com base na modelagem desenvolvida. Deve-se levar em conta, ainda, que mesmo os resultados experimentais possuem certo grau de dispersão, por defeitos existentes nas lamelas de madeira e pequenas variações em suas propriedades mecânicas.

No que diz respeito à comparação com os resultados analíticos, percebe-se novamente que a Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas se mostrou mais precisa na estimativa da Rigidez Efetiva. As diferenças entre os valores experimentais e analíticos foram de 0,28% e 1,79%, respectivamente, para os painéis B-3-20 e B-3-40. Para a Teoria do Compósito e a Analogia do Cisalhamento, as diferenças foram de 18,57% e 20,36%, respectivamente, para os painéis B-3-20 e B-3-40. É interessante se observar que a magnitude das diferenças é semelhante para ambos os painéis constituídos por três camadas de madeira.

Tanto o painel B-3-20 quanto o painel B-3-40 apresentaram comportamentos mecânicos semelhantes. Para os níveis de carregamento simulados, não se percebeu que as resistências ao *rolling shear* tenham sido alcançadas. A resistência ao cisalhamento, por sua vez, foi alcançada, de forma pontual, próximo à interface entre a camada superior e a camada central, com a aplicação de uma força da ordem de 46 kN, para o painel B-3-20, e de 90,4 kN, para o painel B-3-40.

No que diz respeito às tensões normais, percebeu-se que a resistência à tração foi atingida nas camadas inferiores de ambos os painéis. Para o painel B-3-20, a resistência foi alcançada com a aplicação de uma força da ordem de 45,4 kN, enquanto que para o painel B-3-40 isso ocorreu com uma força de 88,5 kN. Como a resistência às tensões normais foi alcançada antes da resistência ao cisalhamento, presume-se que a ruptura dos

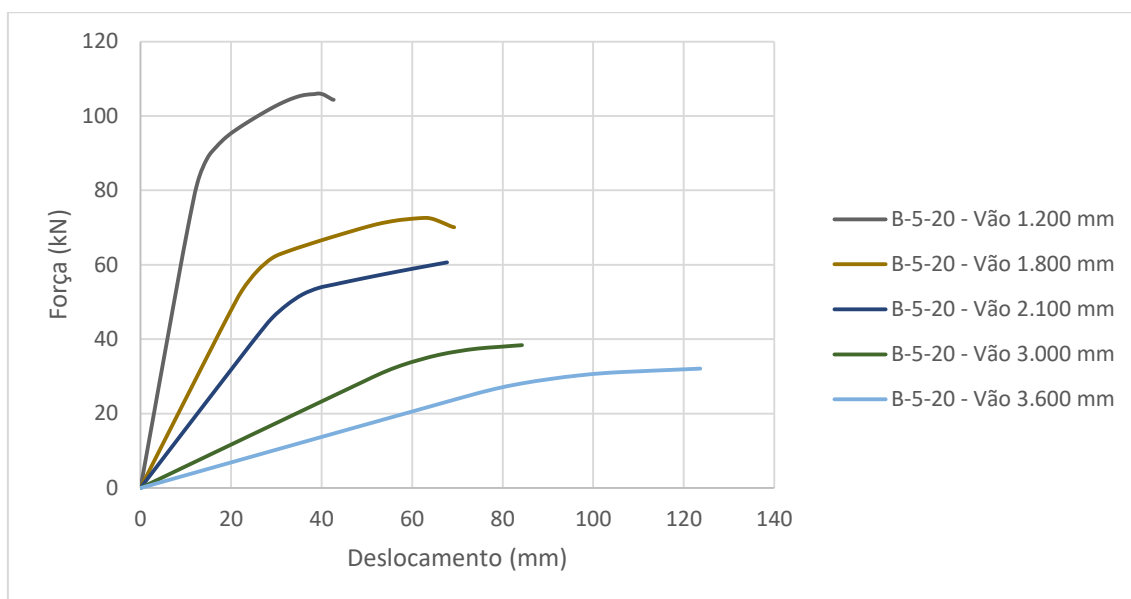
painéis estaria associada às tensões normais decorrentes da flexão, observadas as limitações das modelagens desenvolvidas. O escoamento, por sua vez, foi associado à aplicação de uma força de 67,8 kN, para o painel B-3-40; de 45,7 kN, para o painel B-5-20; e de 34,7 kN, para o painel B-3-20, seguindo a mesma tendência das tensões associadas à ruptura.

Deve-se observar ainda que as forças aplicadas necessárias para se alcançar tanto as tensões de escoamento quanto as resistências da madeira no painel B-3-40 foram muito superiores às relacionadas a esses fenômenos nos painéis B-3-20 e B-5-20. Esses resultados vão ao encontro dos obtidos por Sikora, McPolin e Harte (2016) e Pang e Jeong (2019), demonstrando que o aumento da espessura total dos painéis contribui com o crescimento em sua capacidade de carga. Além disso, apontam para o fato de que o aumento da espessura total do painel está associado a um aumento de sua capacidade de suportar esforços antes de se atingir o regime plástico, ou seja, sem se deformar de forma permanente.

6.5 GRUPO 4 – PAINÉIS COM VÃOS DE TAMANHOS DIFERENTES

Neste grupo de simulações são comparados os resultados para os painéis B-5-20, com espessura de 100 mm, porém com diferentes vãos: 1.200 mm, 1.800 mm, 3.000 mm e 3.600 mm, além do já analisado painel B-5-20 com vão de 2.100 mm. Para as propriedades mecânicas da madeira, foi adotada como referência a classe C16 da norma CEN EN 338:2009.

A Figura 6.37 ilustra os gráficos de Força x Deslocamento para esses cinco painéis. Vale salientar que o painel B-5-20 com vão de 2.100 mm tem sua curva de Força x Deslocamento também ilustrada na mesma figura e faz parte da discussão dos resultados deste grupo, embora os detalhes dos resultados desse painel tenham sido apresentados no Grupo 1.

Figura 6.37 – Gráfico de Força x Deslocamento para os painéis do Grupo 4

Fonte: O Autor

Vale salientar que o painel B-5-20 com vão de 2.100 mm tem sua curva de Força x Deslocamento ilustrada na Figura 98 e faz parte da discussão dos resultados deste grupo, embora os detalhes dos resultados desse painel tenham sido apresentados no Grupo 1.

A Tabela 6.9 apresenta os resultados de Rigidez Efetiva calculados por meio da metodologia apresentada na norma CEN EN 408:2004 e pela Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas. A tabela apresenta ainda a diferença percentual entre esses valores.

Tabela 6.9 –Rigidezes Efetivas obtidas pela norma CEN EN 408:2004 e pela Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas

Configuração	Rigidez Efetiva CEN EN 408:2004 (N mm ²)	Rigidez Efetiva Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas (N mm ²)	Diferença (%)
B-5-20 1.200 mm	2,1625 10 ¹¹	2,1756 10 ¹¹	0,61
B-5-20 1.800 mm	2,5960 10 ¹¹	2,6001 10 ¹¹	0,16
B-5-20 2.100 mm	2,7147 10 ¹¹	2,7135 10 ¹¹	-0,04
B-5-20 3.000 mm	2,9100 10 ¹¹	2,8924 10 ¹¹	-0,61
B-5-20 3.600 mm	2,9692 10 ¹¹	2,9496 10 ¹¹	-0,66

Fonte: O Autor

A Tabela 6.10 apresenta os resultados de Rigidez Efetiva calculados por meio da metodologia apresentada na norma CEN EN 408:2004. Também apresenta os resultados de Rigidez Efetiva calculados pela Teoria do Compósito e pela Analogia do Cisalhamento, que por serem valores coincidentes em todos os casos foram agrupados em uma única coluna. A tabela apresenta ainda a diferença percentual entre os valores da segunda e da terceira colunas.

Tabela 6.10 – Rigidezes Efetivas obtidas pela norma CEN EN 408:2004 e pela Teoria do Compósito e pela Analogia do Cisalhamento

Configuração	Rigidez Efetiva CEN EN 408:2004 (N mm ²)	Rigidez Efetiva Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas (N mm ²)	Diferença (%)
B-5-20 1.200 mm	2,1625 10 ¹¹	3,1162 10 ¹¹	44,10
B-5-20 1.800 mm	2,5960 10 ¹¹	3,1162 10 ¹¹	20,04
B-5-20 2.100 mm	2,7147 10 ¹¹	3,1162 10 ¹¹	14,79
B-5-20 3.000 mm	2,9100 10 ¹¹	3,1162 10 ¹¹	7,08
B-5-20 3.600 mm	2,9692 10 ¹¹	3,1162 10 ¹¹	4,95

Fonte: O Autor

Comparando-se os resultados das cinco geometrias analisadas no Grupo 4, percebeu-se que os valores de Rigidez Efetiva obtidos por meio da Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas se mostraram mais próximos, em todos os casos, daqueles obtidos por meio do método proposto pela CEN EN 408:2004.

Isso se mostrou especialmente verdadeiro para o painel com o menor vão, de 1.200 mm, em que o Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas apresentou uma diferença de 0,61%, enquanto a Teoria do Compósito e a Analogia do Cisalhamento se mostraram menos precisas, com diferenças de 44,10%. Essa diferença não era esperada, tendo em vista que a Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas não leva em consideração as deformações por cisalhamento, que são justamente as preponderantes nos painéis com uma menor relação L/h.

Outro ponto de destaque é que tanto a Teoria do Compósito quanto a Analogia do Cisalhamento apresentaram valores iguais, entre si, em todos os casos, além de

apresentarem o mesmo valor para todas as configurações. Como a medida do vão não é utilizada nesses cálculos, esse resultado já era esperado. Comparando-se os valores calculados por meio dessas duas metodologias e os resultados obtidos pelo método da norma CEN EN 338:2004, percebeu-se que eles se mostraram significativamente mais precisos para os painéis com maior relação L/h.

Deve-se salientar, todavia, que nem todas as geometrias adotadas nas análises respeitam as especificações dos ensaios de flexão da CEN EN 408:2004, pois essa norma estabelece que a medida do vão entre os apoios não pode ser inferior a 15 vezes a espessura do painel e nem superior a 21 vezes esse mesmo valor. Desse modo, considerando-se que a espessura do painel é de 100 mm, os resultados experimentais para os vãos de 1.200 mm, 3.000 mm e 3.600 mm devem ser observados com cuidado, tendo em vista que não respeitam a geometria indicada na norma para o ensaio de flexão.

A Tabela 6.11 apresenta os resultados relacionados à resistência dos painéis do Grupo 4: forças associadas ao escoamento e à ruptura e momentos fletores associados à ruptura para as diferentes configurações.

Tabela 6.11 – Resultados relacionados à resistência nos painéis do Grupo 4

Configuração	Força associada ao escoamento (kN)	Força associada à ruptura (kN)	Momento fletor de ruptura (kNm)
B-5-20 – 1.200 mm	82,1	94,0*	20,21
B-5-20 – 1.800 mm	53,1	70,4	22,70
B-5-20 – 2.100 mm	45,7	60,5	22,69
B-5-20 – 3.000 mm	30,9	38,3	20,49
B-5-20 – 3.600 mm	26,6	–	–

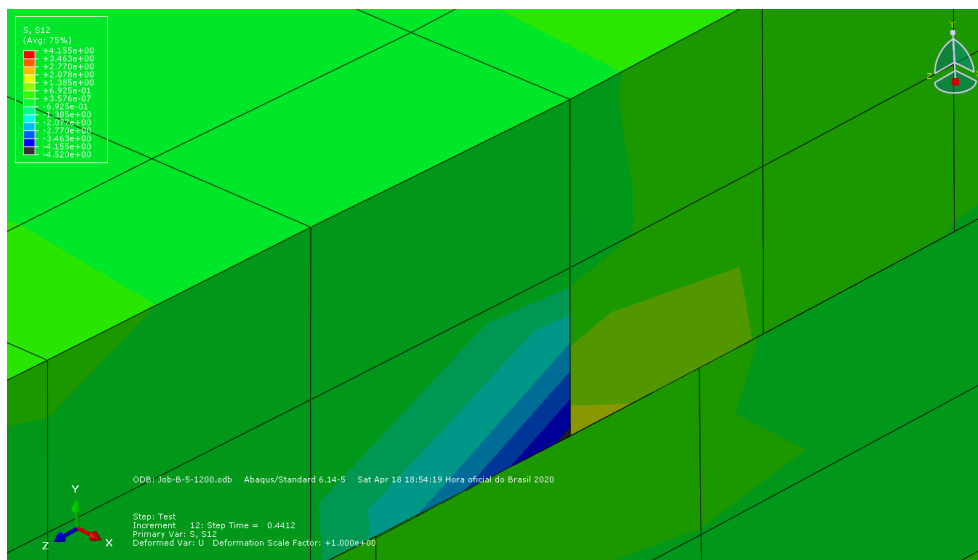
* Ruptura por cisalhamento;

Fonte: O Autor

No que diz respeito à distribuição de tensões, os resultados demonstram que a tentativa de se prever o modo de falha dos painéis com base na modelagem pode levar a resultados incorretos. O painel B-5-20 com vão de 1.200 mm, por exemplo, deveria ter sua ruptura associada ao *rolling shear*, com base nos resultados de O’Ceallaigh, Sikora e Harte (2018), que ensaiaram painéis com essa mesma geometria. Nas simulações, porém, esse modo de falha não foi identificado. Ao contrário, percebeu-se a ocorrência de tensões de cisalhamento concentradas na camada superior, assim como tensões normais nas camadas mais externas do painel.

A Figura 6.38 ilustra um dos pontos onde a resistência ao cisalhamento é alcançada, no painel B-5-20-1.200mm, no incremento 12 da simulação, correspondente à aplicação de uma força de 94 kN.

Figura 6.38 – Ponto onde é alcançada a tensão de cisalhamento no painel B-5-20 com vão de 1.200 mm

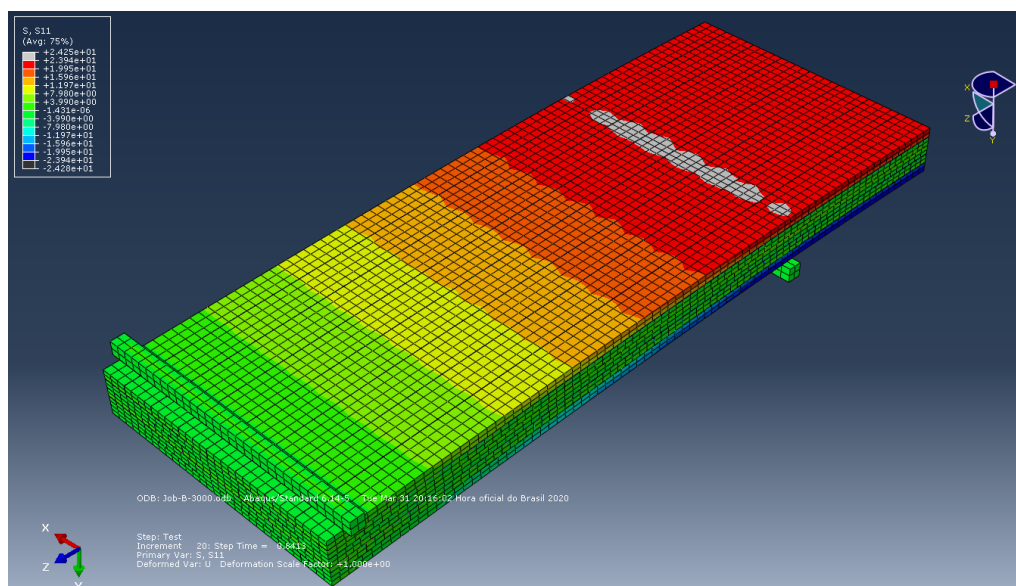


Fonte: O Autor

Para os demais painéis, percebeu-se que a resistência na direção paralela às fibras foi alcançada nas lamelas das camadas externas, à exceção do painel com vão de 3.600 mm. Para esse painel, a simulação foi interrompida antes que a resistência fosse alcançada, pois os incrementos de deslocamento foram grandes demais para as propriedades definidas para a modelagem.

A Figura 6.39 ilustra as tensões atuantes no painel B-5-20 com vão de 3.000 mm no incremento 20 da simulação, correspondente à aplicação de uma força de 38,3 kN, com as lamelas de sua camada inferior alcançando a resistência à tração.

Figura 6.39 – Resistência à tração alcançada no painel B-5-20 com vão de 3.000 mm



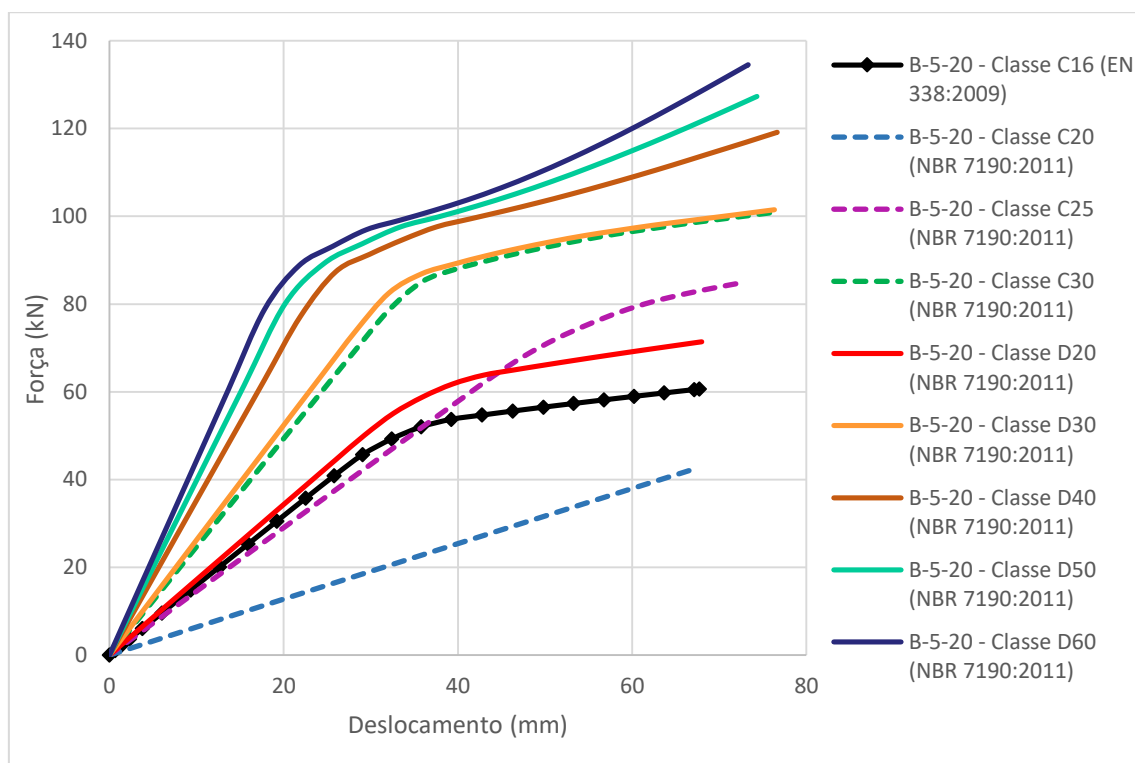
Fonte: O Autor

É interessante se observar a variação no valor das forças aplicadas necessárias para se alcançar a resistência nos painéis, fenômeno associado a sua ruptura, na análise de resultados. O valor dessas forças variou conforme o tamanho do vão, sendo ambos inversamente proporcionais. Quando analisados os momentos fletores atuante nos painéis, entretanto, percebeu-se que foram obtidos valores próximos nas quatro configurações em que se conseguiu estimar a ruptura dos painéis.

6.6 GRUPO 5 – PAINÉIS CONSTITUÍDOS POR DIFERENTES CLASSES DE RESISTÊNCIA DA MADEIRA

Neste grupo de simulações são comparados os resultados para os painéis B-5-20, com espessura de 100 mm e vão de 2.100 mm. Foram analisados painéis simulados com as propriedades mecânicas correspondentes às diferentes classes de resistência, conforme o Projeto de Revisão da NBR 7190:2011, que compreende as classes: C20, C25, C30, D20, D30, D40, D50 e D60.

A Figura 6.40 ilustra os gráficos de Força x Deslocamento para esses oito painéis, bem como para o painel B-5-20 com vão de 2.100 mm e madeira da classe C16 conforme a norma CEN EN 338:2009.

Figura 6.40 – Gráfico de Força x Deslocamento para os painéis do Grupo 5

Fonte: O Autor

A Tabela 6.12 apresenta os resultados de Rigidez Efetiva calculados por meio da metodologia apresentada na norma CEN EN 408:2004 e pela Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas. A tabela apresenta ainda a diferença percentual entre esses valores.

Tabela 6.12 – Rigidezes Efetivas obtidas pela norma CEN EN 408:2004 e pela Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas

Classe de Resistência	Rigidez Efetiva CEN EN 408:2004 (N mm ²)	Rigidez Efetiva Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas (N mm ²)	Diferença (%)
C20	1,0898 10 ¹¹	1,0923 10 ¹¹	0,23
C25	2,4879 10 ¹¹	2,4797 10 ¹¹	-0,33
C30	4,2280 10 ¹¹	4,2132 10 ¹¹	-0,35
D20	2,9423 10 ¹¹	2,9222 10 ¹¹	-0,68
D30	4,4926 10 ¹¹	4,4602 10 ¹¹	-0,72
D40	6,0472 10 ¹¹	5,9982 10 ¹¹	-0,81
D50	6,8230 10 ¹¹	6,7672 10 ¹¹	-0,82
D60	7,6035 10 ¹¹	7,5362 10 ¹¹	-0,89

Fonte: O Autor

A Tabela 6.13 apresenta os resultados de Rigidez Efetiva calculados por meio da metodologia apresentada na norma CEN EN 408:2004. Também apresenta os resultados de Rigidez Efetiva calculados pela Teoria do Compósito e pela Analogia do Cisalhamento, que por serem valores coincidentes em todos os casos foram agrupados em uma única coluna. A tabela apresenta ainda a diferença percentual entre os valores da segunda e da terceira colunas.

Tabela 6.13 – Rigidezes Efetivas obtidas pela norma CEN EN 408:2004 e pela Teoria do Compósito e pela Analogia do Cisalhamento

Classe de Resistência	Rigidez Efetiva CEN EN 408:2004 (N mm ²)	Rigidez Efetiva Teoria do Compósito e Analogia do Cisalhamento (N mm ²)	Diferença (%)
C20	1,0898 10 ¹¹	1,1637 10 ¹¹	6,78
C25	2,4879 10 ¹¹	2,8262 10 ¹¹	13,60
C30	4,2280 10 ¹¹	4,8212 10 ¹¹	14,03
D20	2,9423 10 ¹¹	3,3445 10 ¹¹	13,67
D30	4,4926 10 ¹¹	5,1048 10 ¹¹	13,63
D40	6,0472 10 ¹¹	6,8650 10 ¹¹	13,53
D50	6,8230 10 ¹¹	7,7452 10 ¹¹	13,52
D60	7,6035 10 ¹¹	8,6253 10 ¹¹	13,44

Fonte: O Autor

A exemplo do observado nas demais análises, os resultados analíticos para as rigidezes efetivas, obtidos com base na simulação numérica e calculados segundo o equacionamento da CEN EN 408:2004, apresentaram maior concordância com as previsões realizadas pela Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas. Em todos os oito casos, as diferenças foram inferiores a 1%. A Teoria do Compósito e a Analogia do Cisalhamento também ofereceram resultados pouco discrepantes, com diferenças entre 6,78% e 14,03%, quando comparados aos calculados pela CEN EN 408:2004.

No que diz respeito à Rigidez Efetiva dos painéis, percebe-se que ela é proporcional ao Módulo de Elasticidade do material das lamelas, sem que essa relação de proporcionalidade se mostrasse diferente nas classes de coníferas e de folhosas. Desse modo, os valores de Rigidez Efetiva se mostraram muito diferentes entre si, com diferenças proporcionais às observadas entre os Módulos de Elasticidade correspondentes às classes de resistências.

Na Tabela 6.14 são apresentados os principais resultados das simulações desenvolvida, para cada uma das classes de resistência analisadas: a força associada ao início do escoamento da madeira, a força associada à sua ruptura e a máxima tensão de *rolling shear* identificadas nas lamelas transversais.

Tabela 6.14 – Forças associadas ao escoamento e à ruptura e máximas tensões de *rolling shear* para as diferentes classes de resistência

Classes de Resistência	Força associada ao escoamento (kN)	Força associada à ruptura (kN)	Tensão de <i>rolling shear</i> máxima (MPa)
C20	–	–	0,672
C25	68,3	84,8	0,945
C30	78,5	100,2	0,957
D20	55,1	71,3	0,945
D30	82,4	100,9	0,976
D40	97,6	118,5	0,961
D50	105,0	–	0,960
D60	116,7	–	0,956

Fonte: O Autor

Para os deslocamentos analisados, não houve escoamento para o painel simulado com madeira de Classe C20. Isso possivelmente se deve ao fato de o Módulo de Elasticidade desse material ter um valor relativamente pequeno (3.500 MPa, contra 8.500 MPa para a Classe C25 e 9.500 MPa para a Classe D20) e uma resistência característica à compressão paralela às fibras de 20 MPa. Como as tensões causadas por uma deformação são proporcionais ao Módulo de Elasticidade do material, as tensões desenvolvidas no painel de Classe C20 são relativamente menores, não sendo suficientes para alcançar a tensão de escoamento. Para fins de comparação, proporcionalmente, para a Classe C20, a resistência característica à compressão na direção paralela às fibras corresponde a 0,57% do valor de seu Módulo de Elasticidade, enquanto que para a Classe C25 essa relação é de 0,29% e, para a Classe D20, de 0,21%.

Ao se analisar as curvas de Força x Deslocamento, percebe-se um comportamento muito semelhante para os painéis de classe C30 e D30, com suas curvas quase se sobrepondo. Isso se deve à proximidade entre os valores de suas propriedades mecânicas.

Observou-se uma discrepância, para os painéis das classes D40, D50 e D60, entre o ponto em que se verificou a ocorrência de tensões correspondentes ao escoamento na direção paralela às fibras, nas simulações, e o início do comportamento não-linear nos

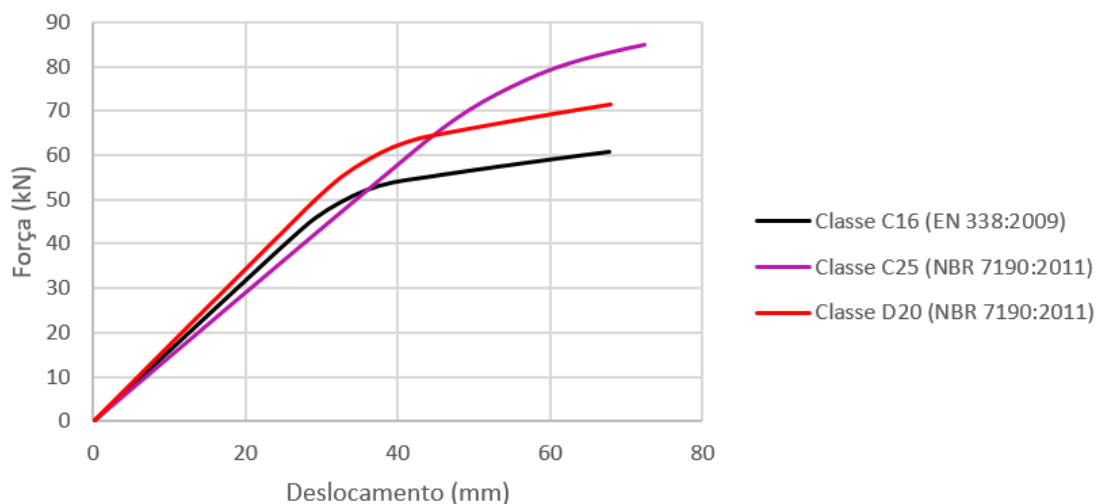
gráficos de Força x Deslocamento. Isso indica que as não-linearidades, para os painéis dessas classes de resistência, podem estar associadas a fenômenos que ocorrem em outras direções do material.

Considerando-se essa questão, vale complementar que, a exemplo do observado por Hochreiner *et al.* (2013), para as classes de resistência C30, D30, D40, D50 e D60, as diferenças entre as propriedades mecânicas da madeira não influenciaram de modo significativo no ponto em que se iniciaram as não-linearidades no diagrama Força x Deslocamento. Embora as diferenças entre a Rigidez Efetiva dos painéis sejam bastante perceptíveis, as forças correspondentes ao início do comportamento plástico, considerando-se os gráficos para essas cinco configurações, têm valores bastante próximos, entre 85 e 90 kN.

Para os painéis de Classe D50 e D60 a resistência à tração na direção paralela às fibras não foi alcançada durante as simulações. Isso decorre de uma limitação da modelagem desenvolvida, pois os deslocamentos necessários para dar continuidade à simulação eram grandes demais para as propriedades de contato adotadas.

Considerando-se que a geometria dos painéis utilizados nas simulações das classes de resistência era a mesma do painel B-5-20, simulado com as características da madeira C16, conforme a classificação da CEN EN 338:2009, foi possível se comparar o comportamento mecânico desse painel ao das simulações de algumas classes de resistência. As classes C25 e D20 forneceram os resultados mais próximos aos observados para o painel de classe C16, como é ilustrado na Figura 6.41.

Figura 6.41 – Gráficos de Força x Deslocamento para os painéis B-5-20 com propriedades das classes C16, C25 e D20



Fonte: O Autor

Comparando-se a Rigidez Efetiva dos painéis, o de Classe C16 apresentou um valor de $2,7147 \cdot 10^{11}$ N mm². O de Classe C25, por sua vez, apresentou $2,4879 \cdot 10^{11}$ N mm², enquanto que o de Classe D20 apresentou $2,9423 \cdot 10^{11}$ N mm². Esses valores correspondem, respectivamente, a 91,65% e 108,38% da Rigidez Efetiva do painel de Classe C16. Desse modo, com madeira da classe D20, a menos resistente entre as folhosas do Projeto de Revisão da ABNT NBR 7159:2011, seria possível se produzir um painel com características superiores às da Classe C16 da CEN EN 338:2009. Resultados semelhantes seriam possíveis com madeira da Classe C25.

O’Ceallaigh, Sikora e Harte (2018) e Sikora, McPolin e Harte (2016) obtiveram resultados compatíveis com as exigências estruturais mínimas com a produção de painéis de CLT utilizando madeira de *Sitka Spruce* (*Picea sitchensis*) da Classe C16. Considerando-se as conclusões desses autores, seria possível, a princípio, o emprego de madeira das classes C25, C30 ou de qualquer outra classe de folhosas, para a produção em larga escala de painéis de Madeira Laminada Colada Cruzada.

6.7 ANÁLISES ADICIONAIS RELACIONADAS À RIGIDEZ E À RESISTÊNCIA DOS PAINÉIS SIMULADOS

Nesta subseção são discutidos fatores que afetam a Rigidez Efetiva e a Resistência dos painéis, tendo como base os resultados das simulações de diferentes grupos de painéis, com a mesma espessura total e o mesmo vão. Primeiramente se discute como a influência da porcentagem da área da seção transversal correspondente às lamelas orientadas paralelamente à direção principal e o número de camadas de madeira dos painéis influencia em sua Rigidez Efetiva. Posteriormente, analisa-se como essas mesmas variáveis interferem na resistência dos painéis e nas forças associadas ao início de seu escoamento.

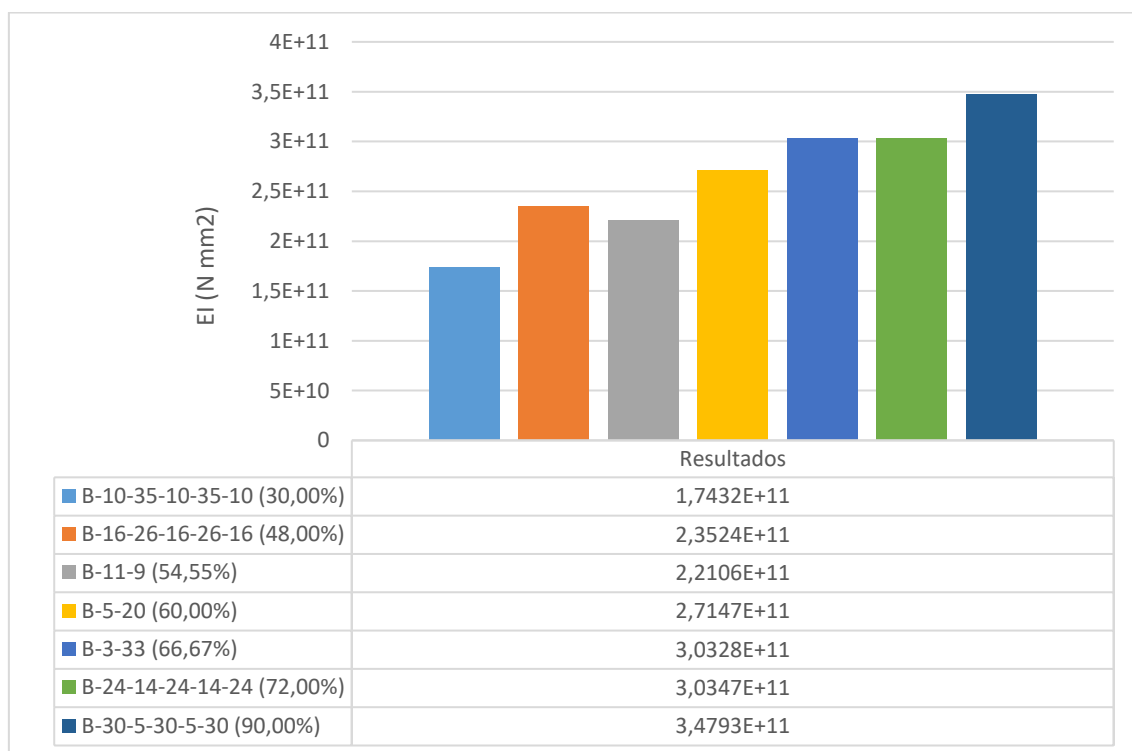
6.7.1 Influência das Lamelas Orientadas Paralelamente à Direção Principal e do Número de Camadas na Rigidez Efetiva dos Painéis de CLT

Em todas as simulações analisadas, a Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas apresentou resultados mais próximos, para a estimativa da Rigidez Efetiva, daqueles obtidos com a aplicação do método proposto pela CEN EN 408:2004. Essa constatação

contrariou as expectativas, tendo em vista que a Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas não leva em consideração as deformações por cisalhamento. Quando analisadas apenas a Teoria do Compósito e a Analogia do Cisalhamento, constatou-se que os resultados de Rigidez Efetiva obtidos com esses métodos foram mais próximos dos obtidos com o método da CEN EN 408:2004 para painéis com um maior número de camadas e com uma maior relação L/h.

Na Figura 6.42 são comparados os valores obtidos para a Rigidez Efetiva de cada um dos painéis de vão 2.100 mm, por meio do método da CEN EN 408:2004. Nesse gráfico os resultados são apresentados em ordem crescente de proporção da área da seção transversal composta por lamelas orientadas paralelamente à direção principal do painel.

Figura 6.42 – Rigidezes Efetivas dos painéis com vão de 2.100 mm



Fonte: O Autor

Como se pode perceber, existe uma relação direta entre a porcentagem da seção transversal composta por lamelas orientadas paralelamente à direção principal do painel e a sua Rigidez Efetiva. Por exemplo, comparando-se os painéis B-10-35-10-35-10, com apenas 30% da área da seção transversal orientada paralelamente à direção principal e o painel B-30-5-30-5-30, com 90% da área da seção transversal com essa orientação, essa

relação fica evidente, uma vez que a Rigidez Efetiva deste painel é duas vezes maior que a daquele, para um mesmo volume de madeira.

Entretanto, essa relação não é válida para todas as configurações geométricas, dependendo também do número de camadas dos painéis. Por exemplo, comparando-se o painel B-11-9 com o painel B-16-26-16-26-16, percebe-se que a Rigidez Efetiva deste é superior à daquele. Mesmo se corrigindo esse valor em função da diferença de altura dos painéis, tendo em vista que o painel B-11-9 tem 99 mm de espessura, contra 100 mm do painel B-16-26-16-26, este continua apresentando uma maior Rigidez Efetiva.

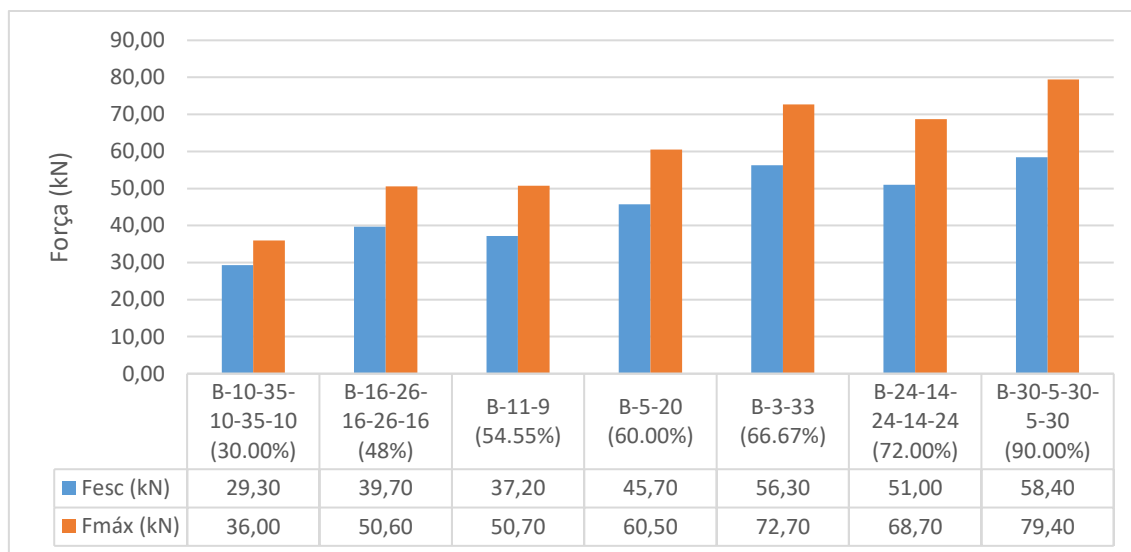
De modo semelhante, percebe-se que a Rigidez Efetiva do painel B-3-33 é muito parecida com a do painel B-24-14-24-14-24. Neste caso, porém, corrigindo-se o valor do painel B-3-33 para uma espessura total de 100 mm, obtém-se uma Rigidez Efetiva superior à do painel B-24-14-24-14-24.

Com isso, percebe-se que, além da proporção da seção transversal composta por lamelas orientadas paralelamente à direção principal dos esforços, a espessura das camadas com essa orientação também influencia no valor da Rigidez Efetiva. Desse modo, é possível se identificar que o aumento da espessura das camadas orientadas paralelamente à direção principal da flexão tem um efeito positivo no aumento da Rigidez Efetiva dos painéis. Além disso, não se percebeu um aumento na Rigidez Efetiva associado a um maior número de camadas nos painéis.

6.7.2 Influência das Lamelas Orientadas Paralelamente à Direção Principal e do Número de Camadas na Resistência e Ponto de Escoamento dos Painéis de CLT

Com base na ocorrência do escoamento da madeira e da ruptura dos painéis, é possível se estabelecer comparações entre aqueles que possuem a mesma espessura e o mesmo vão. Na Figura 6.43 são ilustradas e comparadas as forças aplicadas responsáveis por provocar o escoamento do material e a ruptura em cada um dos painéis com vão de 2.100 mm. Nesse gráfico, os resultados são apresentados em ordem crescente de proporção das lamelas orientadas paralelamente à direção principal.

Figura 6.43 – Forças associadas ao escoamento da madeira e à ruptura estimada dos painéis com vão de 2.100 mm



Fonte: O Autor

O gráfico indica que, entre os painéis analisados, a configuração B-30-5-30-5-30 é capaz de suportar a aplicação de uma força de maior intensidade antes de a madeira entrar em escoamento. Na simulação, essa força é de 58,40 kN. O mesmo acontece com relação à ruptura, que ocorreu com uma força de 79,40 kN.

Percebe-se ainda que a configuração B-10-35-10-35-10 apresenta o pior desempenho entre os painéis analisados. Para fins de comparação, a força associada à ruptura deste painel, de 36 kN, é inferior à associada ao escoamento do material de todos os demais painéis.

Assim como no caso da Rigidez Efetiva, percebe-se que existe uma tendência de que os painéis com uma maior porcentagem da área da seção transversal composta por lamelas orientadas paralelamente à direção principal apresentem uma maior resistência. Esse resultado não é válido para todas as geometrias, dependendo também do número de camadas dos painéis, o que pode ser percebido ao se comparar os resultados do painel B-3-33 com os do painel B-24-14-24-14-24. O painel B-3-33 apresenta uma menor porcentagem de lamelas orientadas paralelamente à direção principal (66,67%), quando comparado ao painel B-24-14-24-14-24 (72,00%) e, no entanto, apresenta resistências superiores, tanto quando se leva em conta o escoamento (56,30 kN, contra 51,00 kN) quanto a ruptura (72,70 kN, contra 68,70 kN).

Para todas essas configurações as forças associadas à ruptura foram entre 23% e 36% superiores àquelas responsáveis pelo escoamento do material dos painéis. Não se

verificou nenhuma relação entre essas diferenças de valor e o número de camadas dos painéis.

Desse modo, percebe-se que, para uma mesma quantidade de material e para um processo de fabricação semelhante, é possível se obter resultados superiores, alterando-se apenas a espessura das lamelas. Percebeu-se que o aumento da espessura das lamelas orientadas paralelamente à direção principal está associado a uma maior resistência dos painéis, ao passo em que um aumento no número de camadas não apresentou nenhuma relação com melhoras no desempenho dos painéis.

7 CONCLUSÃO

A Madeira Laminada Colada Cruzada vem se mostrando um produto extremamente inovador, permitindo a ampliação do uso da madeira como material estrutural e a execução de edifícios de múltiplos pavimentos de forma mais racional e sustentável. Tendo em vista a vocação do Brasil para a produção de madeira e o fato de a indústria de CLT ser ainda bastante incipiente no país, existe um vasto campo a ser explorado no estudo e no desenvolvimento dessa tecnologia com vistas à realidade local. Nesse contexto, a pesquisa acadêmica tem um papel fundamental, a exemplo da associação entre a academia e da indústria que, nos anos 1990, possibilitou o desenvolvimento desse produto.

Diante disso, o presente trabalho teve como objetivo a investigação do comportamento de painéis de CLT submetidos à flexão causada por forças aplicadas perpendicularmente ao plano. Para isso, foram utilizadas simulações numéricas, considerando modificações tanto na geometria dos painéis quanto nas propriedades mecânicas da madeira utilizada em sua produção.

Nesse intuito, o *software* Abaqus foi utilizado para se desenvolver uma modelagem, com base no Método dos Elementos Finitos, capaz de simular o comportamento mecânico dos painéis de CLT com um custo computacional adequado. As modelagens foram aprimoradas por meio de calibrações, comparando-se os resultados das simulações a resultados experimentais de outros autores. Apesar de algumas limitações, como a consideração de comportamentos idênticos na tração e na compressão, e de uma grande dispersão dos resultados experimentais utilizados nas calibrações, a modelagem desenvolvida foi capaz de representar de forma realista o comportamento dos painéis. Com base nas calibrações desenvolvidas, foi possível se extrapolar a capacidade da modelagem de representar o comportamento real dos painéis para outras configurações geométricas e outras propriedades mecânicas do material.

No que diz respeito à estimativa da Rigidez Efetiva, foram comparados os valores obtidos por meio do método proposto na CEN EN 408:2004 aos obtidos utilizando-se outros três métodos: a Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas (*Gamma Method*), a Teoria do Compósito (*k-Method*) e a Analogia do Cisalhamento (*Shear Analogy*). Em todos os casos a Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas apresentou os resultados com menores diferenças em relação aos obtidos pela CEN EN 408:2004, que se basearam nas modelagens. Para todos os casos analisados a Teoria do Compósito e a Analogia do

Cisalhamento apresentaram resultados iguais, possivelmente pela consideração dos mesmos módulos de elasticidade para todas as camadas (simetria).

O primeiro grupo de simulações desenvolvidas teve como objetivo verificar o comportamento de painéis com a mesma espessura total, mas com números de camadas diferentes. Para isso, foram simulados painéis de 3 (B-3-33), 5 (B-5-20) e 11 (B-11-9) camadas. Verificou-se que tanto as Rigidezes Efetivas dos painéis quanto as forças associadas às suas rupturas são influenciadas pelo número de camadas. O painel B-3-33 apresentou a maior Rigidez Efetiva ($3,033 \cdot 10^{11} \text{ N mm}^2$) e sua ruptura esteve associada a uma maior força aplicada (72,7 kN). Em todos os casos se observou que a ruptura estaria associada à tração na direção paralela às fibras.

O segundo grupo de simulações desenvolvidas teve como objetivo verificar o comportamento de painéis com a mesma espessura total, mas formados por camadas de diferentes espessuras. Para isso, foram simulados painéis com cinco camadas, tendo as configurações B-10-35-10-35-10, B-16-26-16-26-16, B-24-14-24-14-24 e B-30-5-30-5-35. Verificou-se que tanto a Rigidez Efetiva quanto a resistência dos painéis são positivamente influenciadas pelo aumento na espessura das camadas com orientação paralela à direção principal dos esforços. O painel B-30-5-30-5-30 apresentou a maior Rigidez Efetiva ($3,4793 \cdot 10^{11} \text{ N mm}^2$), e foi o painel para o qual se estimou que o escoamento e a ruptura ocorreriam com a aplicação de maiores forças (de 58,4 kN e de 79,4 kN, respectivamente). A partir das simulações realizadas se utilizando uma mesma força, de 30 kN, para todos os painéis, constatou-se que nos painéis com camadas transversais menos espessas as tensões de *rolling shear* atuantes eram menores, o que, juntamente com sua maior resistência ao *rolling shear*, mostrou-se mais uma característica positiva associada a essa geometria.

O terceiro grupo de simulações desenvolvidas teve como objetivo verificar o comportamento de painéis com espessuras totais diferentes, com as configurações B-3-20 e B-3-40. Para se respeitar as disposições da CEN EN 408:2004, o painel B-3-20 foi simulado com um vão de 1.260 mm, ao passo em que para o painel B-3-40 se adotou um vão de 2.520 mm. Constatou-se que a maior espessura do painel B-3-40 lhe conferiu uma Rigidez Efetiva muito superior a dos painéis B-5-20 e B-3-20, com um valor de $5,399 \cdot 10^{11} \text{ Nmm}^2$. Comparando-se os valores da Rigidez Efetiva para os painéis simulados aos valores obtidos experimentalmente por outros autores, foi possível se avaliar a precisão das simulações desenvolvidas, com diferenças inferiores a 15% com relação aos resultados experimentais, confirmando que a modelagem foi capaz de representar o

comportamento mecânico dos painéis. Verificou-se ainda que um aumento na espessura total dos painéis contribui com sua capacidade de carga.

O quarto grupo de simulações corresponde a painéis de cinco camadas de 20 mm de espessura, com diferentes tamanhos de vão: 1.200 mm, 1.800 mm, 3.000 mm e 3.600 mm. Verificou-se que o painel com vão de 1.200 mm teve sua ruptura associada ao cisalhamento, embora fosse esperada uma ruptura por *rolling shear*, indicando que a modelagem se mostra, por vezes, incapaz de prever o modo de falha dos painéis. Os demais painéis tiveram sua ruptura associada à tração na direção paralela às fibras. Embora as forças associadas à ruptura dos painéis tivessem valores substancialmente diferentes, os momentos fletores associados às suas rupturas apresentaram valores próximos (entre 20,21 kN m e 22,70 kN m).

O quinto grupo de simulações corresponde a painéis de cinco camadas de 20 mm de espessura, com as propriedades mecânicas da madeira correspondentes às diferentes classes de resistência apresentadas no Projeto de Revisão da NBR 7190:2011. Percebeu-se que a Rigidez Efetiva dos painéis é diretamente proporcional ao Módulo de Elasticidade da madeira, sem diferenças encontradas nessa relação para coníferas e folhosas. No painel da classe C20 não foi identificada a ocorrência de regime plástico, o que pode estar associado a um baixo Módulo de Elasticidade para uma tensão de escoamento relativamente alta. Constatou-se que para as classes D40, D50 e D60 as não-linearidades do diagrama Força x Deslocamento estavam associadas a outros fenômenos, como as deformações por *rolling shear*, e não apenas às tensões normais nas lamelas. Nos painéis das classes C30, D30, D40, D50 e D60 se observou que, apesar das Rigidezes Efetivas serem muito diferentes, as forças associadas ao início das não-linearidades no diagrama Força x Deslocamento apresentaram valores próximos, entre 85 kN e 90 kN.

Deve-se salientar que as modelagens desenvolvidas não foram capazes de representar o comportamento pós-pico dos painéis, tampouco representaram sua ruptura, e que as estimativas de seu modo de falhas nem sempre se mostraram precisas. As informações relacionadas à ruptura foram obtidas pela comparação da resistência do material com as tensões atuantes em cada incremento das simulações. Essa metodologia, embora forneça uma aproximação do comportamento dos painéis, não se mostrou eficiente para identificar as rupturas por *rolling shear*, e por isso os resultados associados aos modos de falha devem ser interpretados com cautela. Além disso, o tamanho dos incrementos utilizados nas simulações e seu número possivelmente influenciou na estimativa das forças relacionadas à ruptura e ao escoamento da madeira dos painéis.

Incrementos menores certamente forneceriam resultados mais precisos, aumentando, contudo, o custo computacional das simulações.

De modo geral, identificou-se uma tendência de que a Rigidez Efetiva dos painéis estivesse associada à porcentagem da área de sua seção transversal composta por lamelas orientadas paralelamente à direção principal. Outro fator capaz de influenciar na Rigidez Efetiva dos painéis é o número de camadas, tendo se percebido que um aumento no número de camadas foi associado a uma redução na Rigidez Efetiva. Esse resultado se deveu, em parte, à incapacidade de a modelagem desenvolvida representar o efeito de homogeneização nos painéis de CLT.

No que diz respeito ao escoamento e à resistência, a mesma tendência foi observada. A porcentagem da área da seção transversal formada por lamelas orientadas paralelamente à direção principal esteve associada a uma maior capacidade de os painéis suportarem a aplicação de forças sem haver o escoamento ou a ruptura do material. Novamente, percebeu-se um efeito negativo do aumento do número de camadas, devendo-se fazer, mais uma vez, a ressalva a respeito da incapacidade da simulação de captar o efeito de homogeneização nos painéis.

Por meio dos resultados obtidos nesta pesquisa, ficam evidentes as variações no comportamento mecânico dos painéis de CLT proporcionadas por alterações em sua geometria e nas propriedades mecânicas da madeira empregada. Vale salientar que as conclusões obtidas carecem, em sua maior parte, de comprovação experimental. Além disso, os resultados obtidos dizem respeito somente a painéis cuja flexão causada por forças aplicadas perpendicularmente ao plano e ocorrendo apenas em apenas uma direção.

7.1 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 comportamento de painéis de CLT submetidos à flexão na direção perpendicular ao plano e a influência de alterações em sua geometria e nas propriedades dos materiais, seguem algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Repetição das simulações desenvolvidas neste trabalho utilizando incrementos menores e malhas mais refinadas no *software* Abaqus, a fim de aumentar a precisão das respostas;

- Realização de simulações utilizando o critério de falha de Tsai-Wu ou ainda outros critérios de falha que possam ser empregados para simular o comportamento ortotrópico da madeira;
- Realização de simulações variando as espessuras das camadas de madeira para painéis com largura e comprimento iguais, submetidos à flexão perpendicular ao plano nas duas direções, em vez de painéis com flexão ocorrendo em apenas uma direção;
- Realização de simulações utilizando propriedades mecânicas de algumas espécies de madeira obtidas experimentalmente, em vez de se utilizar as propriedades tabeladas das classes de resistência;
- Realização de ensaios físicos com painéis de CLT de diferentes classes de resistência e com as variações propostas, neste trabalho, para sua geometria.

REFERÊNCIAS

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **ANSI/APA PRG 320:** Standard for performance-rated cross-laminated timber. Tacoma, 2018.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **Technical Topics:** TT-082B – True and Apparent Modulus of Elasticity. Tacoma, 2012.

ASSAN, A. E. **Método dos Elementos Finitos – Primeiros Passos.** 2. Ed. Campinas: Unicamp, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190** – Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de Norma NBR 7190** – Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 2011.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D2555-6:** Standard Practice for Establishing Clear Wood Strength Values. West Conshohocken, 2006.

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.

BRANDNER, R. **Production and technology of cross laminated timber (CLT): a state-of-the-art report.** Relatório – Institute of Timber Engineering and Wood Technology, Graz University of Technology, Graz, 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/261884030_Production_and_Technology_of_Cross_Laminated_Timber_CLT_A_state-of-the-art_Report. Acesso em: 10 dez. 2018.

BRANDNER, R.; FLATSCHER, G.; RINGHOFER, A.; SCHICKHOFER, G.; THIEL, A. Cross Laminated Timber (CLT): Overview and Development. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlim, v.4, i.3, p.331-351, 2016. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00107-015-0999-5>. Acesso em: 14 jul. 2018.

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: 14 jul. 2018.

BUCK, D.; WANG, X.; HAGMAN, O.; GUSTAFSSON, A. Bending Properties of Cross Laminated Timber (CLT) with a 45° Alternating Layer Configuration.

BioResources, Raleigh, v.11(2), p.4633-4644, 2016. Disponível em: 10.15376/biores.11.2.4633-4644. Acesso em: 12 jul. 2018.

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 12 abr. 2019.

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

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

COLLINS, J. A. **Failure of Materials in Mechanical Design – Analysis, Prediction, Prevention**. 2. ed. Nova York: John Wiley & Sons, 1993.

CRESPELL, P.; GAGNON, S. 2010. Cross Laminated Timber: a Primer. **FPInnovations**, Vancouver, Canada. Disponível em <https://fpinnovations.ca/media/factsheets/Documents/cross-laminated-timber-the-book.pdf>. Acesso em: 19 ago. 2018.

COOK, R. D. **Finite Element Modeling for Stress Analysis**. 1. ed. Nova York: John Wiley & Sons, 1995.

DASSAULT SYSTEMES, **Abaqus 6.14 – Analysis User’s Guide**. 2014.

EBNER, G. CLT production is expected to double until 2020. **Timber-Online.net**, 2017. Disponível em: <https://www.timber-online.net/holzprodukte/2017/06/brettspertholz-produktion-in-europa---20162020.html>. Acesso em: 20 ago. 2018.

ELEMENT 5. **Products**. Disponível em: <https://elementfive.co/products/>. Acesso em 21 ago. 2018.

ESPINOZA, O.; TRUJILLO, V. R.; MALLO, M. F. L.; BUEHLMANN, U. Cross Laminated Timber: Status and Research Needs in Europe. **BioResources**, Raleigh, v.11, p.281-295, 2016a. Disponível em: <https://doaj.org/article/b227189739e5485c9027c0081c5dd518?frbrVersion=2>. Acesso em: 12 jul. 2018.

ESPINOZA, O.; BUEHLMANN, U.; MALLO, M. F. L.; TRUJILLO, V. R. Identification of Research Areas to Advance the Adoption of Corss-Laminated Timber in North America. **BioProducts Business**, v.1, n.5, p.60-72. 2016b. Disponível em: <http://biobus.swst.org/index.php/bpbj/article/view/20/7>. Acesso em: 27 set. 2019.

ESPINOZA, O.; BUEHLMANN, U. Cross-Laminated Timber in the USA: Opportunity for Hardwoods? **Current Forestry Reports**, v.4, i.1, p.1-12. 2018. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40725-018-0071-x>. Acesso em: 28set. 2018.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **CEN EN 338**: Structural Timber - Strength classes. Brussels, 2009.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **CEN EN 408**: Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties. Brussels, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **CEN EN 408**: Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties. Brussels, 2010.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **CEN EN 16351**: Timber structures – Cross laminated timber – Requirements. Brussels, 2015.

FALK, R. H. Wood as a Sustainable Building Material. In: Forest Products Laboratory. **Wood Handbook – Wood as an Engineering Material**. Wisconsin: Estados Unidos, 2010. cap. 1.

FELLMOSER, P.; BLASS, H. J. Influence of rolling shear modulus on strength and stiffness of structural bonded timber elements. In: Working Commission W18 – Timber Structures, 2004, Edinburgh. **Proceedings**, Edinburgh, 2004. Disponível em: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000003734>. Acesso em 18 jul. 2019.

FINK, G.; KOHLER, J.; BRANDNER, R. Application of European design principles to cross laminated timber. **Engineering Structures**, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.02.081>. Acesso em: 14 jul. 2018.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Forest products market discussions**. Engelberg, 2015.

FPInnovations. Introduction to cross-laminated timber. In: FPInnovations. **CLT Handbook: cross-laminated timber**. Québec: Canada, 2011. cap. 1.

FRANKE, S. Mechanical properties of beech CLT. In: World Conference on Timber Engineering, 2016, Viena. **WCTE e-book**. Technische Universität Wien: 2016. Disponível em: <http://repositum.tuwien.ac.at/obvutwoa/content/titleinfo/1528439>. Acesso em 05 out. 2019.

FRANZONI, L.; LEBEÉ, A.; LYON, F.; FORET, G. Influence of orientation and number of layers on the elastic response and failure modes on CLT floors: modeling and parameter studies. **European Journal of Wood and Wood Products**, v.74, p.671-

684, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00107-016-1038-x>. Acesso em 2 mai. 2019.

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 mai. 2019.

GANGNON, S.; POPOVSKI, M. Structural design of cross-laminated timber elements. In: FPInnovations. **CLT Handbook: cross-laminated timber**. Revisão de Kevin D. Below, Robert Malczyk e David Moses. Québec: Canada, 2011. cap. 3.

GLASS, S. V.; ZELINKA, S. L. Moisture Relations and Physical Properties of Wood. In: Forest Products Laboratory. **Wood Handbook – Wood as an Engineering Material**. Wisconsin: Estados Unidos, 2010. cap. 4.

HOCHREINER, G.; FÜSSL, J.; SERRANO, E.; EBERHARDSTEINER, J. Influence of Wooden Board Strength Class on the Performance of Cross-laminated Timber Plates Investigated by Means of Full-field Deformation Measurements. **Strain**, v.50, p.161-173, 2013. Disponível em: [10.1111/str.12077](https://doi.org/10.1111/str.12077). Acesso em 17 jul. 2019.

JELEC, M.; VAREVAC, D.; RAJCIC, V. Cross-laminated timber (CLT) – a state of the art report. **Gradevinar – Journal of the Croatian Association of Civil Engineers**, v.70, i.2, p.70-95, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.14256/JCE.2071.2017>. Acesso em 09 jul. 2019.

JOHANSSON, M. Structural properties of sawn timber and engineered wood products. In: Swedish Forest Industries Federation. **Design of Timber Structures – Volume 1: Structural aspects of timber construction**. 2 Ed. Swedish Forest Industries Federation. Estocolmo: Suécia, 2007. cap. 2.

KRAMER, A.; BARBOSA, A. R.; SINHA, A. Viability of Hybrid Poplar in ANSI Approved Cross-Laminated Timber Applications. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Corvallis, v.26(7), p.508-515, 2014. Disponível em: <https://ascelibrary.org.ez79.periodicos.capes.gov.br/doi/full/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0000936>. Acesso em: 20 jul. 2018.

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.

LIAO, Y., TU, D., ZHOU, J., ZHOU, H., YUN, H., GU, J., HU, C. Feasibility of manufacturing cross-laminated timber using fast-grown small diameter eucalyptus lumbers. **Construction and Building Materials**, v.132, p.508-515, 2017. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816319249?via%3Dihub>. Acesso em: 14 jul. 2018.

MALLO, M. F. L.; ESPINOZA, O. Awareness, perceptions and willingness to adopt Cross-Laminated Timber by the architecture community in the United States. **Journal of Cleaner Production**, v.94, p.198-210, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.01.090>. Acesso em: 13 jul. 2018.

MALO, K. A.; ANGST, V. Wood based panels. In: LEONARDO DA VINCI. **Handbook 1: timber structures**. Educational Materials for Designing and Testing of Timber Structures (TEMIS). 2008. cap. 5.

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.

MOHAMMAD, M.; MUNOZ, W. Connections in cross-laminated timber buildings. In: FPInnovations. **CLT Handbook: cross-laminated timber**. Revisão de Pierre Quenneville e David Moses. Québec: Canada, 2011. cap. 5.

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.

O'CEALLAIGH, C.; SIKORA, K.; HARTE, A. M. The influence of Panel Lay-Up on the Characteristic Bending and Rolling Shear Strength of CLT. **Buildings**, v.8, i.9, n.114, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings8090114>. Acesso em: 28 nov. 2019.

PANG, S, J.; JEONG, G. Y. Effects of combinations of lamina grade and thickness, and span-to-depth ratios on bending properties of cross-laminated timber (CLT) floor. **Construction and Building Materials**, v. 222, p.142-151, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.012>. Acesso em 30 set. 2019.

PETRAUSKI, S. M. F. C.; MARQUES, G. M. M.; SILVA, M. L.; CORDEIRO, S. A.; SOARES, N. S. Competitividade do Brasil no Mercado Internacional de Madeira Serrada. **CERNE**, v.18, n.1, p.99-104, jan./mar. 2012. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-77602012000100012>. Acesso em 17 ago. 2018.

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

PORTEOUS, J.; KERMANI, A., **Structural Timber Design to Eurocode 5**. 1. Ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2007.

REWOOD. **Cases – Portal do Ingá**. Disponível em: <https://rewood.com.br/cases/portal-inga>. Acesso em 27 nov. 2019.

SIKORA, K. S.; MCPOLIN, D. O.; HARTE, A. M. Effects of the thickness of cross-laminated timber (CLT) panels made from Irish Sitka spruce on mechanical performance in bending and shear. **Construction and Building Materials**, v. 116, p.141-150, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.145>. Acesso em 10 dez. 2018.

STARK, N. M.; CAI, Z.; CARLL, C. Wood-Based Composite Materials. In: Forest Products Laboratory. **Wood Handbook – Wood as an Engineering Material**. Wisconsin: Estados Unidos, 2010. cap. 11.

STAUDER, C. **Cross-Laminated Timber – An analysis of the Austrian industry and ideas for fostering its development in America**. 2013. 31 f. Research (Austrian Marshall Plan Foundation Scholarship) – Fachhochschule Salzburg, University of Applied Sciences.

THE ENGINEERED WOOD ASSOCIATION (APA). **Glulam – Product Guide**. Tacoma, 2017.

THE ENGINEERED WOOD ASSOCIATION (APA). Products. **Oriented Strand Board (OSB)**. 2018. Disponível em: <https://www.apawood.org/osb>. Acesso em: 18 ago. 2018.

UGURAL. A. C.; FENSTER, S. K. **Advanced Strength and Applied Elasticity**. Nova York: Elsevier, 1978.

ULTRALAM. Products. **Laminated Veneer Lumber LVL**. 2018. Disponível em: <http://ultralam.com/products/laminated-veneer-lumber-lvl/>. Acesso em: 16 ago. 2018.

WALLNER-NOVAK, M.; KOPPELHUBER, J.; POCK, K. **Cross-Laminated Timber Structural Design – Basic design and engineering principles according to Eurocode**. 1. Ed. Immenstadt, Austria: proHolz Austria, 2014.

WANG, B. J.; PIRVU, C.; LUM, C. Cross-laminated timber manufacturing. In: FPInnovations. **CLT Handbook: cross-laminated timber**. Revisão de Romulo C. Casilla, Y. H. Chui e Bob Knudson. Québec: Canada, 2011. cap. 2.

WIEMANN, M. C. Characteristics and Availability of Commercially Important Woods. In: Forest Products Laboratory. **Wood Handbook – Wood as an Engineering Material**. Wisconsin: Estados Unidos, 2010. cap. 2.

WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. **Our Common Future**, 1987.

ZHOU, Q.; GONG, M.; CHUI, Y. H.; MOHAMMAD, M. Measurement of rolling shear modulus and strength of cross laminated timber fabricated with black spruce. **Construction and Building Materials**, v. 64, p. 379-386, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.039>. Acesso em 10 dez. 2018.

ZHU, E. C.; GUAN, Z. W.; RODD, P. D.; POPE, D. J. Finite element modelling of OSB webbed timber I-beams with interactions between openings. **Advances in Engineering Software**, v. 36, p.797-805, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2005.03.027>. Acesso em 18 ago. 2018.

APÊNDICE A – EXEMPLO DE DETERMINAÇÃO DA RIGIDEZ EFETIVA DE PAINÉIS DE CLT

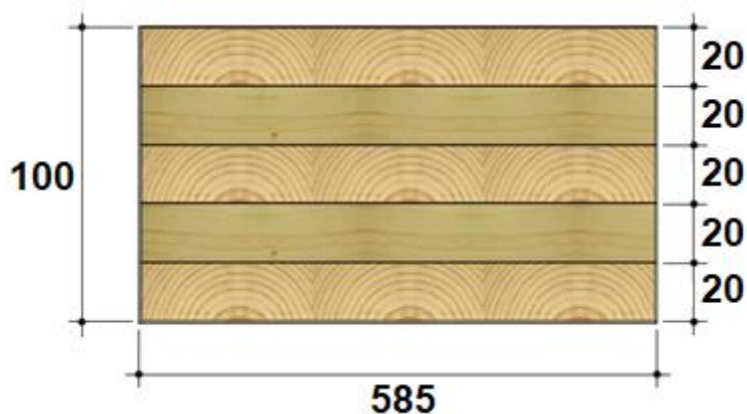
Nesta seção são apresentados os cálculos empregados para a determinação da Rigidez Efetiva de um painel de CLT de cinco camadas. Primeiramente, apresenta-se a determinação experimental com base na norma CEN EN 408:2004, com os resultados obtidos por meio da simulação numérica. Em seguida, a Rigidez Efetiva para o mesmo painel é obtida por meio dos três métodos analíticos apresentados no referencial teórico: a Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas (*Gamma Method*), a Teoria do Compósito (*k-Method*) e a Analogia de Cisalhamento (*Shear Analogy*).

A.1 DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO MÓDULO DE ELASTICIDADE

A determinação experimental do Módulo de Elasticidade seguiu a metodologia apresentada na norma CEN EN 408:2004. Desse modo, as simulações realizadas no software Abaqus tiveram como objetivo reproduzir tanto as propriedades mecânicas e geométricas dos painéis de CLT quanto as condições estabelecidas pela norma para a realização dos ensaios de flexão em quatro pontos.

O exemplo apresentado neste apêndice corresponde aos procedimentos adotados para a simulação e a análise de um painel B-5-20, ou seja, um painel de CLT formado por cinco camadas, cada uma delas com 20 mm de espessura. A Figura A.1 mostra a geometria da seção transversal desse painel.

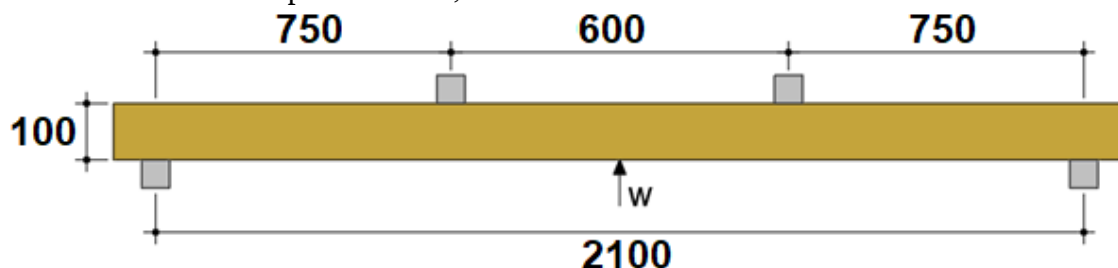
Figura A.1 – Seção transversal de um painel de CLT B-5-20, com dimensões em milímetros



Fonte: adaptado de Gangnon e Popovski (2011)

Na Figura A.2, por sua vez, são apresentadas as configurações geométricas do ensaio de flexão em quatro pontos para o painel B-5-20, em conformidade com as disposições da norma CEN EN 408:2004.

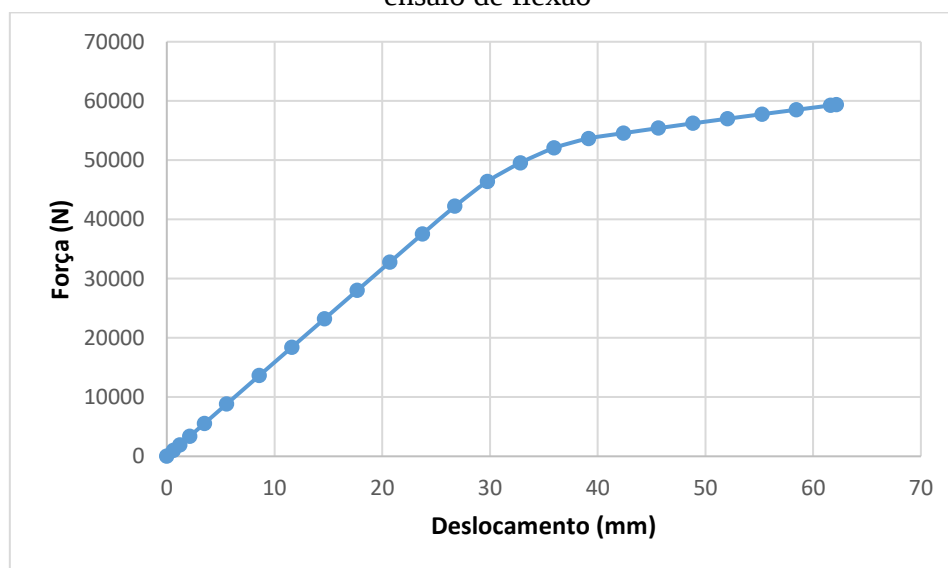
Figura A.2 – Configurações geométricas do ensaio de flexão em quatro pontos para o painel B-520, com dimensões em milímetros



Fonte: o autor

A Figura A.3, por sua vez, traz um gráfico de Força x Deslocamento com resultados da modelagem utilizada para simular o ensaio de flexão.

Figura A.3 – Gráfico de Força x Deslocamento obtido pela simulação numérica do ensaio de flexão



Fonte: o autor

Do trecho linear desse gráfico foram extraídos dois pares de Força x Deslocamento, para serem utilizados na Equação [3.1]: forças F_1 e F_2 , respectivamente 5.550 N e 32.791 N; e deslocamentos w_1 e w_2 , respectivamente 3,49 mm e 20,71 mm.

Assim, para o cálculo do Módulo de Elasticidade Global, aplicou-se a Equação A.1:

$$E_{m,g} = \frac{L^3(F_2 - F_1)}{bh^3(w_2 - w_1)} \left[\left(\frac{3a}{4L} \right) - \left(\frac{a}{L} \right)^3 \right]$$

$$E_{m,g} = \frac{2.100^3(32.791 - 5.550)}{585 * 100^3(20,71 - 3,49)} \left[\left(\frac{3 * 750}{4 * 2.100} \right) - \left(\frac{750}{2.100} \right)^3 \right]$$

$$E_{m,g} = 5.568,62 \text{ MPa}$$

Em seguida, calculando-se o Momento de Inércia da seção transversal do painel, pode-se obter a rigidez efetiva.

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{585 * 100^3}{12} = 4,875 * 10^7 \text{ mm}^4$$

$$EI_{exp} = E_{m,g}I = 5.568,62 * 4,875 * 10^7 = 2,7147 * 10^{11} \text{ N mm}^2$$

A.2 MÉTODOS ANALÍTICOS PARA A DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE

Nesta seção é mostrada a aplicação de cada um dos três métodos analíticos empregados para a estimativa do Módulo de Elasticidade à flexão de painéis de CLT na direção perpendicular ao plano apresentados na revisão bibliográfica do trabalho. A Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas (*Gamma Method*), a Teoria do Compósito (*k-Method*) e a Analogia de Cisalhamento foram aplicadas para a obtenção do Módulo de Elasticidade e da Rigidez Efetiva do mesmo painel B-5-20 cujos resultados da simulação já foram apresentados.

A.2.1 Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas (*Gamma Method*)

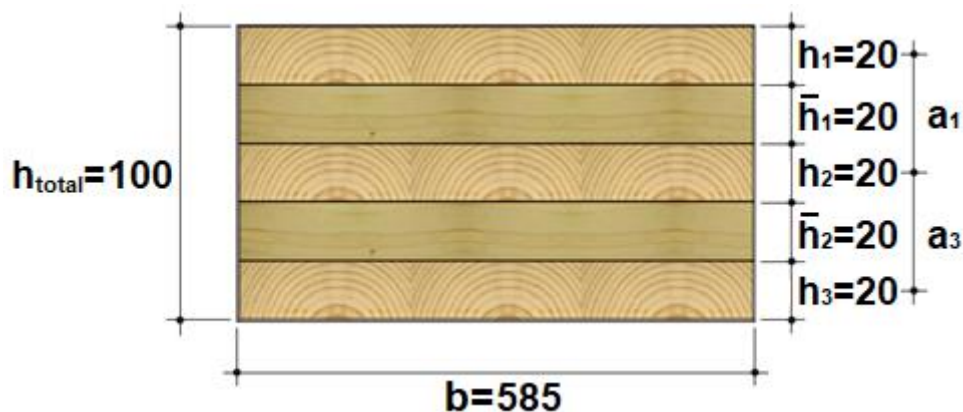
Na Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas a Rigidez Efetiva dos painéis é calculada por meio da Equação [3.3], apresentada na revisão bibliográfica do trabalho e aqui reproduzida.

$$(EI)_{eff} = \sum_{i=1}^n (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2)$$

Para a obtenção de cada uma das variáveis presentes nessa equação, é necessário se obter as propriedades mecânicas do painel (E_i , I_i e A_i), os fatores γ_i e os valores de a_i , obtidos em função da geometria do painel e dos valores de γ_i .

A Figura A.4 mostra a seção transversal do painel B-5-20 com algumas indicações de dimensões utilizadas na Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas.

Figura A.4 – Seção transversal de um painel de CLT B-5-20, com indicações utilizadas no *Gamma Method* e dimensões em milímetros



Fonte: adaptado de Gangnon e Popovski (2011)

Propriedades geométricas e mecânicas do painel:

$h_1 = 20 \text{ mm}$	$E_1 = 8.000 \text{ MPa}$
$\bar{h}_1 = 20 \text{ mm}$	$\bar{E}_1 = 8.000 \text{ MPa}$
$h_2 = 20 \text{ mm}$	$E_2 = 8.000 \text{ MPa}$
$\bar{h}_2 = 20 \text{ mm}$	$\bar{E}_2 = 8.000 \text{ MPa}$
$h_3 = 20 \text{ mm}$	$E_3 = 8.000 \text{ MPa}$
$h_{total} = 100 \text{ mm}$	$G_R = 50 \text{ MPa}$
$L = 2.100 \text{ mm}$	
$b = 585 \text{ mm}$	

$$A_1 = h_1 * b = 20 * 585 = 11.700 \text{ mm}^2 \quad I_1 = \frac{b * h_1^3}{12} = \frac{585 * 100^3}{12} = 390.000 \text{ mm}^4$$

$$A_2 = h_2 * b = 20 * 585 = 11.700 \text{ mm}^2 \quad I_2 = \frac{b * h_2^3}{12} = \frac{585 * 100^3}{12} = 390.000 \text{ mm}^4$$

$$A_3 = h_3 * b = 20 * 585 = 11.700 \text{ mm}^2 \quad I_3 = \frac{b * h_3^3}{12} = \frac{585 * 100^3}{12} = 390.000 \text{ mm}^4$$

Cálculo dos fatores γ_i :

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \left(\pi^2 \frac{E_1 A_1}{L^2} \frac{\bar{h}_1}{G_R b} \right)} = \frac{1}{1 + \left(\pi^2 \frac{8.000 * 11.700}{2.100^2} \frac{20}{50 * 100} \right)} = 0,8747$$

$$\gamma_2 = 1$$

Para painéis com 5 camadas de mesma espessura,

$$\gamma_2 \text{ é } 1.$$

$$\gamma_3 = \frac{1}{1 + \left(\pi^2 \frac{E_3 A_3}{L^2} \frac{\bar{h}_2}{G_R b} \right)} = \frac{1}{1 + \left(\pi^2 \frac{8.000 * 11.700}{2.100^2} \frac{20}{50 * 100} \right)} = 0,8747$$

Cálculo dos valores a_i :

$$a_1 = \frac{h_1}{2} + \bar{h}_1 + \frac{h_2}{2} = \frac{20}{2} + 20 + \frac{20}{2} = 40 \text{ mm}$$

$$a_2 = \frac{\gamma_1 E_1 A_1 \left(\frac{h_1}{2} + \bar{h}_1 + \frac{h_2}{2} \right) - \gamma_3 E_3 A_3 \left(\frac{h_2}{2} + \bar{h}_2 + \frac{h_3}{2} \right)}{\sum_i^3 (\gamma_i E_i A_i)} =$$

$$= \frac{0,8747 * 8.000 * 11.700 * \left(\frac{20}{2} + 20 + \frac{20}{2} \right) - 0,8747 * 8.000 * 11.700 * \left(\frac{20}{2} + 20 + \frac{20}{2} \right)}{0,8747 * 8.000 * 11.700 + 1 * 8.000 * 11.700 + 0,8747 * 8.000 * 11.700} = 0$$

$$a_3 = \frac{h_1}{2} + \bar{h}_1 + \frac{h_2}{2} = \frac{20}{2} + 20 + \frac{20}{2} = 40 \text{ mm}$$

Assim, pode-se calcular o valor de EI_{eff} por meio da Equação 4:

$$(EI)_{\text{eff}} = \sum_{i=1}^n (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2) =$$

$$= 8.000 * 390.000 + 0,8747 * 8.000 * 11.700 * 40^2 + 8.000 * 390.000 + 8.000 * 390.000$$

$$+ 0,8747 * 8.000 * 11.700 * 40^2 = 2,7135 * 10^{11} \text{ N mm}^2$$

A.2.2 Teoria do Compósito (*k-Method*)

Na Teoria do Compósito, o Módulo de Elasticidade é calculado por meio da Equação [3.9] da revisão bibliográfica.

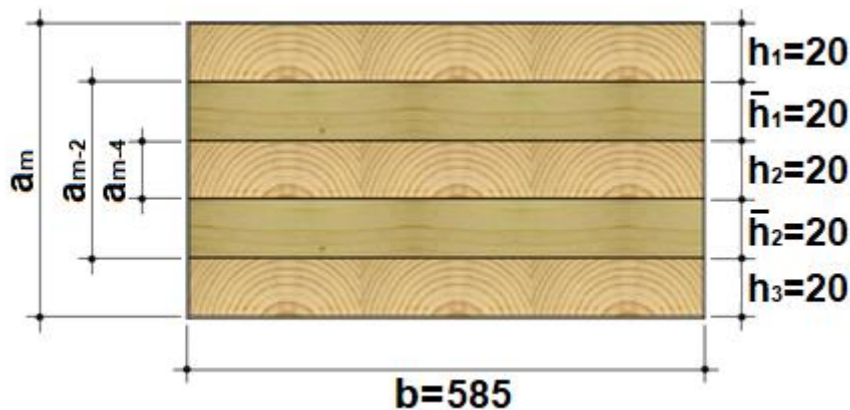
$$E_{b,0,\text{eff}} = E_0 k_i$$

O coeficiente k_i depende da situação de carregamento do painel analisado, conforme apresentado na Figura 3.4 da fundamentação teórica. Para o caso do painel B-5-20 analisado, considera-se que se trata de um painel de cinco camadas, submetido à flexão na direção perpendicular ao plano, com as camadas externas orientadas na direção paralelamente à direção principal. Desse modo, o coeficiente k_1 é obtido por meio da seguinte equação:

$$k_1 = 1 - \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0}\right) \frac{a_{m-2}^3 - a_{m-4}^3}{a_m^3}$$

O valor de E_0 corresponde ao Módulo de Elasticidade na direção paralela às fibras e diz respeito às camadas orientadas paralelamente à direção principal. O valor de E_{90} corresponde ao Módulo de Elasticidade na direção normal às fibras, considerando assim as camadas orientadas perpendicularmente à direção principal. Os valores de a dizem respeito à geometria da seção transversal do painel, como é apresentado na Figura A.5.

Figura A.5 – Seção transversal de um painel de CLT B-5-20, com indicações utilizadas no *k-Method* e dimensões em milímetros



Fonte: adaptado de Gangnon e Popovski (2011)

Desse modo, segue o cálculo de k_1 :

$$k_1 = 1 - \left[\left(1 - \frac{E_{90}}{E_0}\right) \frac{a_{m-2}^3 - a_{m-4}^3}{a_m^3} \right] = 1 - \left[\left(1 - \frac{8.27000}{8.27000}\right) \frac{60^3 - 20^3}{100^3} \right] = 0,799$$

Assim, segue o cálculo do Módulo de Elasticidade Efetivo:

$$E_{b,0,eff} = E_0 k_i = 8.000 * 0,799 = 6.392,16 \text{ MPa}$$

Multiplicando-se esse valor pelo Momento de Inércia da seção transversal, obtém-se a Rigidez Efetiva do painel.

$$(EI)_{eff} = E_{b,0,eff} I = 6.392,16 * \frac{585 * 100^3}{12} = 3,1162 * 10^{11} \text{ N mm}^2$$

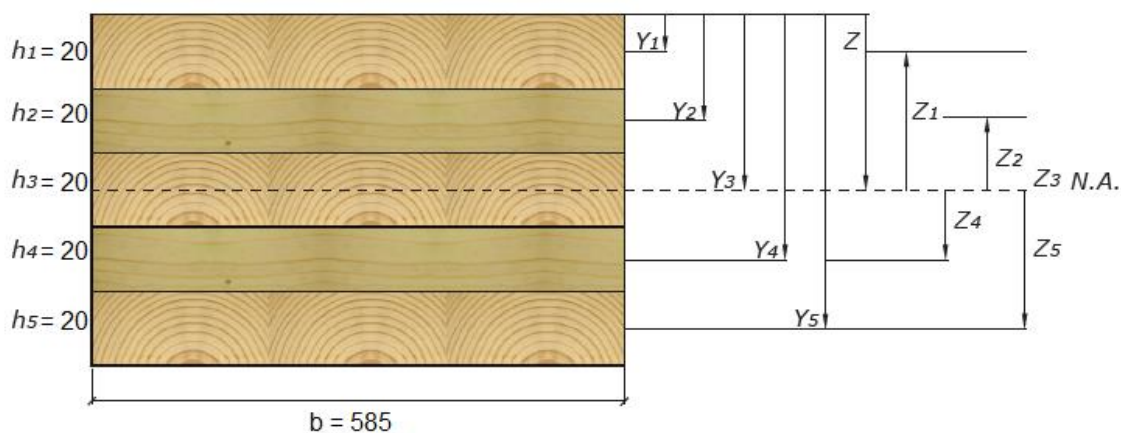
A.2.3 Analogia do Cisalhamento (por Kreuzinger)

Na Analogia do Cisalhamento, a Rigidez Efetiva é calculada por meio da Equação [3.13], apresentada no referencial teórico.

$$(EI)_{eff} = B_A + B_B = \sum_{i=1}^n E_i b_i \frac{h_i^3}{12} + \sum_{i=1}^n E_i A_i z_i^2$$

A Figura A.6 mostra algumas das indicações relacionadas à geometria da seção transversal e que são utilizadas no cálculo da Rigidez Efetiva.

Figura A.6 – Seção transversal de um painel de CLT B-5-20, com indicações utilizadas na Analogia do Cisalhamento e dimensões em milímetros



Fonte: adaptado de Gangnon e Popovski (2011)

Seguem as propriedades geométricas e mecânicas do painel:

$h_1 = 20 \text{ mm}$	$E_{0,1} = 8.000 \text{ MPa}$	$E_{90,1} = 270 \text{ MPa}$
$h_2 = 20 \text{ mm}$	$E_{0,2} = 8.000 \text{ MPa}$	$E_{90,2} = 270 \text{ MPa}$
$h_3 = 20 \text{ mm}$	$E_{0,3} = 8.000 \text{ MPa}$	$E_{90,3} = 270 \text{ MPa}$
$h_4 = 20 \text{ mm}$	$E_{0,4} = 8.000 \text{ MPa}$	$E_{90,4} = 270 \text{ MPa}$
$h_5 = 20 \text{ mm}$	$E_{0,5} = 8.000 \text{ MPa}$	$E_{90,5} = 270 \text{ MPa}$
$h_{total} = 100 \text{ mm}$		
$L = 2.100 \text{ mm}$		

$$b = 585 \text{ mm}$$

O cálculo da primeira parte da equação, correspondente à viga imaginária B_A, é realizado por meio da Equação [3.11].

$$B_A = \sum_{i=1}^n E_i I_i = \sum_{i=1}^n E_i b_i \frac{h_i^3}{12}$$

Desse modo, tem-se:

$$E_1 b_1 \frac{h_1^3}{12} = 8.000 * 585 * \frac{10^3}{12} = 3.120.000.000 \text{ N mm}^2$$

$$E_2 b_2 \frac{h_2^3}{12} = 270 * 585 * \frac{10^3}{12} = 105.300.000 \text{ N mm}^2$$

$$E_3 b_3 \frac{h_3^3}{12} = 8.000 * 585 * \frac{10^3}{12} = 3.120.000.000 \text{ N mm}^2$$

$$E_4 b_4 \frac{h_4^3}{12} = 270 * 585 * \frac{10^3}{12} = 105.300.000 \text{ N mm}^2$$

$$E_5 b_5 \frac{h_5^3}{12} = 8.000 * 585 * \frac{10^3}{12} = 3.120.000.000 \text{ N mm}^2$$

$$B_A = 9.570.600.000 \text{ N mm}^2 = 9,5706 * 10^9 \text{ N mm}^2$$

O cálculo da segunda parte da equação, correspondente à viga imaginária B_B, é realizado por meio da Equação [3.12].

$$B_B = \sum_{i=1}^n E_i A_i z_i^2$$

Para esta segunda parte do cálculo, primeiramente, é necessário se localizar a Linha Neutra da seção transversal, pelo procedimento apresentado a seguir:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i A_i) Y_i}{\sum_{i=1}^n (E_i A_i)}$$

$$(E_1 A_1) Y_1 = 8.000 * (20 * 585) * 10 = 936.000.000$$

$$(E_1 A_1) = 8.000 * (20 * 585) = 93.600.000$$

$$(E_2 A_2) Y_2 = 270 * (20 * 585) * 30 = 94.770.000$$

$$(E_2 A_2) = 270 * (20 * 585) = 3.159.000$$

$$(E_3 A_3) Y_3 = 8.000 * (20 * 585) * 50 = 4.680.000.000$$

$$(E_3 A_3) = 8.000 * (20 * 585) = 93.600.000$$

$$(E_4 A_4) Y_4 = 270 * (20 * 585) * 70 = 221.130.000$$

$$(E_4 A_4) = 270 * (20 * 585) = 3.159.000$$

$$(E_5 A_5) Y_5 = 8.000 * (20 * 585) * 90 = 8.424.000.000 \quad (E_5 A_5) = 8.000 * (20 * 585) = 93.600.000$$

$$\sum_{i=1}^5 (E_i A_i) Y_i = 14.355.900.000 \text{ N mm}$$

$$\sum_{i=1}^5 (E_i A_i) = 287.118.000 \text{ N}$$

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i A_i) Y_i}{\sum_{i=1}^n (E_i A_i)} = \frac{14.355.900.000}{287.118.000} = 50 \text{ mm}$$

Conhecendo-se a posição da linha neutra, é possível se calcular os valores de z_i , que correspondem à distância entre o centro geométrico de cada uma das camadas até a linha neutra. Com esse valor é possível se calcular a Rigidez Efetiva da viga imaginária B_B .

$$\begin{aligned} z_1 &= 40 \text{ mm} & E_1 A_1 z_1^2 &= 8.000 * (20 * 585) * (40)^2 = 1,4976 * 10^9 \text{ N mm}^2 \\ z_2 &= 20 \text{ mm} & E_2 A_2 z_2^2 &= 270 * (20 * 585) * (20)^2 = 1,2636 * 10^9 \text{ N mm}^2 \\ z_3 &= 0 \text{ mm} & E_3 A_3 z_3^2 &= 8.000 * (20 * 585) * (0)^2 = 0 \\ z_4 &= 20 \text{ mm} & E_4 A_4 z_4^2 &= 270 * (20 * 585) * (20)^2 = 1,2636 * 10^9 \text{ N mm}^2 \\ z_5 &= 40 \text{ mm} & E_5 A_5 z_5^2 &= 8.000 * (20 * 585) * (40)^2 = 1,4976 * 10^9 \text{ N mm}^2 \\ & & B_B &= 3,0205 * 10^{11} \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Daí, finalmente se calcula a Rigidez Efetiva do painel:

$$(EI)_{eff} = B_A + B_B = 9,5706 * 10^9 + 3,0205 * 10^{11} = 3,1162 * 10^{11} \text{ N mm}^2$$