UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

MARCOS CESAR DE MORAES PEREIRA

Painel estrutural de madeira maciça tipo DCLT: Estudo experimental, analítico e numérico de dois painéis de lamelas cruzadas com ligações cavilhadas

São Carlos
2019

MARCOS CESAR DE MORAES PEREIRA

Painel estrutural de madeira maciça tipo DCLT: Estudo experimental, analítico e numérico de dois painéis de lamelas cruzadas com ligações cavilhadas

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como requisito para a obtenção do Título de Doutor em Ciências.

Área de concentração: Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Carlito Calil Junior

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos

2019

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

D436p

de Moraes Pereira, Marcos Cesar
Painel estrutural de madeira maciça tipo DCLT: Estudo experimental, analítico e numérico de dois painéis de lamelas cruzadas com ligações cavilhadas / Marcos Cesar de Moraes Pereira; orientador Carlito Calil Junior. São Carlos, 2019.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais e Área de Concentração em Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2019.

1. Ligações cavilhadas. . 2. DCLT. . 3. Cavilha. . 4. Painel de Madeira Maciça. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **MARCOS CESAR DE MORAES PEREIRA.**

Título da tese: "Painel estrutural de madeira maciça tipo DCLT: estudo experimental, analítico e numérico de dois painéis de lamelas cruzadas com ligações cavilhadas".

Data da defesa: 13/06/2019.

Comissão Julgadora: **Resultado:**

Prof. Titular **Carlito Calil Junior** APROVADO
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Profa. Associada **Akemi Ino** APROVADO
(Instituto de Arquitetura e Urbanismo/IAU-USP)

Prof. Dr. **Francisco Antonio Romero Gesualdo** APROVADO
(Universidade Federal de Uberlândia/UFU)

Prof. Dr. **Adriano Wagner Ballarin** APROVADO
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP – Botucatu)

Prof. Dr. **Sergio Brazolin** APROVADO
(Instituto de Pesquisas Tecnológicas/IPT)

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais:
Prof. Associado **Rafael Salomão**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. titular **Murilo Araujo Romero**

À minha querida mãe, Nair de Moraes Pereira (*in memoriam*)

Ao meu amado pai, Walther Soares Pereira.

Ao meu querido irmão, André.

À Sabrina, minha linda e amada companheira.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus.

Ao professor Carlito Calil Junior pela atenção, amizade e orientação.

Ao colega e amigo Luc Arthur Pascal Sohier, da Universidade de Mons, que através do seu trabalho, contribuiu enormemente para a realização deste estudo.

Ao professor Thierry Descamps, da Universidade de Mons, que sempre nos auxiliou e esteve a disposição para todas as nossas dúvidas.

Ao professor Antonio Alves Dias, da Escola de Engenharia de São Carlos, EESC, que sempre esteve disponível e acessível para auxiliar nas mais diversas dificuldades.

Ao professor Heinrich Kreuzinger, da Universidade Técnica e Munique, por sua disponibilidade e boa vontade em cooperar com este estudo.

À empresa Berneck pelo fornecimento da madeira de *Pinus*.

À Escola de Engenharia de São Carlos, EESC, pela oportunidade de realização do curso de doutorado.

Ao departamento de Engenharia de Materiais e Manufatura e ao programa de pós-graduação em Ciências e Engenharia de Materiais.

Aos funcionários e técnicos do Laboratório de Madeira e Estruturas de Madeira, LaMEM, Jaime, Samuel, Silvio, Roberto, Arnaldo e Aparecido (*in memoriam*). Aos técnicos do Departamento de Engenharia de Estruturas (SET), Romeu, Dorival e Luiz Vareda.

Ao Luís Eduardo Bragatto, secretário do IBRAMEM, por toda ajuda durante o desenvolvimento desta tese.

A todos os amigos e colegas que no laboratório compartilham da experiência e dificuldades da pós-graduação, em especial ao Tiago Hendrigo de Almeida e ao Leonardo Marcolin.

À Sabrina, minha companheira de todas as horas.

À Nayara, Regina, Anselmo, Walther, André e demais familiares e amigos que ajudaram a superar os desafios da vida acadêmica.

À CAPES pelo apoio financeiro através de uma bolsa de estudo durante o tempo deste estudo.

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

EPÍGRAFE

“Hoje me sinto mais forte,
Mais feliz, quem sabe,
Só levo a certeza
De que muito pouco sei,
Ou nada sei”

(SATER e TEIXEIRA, 1990)

RESUMO

PEREIRA, M. C. M. **Painel estrutural de madeira maciça tipo DCLT:** Estudo experimental, analítico e numérico de dois painéis de lamelas cruzadas com ligações cavilhadas. 2019. 162 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

O setor da construção civil em países desenvolvidos tem caminhado no sentido da industrialização e da sustentabilidade dos materiais construtivos e estruturais, e neste sentido a construção em madeira maciça tem ganhado destaque. Produtos como painéis de CLT já estão sendo usados para construção de grandes prédios multipavimentos, porem outros produtos que utilizam o mesmo princípio da laminação cruzada vem ganhando espaço, como é o caso do painel de lamelas cruzadas cavilhadas, chamado de DCLT. Neste estudo, avaliou-se o comportamento estrutural de painéis DCLT com lamelas feitas com madeira de *Pinus Elliottii* e *Pinus Taeda* e cavilhas de pau-roxo (*Peltogyne spp., Leguminosae*), onde foi desenvolvido um modelo de ensaio específico para as ligações neste tipo de painel, simulações em software de elementos finitos no modelo de ensaio desenvolvido, ensaios de flexão nos painéis de tamanho estrutural e posterior comparação com os métodos analíticos de cálculo de painéis de lamelas cruzada. Os resultados obtidos para rigidez dos painéis foram de 727 e 1353 KNm² para o painel de 3 e 5 camadas, respectivamente. Os valores analíticos ficaram muito próximos aos valores experimentais, validando o novo procedimento de ensaio com o qual foi obtido o valor do módulo de deslizamento usado nos cálculos analíticos. Em termos de resistência, o painel de 3 camadas se mostrou mais resistente, pois com uma dimensão menor, resistiu proporcionalmente mais carga. De maneira geral, os painéis poderiam vencer vãos de até quatro metros suportando uma carga de 150 kg/m², mostrando ser um potencial produto para uso em obras residenciais.

Palavras-chave: Ligações cavilhadas. DCLT. CLT, Cavilha. Painel de Madeira Maciça

ABSTRACT

PEREIRA, M. C. M. **Massive wood structural panel type DCLT:** Experimental, analytical and numerical study of two panels of crossed lamellae with doweled connections. 2019. 162 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

The construction sector in developed countries has been moving towards industrialization and sustainability of construction and structural materials and in this sense solid wood construction has gained prominence. New products such as CLT panels are used for construction of multi-storey building, and other products that use the same principle of cross lamination have been gaining ground, as is the case of the dowel cross laminated timber panel, called DCLT. In this study, we evaluated the structural behavior of DCLT panels with *Pinus Elliottii* and *Pinus Taeda* wood lamellae and pau-roxo dowels (*Peltogyne spp., Leguminosae*), where a specific test model was developed for connections in this type. Finite element simulations was made for the developed test model, bending tests on structural size panels and subsequent comparison with the analytical methods of calculating cross sided panels. The results obtained for the sttiffiness of the panels were 727 and 1353 KNm² for the 3 and 5 layer panels, respectively. The analytical values were very close to the experimental values, validating the new test procedure with which the value of the slip module used in the analytical calculations was obtained. In terms of strength, the 3-layer panel was more resistant, because with a smaller size, it resisted proportionally more load. In general, the panels could cover span of up to four meters supporting a load of 150 kg/m², proving to be a potential product for use in residential works.

Keywords: Connection Dowels. DCLT. Dowels. Massive Wood Panel

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: a) Exemplos de cavilhas de madeira; b) modelos de cavilhas _____ 33

Figura 2: Vigas lameladas cavilhadas em pequena escala durante ensaio de flexão _____ 35

Figura 3: Esquema das etapas para cravação de cavilhas partidas_____ 35

Figura 4: Ensaio de um painel DLT _____ 36

Figura 5: Modelo de um painel DLT. _____ 37

Figura 6: Imagem obtida por microscópio eletrônico de varredura (MEV), da matriz de lignina fundida e de células de madeira nela imersas._____ 38

Figura 7: Localização das principais fábricas de painéis cavilhados na Europa _____ 41

Figura 8: Modelo do painel produzido pela Longin Holzbau Willibald GmbH. _____ 42

Figura 9: a) esquema da posição das lamelas, b) montagem das lamelas por um braço robótico, c) furação e colocação das cavilhas por um CNC, d) transporte de uma parede pronta _____ 43

Figura 10: a) esboço de painel com cavilha diagonal, b) seção de um painel ilustrando o uso de cavilhas na diagonal _____ 44

Figura 11: a) Detalhe de um painel DLT; b) variados modelos de painéis DLT; c) painel sendo içado em uma obra. _____ 44

Figura 12: Contribuição na demanda de energia primária para a confecção dos materiais necessário para construção de 1m² (área de piso) na Espanha. _____ 46

Figura 13: Contribuição de emissões de CO_2 associadas com a fabricação dos materiais necessários para a construção de 1m² (área de piso) na Espanha._____ 46

Figura 14: Consumo de energia equivalente para fazer uma coluna de 3 metros. _____ 49

Figura 15: Edifício Stadhaus Murray Grove, Londres, Reino Unido. _____ 49

Figura 16: Comparativo do uso do CLT versus concreto armado._____ 50

Figura 17: Comparativo da ACV de 1m² de piso de concreto versus 1m² de piso de CLT. _____ 51

Figura 18: Curvas Força x Deformação para diferentes tipos de conexões _____ 53

Figura 19: Detalhe das ligações por cavilhas 54

Figura 20: Possíveis modos de falhas para ligações duplas (dois planos de corte) 56

Figura 21: a) Flexão do painel de uma carga distribuída aplicada no centro do vão; b) ilustração das forças atuando nas lamelas e nas cavilhas; c) ilustração das distribuições de tensões de compressão e tração no painel 58

Figura 22: Modelos de falhas nas ligações cavilhadas para painéis DCLT na flexão 58

Figura 23: Seção transversal de uma viga composta e sua distribuição de tensões normais. 62

Figura 24: Parâmetros geométricos para vigas T e correlação para painéis de 3 camadas de CLT 63

Figura 25: Parâmetros geométricos para vigas I e correlação para painéis de 5 camadas de CLT 63

Figura 26: Ilustração da união dos conceitos de cálculo de vigas compostas e painéis CLT para o cálculo do DCLT 64

Figura 27: Princípio básico do método da analogia do cisalhamento 66

Figura 28: Somatório dos sistemas de deformação 68

Figura 29: Esquema de análise de tensões usando um exemplo de uma estrutura em camadas 68

Figura 30: Distribuição de uma carga senoidal 71

Figura 31: Distribuição de cargas senoidais na viga B_A, B_B e viga Real 72

Figura 32: Processo esquemático geral dos Algoritmos Genéticos convencionais 75

Figura 33: Distribuição geográfica do gênero Peltogyne 76

Figura 34: Imagens da seção de uma peça de Peltogyne confertiflora (Hayne) Benth 78

Figura 35: Localização das florestas plantadas de 2014 a 2016 79

Figura 36: Imagens da seção de uma peça de Pinus elliottii 81

Figura 37: Painéis DCLT produzidos para estudo 84

Figura 38: a) Tábuas de Pinus; b) vigotas de pau-roxo 85

Figura 39: a) corpos de prova de pau-roxo para compressão normal e paralela às fibras; b) teste de compressão paralela, e c) teste de compressão normal às fibras _____ 86

Figura 40: Diagrama tensão deformação específica para determinação da rigidez da madeira na direção normal às fibras _____ 87

Figura 41: Corpo de prova para ensaios de embutimento a) pela norma NBR7190; e b) pela norma ASTM D5764-97a _____ 88

Figura 42: Definição das cargas obtidas através da curva de cargas x deformação_____ 89

Figura 43: Ensaio de embutimento na direção paralela às fibras. _____ 90

Figura 44: a) Dimensões dos corpos de prova; b) Corpo de prova de pau-roxo _____ 91

Figura 45: Dimensões do corpo de prova para ensaio de cisalhamento_____ 92

Figura 46: Lamelas de Pinus seccionadas em comprimentos diferentes _____ 93

Figura 47: a) régua com os limites dos tamanhos dos nós e inclinação das fibras; b) medição de um nó _____ 93

Figura 48: Lamela sendo ensaiada em equipamento de Vibração Transversal _____ 94

Figura 49: Ensaio de flexão estática em lamelas curtas de Pinus_____ 95

Figura 50: Ensaio de flexão estática – Pau-roxo _____ 95

Figura 51: a) dimensão do corpo de prova; b) ensaio de ligação perpendicular com duas seções de corte _____ 96

Figura 52: Forma de aplicação do carregamento. _____ 97

Figura 53: Diagrama força x deslizamento da ligação. _____ 97

Figura 54: Detalhe da deformação da cavilha durante a aplicação da carga no painel _____ 98

Figura 55: Corpo de prova para ensaio de ligação perpendicular com uma seção de corte; a) Vista explodida; b) dimensões do corpo de prova; c) Deslocamento previsto do corpo de prova durante ensaio; d) Corpo de prova durante ensaio _____ 99

Figura 56: Modelo do gabarito para montagem do DCLT_____ 101

Figura 57: Montagem do painel 103

Figura 58: a) Ensaio de flexão longitudinal no painel de 3 camadas; b) ensaio de flexão transversal no painel de 3 camadas; e c) ensaio de flexão longitudinal no painel de 5 camadas 105

Figura 59: a) Pontos de aplicação de carga P1 e P2, b) ponto de aplicação da carga P3 105

Figura 60: Ensaio de flexão com carga pontual 106

Figura 61: a) Ensaio do painel pequeno de 5 camadas; b) ensaio do painel pequeno de 3 camadas; e c) detalhe para efeito do cisalhamento na camada central 106

Figura 62: a) Geometria usada para a modelagem numérica; b) modelo numérico em forma de malha 109

Figura 63: Deslocamento relativo médio dos cinco corpos de prova 115

Figura 64: Box plot dos valores do K_{ser} para cada método de cálculo 116

Figura 65: Box plot dos valores do K_{ser} para cada método de cálculo para ensaio com uma seção de corte 118

Figura 66: Painel DCLT 3 camadas após ensaio de flexão longitudinal 119

Figura 67: Painel DCLT 5 camadas após ensaio de flexão longitudinal 119

Figura 68: Painel de 3 camadas: a) Detalhe da ruptura na lateral; b) ruptura ao longo da camada inferior do painel 120

Figura 69: painel de 5 camadas: a) Detalhe da ruptura na lateral b) ruptura ao longo da camada inferior do painel 120

Figura 70: Tela de interface do software ATM 121

Figura 71: Deslocamento do painel de 3 camadas na direção longitudinal com carga pontual de 17 KN 122

Figura 72: Deslocamento do painel de 3 camadas na direção transversal com carga pontual de 17 KN 122

Figura 73: a) Detalhe da ruptura por cisalhamento com rotação das lamelas transversais; b) detalhe do tipo de flexão sofrida nas cavilhas 123

Figura 74: Distribuição de tensões locais, globais e totais calculadas através do método das vigas compostas (método γ) para uma carga linear (92,6 KN) no centro do vão do painel de 3 camadas _ 127

Figura 75: Discretização da conexão de 5 camadas em duas conexões de 3 camadas_____ 127

Figura 76: Distribuição de tensões locais, globais e totais calculadas através do método das vigas compostas (método γ) para uma carga linear (198 KN) no centro do vão do painel de 5 camadas__ 129

Figura 77: representação da viga fictícia usada para cálculo dos momentos e cortantes usados no método da analogia do cisalhamento _____ 129

Figura 78: Distribuição de tensões normais através do método da analogia do cisalhamento para uma carga distribuída no centro do painel de 3 camadas_____ 131

Figura 79: Distribuição de tensões cisalhamento através do método da analogia do cisalhamento para uma carga linear (92,6 KN) no centro do painel de 3 camadas _____ 132

Figura 80: Distribuição de tensões normais através do método da analogia do cisalhamento para uma carga linear (198KN) no centro do painel de 5 camadas _____ 135

Figura 81: Distribuição de tensões de cisalhamento através do método da analogia do cisalhamento para uma carga distribuída no centro do painel de 5 camadas _____ 135

Figura 82: Variação de uma carga distribuída uniforme sobre o painel versus o vão máximo, para um critério de flexão L/300 _____ 137

Figura 83: Deformações do modelo numérico original (fator de escala de deformação = 15) _____ 138

Figura 84: Variação do módulo de deslizamento versus variação da camada transversal para painéis de 3 camadas_____ 139

Figura 85: Variação do módulo de deslizamento versus variação do MOE _____ 140

Figura 86: Variação do módulo de deslizamento versus variação do diâmetro das cavilhas para quatro espessuras de camadas _____ 140

Figura 87: Tensão de compressão perpendicular às fibras para uma carga de 40% da força do ensaio experimental_____ 142

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Matriz comparativa entre painéis de madeira 39

Tabela 2: Algumas indústrias que produzem painéis estruturais sem adesivos 41

Tabela 3: Impacto dos materiais de construção na Espanha 47

Tabela 4: CLT X Concreto armado: comparativo de uma laje em m² 51

Tabela 5: Propriedades físicas e mecânicas do Pau-roxo (Peltogyne confertiflora (Hayne) Benth.) 77

Tabela 6: Propriedades físicas e mecânicas do Pinus elliottii 80

Tabela 7: Requisitos da classificação visual para enquadramento nas classes estruturais para Pinus 82

Tabela 8: Faixas de densidade para confecção dos corpos de prova 100

Tabela 9: Parâmetros dos materiais usados para a simulação numérica 107

Tabela 10: Resultados dos ensaios para determinação da resistência e rigidez à compressão do Pinus 110

Tabela 11: Resultados para ensaio de embutimento paralelo e normal às fibras 110

Tabela 12: Resultados dos ensaios para determinação da resistência e rigidez à compressão de Peltogyne spp., leguminosae 111

Tabela 13: Resultados dos ensaios para determinação da resistência e rigidez à flexão de Peltogyne spp., leguminosae 112

Tabela 14: Resultados do ensaio de estabilidade dimensional (retratibilidade) do pau-roxo 112

Tabela 15: Resultado do ensaio de cisalhamento do pau-roxo 113

Tabela 16: Resultados da classificação visual e mecânica para lamelas dos painéis 114

Tabela 17: Parâmetros medidos durante ensaio de ligação com corte duplo 114

Tabela 18: Valores do módulo de deslizamento K_{ser} através de três modelos de cálculo para duas seções de corte 116

Tabela 19: Valores do módulo de deslizamento K_{ser} através de três modelos de cálculo para uma seção de corte 117

Tabela 20: Rigidez dos painéis DCLT 119

Tabela 21: Resistência dos painéis DCLT 120

Tabela 22: Modulo de Elasticidade na direção longitudinal 121

Tabela 23: Valores de Rigidez na flexão obtidos pelo software ATM 122

Tabela 24: Módulos de elasticidade e torção equivalentes para painéis DCLT de 3 e 5 camadas 122

Tabela 25: Resultados do ensaio de flexão de painéis em pequenos com vãos 123

Tabela 26: Propriedades usadas para o cálculo analítico pelo método γ e os resultados obtidos para o painel de 3 camadas 125

Tabela 27: Propriedades usadas para o cálculo analítico pelo método γ e os resultados obtidos para o painel de 5 camadas 127

Tabela 28: Propriedades usadas para o cálculo analítico pelo método da analogia do cisalhamento e os resultados obtidos para o painel de 3 camadas 130

Tabela 29: Propriedades usadas para o cálculo analítico pelo método da analogia do cisalhamento e os resultados obtidos para o painel de 5 camadas 132

Tabela 30: Rigidez longitudinal dos painéis para os três métodos estudados e pelo software ATM 136

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACV	Avaliação de Ciclo de Vida
AFEWPs	Adhesive Free Engineered Wood Products (Produtos Engenheirados de madeira livres de adesivos)
AG	Algoritmo Genético
ASTM	American Society for Testing and Materials (Sociedade Americana para Testes e Materiais)
ATM	Análise de Tabuleiros de Madeira
AWSF	American Wood Forest Service (Serviço Florestal e Madeireiro Norte Americano)
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
BS	British Standard (Norma Britânica)
CAE	Computer Aided Engineering (Engenharia Assistida por Computador)
CCA	Arseniato de Cobre Cromatado
CCB	Borato de Cobre Cromatado
CE	European Commission (Comissão Europeia)
CLT	Cross Laminated Timber (Madeira Lamelada Colada Cruzada)
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DCLT	Dowel Cross Laminated Timber (Madeira Lamelada Cruzada Cavilhada)
DLT	Dowel Laminated Timber (Madeira Lamelada Cavilhada)
Dowel-lam	Painel Laminado Cavilhado
EN	Norma Europeia
EPS	Poliestireno expandido
ETA	European Technical Approval (Aprovação Técnica Europeia)
EYM	European Yield Model (Modelo de Aproveitamento Europeu)
FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
FEM	Finite Element Method (Método dos Elementos Finitos)
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung (Sociedade com Responsabilidade Limitada)
GWP	Global-warming potential (Potencial de aquecimento global)
IBA	Associação de Indústrias Brasileiras de Árvores
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

Inc	incorporated (Corporação jurídica)
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ISO	International Standarization Organization (Organização Internacional de Normalização)
JBRJ	Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro
LDF	Low Density Fiberboard (Painel de fibras de baixa densidade)
LVDT	Linear Variable Differential Transformer (Transformador Diferencial Variável Linear ou transdutor para medição de deslocamento linear)
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MLC	Madeira Lamelada Colada
NB	Norma Brasileira (antiga)
NBR	Norma Brasileira (atual)
NLT	Nail Laminated Timber (Madeira Lamelada Pregada)
ONU	Organização das nações Unidas
OSB	Oriented Strand Board (Painel de Lascas Orientadas)
OTB	Orthotropic Timber Bridges (idem a ATM)
PN	Projeto de Norma (brasileira)
PVC	Policloreto de vinila
SAM	Shear Analogy Method (Método da Analogia do Cisalhamento)
SFB	Serviço Florestal Brasileiro
SNIF	Serviço Nacional de Informações Florestais
SPIB	Southern Pine Inspection Bureau (Agência de inspeção de Pinus do Sul)
TCC	Timber Concrete Composite (Compósito de Madeira-Concreto)
UE	União Europeia
VOC	Compostos Orgânicos Voláteis

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da seção transversal [mm²]
a_i	Distâncias dos centroides de cada camadas até a linha neutra do conjunto [mm]
B_A	Viga fictícia 'A' [Knm²]
B_B	Viga fictícia 'B' [Knm²]
b	Largura [mm]
CV	Coeficiente de Variação [-]
d_0	Diâmetro do furo [mm]
d	Diâmetro da cavilha [mm]
Desv. Pad.	Desvio Padrão [-]
E_M ou MOE	Módulo de Elasticidade na flexão [MPa]
E_C	Módulo de Elasticidade na compressão [MPa]
EI_{ef}	Rigidez efetiva [Nmm²]
F	Força (carga) [N]
F_{max}	Força máxima (última) [N]
F_{est}	Força estimada [N]
$F_{v,R}$	Força de cisalhamento característica na cavilha [N]
$F_{yield,0}$	Força de escoamento no ensaio de embutimento paralelo às fibras [KN]
$F_{yield,90}$	Força de escoamento no ensaio de embutimento normal às fibras [KN]
f	Frequência natural de vibração [Hz]
f_{c0}	Resistência à compressão paralela [MPa]
f_{c90}	Resistência à compressão normal [MPa]
f_{e0}	Resistência ao embutimento paralela [MPa]
f_{e90}	Resistência ao embutimento normal [MPa]
f_{v0}	Resistência ao cisalhamento paralela [MPa]
$f_{c0,d,cav}$	Resistência à compressão paralela da cavilha [MPa]
$f_{c90d,cav}$	Resistência à compressão normal da cavilha [MPa]
$f_{e,1,k}$	Resistência ao embutimento característico [MPa]
f_M	Resistência à flexão[MPa]
G	Módulo de elasticidade transversal da madeira [MPa]
G_{90}	Rolling Shear (cisalhamento das fibras da madeira na direção transversal) [MPa]

G_{xy}	Módulo de torção [MPa]
h	Espessura da lamela [mm]
I	Momento de inércia [mm^4]
i	Inclinação das fibras [-]
K_{ser}	Módulo de deslizamento da ligação [Nmm]
Ku	Módulo de deslizamento para o estado último de utilização [Nmm]
Ki	Módulo de deslizamento inicial [Nmm]
L	Comprimento [mm]
L_0	Vão livre [mm]
M	Momento [Nmm]
MOE_{din}	Módulo de Elasticidade Dinâmico [MPa]
MOE_{est}	Módulo de Elasticidade Estático [MPa]
MOR	Módulo de Ruptura [MPa]
$M_{y,Rk}$	Momento característico atuante na direção y [Nmm]
P	Carga de ruptura [KN]
$R_{vd,1}$	Resistencia de cálculo da cavilha para uma seção de corte [N]
S_B	Rigidez de cisalhamento [KN]
S_i	Distância entre conectores [mm]
t	Espessura [mm]
u_i	Deslizamento da ligação [mm]
V	Força cortante [N]
V_{sat}	Volume saturado de água [m^3]
V_{seco}	Volume seco [m^3]
W	Peso da peça de madeira [Kg]
z_{si}	Distâncias entre os centros de gravidade de cada camada *i* até o centro de gravidade do painel [mm]

Letras Gregas:

ß	Razão entre a espessura convencional da peça de madeira e o diâmetro do pino [-]
γ	índice de redução do método gamma
ρ	Peso específico [Kg/m^3]
σ	Tensão normal [MPa]
ε	Deformação específica [mm]

τ	Tensão cisalhamento [MPa]
Ø	diâmetro [mm]
δ	deslocamento transversal ao eixo da peça [mm]
Δ	variação [-]
ΔV_v	Variação Volumétrica [%]
υ	Coeficiente de Poisson [-]

Índices:

d	cálculo
m	médio
k	característico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 31

1.1 OBJETIVO 32

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 33

2.1 CAVILHAS E PAINÉIS CAVILHADOS – HISTÓRICO E DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO 33
2.2 EXEMPLOS DE INDÚSTRIAS PRODUTORAS DE PAINÉIS ESTRUTURAIS SEM ADESIVOS 40
2.3 VANTAGENS AMBIENTAIS DOS PAINÉIS ESTRUTURAIS DE MADEIRA MACIÇA 45
2.4 LIGAÇÕES CAVILHADAS 53
2.4.1 RESISTÊNCIA DA CAVILHA E MODOS DE RUPTURA DA LIGAÇÃO 53
2.4.2 MÉTODOS ANALÍTICOS PARA O CÁLCULO DE LIGAÇÕES CAVILHADAS: PRINCIPAIS TEORIAS 60
2.4.3 MÉTODO DE MODELAGEM NUMÉRICAS 73
2.5 CARACTERÍSTICAS DAS MADEIRAS 75
2.5.1 PAU-ROXO 75
2.5.2 PINUS 78

3 MATERIAIS E MÉTODOS 84

3.1 MATERIAIS PARA PRODUÇÃO DE PAINÉIS DE MADEIRA LAMELADA CRUZADA CAVILHADA (DOWEL CROSS LAMINATED TIMBER – DCLT) 84
3.2 MÉTODOS 85
3.2.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DAS MADEIRAS 85
3.2.2 CLASSIFICAÇÃO VISUAL E MECÂNICA NÃO DESTRUTIVA DAS LAMELAS 92
3.2.3 ENSAIO DAS LIGAÇÕES 95
3.2.4 PRODUÇÃO DOS PAINÉIS DCLT 100
3.2.5 ENSAIO DE FLEXÃO LONGITUDINAL E TRANSVERSAL NOS PAINÉIS DCLT 103
3.2.6 ENSAIO DE FLEXÃO COM CARGA PONTUAL 105
3.2.7 ENSAIO DE FLEXÃO EM PAINÉIS COM VÃO PEQUENOS PARA ANÁLISE DO CISALHAMENTO 106
3.2.8 ESTUDO ANALÍTICO 107
3.2.9 ANÁLISE NUMÉRICA DO CORPO DE PROVA DESENVOLVIDO PARA DCLT 107

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 110

4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICOS 110
4.1.1 COMPRESSÃO PARALELA E NORMAL ÀS FIBRAS PINUS 110
4.1.2 ENSAIOS DE EMBUTIMENTO 110
4.1.3 CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS NO PINUS 110
4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS NA MADEIRA DE PAU-ROXO (*PELTOGYNE SPP., LEGUMINOSAE*) 111
4.2.1 COMPRESSÃO PARALELA E NORMAL ÀS FIBRAS PAU-ROXO (PELTOGYNE SPP., LEGUMINOSAE) 111
4.2.2 FLEXÃO ESTÁTICA DO PAU ROXO 112
4.2.3 ESTABILIDADE DIMENSIONAL DO PAU ROXO (RETRATIBILIDADE) 112
4.2.4 CISALHAMENTO 112
4.2.5 CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS NO PAU-ROXO (PELTOGYNE, SSP. LEGUMINOSAE) 113
4.3 RESULTADOS DA CLASSIFICAÇÃO VISUAL E MECÂNICA DAS LAMELAS 113
4.4 RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA ANÁLISE DAS LIGAÇÕES 114
4.4.1 ENSAIO DE LIGAÇÕES: DUAS SEÇÕES DE CORTE 114
4.4.2 ENSAIO DE LIGAÇÕES: UMA SEÇÃO DE CORTE (CORPO DE PROVA DESENVOLVIDO NESTE ESTUDO) 117
4.4.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS ENSAIOS DE LIGAÇÕES 118
4.5 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FLEXÃO NOS PAINÉIS DCLT 118
4.5.1 RIGIDEZ DOS PAINÉIS NA FLEXÃO LONGITUDINAL E TRANSVERSAL 118
4.5.2 RESISTÊNCIA DOS PAINÉIS NA FLEXÃO LONGITUDINAL E TRANSVERSAL 120
4.5.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE (MOE) 121
4.5.4 ENSAIO DE FLEXÃO COM CARGA PONTUAL PARA APLICAÇÃO DO ATM 121
4.5.5 ENSAIO DE FLEXÃO EM PAINÉIS COM VÃOS PEQUENOS PARA ANÁLISE DO CISALHAMENTO 122
4.5.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS ENSAIOS NOS PAINÉIS 123
4.6 RESULTADOS ANALÍTICOS 125
4.6.1 TEORIA DAS VIGAS COMPOSTAS MECANICAMENTE OU MÉTODO GAMMA (Γ-METHOD) 125
4.6.2 MÉTODO DA ANALOGIA DO CISALHAMENTO (SHEAR ANALOGY METHOD) 129
4.7 RESULTADOS DAS ANÁLISES NUMÉRICAS PARA O MODELO DE CORPO DE PROVA DE LIGAÇÃO DESENVOLVIDO 137
4.7.1 INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DAS LAMELAS 139
4.7.2 INFLUÊNCIA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DAS LAMELAS 139
4.7.3 INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DAS CAVILHAS 140
4.7.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS ANÁLISES NUMÉRICAS 141

5 CONCLUSÕES 143

REFERÊNCIAS **145**

ANEXO A **154**

1 INTRODUÇÃO

O setor da construção civil em países desenvolvidos tem caminhado no sentido da industrialização e da sustentabilidade dos materiais construtivos estruturais. Nos países da União Europeia (UE), a preocupação com a origem e destino dos materiais, bem como a eficiência ambiental e energética tem sido constante. Desde o início da década de 2000 está em vigor a diretiva 2002/91/CE que define uma metodologia comum de cálculo do desempenho energético integrado dos edifícios. Também o uso da metodologia de ACV – Avaliação de Ciclo de Vida – para os diversos materiais de um edifício, tem sido utilizado como parâmetro para melhoria ambiental das obras civis. Com políticas desse porte, pesquisadores e empresas buscam novas soluções construtivas visando atender as novas normas e requisitos impostos pelos governos e entidades da sociedade civil organizada.

Foi buscando soluções que vão de encontro a essas novas demandas, que a madeira se tornou uma alternativa competitiva e vem se destacando como material construtivo para residências e edifícios de múltiplos pavimentos. A utilização da madeira como elemento estrutural em casas do tipo *woodframe* há muito tempo vem sendo usado para residências unifamiliares, principalmente nos Estados Unidos (MOLINA; CALIL JR, 2010, p.145). Porém foi a construção em madeira maciça que mais se expandiu nas últimas duas décadas. Com o desenvolvimento de painéis estruturais de grande porte, pesquisadores austríacos e alemães, em conjunto com as indústrias da região, criaram o CLT – Cross Laminated Timber – que foi o primeiro painel de madeira maciça com capacidade para receber grandes esforços e vencer grandes vãos, a ganhar mercado. O CLT é definido como um painel de madeira maciça multicamadas onde cada camada é colada perpendicularmente à camada anterior, geralmente com número ímpar de camadas, com espessuras finais que variam de 57 a 500 mm, com comprimentos que podem chegar a 20 m, e largura geralmente em torno de 3 m, obtendo assim um painel de grandes dimensões (PEREIRA; CALIR JR, 2016, p.3). A conexão entre as camadas, normalmente feita por colagem, confere uma ligação contínua semirrígida, que pode receber esforços tanto no plano do painel, como perpendicular ao painel, de forma que pode ser utilizado como parede ou piso (BRANDNER, 2013, p.1). Segundo Brandner (2016), essa conexão entre as camadas pode ser feita por anéis metálicos, pregos, parafusos, cavilhas de madeira dura e até mesmo por parafusos de madeira.

A utilização de peças de madeira maciça para formar um elemento de grandes dimensões com capacidade portante não é recente, pois na década de 1970 o engenheiro e

professor alemão Julius Natterer já havia desenvolvido um painel com lamelas dispostas lateralmente e conectadas umas às outras por pregos e por cavilhas de madeira, chamado de painel *brettstapel*. A utilização do conceito da laminação cruzada para este tipo de aplicação é mais recente, e foi derivada da ideia do CLT convencional colado. Alguns autores na literatura e empresas produtoras, como a canadense Structurecraft Builders Inc., passaram a chamar o painel de madeira unido com cavilha de DLT (Dowel Laminated Timber). Da mesma forma, o painel unido com pregos passou a ser conhecido como NLT (Nail Laminated Timber). Como os painéis de lamelas paralelas e lamelas cruzadas unidas por cavilhas tem sido nomeado pela mesma sigla (DLT), pode-se diferenciar o painel de lamelas cruzadas usando o termo DCLT – *Dowel Cross Laminated Timber* ou *Madeira Lamelada Cruzada Cavilhada*, em português.

A fabricação e utilização deste tipo de painel vem crescendo nos países da Europa central, principalmente para uso em obras de pequeno porte. Neste sentido o estudo das propriedades mecânicas de painéis DCLT produzido com a espécie Pinus plantada no Brasil e unida por cavilha de madeira dura, como recomenda a norma brasileira de estruturas de madeira ABNT NBR 7190 para este tipo de conexão, se mostra pertinente e é o alvo da investigação deste estudo. Tal justificativa se baseia no fato do produto ser inovador para o mercado brasileiro, ter potencial de fabricação em pequena e média escala, dar aproveitamento para peças de madeira dura de pequenas dimensões, e os resultados obtidos neste estudo podem balizar novos trabalhos de pesquisa e desenvolvimento para o setor da construção em madeira maciça no Brasil.

1.1 Objetivo

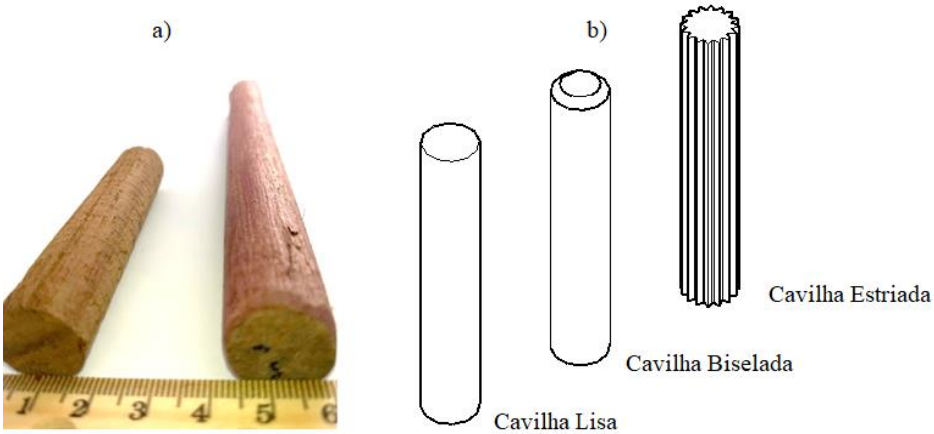
Este trabalho tem por objetivos avaliar o comportamento estrutural de painéis de madeira tipo DCLT (lamelas cruzadas) onde as camadas são feitas com madeira de *Pinus Elliottii* e *Pinus Taeda* e as cavilhas com madeira de pau-roxo (*Peltogyne* spp., *Leguminosae*), através do desenvolvimento de um modelo de ensaio específico para as ligações neste tipo de painel, simulação com uso de softwares de elementos finitos no modelo desenvolvido e comparação dos resultados experimentais realizados nos painéis com os métodos analíticos de cálculo existentes para painéis de lamelas cruzadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cavilhas e painéis cavilhados – histórico e desenvolvimento tecnológico

Cavilhas são peças de madeira em formato cilíndrico, que podem ser estriadas ou lisas, e podem ter formato biselado nas pontas, usadas para ligar duas ou mais peças de madeira, ou usadas para tapar orifícios nas peças de madeira. Alguns exemplos de cavilhas são apresentados na figura 1.

Figura 1: a) Exemplos de cavilhas de madeira; b) modelos de cavilhas



Fonte: Próprio Autor

As ligações por cavilhas foram um dos primeiros modos de ligação desenvolvida para unir peças estruturais de madeira, usadas desde os tempos antigos, junto com os entalhes e os encaixes. Com o desenvolvimento dos pregos e parafusos e posteriormente a colagem estrutural com adesivos químicos, esse tipo de conexão foi caindo em desuso. Moliterno (1990) ressalta que esse tipo de ligação se torna quase obrigatória em estruturas localizadas em ambientes afetados por corrosão química, onde elementos metálicos podem sofrer comprometimentos na sua resistência, como é o caso de armazéns de estocagem de fertilizantes. O autor cita que uma das vantagens do uso de cavilhas de madeira frente ao pino metálico é o fato da resistência da ligação ser governada pela pressão de contato entre o pino e as peças de madeiras a serem ligadas, de forma que a cavilha de madeira, por ser um material anisotrópico, produz uma melhor fixação. Um exemplo citado pelo mesmo autor são as estruturas produzidas pelo Engenheiro alemão radicado no Brasil Erwin Hauff, na década de 1930, que substituiu o uso de pinos metálicos em suas obras por cavilhas de ipê. Cesar (1991) fez um levantamento das

principais contribuições das obras de Erwin Hauff, como pontes ferroviárias e rodoviárias feitas em sistemas treliçados, além de cimbramentos, torres e coberturas em geral, e certificou o uso de cavilhas de madeiras duras nas obras de Hauff. Brito e Calil Junior (2014) apresentaram avaliações e algumas inspeções realizadas *in loco* em estruturas com grandes vãos construídas por Hauff, que ainda estão em uso. Os autores ressaltam que as contribuições passadas pelo engenheiro Hauff são exemplos de soluções estruturais e que influenciaram a formação de mão-de-obra de mestres em carpintaria, desenhistas e projetistas, bem como favoreceu o enriquecimento da bagagem técnica de muitos engenheiros no Brasil.

Com a evolução da metalurgia e novos métodos de produção bem como novas ligas metálicas, as cavilhas perderam espaço para os conectores metálicos, como os pregos, parafusos, chapas de dentes estampados e anéis metálicos, de forma que na área de pesquisas relacionadas à elementos de ligação, o número de trabalhos que estudaram ligações cavilhadas perderam espaço.

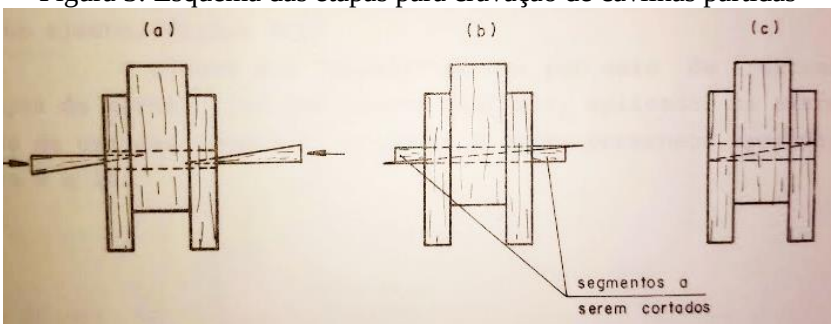
Um dos trabalhos brasileiros mais antigos sobre as ligações cavilhadas foi realizado por Piedade Junior (1972), que ensaiou corpos de prova de pinho do Paraná (*Araucária angustifólia*) e peroba rosa (*Aspidosperma polyneuron*) com seções de 12 x 3 cm 12 x 6 cm, unidos com cavilhas de eucalipto citriodora (*Corymbia citriodora*), com diâmetros de 1,5 cm, 1,8 cm, 2,0 cm, 2,2 cm e 2,5 cm. Os corpos de prova foram ensaiados na compressão normal e paralela às fibras, no qual ele estabeleceu que a função dada pela tensão de compressão normal representou melhor o comportamento da ligação. Nesse mesmo estudo, o autor testou modelos reduzidos de vigas lameladas cavilhadas, semelhantes ao *brettstapel* atribuído ao professor Julius Naterrer. As lamelas da viga eram de pinho do Paraná (*Araucária angustifólia*), com seção transversal de 5 mm x 60 mm, e as cavilhas utilizadas para conexão foram de eucalipto citriodora (*Corymbia citriodora*), com diâmetros de 5 mm. A quantidade de lamelas foram 4, 5 e 6 por viga, e o comprimento foi de 120 centímetros. Elas foram testadas na flexão com vãos de 70, 80 e 90 cm, como ilustrado na figura 2. Com esse ensaio, o autor determinou um fator γ, que posteriormente seria utilizado para o cálculo de uma constante K utilizada na norma brasileira de estrutura que vigorava na época, a NB 11: Cálculo e execução de estruturas de madeira.

Figura 2: Vigas lameladas cavilhadas em pequena escala durante ensaio de flexão

Fonte: Piedade Junior (1972)

Gesualdo (1982) desenvolveu um estudo com cavilhas partidas em forma de cunha, cuja ideia era facilitar a cravação da cavilha no furo para avaliar a resistência deste tipo de conexão. Os corpos de prova foram produzidos em madeira de peroba rosa (*Aspidosperma polyneuron*) com seções de 6 x 12 cm na alma e 3 x 12 cm nas laterais. As cavilhas usadas foram produzidas de eucalipto citriodora (*Corymbia citriodora*) com diâmetros de 12,7 mm (1/2”) e 19 mm (3/4”). A figura 3 ilustra o modelo desenvolvido pelo autor. A conclusão obtida após estudo experimental através de ensaios de compressão paralela e perpendicular às fibras em corpos de prova, e tração e flexão em vigas com emendas na região central, foi que as vigas com ligações com cavilhas partidas tiveram redução em 55% da resistência quando comparadas às vigas sem emendas, o que o autor classificou como satisfatória, e que o uso das cavilhas partidas previamente secas em estufa contribuem para facilitar a montagem da estrutura.

Figura 3: Esquema das etapas para cravação de cavilhas partidas



Fonte: Gesualdo (1982)

Gomes (1997) desenvolveu um estudo para uso de resinas estirênicas (1,5% de peróxido de benzoila e 98,5% de estireno) para impregnação em cavilhas de madeiras de pinus e eucalipto citriodora visando aumentar a resistência destas espécies para utilização como elemento de

ligação, e posteriormente comparou-se os valores obtidos por cavilhas de ipê, que é naturalmente uma madeira dura. As cavilhas ensaiadas tinham diâmetros de 16, 18 e 20 mm, e comprimento de 10 vezes o diâmetro. Os resultados obtidos mostraram um aumento na resistência à compressão normal de até 292%, além do aumento de 80% no limite de proporcionalidade da ligação. A sugestão do uso de resina estirênicas em cavilhas foi implementado na NBR 7190/1997, a partir dos resultados obtidos neste estudo.

Gava (2005) desenvolveu um painel cavilhado de lamelas paralelas, voltado para habitações sociais, com lamelas de pinus provenientes de reaproveitamento de serrarias, unidas com cavilhas de eucalipto com diâmetro de 25,4 mm (1”). Foram ensaiados dois modelos, sendo um modelo com adesivo PVA (poliacetato de vinila) nas cavilhas e outro sem adesivo. Os resultados do ensaio à flexão realizados foram considerados satisfatórios pois atingiram 50% da resistência de um painel de madeira colada. A figura 4 apresenta o painel sendo submetido ao ensaio de flexão à três pontos.

Figura 4: Ensaio de um painel DLT

Fonte: Gava (2005)

Clark et.al. (2012), no relatório anual de produtos florestais da FAO – Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura – apresentaram um estudo sobre produtos à base de madeira e destacaram produtos considerados recentes e inovadores. Os painéis de CLT e os painéis unidos por cavilhas foram considerados como as grandes inovações para o setor da construção, pois possibilitaram a construção de grandes obras em madeira. A figura 5 ilustra um modelo de painel cavilhado (DLT) apresentado pelos autores.

Figura 5: Modelo de um painel DLT.

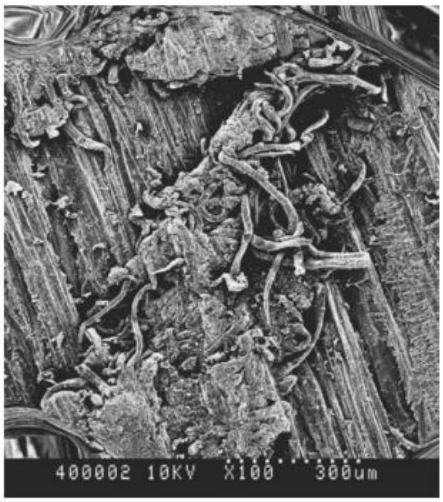
Fonte: Clark, et.al. (2012)

Plowas et. al. (2015) nomearam esse tipo de painel cavilhado sem uso de adesivo como *"Dowel-lam"*. Os autores caracterizam esse painel como uma série de tábuas (lamelas) unidas por um conjunto de cavilhas de madeira dura aplicada na perpendicular do centro das tábuas. As cavilhas podem variar entre 12 a 24 mm de diâmetro com teor de umidade abaixo do teor das tábuas, de forma que o diferencial de umidade criado entre os dois tipos de madeira gere um inchamento nas cavilhas e consequentemente uma fixação do conjunto, formando um painel sólido e rígido. Testes realizados num painel piloto foram conduzidos pelos pesquisadores que ensaiaram três espécies de madeira para confecção das cavilhas, sendo Ash (*Fraxinus excelsior*), Beech (*Fagus sylvatica*) e Sycamore (*Platanus occidentalis*). Foram fabricadas 20 cavilhas de cada tipo de madeira, provenientes da Escócia. Os painéis produzidos pelos autores utilizando os três tipos de cavilhas foram ensaiados na flexão a 4 pontos seguindo o recomendado pela norma EN 408, e o valores da rigidez foram cerca de 5500 KNm² com valores do módulo de deslizamento da ligação (k_{ser}) variando entre 2,5 e 4,3 KN/mm dependendo da espécie de madeira da cavilha.

Outro conceito desenvolvido por pesquisadores nos últimos anos é a chamada 'soldagem de madeira' – *wood welding* – que é definida como a soldagem por fricção linear, induzida por vibração mecânica, que consolida a união de superfícies planas de madeira (MÜLLER et. al., 2010, p.1). Essa soldagem pode ser realizada através da fricção entre duas peças planas ou pela colocação de uma cavilha em um furo com diâmetro levemente menor que o diâmetro da cavilha. A colocação da cavilha do furo é feita por meio de fricção e rotação, e a soldagem ocorre em uma determinada frequência e velocidade específica, que pode variar para cada espécie de madeira. A soldagem ocorre devido ao aquecimento a mais de 170°C durante curto espaço de tempo na região da junta das peças de madeira, fazendo com que a lignina atinja

sua temperatura de fusão, e se torne um material viscoso, principalmente na região da lamela média que é rica em lignina, sendo que o fenômeno ocorre nas duas partes, (na cavilha e na peça a ser cavilhada), e após o resfriamento as estruturas químicas da lignina se fundem gerando a soldagem (MÜLLER, et. al., 2010, p.3). A Figura 6 apresenta uma imagem obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da região de soldagem de duas madeiras obtida nos estudos desenvolvidos por Pizzi, et. al (2004).

Figura 6: Imagem obtida por microscópio eletrônico de varredura (MEV), da matriz de lignina fundida e de células de madeira nela imersas.



Fonte: Pizzi et al. (2004).

Sochacki (2014) desenvolveu um estudo de um painel cavilhado utilizando a técnica da soldagem através da introdução da cavilha em alta rotação em furos feitos nas lamelas do painel e comparou com outro tipo de ligação cavilhada feita através do aquecimento prévio da cavilha, de maneira a se atingir o ponto de fusão da lignina e a colocação desta no furo das lamelas do painel sem a rotação do modelo anterior. As cavilhas foram fabricadas com madeira de cedro vermelho (*Juniperus virginiana*) e beech (*Fagus sylvatica*). As conclusões obtidas pelo autor foram que a ligação soldada por fricção rotacional obteve resultados muito abaixo dos esperados devido principalmente a dificuldade de se atingir a rotação ideal em cada furo para que a região da junta entre a cavilha e a madeira se aqueçam ao ponto de fusão da lignina. O autor ainda ressaltou que num processo industrial seria ainda mais difícil de obter este controle térmico individual. A ligação com cavilha pré-aquecida foi a que obteve melhores resultados, inclusive quando comparados aos valores de painéis cavilhados da forma tradicional, por meio da secagem da cavilha em estufa e posterior introdução no furo.

Buck et. al. (2015) realizaram um estudo comparativo entre diversos painéis de madeira levando em consideração dados qualitativos referentes à rigidez físico-mecânica, à sustentabilidade, a ecologia do produto e quesitos econômicos, como valor de venda. Os diversos painéis analisados tinham ligações coladas, cavilhadas, pregadas e soldadas. Os resultados qualitativos foram compilados numa matriz que utiliza os sinais de mais (+) e de menos (-) para mostrar que o item analisado é mais ou menos vantajoso. O número zero (0) considera o item como neutro. A tabela 1 apresenta os resultados obtidos pelos pesquisadores.

Tabela 1: Matriz comparativa entre painéis de madeira

Tipo de Painel	Quesitos analisados				
	Preço	Rigidez	Sustentabilidade		
			Conteúdo químico	Reciclagem	Otimização da matéria-prima
CLT	+ +	+ +	-	0	+ +
OSB	0	0	- -	0	+
DCLT	-	0	0	+ +	+
DLT	-	-	0	+ +	-
DCLT com parafuso de madeira	-	+	0	+ +	+
NCLT	+	- -	0	- -	0
NCLT com grampos	+	-	0	-	0
Lamela parafusada na face larga	- -	+	0	- -	+
Lamela parafusada na face estreita	-	0	0	- -	-
Lamelas encaixadas tipo ‘Rabo de andorinha’	- -	- -	0	+ +	+ +
Laminado protendido	X*	+ +	0	-	-
DCLT com cavilhas soldadas	X*	+ +	0	+ +	+ +
DLT com cavilhas soldadas	X*	+	0	+ +	-

*Nota: * X são painéis que não tiveram o valor precificado.*

Fonte: Buck et. al. (2015)

Os autores concluíram que no quesito preço o CLT é a melhor opção devido ao grande volume produzido e por já existir uma cadeia de suprimentos estabelecida. Enquanto a pior opção foram os painéis unidos com chavetas tipo ‘rabo de andorinha’ e os parafusados. No quesito rigidez, os melhores painéis foram o painel protendido, o painel soldado com lamelas cruzadas e o painel CLT, enquanto os mais fracos em termos de rigidez foram os painéis OSB e os unidos com chavetas tipo ‘rabo de andorinha’. Em relação a ecologia todos os painéis que utilizam algum adesivo foram classificados como negativos no item “conteúdo químico”, enquanto os demais que não utilizam adesivo foram classificados como neutros. No item

reciclagem (que engloba conceitos de reuso, reutilização e renovabilidade) todos os painéis que são produzidos exclusivamente de madeira (painéis sem uso de conectores metálicos ou adesivos químicos) obtiveram o conceito mais alto. O painel colado obteve classificação neutra pois parte dos painéis colados não é passível de reciclagem. O item otimização da matéria-prima levou em consideração como os painéis aproveitam a madeira de forma a não gerar desperdícios. Os painéis cruzados levaram vantagem pois nas camadas interiores é possível utilizar madeira de segunda categoria sem afetar a resistência e o acabamento superficial do painel. A conclusão geral foi que o CLT leva vantagem em preço, e o DLT com cavilhas soldadas leva vantagem no item sustentabilidade. Porém, o DLT com cavilhas soldadas ainda não é produzido industrialmente, e se encontra em fase de pesquisas, portanto mais dados e testes seriam necessários para um comparativo mais exato. Os autores ainda concluem que o desenvolvimento de um adesivo estrutural mais eco-eficiente para o CLT seria o ideal para melhorar o desempenho do produto no quesito sustentabilidade.

Guan, et. al. (2018) apresentaram algumas vigas lameladas unidas por cavilhas desenvolvidas na Universidade de Liverpool, no Reino Unido, e o desenvolvimento de um painel cavilhado de lamelas cruzadas, tipo DCLT, dos quais seriam parte do que os autores chamaram de AFEWPs – *Adhesive Free Engineered Wood Products* (Produtos Engenheirados de madeira livres de adesivos).

2.2 Exemplos de indústrias produtoras de painéis estruturais sem adesivos

Os painéis de madeira maciça unida por cavilha, tanto com as lamelas paralelas (DLT), como com as lamelas cruzadas (DCLT), já chegaram ao mercado da construção civil de países do centro europeu há pelo menos uma década. São fabricados em pequenas empresas e usados para a produção de casas e sobrados. Uma hipótese de a fabricação ser feita primordialmente por pequenas empresas é que o custo do investimento para iniciar a produção de painel cavilhado é menor que o investimento necessário para uma indústria de CLT, já que não são necessárias prensas hidráulicas de grandes dimensões e nem o uso de adesivos estruturais que tem valores elevados. A figura 7 apresenta, no mapa europeu, a localização das principais fábricas de painéis estruturais de madeira sem uso de adesivos.

Figura 7: Localização das principais fábricas de painéis cavilhados na Europa

Fonte: Henderson, (2009)

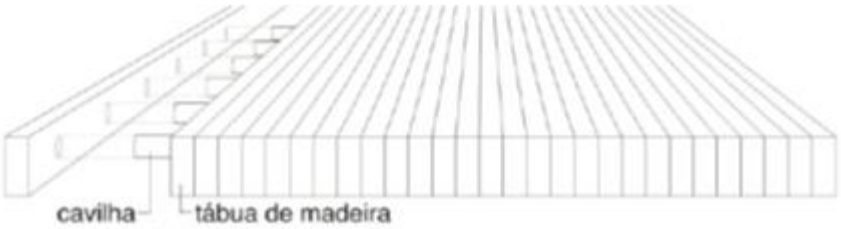
A tabela 2 apresenta de forma resumida algumas indústrias, as localizações e o tipo de painel produzido.

Tabela 2: Algumas indústrias que produzem painéis estruturais sem adesivos

Indústria	Localização	Tipo de painel
Longin	Dobsberg, Áustria	DLT
Thoma	Godegg, Áustria	DCLT
HolzBautechnik	Vorarberg, Áustria	DLT
Structure Craft	Canadá	DLT e NLT

A Longin Holzbau Willibald GmbH, apresentada por Passarelli e Ino (2013) em um estudo de caso sobre a produção de painéis cavilhados, está sediada na cidade de Dobsberg, região nordeste da Áustria e fabrica painéis estruturais de madeira maciça formado por tábuas de madeira de conífera (*Picea abies*) unidas por cavilhas de madeira das folhosas (Fagus sylvatica), alcançando as dimensões máximas de 3 x 12 metros e espessuras que variam de 8 a 22 centímetros. As cavilhas utilizadas para confecção do painel possuem 20 mm de diâmetro e os furos 19,6mm. Para o uso em elementos de paredes, é feita somente uma linha de cavilhas, e para elementos de piso e coberturas são feitas duas linhas de cavilhas sendo defasadas uma da outra em forma alternada. A resistência mecânica do painel definida segundo critérios da norma europeia EN 1991-1-1B, é de 4,2 KN/m² e, de acordo com a EN 1995-1-1, apresenta uma deformação máxima de L/500. A figura 8 apresenta um modelo do painel de parede produzido pela empresa.

Figura 8: Modelo do painel produzido pela Longin Holzbau Willibald GmbH.

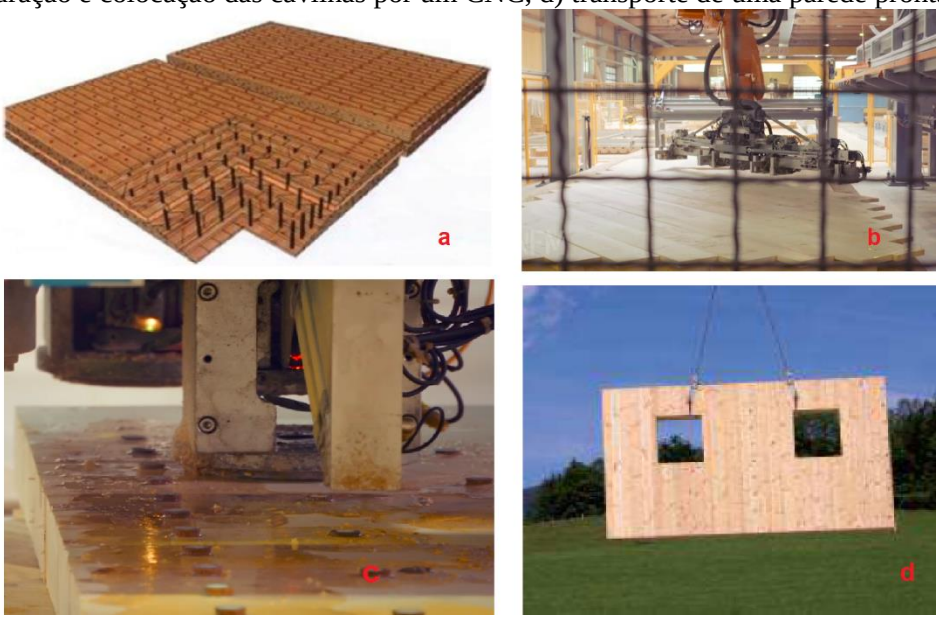


Fonte: Passarelli e Ino, (2013)

Os autores apontam como pontos positivos a não utilização de adesivos e consequentemente a não geração de VOC (Compostos Orgânicos Voláteis), a isenção de problemas com descarte e reutilização da madeira e o bom aproveitamento das tábuas, já que peças curtas podem ser utilizadas em painéis que possuem aberturas para portas e janelas. A principal desvantagem do painel é decorrente da retração tangencial das peças de madeira serrada pois as peças podem mover-se individualmente sobre as cavilhas resultando no surgimento de pequenas frestas entre as peças verticais, devido à retração tangencial, que tornam o painel permeável ao som e à umidade, sendo necessário recobrir o painel com materiais de acabamento ou isolamento, (PASSARELLI e INO, 2013, p.8).

A Thoma Holz GmbH, também localizada na Áustria, produz painel cavilhado, mas com sistema de lamelas cruzadas (DCLT). O sistema criado pela empresa utiliza camadas cruzadas em 45° em relação a camada anterior e foi batizado de Holz 100. As lamelas destes painéis possuem espessuras que variam de 20 a 60 mm, e a camada central do painel é sempre a mais espessa, variando de 40 a 80 mm. As cavilhas são feitas com madeira de european beech (*Fagus sylvatica*), uma espécie que possui densidade alta para os padrões europeus, 710 kg/m³, e são produzidas com 20 mm de diâmetro. A fabricação é automatizada, tanto para a montagem das lamelas na posição, como para a furação e a colocação das cavilhas, e as paredes vão semi-prontas para a obra, podendo ter dimensões de até 3 x 8 m, e 40 cm de espessura. A figura 9 apresenta um esquema do painel, as etapas de montagem das lamelas por meio de um braço robótico, a furação por meio de uma máquina CNC e a imagem de uma parede já pronta sendo transportada.

Figura 9: a) esquema da posição das lamelas, b) montagem das lamelas por um braço robótico, c) furação e colocação das cavilhas por um CNC, d) transporte de uma parede pronta

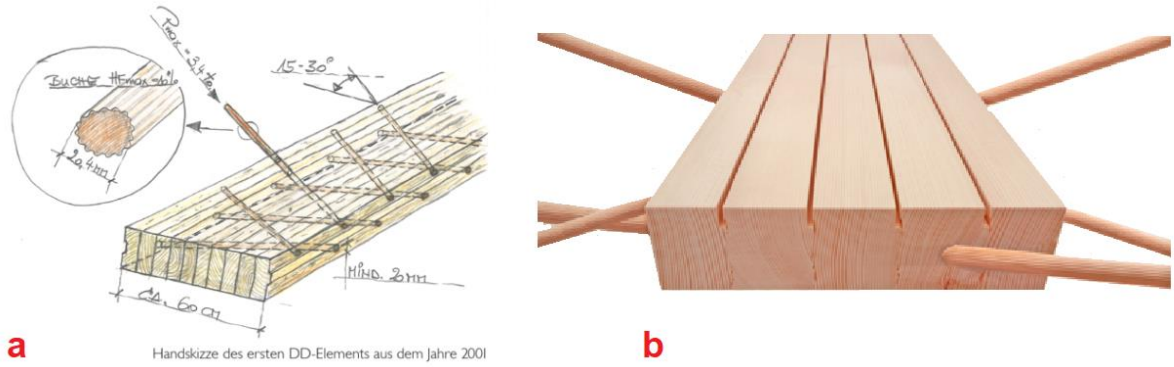


Fonte: Thoma Holz GmbH (2018)

Além dos painéis lisos (Holz 100 Standard), a Thoma também fabrica painéis especiais para minimizar a troca de temperatura entre o interior e o exterior da residência (chamado de *Holz 100 Thermal*) e painéis para minimizar a passagem do som (chamado de *Holz 100 Soundproofing*). A diferença é que o painel com proteção térmica possui ranhuras e sulcos na parte interna das lamelas de forma a criar um colchão de ar dentro do painel minimizando a perda ou ganho da temperatura. O painel com proteção à passagem do som tem na sua camada interna uma placa de fibra de madeira de baixa densidade (LDF – *Low Density Fiberboard*), que minimiza a passagem do som.

A empresa HolzBautechnik Sohm GmbH produz um painel de lamelas paralelas unidas com cavilhas em diagonais. Henderson (2009) destaca que o uso de cavilhas em diagonal reduz a chance de possíveis aberturas entre as lamelas, como as citadas por Passarelli e Ino (2013). A figura 10 ilustra o sistema utilizado pela empresa, que utiliza cavilhas com 20,4 mm de diâmetro.

Figura 10: a) esboço de painel com cavilha diagonal, b) seção de um painel ilustrando o uso de cavilhas na diagonal



Fonte: HolzBautechnik Sohm GmbH, (2018)

Além das pequenas e médias empresas na Europa central, a Structure Craft Mass Timber Inc. localizada no Canadá, produz painéis de CLT, NLT e DLT. Por se tratar de uma fábrica com maior capacidade de produção de diversos painéis, ela conta com mais equipamentos e automação que as pequenas fábricas europeias. O diâmetro das cavilhas utilizadas pela Structure Craft é de ¾” (19 mm), e são produzidas com madeira com densidades elevadas para os padrões canadenses, tais como *Douglas fir* (530 kg/m³) e *Hemlock* (500 kg/m³). Além dos painéis lisos e com ranhuras para reduzir propagação do som e os painéis com manta térmica, semelhantes aos produzidos na Europa, esta fábrica também produz um modelo de DLT que agrega uma camada de concreto sobre o painel, chamado de Timber-Concrete Composite (TCC), ou Compósito de Madeira-Concreto. Normalmente, os pisos TCC são usados quando é necessário vencer vãos maiores que 6 metros, ou quando a altura das lamelas precisa ser minimizada, ou ainda quando existem requisitos mais rigorosos para a rigidez do piso e melhor desempenho na vibração. A figura 11 ilustra o painel e algumas aplicações em obras.

Figura 11: a) Detalhe de um painel DLT; b) variados modelos de painéis DLT; c) painel sendo içado em uma obra.

Fonte: Structure Craft Massive Timber (2018)

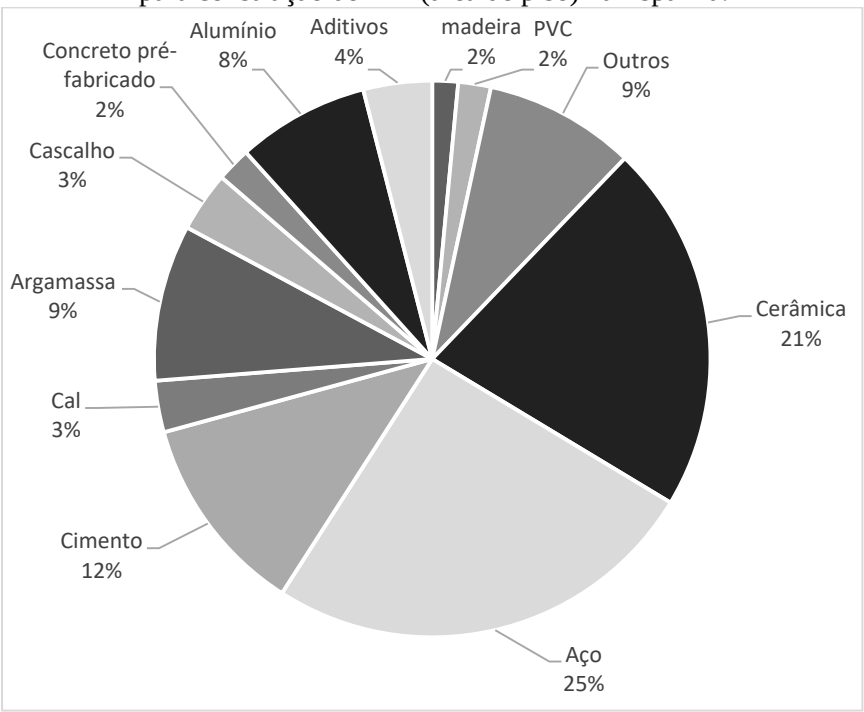
2.3 Vantagens ambientais dos painéis estruturais de madeira maciça

Na região da União Europeia, desde o início da década de 2000 está em vigor a diretiva 2002/91/CE que define uma metodologia comum de cálculo do desempenho energético integrado e normas mínimas relativas ao desempenho energético dos edifícios, além da inspeção regular de caldeiras e instalações de ar condicionado nos edifícios. A partir dessa diretiva, os países da comunidade europeia criaram selos de eficiência energética para os edifícios, e com o uso da metodologia de ACV os projetistas obtém o consumo energético do edifício e podem se enquadrar dentro dos requisitos da diretiva. A intenção é respaldar ações relativas à alteração climática (obrigações que são da competência do protocolo de Quioto), e desenvolver a eficiência energética, já que a comunidade europeia depende de energia produzida por países fora do bloco, e reduzir a emissão dos gases que causam efeito estufa (EUROPEAN COMMISSION, 2002).

A ACV – Avaliação do Ciclo de Vida – é definida como um estudo comparativo entre os mais diversos materiais que compõe um produto baseado em uma ampla base de dados de materiais, nas quais levanta-se as informações sobre o impacto ambiental de cada material, de forma a estudar como reduzir tais impactos ao meio ambiente (MARCAL et. al., 2013, p.2). De forma resumida, esta análise considera toda a cadeia produtiva, e calcula-se o máximo possível o consumo energético de cada etapa. Entretanto, é necessário ressaltar que o desenvolvimento de estudos de ACV em edificações requer algumas alterações devido, entre outros aspectos, às diferenças apresentadas com relação ao ciclo de vida de produtos industriais que envolvem, normalmente, um curto espaço de tempo, pois as obras de engenharia são geralmente caracterizadas por uma vida útil de anos, décadas ou séculos. (SOARES, SOUZA e PEREIRA, 2006, p.105). Além disso, os autores também ressaltam que a complexidade de uma edificação faz com que exista diversas ACV's, sendo que cada etapa construtiva e gerencial da obra poderia ter um processo de avaliação distinto.

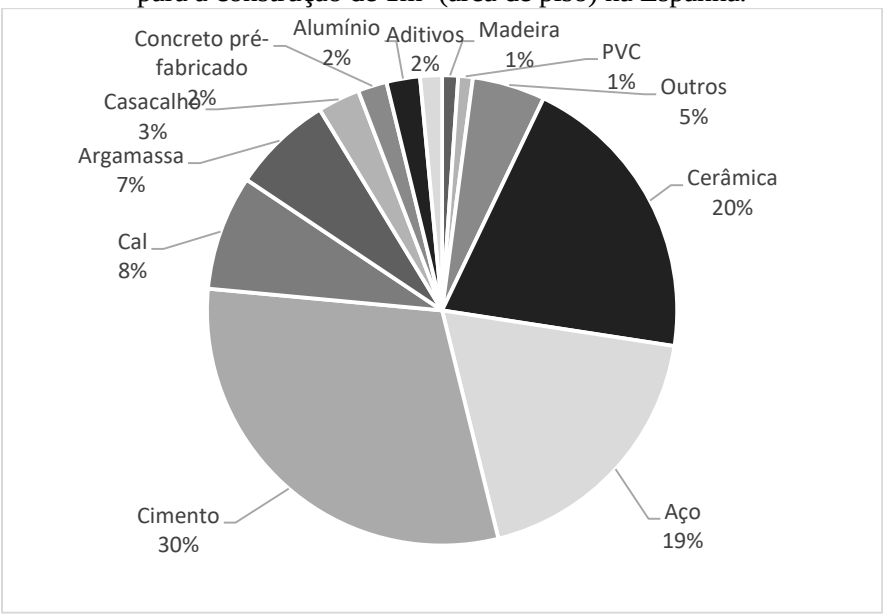
A partir da exigência governamental, diversas pesquisas têm sido conduzidas na Europa para o levantamento das informações sobre o impacto ambiental e consumo energético dos mais variados materiais usados para a construção civil. Dados relativos à Espanha apresentados nas figuras 12 e 13 exemplificam como cada material tem contribuído para o consumo energético e para emissão de CO_2 na atmosfera.

Figura 12: Contribuição na demanda de energia primária para a confecção dos materiais necessário para construção de 1m² (área de piso) na Espanha.



Fonte: BRIBIÁN et. al. (2011)

Figura 13: Contribuição de emissões de CO_2 associadas com a fabricação dos materiais necessários para a construção de 1m² (área de piso) na Espanha.



Fonte: BRIBIÁN et. al. (2011)

Tanto no consumo de energia primária, quanto para a contribuição na emissão de CO_2, os materiais mais agressivos são as cerâmicas, o cimento e aço.

Bribián et. al. (2011) salientam que o comparativo entre os diversos trabalhos que tem sido realizado sobre ACV em edificações, principalmente nos países europeus, além do Canadá,

Austrália e Japão, nem sempre são equivalentes, pois cada equipe de pesquisadores tem adotado um tempo de vida para a edificação (*life time*), além de outras variáveis como o *software* de combinação de dados, o banco de dados sobre os diversos materiais e diferenças geográficas e climáticas que afetam os resultados finais. Os mesmos autores realizaram uma ACV utilizando o *software* SimaPro v7.1.8, comparando materiais de construção em três categorias de impacto, sendo Demanda por Energia Primária (MJ-Eq), GWP (Global-warming potential,) (Kg CO_2 Eq) e a demanda por água (L/Kg), além de considerar a necessidade de transportar os materiais por uma distância de 100 km e um tempo de vida útil da edificação de 50 anos. Os resultados são apresentados compilados na tabela 3, mas de modo geral, os valores obtidos mostraram que todos os materiais à base de madeira tiveram o menor impacto, preferencialmente os que exigem menos processamento, onde o saldo em carbono equivalente é quase neutro e pode ser negativo se ao final da sua vida útil a madeira for reutilizada em vez de incinerada. Vigas de madeira lamelada colada (MLC) não incineradas absorvem 582 kg de CO_2, enquanto concreto armado emite 458 kg CO_2/m^3 e de aço 12.087 kg CO_2/m^3. O uso da madeira para estruturas de edifícios acarreta uma captura de CO_2 nas florestas e armazenamento deste CO_2 pela vida útil inteira do edifício (50 anos pelo menos), que pode ser aumentada se a madeira for reutilizada no final da sua vida útil. Isso faz com que os edifícios com estruturas de madeira sejam verdadeiros “armazéns de CO_2" e seu uso deveria ser incentivado pelas administrações públicas, que além desta vantagem ambiental ainda possuem melhores resistências em situações de incêndio (BRIBIÁN et. al., 2011). Os autores ainda sugerem que os resultados podem ser melhorados se o uso das resinas a base de ureia-formaldeído e melamina-formaldeído usadas em chapas de madeira, vigas e painéis fossem substituídas pelas resinas naturais com as mesmas especificações e qualidade das primeiras que são mais poluentes, e se a secagem da madeira fosse feita de forma natural e não em estufas de secagem forçada, que consomem energia elétrica ou biomassa e geram mais CO_2.

Tabela 3: Impacto dos materiais de construção na Espanha

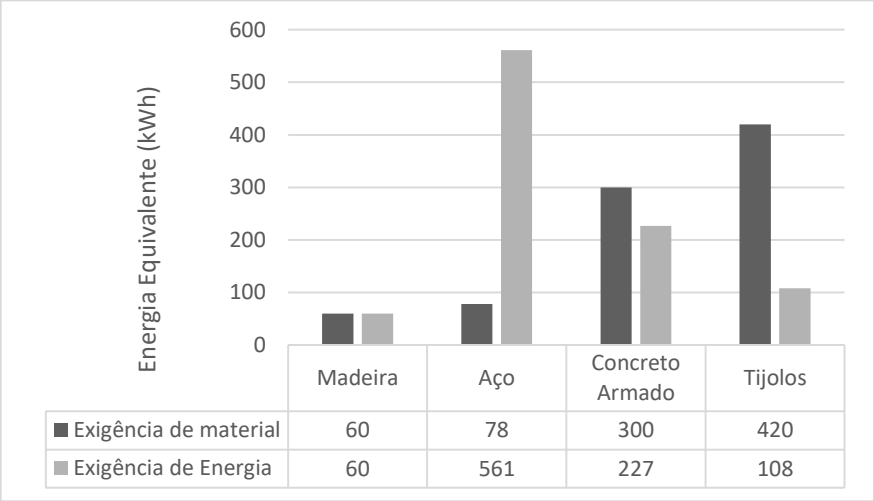
Material de construção		Densidade (kg/m³)	Cond. térmica (W/mK)	Demanda energia primária (MJ-Eq/Kg)	GWP (Kg CO2-Eq/kg)	Demanda por água (L/kg)
Material isolante	Espuma para laje EPS	30	0,0375	105,486	7,336	192,729
	Lã de rocha	60	0,04	26,393	1,511	32,384
	Laje rígida de poliuretano	30	0,032	103,782	6,788	350,982

	Laje de cortiça	150	0,049	51,517	0,807	30,337
	Fibra de celulose	50	0,04	10,487	1,831	20,789
	Lã de madeira	180	0,07	20,267	0,124	2,763
Cimento e concreto	Cimento	3150	1,4	4,235	0,819	3,937
	Argamassa	1525	0,7	2,171	0,241	3,329
	Conc. Reforçado	2546	2,3	1,802	0,179	2,768
	Concreto	2380	1,65	1,105	0,137	2,045
Produtos de madeira	Madeira serrada, *softwood*, aplainada, seca em estufa	600	0,13	20,996	0,3	5,119
	Madeira serrada, *softwood*, aplainada, seca ao ar livre	600	0,13	18,395	0,267	4,192
	MLC-uso interno	600	0,13	27,309	0,541	8,366
	Painel de partícula - uso interno	600	0,13	34,646	0,035	8,788
	OSB	600	0,13	36,333	0,62	24,761
Materiais de construção comuns	Aço reforçado	7900	50	24,336	1,526	26,149
	Alumínio	2700	239	136,803	8,571	214,341
	Cloreto de polivinila PVC	1400	0,17	73,207	4,267	511,999
	Placa de vidro	2500	0,95	15,511	1,136	16,537
	Cobre	8920	380	35,586	1,999	77,794

Fonte: adaptado de BRIBIÁN, et. al. (2011)

Dados mais amplos do continente europeu apresentados por BUCK et al., (2015), mostram o impacto dos materiais utilizados em estruturas pelo comparativo do Carbon Foot Print (Pegada Ecológica de Carbono), que é um termo utilizado por ecologistas que considera o total das emissões de carbono associadas a uma determinada operação, são apresentados na figura 14.

Figura 14: Consumo de energia equivalente para fazer uma coluna de 3 metros.



Fonte: adaptado de Buck et. al. (2015)

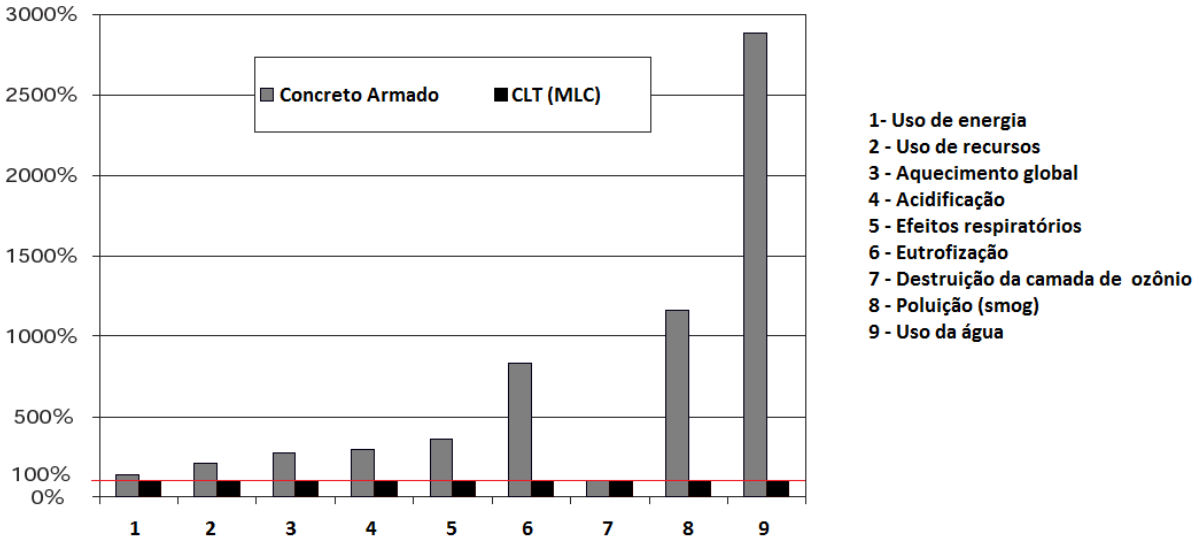
Mahalle, O'Connor e Barry (2011) determinaram algumas características ambientais do CLT comparado ao concreto armado, tomando como base a ACV disponível para Madeira Lamelada Colada Canadense. Um dos comparativos realizado foi feito tendo como base o edifício Stadhaus Murray Grove, localizado em Londres, Reino Unido, que possui 30 metros de altura e nove pavimentos, montado em 2008, apresentado na figura 15.

Figura 15: Edifício Stadhaus Murray Grove, Londres, Reino Unido.

Fonte: TRADA TECHNOLOGY, 2009

Os autores se basearam nos dados disponibilizados pelos projetistas do prédio, que afirmaram, de acordo com estimativas, que um edifício equivalente usando concreto armado iria consumir 950 metros cúbicos de concreto e 120 toneladas de aço para reforço e armações, enquanto na estrutura de madeira, foram utilizados aproximadamente 910 metros cúbicos de CLT. Usando o Estimador de Impacto e substituindo a MLC para CLT, foram estimados o impacto "cradle-to-grave" (do berço ao túmulo) apenas para o volume dos materiais estruturais nestas duas versões do edifício, ou seja, foi feita uma ACV parcial, pois ao mesmo tempo que inclui todas as fases da vida, também omitiu muitos componentes que poderiam alterar os resultados comparativos que são apresentados na Figura 5. Os valores para o CLT são definidos como referência (100%), e os valores para o concreto são apresentados comparativamente aos do CLT, em porcentagem.

Figura 16: Comparativo do uso do CLT versus concreto armado.



Fonte: adaptado de Mahalle, O'Connor e Barry (2011)

Os autores também fizeram um comparativo mais refinado considerando somente a produção de uma laje, comparando os valores de impacto por metro quadrado da laje de CLT versus uma laje de concreto armado e o local como sendo Vancouver, no Canadá. A tabela 4 apresenta os valores obtidos para os dois materiais e a Figura 17 apresenta de forma gráfica os valores em porcentagem.

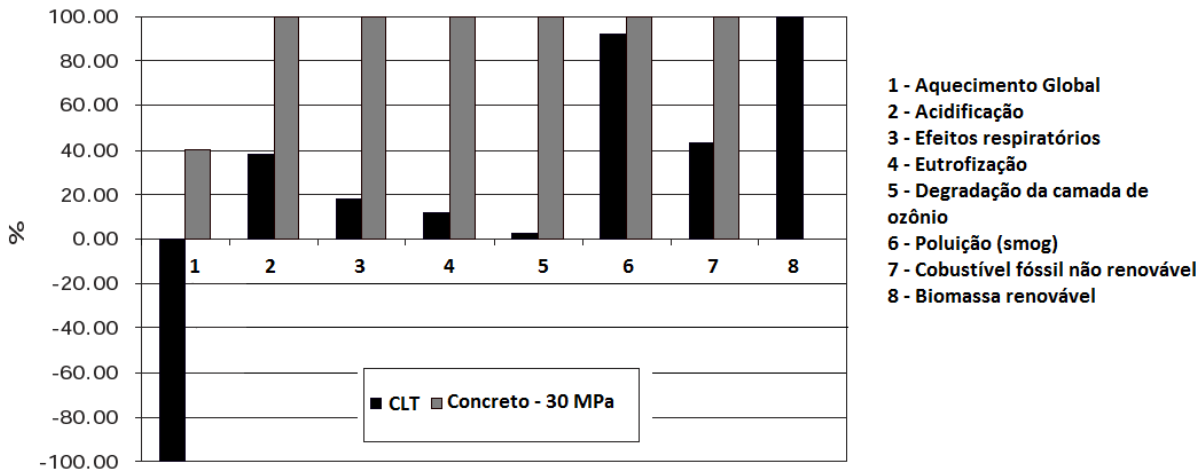
Tabela 4: CLT X Concreto armado: comparativo de uma laje em m²

Categoria de impacto	Unidade	1 m² de piso	
		CLT	Concreto armado 30MPa
Aquecimento Global	Kg CO^2 eq.	-222,55*	90,12
Acidificação	H^+ mols eq.	8,77	23,00
Efeitos Respiratórios	Kg PM2,5 eq.	0,010	0,058
Eutrofização	Kg N eq.	0,014	0,115
Destruição da camada de ozônio	Kg CFC-11 eq.	7,15E-09	2,65E-07
Poluição (Smog)	Kg NOx eq.	0,21	0,23
Combustível fóssil não renovável	MJ eq.	272,30	633,54

*Nota: * emissões líquidas, quando se leva em conta o sequestro de carbono florestal (248 kg CO^2 eq.) e redução das emissões de carbono pela substituição da queima de resíduos de madeira para o gás natural (21,8 kg CO^2 eq.).*

Fonte: Mahalle, O'Connor e Barry (2011)

Figura 17: Comparativo da ACV de 1m² de piso de concreto versus 1m² de piso de CLT.



Fonte: adaptado de Mahalle, O'Connor e Barry (2011)

Em ambas as pesquisas desenvolvidas por Mahalle, O'Connor e Barry fica evidente a grande vantagem ambiental do uso da madeira como elemento estrutural principal de um edifício, principalmente nos indicadores relativos ao aquecimento global, à degradação da camada de ozônio e ao uso de energia. Outros autores presentes na literatura sobre o mesmo

tema obtiveram conclusões similares ao comparar estruturas de madeira feita com painéis maciços de madeira com estruturas em concreto armado.

Robertson (2011) desenvolveu um estudo comparativo da ACV de um edifício de escritórios com cinco andares feito em concreto contra um edifício com estrutura mista que utilizava pilares e vigas de MLC e paredes em painéis de CLT, usando como base um inventário de ciclo de vida obtido a partir de dados primários de um painel piloto fabricado na região de British Columbia, Canadá. Os resultados indicaram que os impactos ambientais para o uso do MLC/CLT na construção do edifício seriam mais vantajosos em 10 dos 11 indicadores ambientais utilizados como referência na pesquisa. O indicador que apresentou a menor diferença entre os materiais foi a acidificação em que a madeira foi 14% melhor que o concreto, e o indicador com maior diferença entre eles foi o aquecimento global, onde a madeira obteve índice de 71% a menos que concreto. O único índice em que o concreto obteve vantagem foi no indicador de consumo de combustível fóssil, onde obteve um índice de 6% sobre a madeira.

Além da ACV, um outro conceito que surgiu no setor da construção é o chamado Health Building ou “construção saudável”, que é um indicador mais subjetivo da sustentabilidade do edifício. Um edifício saudável é aquele que não afeta negativamente nem a saúde dos seus ocupantes nem o ambiente externo (LEVIN, 1995). Essa concepção engloba diversos conceitos, sendo alguns deles relacionados à arquitetura como a possibilidade do projeto privilegiar a luz natural, métodos para economia de energia como uso de aquecimento solar, e o uso de componentes e acabamentos que não emitam Componentes Orgânicos Voláteis, em inglês VOC’s.

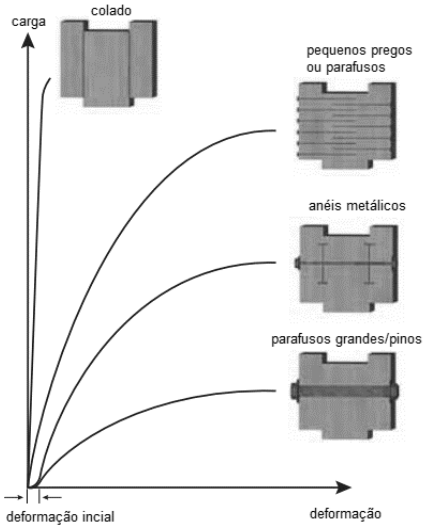
Segundo Thoma (2008) o uso de painéis a base de madeira que utilizam adesivos tais como OSB, MDF, compensados, entre outros, trouxeram desenvolvimento econômico para o setor florestal e madeireiro, porém retiraram todo o potencial ecológico do uso da madeira. Além disso, o autor ressalta que o formaldeído e o isocianato presente nos adesivos estruturais podem causar doenças graves, como câncer, e são prejudiciais para pessoas que são alérgicas a esses componentes químicos. Segundo o autor, as construções saudáveis, como as que utilizam painéis de madeira estrutural sem a utilização de adesivos químicos, como o DLT e o DCLT, são soluções viáveis e não prejudiciais à saúde.

2.4 Ligações cavilhadas

2.4.1 *Resistência da cavilha e modos de ruptura da ligação*

O guia canadense de projetos e montagens em estruturas de madeira Cecobois (2015) apresenta um estudo do professor Julius Natterer no qual é ilustrado graficamente um comparativo da rigidez das ligações para estruturas de madeira (Figura 18), sendo ligações coladas, pregadas, por anéis metálicos e por parafusos grandes e pinos lisos. Nelas fica evidente que as ligações coladas têm menores deformações quando sujeitas ao carregamento e as ligações por pinos, nas quais se encontram as ligações por cavilhas, tem as maiores deformações. No mesmo comparativo percebe-se que a ligação colada tem ruptura frágil enquanto as ligações por pinos são mais dúcteis.

Figura 18: Curvas Força x Deformação para diferentes tipos de conexões



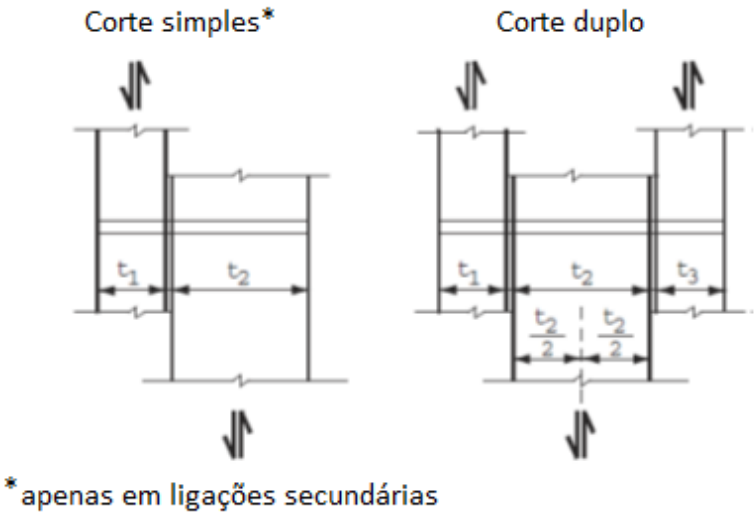
Fonte: Adaptado de Natterer [1](2004, *apud* Cecobois 2015, p.12)

As deformações nas estruturas coladas são menores devido a área de contato entre as peças que formam a viga ou painel serem a maior área possível, ou seja, toda a superfície das peças está unida e transmitindo os esforços entre si. Nas ligações por pinos metálicos ou de madeira, como as cavilhas, o esforço deve ser resistido somente pela área de atuação do pino, ou seja, há uma concentração de tensões na região da ligação, onde ocorre predominantemente compressão normal às fibras da madeira, ocasionando uma deformação maior.

[1] Natterer, J. Construction en Bois: Matériau, Technologie et Dimensionnement. Lausane: PPUR Presses Polytechniques, 2004

A norma NBR 7190/1997 determina que a resistência total de uma cavilha é a soma das resistências correspondentes às suas diferentes seções de corte. O valor de cálculo da resistência da cavilha, correspondente a uma dada seção de corte entre duas peças de madeira, é determinada em função da resistência à compressão paralela $f_{c0,d}$ da cavilha, considerada em sua flexão, e da resistência à compressão normal $f_{c90,d}$ da cavilha, considerada na segurança relativa a seu esmagamento, do diâmetro (*d*) da cavilha e da espessura (*t*) das peças a serem unidas, tomada como a menor das espessuras t_1 e t_2 de penetração nos elementos interligados, como mostrado na Figura 19 (ABNT NBR 7190, 1997, p.35). Para cortes simples é recomendado o uso em ligações secundárias.

Figura 19: Detalhe das ligações por cavilhas



Fonte: NBR 7190/1997

A resistência de cálculo da cavilha $R_{vd,1}$, correspondente a uma única seção de corte é determinada de modo análogo ao empregado para os pinos metálicos. Para as cavilhas, calcula-se incialmente os valores de ß e ßlim e posteriormente a resistência de cálculo, conforme as equações de 1 a 4.

$$\beta = \frac{t}{d}$$ Equação 1

$$\beta_{lim} = \sqrt{\frac{f_{c0,d\ cav}}{f_{c90,d\ cav}}}$$ Equação 2

Onde $f_{c0,d,cav}$ é o valor de cálculo da resistência à compressão paralela e $f_{c90d,cav}$ é o valor de cálculo da resistência à compressão normal da cavilha, calculando-se a resistência pelas seguintes expressões:

- No caso de esmagamento da cavilha ($\beta \leq \beta_{lim}$)

$$R_{vd,1} = 0{,}5 \cdot t \cdot d \cdot f_{c90,d\ cav} \qquad \text{Equação 3}$$

- No caso de flexão da cavilha ($\beta \geq \beta_{lim}$)

$$R_{vd,1} = 0{,}5 \frac{d^2}{\beta_{lim}} \cdot f_{c0,d\ cav} \qquad \text{Equação 4}$$

A partir da resistência de uma cavilha calcula-se o número de cavilhas necessárias para resistir o carregamento.

A NBR 7190 (ABNT, 1997, p.35) apresenta as seguintes exigências complementares:

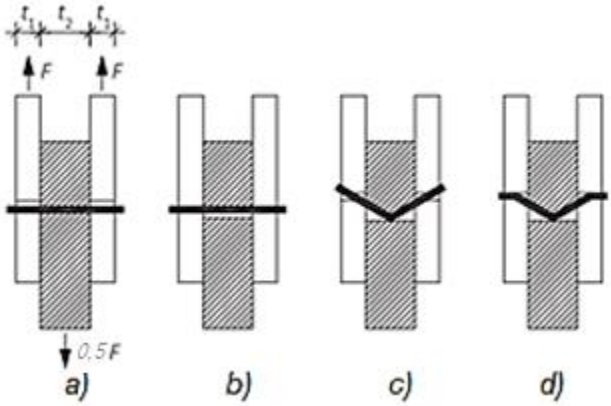
- Uso de madeira classe D60 ($f_{c0,d}$ = 60MPa) para confecção das cavilhas;
- Alternativamente pode-se usar impregnação com resinas que aumentem a resistência de madeiras com classes inferiores a D60;
- Diâmetros das cavilhas devem ser de 16, 18 e 20 mm;
- Pré furação das peças que irão ser ligadas pelas cavilhas com diâmetro do furo (d_0) igual ao diâmetro (d) da cavilha.

Pela norma europeia de estruturas de madeira Eurocode 5, no item 8.2.2, a resistência característica de um elemento de ligação para cortes duplos deve ser determinado através do menor valor obtido das expressões que são associadas aos modos de falhas estabelecidos pela teoria de Johansen (1949), base do European Yield Model (EYM), incorporados a norma de Estruturas de Madeira Europeia EN 1995-1-1 – Eurocode 5. (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004, p.62). A atual revisão da norma brasileira de estruturas de madeira passará a adotar os mesmos critérios que a norma europeia.

Estes modelos de falhas dependem de duas propriedades mecânicas da madeira: resistência ao embutimento da madeira que está sendo conectada e resistência à flexão da madeira da cavilha que faz a conexão. Assumindo a hipótese que o material tem um comportamento rígido-plástico (sem deformação elástica e deformação plástica perfeita), Johansen diferenciou os modos de falhas para ligações simples e duplas. A Figura 20 apresenta os quatro modos de falhas para ligações duplas. Para estes modos, a força característica ou

capacidade de carga $F_{v,R}$ pode ser calculada por condições de equilíbrio de força e momento (RACHER, 2017, p.333).

Figura 20: Possíveis modos de falhas para ligações duplas (dois planos de corte)



Fonte: Racher (2017)

Os modos de falhas apresentados representam os seguintes efeitos:

a) Embutimento na madeira das peças externas;
b) Embutimento na madeira da peça interna;
c) Flexão do pino;
d) Flexão do pino e embutimento na madeira.

Para cada modelo de falha foi deduzida uma equação de forma que a força característica é representada pelo menor valor dentre os apresentados na equação 5.

$$F_{v,Rk=min} \begin{cases} a) \quad f_{e1,k} t_1 \, d \\ b) \quad 0{,}5 f_{e1,k} t_2 \, d \, \beta \\ c) \quad 1{,}05 \dfrac{f_{e1,k} t_1 \; d}{2+\;\beta} \left[\sqrt{2\beta(1+\beta) + \dfrac{4\beta\,(2+\beta) M_{y,k}}{f_{e1,k} \; d \; t_1^2}} - \beta \right] + \dfrac{F_{ax,Rk}}{4} \\ d) \quad 1{,}15 \sqrt{\dfrac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2\, M_{y,k} f_{e1,k} \; d} + \dfrac{F_{ax,Rk}}{4} \end{cases} \qquad \text{Equação 5}$$

Sendo:

Fator $\beta = \frac{f_{e2,k}}{f_{e1,k}}$

t_1 = espessura da peça 1 (externa);

t_2 = espessura da peça 2 (central);

f_e = resistência ao embutimento;

d = diâmetro do pino;

$M_{y,k}$ = Momento aplicado pela força F.

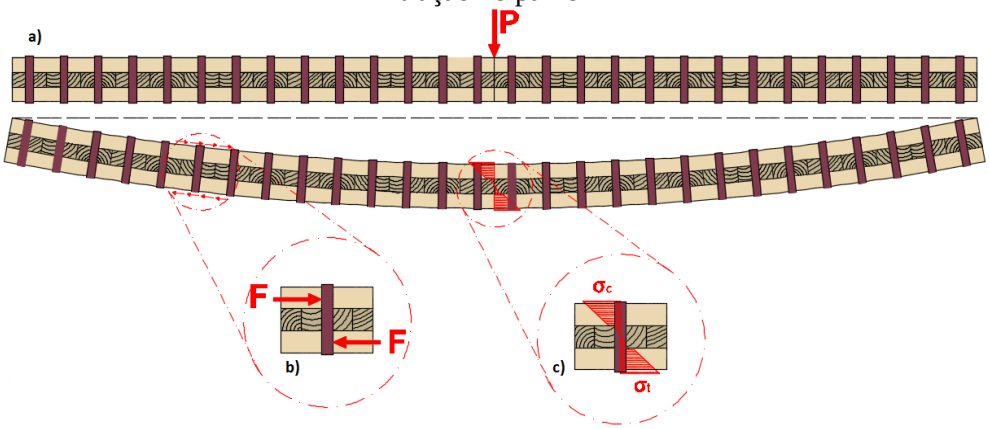
O Eurocode 5 e o projeto de revisão da norma brasileira salientam que o valor $F_{ax,Rk}/4$ é a contribuição do efeito de confinamento provocado pela compressão das arruelas nas laterais externas da ligação, ou pela resistência ao arrancamento no caso de pregos e parafusos de rosca soberba, ou embutimento da cabeça do prego ou parafuso de rosca soberba na lateral externa da peça de madeira. A contribuição do efeito de confinamento deve ser limitada às seguintes porcentagens das parcelas das equações que representam os modos de falha c e d, desconsiderando o fator de atrito:

- Pregos cilíndricos lisos (15%);
- Pregos anelados (25%);
- Parafusos passantes com porca e arruelas (25%);
- Parafusos de rosca soberba (100%);
- Pinos metálicos ajustados (0%).

Apesar de não fazer menção às cavilhas de madeira, considera-se o mesmo caso do pino metálico ajustado.

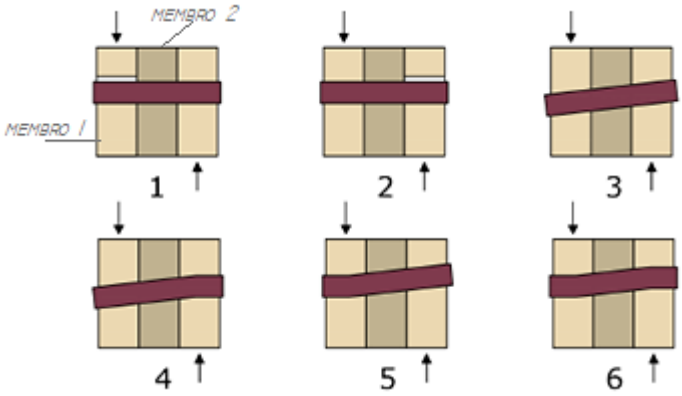
A partir da teoria de falha de Johansen, Sohier (2018) deduziu os modos de falha para as ligações cavilhadas de um painel DCLT, pois as ligações entre as lamelas do painel trabalham na flexão, ou seja, as camadas externas possuem forças que atuam em direções opostas (compressão na parte superior e tração na parte inferior). Diferentemente das ligações calculadas por Johansen que são mais comuns em treliças, onde as forças das camadas externas atuam na mesma direção, e a camada central na direção oposta. A figura 21 ilustra como as ligações são solicitadas pela flexão do painel, e a figura 22 os modos de falhas possíveis de ocorrem.

Figura 21: a) Flexão do painel de uma carga distribuída aplicada no centro do vão; b) ilustração das forças atuando nas lamelas e nas cavilhas; c) ilustração das distribuições de tensões de compressão e tração no painel



Fonte: Pereira, Sohier e Calil (2018)

Figura 22: Modelos de falhas nas ligações cavilhadas para painéis DCLT na flexão



Fonte: Pereira, Sohier e Calil (2018)

Os modelos apresentados na figura 22 são:

1. Falha por embutimento do membro 1;
2. Falha por embutimento do membro 2;
3. Falha por embutimento simultânea dos dois membros;
4. Falha por flexão da cavilha sobre o membro 1;
5. Falha por flexão da cavilha sobre o membro 2;
6. Falha por flexão da cavilha simultaneamente sobre os dois membros.

Para o equacionamento de cada situação de falha, Sohier (2018) utilizou o mesmo conceito desenvolvido por Johansen, partindo o equilíbrio de força e momentos, e assim deduzir a equação para cada situação. O detalhamento do método de Johansen foi demonstrado por Blaß e Laskewitz (2017), e a partir destes modelos, Sohier adicionou uma camada transversal entre

as peças, considerando as forças em direções opostas. Para simplificar as equações, foram criados dois parâmetros: o primeiro (ß) que é a razão entre as resistências ao embutimento dos membros 1 ($f_{e,1,k}$) e 2 ($f_{e,2,k}$) (externos), e o segundo (δ) que é razão entre a resistência ao embutimento da camada central ($f_{e,c,k}$) com a resistência ao embutimento do membro 1. Os dois parâmetros são apresentados nas equações 6 e 7.

$$\beta = \sqrt{\frac{f_{e,2,k}}{f_{e,1,k}}} \qquad \text{Equação 6}$$

$$\delta = \frac{f_{e,c,k}}{f_{e,1,k}} \qquad \text{Equação 7}$$

Da mesma forma que as equações de Johansen, as equações desenvolvidas para este caso, levam em consideração seis modos de falhas e a força característica é representada pelo menor valor obtido entre as seis equações apresentados na Equação 8.

$$F_{v,Rk=min} \begin{cases} a) & f_{e1,k} t_1 \, d \\ b) & f_{e2,k} t_2 \, d \\ c) & \frac{f_{e1,k} \cdot d\beta}{1+\beta} \cdot \left(-2t_w - t_1 - t_2 + \sqrt{(4+\beta+\frac{\delta}{\beta})t_w^2 + \left(\frac{2\beta+1}{\beta}\right) t_1^2 + (2+\beta)t_2^2 + 4t_w \cdot (t_1+t_2) + 2t_1 t_2} \right) \\ d) & \frac{f_{e1,k} \cdot d\beta}{1+\beta} \cdot \left(-t_w - \frac{t_2}{2} + \sqrt{(1+\frac{\delta}{4\beta}+\frac{\delta}{2})t_w^2 + \left(\frac{1}{2}+\frac{\beta}{2}\right) \cdot t_2^2 + t_w t_2 \cdot \frac{2 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d} + \frac{M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d\beta}} \right) \\ e) & \frac{f_{e1,k} \cdot d}{1/\beta + 0{,}5} \cdot \left(-t_w - \frac{t_1}{2} + \sqrt{t_w^2 + t_w t_1 + \frac{t_1^2}{2} + \delta \frac{t_w^2}{2\beta} + \frac{t_1^2}{2\beta} + \frac{2 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d\beta} + \delta \frac{t_w^2}{4} + \frac{M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d}} \right) \\ f) & \frac{f_{e1,k} \cdot d}{1+\beta} \cdot \left(-\beta t_w + \sqrt{\beta^2 + t_w^2 + \delta \cdot \frac{\beta(1+\beta)}{2} \cdot t_w^2 + 4\beta(\beta+1) \frac{M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d}} \right) \end{cases} \qquad \text{Equação 8}$$

Pode-se simplificar o conjunto das equações considerando algumas condições de contorno tais como:

- Espessuras idênticas das camadas, ou seja, $t_1=t_2$;
- Mesma madeira para todas as camadas, portanto mesmas propriedades de densidade e resistência ao embutimento, $f_{e1,k}=f_{e2,k}$, ou seja, ß=1.

A partir dessas condições, as equações se resumem à equação 9.

$$F_{v,Rk}=\min\begin{cases} a) & f_{e1,k}\cdot t\cdot d \\ c) & \dfrac{f_{e,1k}\cdot d}{2}\cdot\left(-4t+\sqrt{(\delta+21)t^2}\right) \\ d) & \dfrac{2\cdot f_{e1,k}\cdot d}{3}\cdot\left(-\dfrac{3t}{2}+\sqrt{3t^2\left(1+\dfrac{\delta}{4}\right)+\dfrac{3\cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k}\cdot d}}\right) \\ e) & \dfrac{f_{e1,k}\cdot d}{2}\cdot\left(-t+\sqrt{t^2(1+\delta)+8\cdot\dfrac{M_{y,Rk}}{f_{h,1,k}\cdot d}}\right) \end{cases} \qquad \text{Equação 9}$$

2.4.2 *Métodos analíticos para o cálculo de ligações cavilhadas: principais teorias*

Kreuzinger (2017) explica que duas ou mais peças unidas por fixadores mecânicos para compor uma viga composta sofrem deformações nas camadas intermediárias devido à ligação ser semi-rígida, quando estes elementos são submetidos a esforços de cisalhamento. Devido a esses deslocamentos relativos, a hipótese de Bernoulli de que as seções de plano permanecem como plano não mais se sustenta e o modelo de viga de Euler-Bernoulli[2] não pode ser aplicada à seção transversal geral da viga composta.

As vigas compostas geralmente são formadas por seções transversais com geometrias em forma de T, I, ou vigas caixão, de maneira a aumentar o momento de inércia quando comparado a vigas com seções retangulares. Os conectores neste tipo de viga são submetidos primordialmente a esforços de cisalhamento.

A capacidade de carga de vigas compostas ligadas mecanicamente se situam entre 0 e 1, sendo 0 o valor atribuído a vigas compostas sem nenhum tipo de ligação entre as camadas (camadas somente sobrepostas) e 1 às vigas com camadas totalmente unidas, como o caso de vigas coladas (MLC) (KREUZINGER, 2017, p.249). O autor também salienta que existem dois métodos de cálculo amplamente difundido para o dimensionamento de vigas compostas: o Mechanically Jointed Beams Theory (Teoria das Vigas Compostas Mecanicamente) também chamado de Método Gamma (γ-method); e o Shear Analogy Method (Método de Analogia de Cisalhamento). O método gamma consta no anexo B da norma de Estruturas de Madeira

[2] O modelo de viga de Euler-Bernoulli é uma simplificação da teoria linear da elasticidade com a qual calcula-se a deflexão de uma viga sob um determinado carregamento e é constituída por uma equação diferencial parcial linear de quarta ordem (SILVA, 2014, p.43).

Europeia EN 1995-1-1 – Eurocode 5 e também foi incorporado na revisão da norma brasileira de estruturas de madeira como Fator de Redução da Inércia para vigas compostas. Segundo Gagnon e Popovski (2011), a vantagem deste método é que, por ser mais simples, pode ser calculado manualmente, e a desvantagem é que foi desenvolvido para elementos de 3 camadas, sendo necessário algumas condições de contorno para aplicação em vigas e painéis com mais de três camadas. Já o método Shear Analogy é válido para qualquer tipo de seção transversal e qualquer número de camadas individuais, permite seções transversais variáveis e configurações de carga ou conexão ao longo da viga composta, porém, o método requer o uso de *softwares* (programas de elementos finitos), que podem considerar deformações de cisalhamento em elementos de barra.

2.4.2.1 Teoria das Vigas Compostas Mecanicamente ou Método Gamma (γ-method)

A Teoria das Vigas Compostas Mecanicamente (Mechanically Jointed Beams Theory) também chamado de Método Gamma (γ-method) foi desenvolvido na década de 1950, para cálculo e projetos de vigas compostas unidas por pinos, pregos e parafusos. Por este método, um coeficiente chamado de gamma (γ) funciona como um redutor na rigidez da viga, quando comparada à uma viga sem emendas ou conexões. Os valores do γ podem variar de 0 a 1, conforme citado anteriormente, e por isso funciona como uma taxa de eficiência da ligação, sendo que a ligação colada possui a melhor eficiência, ou seja, γ = 1. O fator γ está ligada à componente de Steiner ($E \cdot A \cdot a^2$) no cálculo da rigidez efetiva como demonstrado pela equação 10.

$$EI_{eff} = \sum_{i=1}^{3} (E_i \cdot I_i + \gamma \cdot E_i \cdot A_i \cdot a_i^2) \qquad \text{Equação 10}$$

Onde:

E_i são os módulos de elasticidade das camadas;

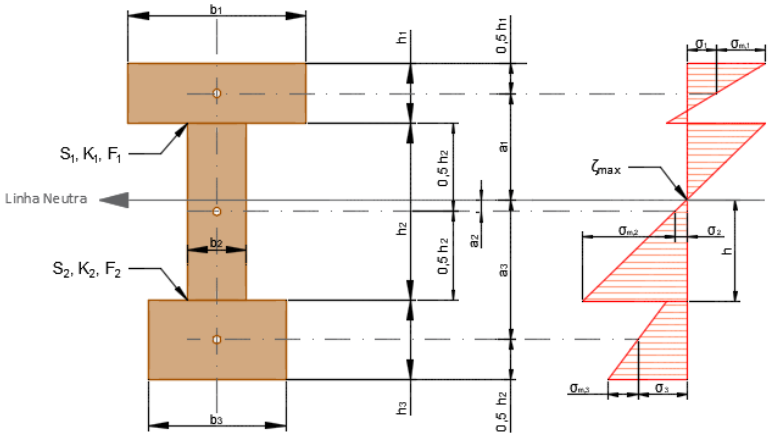
I_i são os momentos de inércias das camadas;

A_i são as áreas das seções transversais das camadas;

a_i são as distâncias dos centroides de cada camadas até a linha neutra do conjunto;

A figura 23 apresenta os índices exemplificados em uma seção transversal de uma viga I não simétrica, e também a distribuição de tensões nesta viga. Os índices S_i são referentes ao espaçamento entre os conectores, os índices K_i (ou K_{ser}) são referentes ao módulo de deslizamento da ligação, os índices F_i são referentes à força aplicada em cada elemento.

Figura 23: Seção transversal de uma viga composta e sua distribuição de tensões normais.



Fonte: próprio autor adaptado do anexo 5 do Eurocode 1995-1-1

Os índices K_{ser} representam o módulo de deslizamento da ligação. A norma de Estruturas de Madeira Europeia EN 1995-1-1 – Eurocode 5 estima esse índice através da equação 11, e a revisão da norma brasileira através das equações 12 e 13.

$$k_{ser} = \rho^{1,5} \cdot \frac{d}{23} \qquad \text{Equação 11}$$

Onde:

ρ é a densidade da madeira a ser unida;

d é o diâmetro da cavilha;

$$k_{ser} = \rho^{1,5} \cdot \frac{d}{20} \qquad \text{Equação 12}$$

$$k_U = \frac{2}{3} \cdot K_{ser} \qquad \text{Equação 13}$$

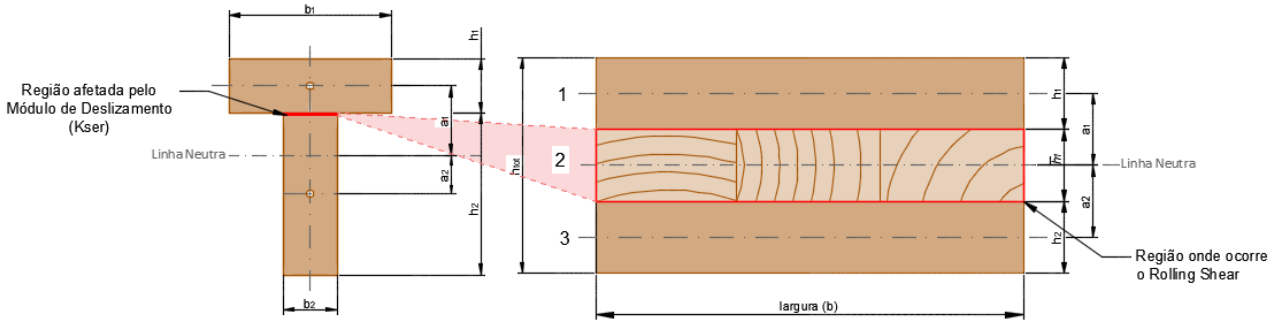
Sendo o *Ku* o valor do módulo de deslizamento para o estado último de utilização.

O projeto de norma brasileira *PN 02:126.10-001-4: Método de ensaio para determinação de resistências de ligações mecânicas das estruturas de madeira*, apresenta o método experimental para a determinação do módulo de deslizamento da ligação (K_{ser}), e será abordado detalhadamente mais adiante no item referente aos métodos de ensaio.

Os valores a_i, são as distâncias dos centroides de cada camadas até a linha neutra do conjunto, e dependendo da geometria da viga, este cálculo pode variar. Quando o método gamma é utilizado para cálculo de painéis de lamelas coladas (CLT), é necessária uma modificação dos parâmetros, como apresentado nas figuras 24 e 25. A região que originalmente transferia esforços através da conexão semi-rígida por conectores mecânicos (pregos, pinos,

cavilhas) na qual havia deslizamento da ligação (k_{ser}) passa a ser representado pela camada na direção transversal do painel, que tem a resistência determinada pela resistência do Rolling Shear (cisalhamento das fibras da madeira na direção transversal – G_{90}), em vez do K_{ser}. Nas figuras 24 e 25 as linhas em vermelho representam a região de interface na qual existe a conexão. Os valores dos parâmetros a_i para vigas T e a correlação para painéis de 3 camadas são demostrados pelas equações 14 e 15, e para vigas I e a correlação para painéis de 5 camadas são demostrados pelas equações 16, 17 e 18. O cálculo dos parâmetros para DCLT é a combinação do conceito das vigas unidas mecanicamente com a adaptação feita deste mesmo método para o cálculo do CLT, como ilustrado na figura 26.

Figura 24: Parâmetros geométricos para vigas T e correlação para painéis de 3 camadas de CLT

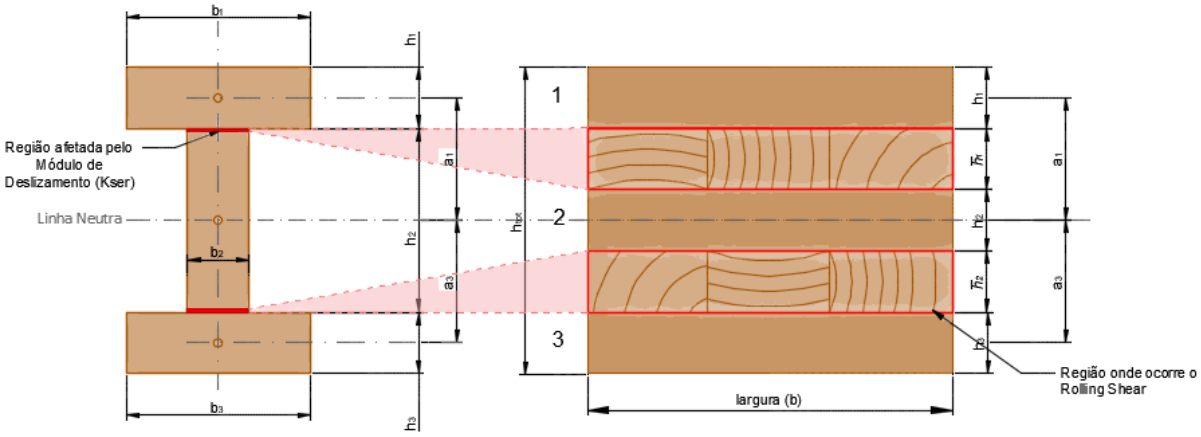


Fonte: próprio autor

$$a_1 = \frac{h_1}{2} + \overline{h_1} + \frac{h_2}{2} - a_2 \qquad \text{Equação 14}$$

$$a_2 = \frac{\gamma_1 E_1 A_1 \left(\frac{h_1}{2} + \overline{h_1} + \frac{h_2}{2}\right)}{\sum_{i=1}^{2} (\gamma_i E_i A_i)} \qquad \text{Equação 15}$$

Figura 25: Parâmetros geométricos para vigas I e correlação para painéis de 5 camadas de CLT



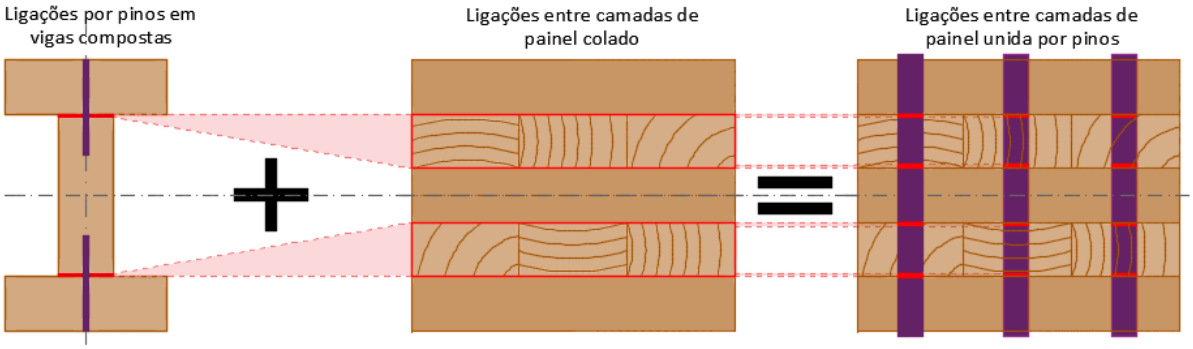
Fonte: próprio autor

$$a_1 = \frac{h_1}{2} + \overline{h_1} + \frac{h_2}{2} - a_2 \qquad \text{Equação 16}$$

$$a_2 = \frac{h_2}{2} + \overline{h_2} + \frac{h_3}{2} + a_2 \qquad \text{Equação 17}$$

$$a_2 = \frac{\gamma_1 E_1 A_1 \left(\frac{h_1}{2} + \overline{h_1} + \frac{h_2}{2}\right) - \gamma_3 E_3 A_3 \left(\frac{h_2}{2} + \overline{h_2} + \frac{h_3}{2}\right)}{\sum_{i=1}^{3}(\gamma_i E_i A_i)} \qquad \text{Equação 18}$$

Figura 26: Ilustração da união dos conceitos de cálculo de vigas compostas e painéis CLT para o cálculo do DCLT



Fonte: próprio autor

A partir dos dados geométricos da seção transversal da viga (ou painel) (A_i), do módulo de elasticidade da madeira (E_i), do espaçamento entre os conectores (S_i), do módulo de deslizamento da ligação (K_i ou K_{ser}), e do comprimento da viga (L^2), pode-se calcular o fator γ a partir da equação 15.

$$\gamma_i = \frac{1}{\left[1 + \frac{\pi^2 \cdot E_i \cdot A_i \cdot S_i}{K_i \cdot L_0^2}\right]} \quad para\ i = 1\ \ e\ \ i = 3 \qquad \text{Equação 19}$$

O valor do γ_2 deve ser igual a 1 (γ_2=1).

Onde:

L_0 = vão livre.

A área (A_i) e o momento de inércia (I_i), são calculados pelas equações 20 e 21.

$$A_i = h_i \cdot b_i \qquad \text{Equação 20}$$

$$I_\mathrm{i} = \frac{b_i \cdot h_i^3}{12} \qquad \text{Equação 21}$$

Os valores dos módulos de elasticidades, E_i, podem ser obtidos para cada peça através de ensaios experimentais, ou estimados através da classe de resistência e da espécie da madeira que está compondo a camada.

Com a obtenção de todos os parâmetros, são equacionadas as tensões normais e cisalhantes atuantes nas peças, bem como a força aplicada nos elementos de ligação ocasionada pelo deslizamento entre as peças, conforme as equações 22, 23 e 24 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004, p.114).

- Tensões normais:

$$\sigma_{i,local} = \frac{\gamma_i \cdot E_i \cdot a_i \cdot M}{(EI)_{ef}} \qquad \text{Equação 22}$$

$$\sigma_{m,i,global} = \frac{0{,}5E_i \cdot h_i \cdot M}{(EI)_{ef}} \qquad \text{Equação 23}$$

- Tensão de cisalhamento máximo

$$\tau_{max} = \frac{\gamma_3 \cdot E_3 \cdot A_3 \cdot a_3 + 0{,}5E_2 \cdot b_2 \cdot h_2^2}{b_2(EI)_{ef}} \cdot V \qquad \text{Equação 24}$$

- Força no conector (cavilha)

$$F_i = \frac{\gamma_i \cdot E_i \cdot A_i \cdot a_i \cdot S_i}{(EI)_{ef}} \cdot V \qquad \text{Equação 25}$$

2.4.2.2 Método da Analogia do Cisalhamento (Shear Analogy Method)

Segundo Kreuzinger (2017), diferentemente do método gamma, o Método da Analogia do Cisalhamento (Shear Analogy Method) desenvolvido no final da década de 1990 pode ser usado para calcular qualquer viga composta ou painel sem limites de camadas, e com qualquer configuração de carga. Este método, também chamado de Método Kreuzinger, é o mais preciso

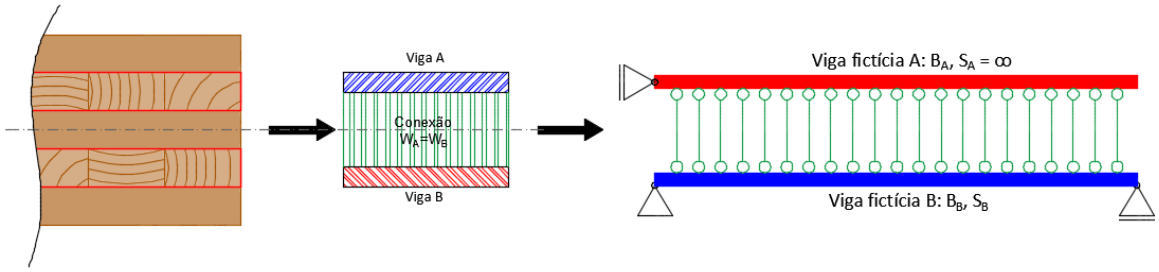
para o cálculo de painéis de CLT pois leva em consideração a deformação de cada camada (GAGNON e POPOVSKI, 2011, p.14).

Para aplicação do método é necessário o uso de um software de análise es estruturas planas, para considerar os diferentes módulos de elasticidade e os módulos de cisalhamento de cada camada individual. Por isso o método pode calcular elementos com configurações diferentes, como infinitas camadas, camadas com espessuras diferentes, quaisquer relações vão *versus* largura de painel.

O conceito do Shear Analogy Method (SAM) se baseia na transformação de uma viga composta real unida mecanicamente em uma viga fictícia homogênea. Para isso, dois componentes A e B da viga fictícia são definidos, sendo que o componente A é formado pela soma das rigidezes das camadas da viga real ao longo do eixo neutro de cada componente real, e o componente B, ligado a parcela de Steiner ($E \cdot A \cdot z_i^2$), é formado pelas rigidezes dos componentes reais da viga e por seus cisalhamentos, que inclui a deformação individual de cisalhamento e o escorregamento da ligação entre as camadas.

Kreuzinger (2017), definiu os componentes A e B como sendo duas vigas unidas entre si por barras com rigidez axial infinita, que geram os mesmas deslocamentos. Em inglês, o termo viga é a palavra *"beam"*, de forma que o autor usa a abreviação B_A para a viga A e B_B para a viga B, como ilustrado na figura 27.

Figura 27: Princípio básico do método da analogia do cisalhamento



Fonte: Próprio autor adaptado de Bogensperger, Silly e Schickhofer (2012)

A rigidez da viga fictícia A (B_A) é a soma das rigidezes na flexão ($E_i \cdot I_i$) de cada componente individual *i*, como demostrado pela equação 26.

$$B_A = \sum_{i=1}^{n} (E_i \cdot I_i) = \sum_{i=1}^{n} \left(E_i \cdot \frac{b_i \cdot h_i^3}{12} \right) \qquad \text{Equação 26}$$

Onde:

b_i = largura da camada ou componente;

h_i = altura da camada ou componente;

E_i = módulo de elasticidade da camada;

Para a viga fictícia B (B_B) a rigidez pode ser calculada pela soma das componentes de Steiner da rigidez individual de cada camada ou componente, como demonstrado pela equação 27.

$$B_B = \sum_{i=1}^{n} (E_i \cdot A_i \cdot z_{si}^2) = \sum_{i=1}^{n} (E_i \cdot b_i \cdot h_i \cdot z_{si}^2) \qquad \text{Equação 27}$$

Onde:

z_{si} = distâncias entre os centros de gravidade de cada camada ou componente i até o centro de gravidade S da viga inteira;

A viga B_A não admite deformações por cisalhamento, de modo que toda a deformação da viga composta é transferida para a viga B_B. A rigidez por cisalhamento, chamada de S_B, consequentemente inclui toda as deformações devido ao cisalhamento individual das camadas, bem como o deslocamento relativo do ajuste de cada camada devido à ligação semi-rígida, como ilustrado na figura 28.

A rigidez devido à deformação por cisalhamento das camadas individuais está relacionada com o módulo de cisalhamento, chamado de G_i, e às espessuras d_i das camadas individuais. A rigidez de cisalhamento devido a ligação semi-rígida na junção das camadas está ligada ao módulo de deslizamento da ligação, $k_{i,j+1}$, entre as camadas i e i+1.

Kreuzinger (2017) explica que a rigidez de cisalhamento S_B, é calculada como a rigidez de uma viga homogênea sujeita as mesmas deformações de cisalhamento da viga composta real, como demostrada na equação 28. O autor ressalta que a primeira e a última camada são divididas por dois na equação, pois a deformação das camadas é considera somente a partir da linha neutra, que geralmente se encontra na linha média da altura.

$$\frac{1}{S_B} = \frac{1}{a^2}\left[\sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{k_{i,j+1}} + \frac{h_1}{2 \cdot G_1 \cdot b_1} + \sum_{i=2}^{n-1} \frac{h_i}{G_i \cdot b_i} + \frac{h_n}{2 \cdot G_n \cdot b_n}\right] \qquad \text{Equação 28}$$

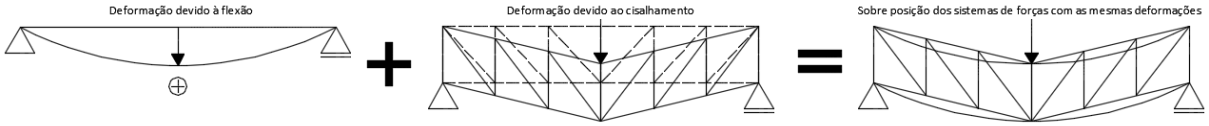
Onde:

a = distância entre os centroides da camada mais alta e a mais baixa;

$k_{i,j}$ = relação entre o k_{ser} e S_i;

Para calcular as forças internas e os momentos nas vigas fictícias A e B, considera-se que elas são unidas umas às outras através de barras rígidas, para assegurar que sofrem a mesma deformação ao longo do seu eixo, como ilustrado pela figura 28.

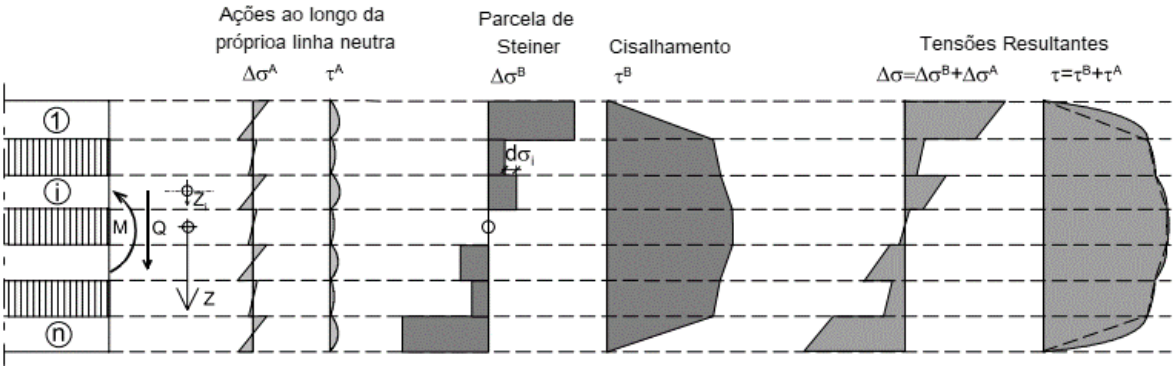
Figura 28: Somatório dos sistemas de deformação



Fonte: Próprio autor adaptado de Kreuzinger (2017)

Para a determinação das forças internas atuantes, pode-se usar *softwares* de análises de estruturas planas, e uma vez determinada essas forças para as vigas fictícias, segue-se para a etapa de transformação em uma viga composta real. Os deslocamentos das vigas fictícias já correspondem aos da viga composta real, sendo que somente as forças internas deverão ser transformadas. A transformação das forças e momentos internos é realizado em proporção à rigidez de cada camada. Os *softwares* de análises de estruturas planas são usados para determinar os momentos M_A e M_B, e as forças cortantes V_A e V_B para as vigas fictícias B_A e B_B, sendo que M_A e V_A, remetem às tensões dos componentes ao longo de suas linhas neutras, e M_B e V_B remetem às forças internas e tensões que ocorrem entre as camadas, tais como cisalhamento individual da camada, escorregamento da ligação semi-rígida ou cisalhamento perpendicular (rolling shear) no caso de CLT. A Figura 29 apresenta as distribuições de tensões determinados pela somatória de toda a seção transversal para uma estrutura em camadas.

Figura 29: Esquema de análise de tensões usando um exemplo de uma estrutura em camadas



Fonte: Scholz (2004)

As tensões devido à flexão nas camadas externas reais *i* são calculadas usando o momento na flexão da viga fictícia A, como demonstrado na equação 29.

$$M_{i,A} = \frac{E_i \cdot I_i}{B_A} \cdot M_A \rightarrow \sigma_{m,i,A}\left(\pm\frac{d_i}{2}\right) = \pm\frac{M_{i,A}}{I_i} \cdot \frac{h_i}{2} = \pm\frac{M_A}{B_A} \cdot E_i \cdot \frac{h_i}{2} \qquad \text{Equação 29}$$

Onde:

B_A = Rigidez à flexão da viga A calculada pela equação 26.

Os momentos na flexão da viga fictícia B, isto é, todas as tensões referentes à parcela de Steiner da equação, por sua vez, provocam tensões normais, que são consideradas constantes sobre as camadas individuais, conforme demonstrado pela equação 30.

$$\sigma_{t/c,i,B}(\pm z_{si}) = \frac{M_B}{B_B} \cdot E_i \cdot z_{si} \qquad \text{Equação 30}$$

Onde:

z_{si} = distâncias entre os centros de gravidades das camadas i para o centro de gravidade S da viga inteira

B_B = Rigidez à flexão da viga B calculada pela equação 27.

A posição z_{0s} do centro de gravidade S da viga inteira, em relação ao eixo de referência *0*, é determinado pela equação 31, com z_{0i} sendo a distância entre os centros de gravidade de cada camada *i* até o eixo de referência *0*.

$$z_{0s} = \frac{\sum_{i=1}^{n} z_{0i} \cdot E_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^{n} E_i \cdot A_i} \qquad \text{Equação 31}$$

Para o equilíbrio de forças em um elemento infinitesimal a tensão de cisalhamento τ, que pode ser obtida pela integração, área por área, sobre as camadas individuais da seção transversal usando as forças de cisalhamento da viga fictícia A, como demonstrado pela equação 32.

$$\tau_{i,A}(z_i) = \int_{-\frac{d_i}{2}}^{z_i} \frac{d\sigma_A}{dx} \cdot dz = \int_{-\frac{d_i}{2}}^{z_i} \frac{dM_A}{dx} \cdot \frac{E_i}{B_A} \cdot z_i \cdot dz = -V_A \cdot \frac{E_i}{B_A}\left(\frac{z_i^2}{2} - \frac{h_i^2}{8}\right) \qquad \text{Equação 32}$$

Analogamente, tem-se a equação 33, que utiliza as forças de cisalhamento da viga fictícia B.

$$\tau_{i,B}(z_{si}, z_i) = -\int_{-\frac{d_i}{2}}^{z_i} \frac{d\sigma_B}{dx} \cdot dz = \int_{-\frac{d_i}{2}}^{z_i} \frac{dM_B}{dx} \cdot \frac{E_i}{B_B} \cdot z_{si} \cdot dz$$
$$= -V_B \cdot \frac{E_i}{B_B} \cdot z_{si} \left(z_i + \frac{h_i}{2}\right) \qquad \text{Equação 33}$$

A máxima tensão de cisalhamento no centro de gravidade da uma camada individual gerada pela força de cisalhamento V_A pode ser determinada usando a equação para seções transversais retangulares, descrita na equação 34.

$$\tau_{i,A} = 1{,}5 \cdot \frac{E_i \cdot I_i}{B_A} \cdot \frac{V_A}{d_i \cdot h_i} \qquad \text{Equação 34}$$

Segundo Scholz (2004), a soma das ações individuais leva às distribuições de tensão resultantes, como descrito pelas equações 35 e 36.

$$\sigma_i(z_i, z_{si}) = \sigma_{i,A}(z_i) + \sigma_{i,B}(z_{si}) \qquad \text{Equação 35}$$

$$\tau_i(z_i) = \tau_{i,A}(z_i) + \tau_{i,B}(z_i, z_{si}) \qquad \text{Equação 36}$$

A rigidez total do painel será dada pela soma das rigidezes B_A e B_B, como ilustrado pela equação 37.

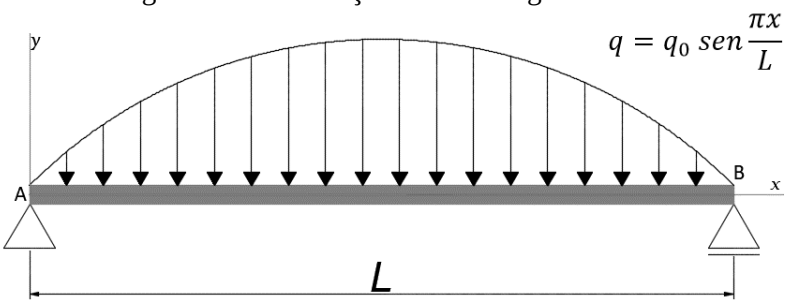
$$EI_{eff,tot} = B_A + B_B \qquad \text{Equação 37}$$

Mestek (2011), comparou a rigidez obtida pelo método da analogia do cisalhamento (Shear Analogy Method) com o Método das Vigas Compostas (Método γ). Ele analisou vigas bi apoiadas sob uma carga senoidal e concluiu que a rigidez de lajes de madeira lamelada colada cruzada (CLT) simétricas de até cinco camadas produzem resultados muito semelhantes pelos dois métodos de cálculo.

Kreuzinger (2019) explicou que para fazer o comparativo entre os dois métodos de cálculo, (Método γ e Shear Analogy Method), em termos de rigidez dos painéis, são necessárias

algumas considerações, tais como uso de uma carga senoidal, como a utilizada por Mestek (2011).

Figura 30: Distribuição de uma carga senoidal



Fonte: Próprio autor

Partindo-se da equação da carga, através do Método da Carga, é possível determinar o deslocamento e a rotação da linha elástica e o deslocamento máximo de uma viga bi apoiada com carga senoidal, conforme demostrado pela dedução da equação 38.

$$EI\frac{dy^4}{dx^4} = -q$$

$$EI\frac{dy^4}{dx^4} = -q_0 sen\left(\frac{\pi x}{L}\right)$$

$$EI\int\frac{dy^4}{dx^4} = \int -q_0 sen\left(\frac{\pi x}{L}\right) \rightarrow EI\frac{dy^3}{dx^3} = -\frac{L}{\pi}q_0 cos\left(\frac{\pi x}{L}\right) + C_1$$

$$EI\int\frac{dy^3}{dx^3} = \int -\frac{L}{\pi}q_0 cos\left(\frac{\pi x}{L}\right) + C_1 \rightarrow EI\frac{dy^2}{dx^2} = \frac{L^2}{\pi^2}q_0 sen\left(\frac{\pi x}{L}\right) + C_1 x + C_2$$

$$EI\int\frac{dy^2}{dx^2} = \int\frac{L^2}{\pi^2}q_0 sen\left(\frac{\pi x}{L}\right) + C_1 + C_2 \rightarrow EI\frac{dy}{dx} = \frac{L^3}{\pi^3}q_0 cos\left(\frac{\pi x}{L}\right) + \frac{C_1 x^2}{2} + C_2 x + C_3$$

$$EI\int\frac{dy}{dx} = EIy - \frac{L^4}{\pi^4}q_0 sen\left(\frac{\pi x}{L}\right) + C_1\frac{x^3}{6} + C_1\frac{x^2}{2} + C_3 x + C_4 \qquad \text{Equação 38}$$

Aplicando as seguintes condições de contorno:

i) $x = 0;\ \frac{dy^2}{dx^2} = 0$

ii) $x = L;\ \frac{dy^2}{dx^2} = 0$

iii) $x = 0;\ y = 0$

iv) $x = L;\ y = 0$

Após a aplicação das condições de contorno, a equação 38 é simplificada nas equações 39 e 40, onde se obtém a inclinação e a deflexão da viga.

$$EI\frac{d_y}{d_x} = \frac{L^3}{\pi^3}q_0 cos\left(\frac{\pi x}{L}\right) \text{ sendo, } \frac{d_y}{d_x} = \emptyset, \text{ temos:}$$

$$\emptyset = \frac{L^3}{\pi^3 EI}q_0 cos\left(\frac{\pi x}{L}\right) \text{ inclinação (rotação)} \qquad \text{Equação 39}$$

$$EIy = -\frac{L^4}{\pi^4}q_0 sen\left(\frac{\pi x}{L}\right) \text{ sendo, } y \text{ a deflexão temos:}$$

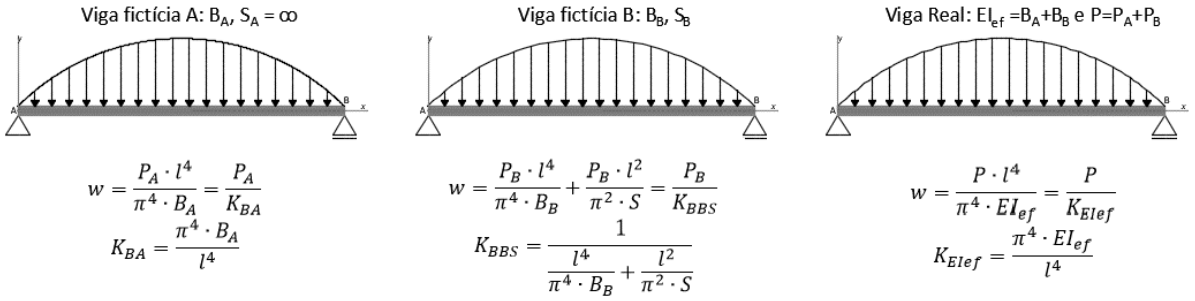
$$y = -\frac{L^4}{\pi^4 EI}q_0 sen\left(\frac{\pi x}{L}\right) \qquad \text{Equação 40}$$

Por se tratar de uma viga bi apoiada o deslocamento máximo será no meio do vão, ou seja, *x=L/2*. Substituindo na equação 40, temos o valor do deslocamento máximo, apresentado na equação 41.

$$y_{máx} = -\frac{q_0 L^4}{EI\pi^4} \qquad \text{Equação 41}$$

A figura 31 apresenta como é a aplicado o conceito da carga senoidal no método da Analogia do Cisalhamento (Shear Anology Method), bem como apresenta as equações da deflexão máxima para cada caso.

Figura 31: Distribuição de cargas senoidais na viga B_A, B_B e viga Real



Fonte: Adaptado de Kreuzinger (2019)

Somando-se os componentes K, temos:

$$K_{BA} + K_{BBS} = K_{EIeff}$$

$$\frac{\pi^4 \cdot B_A}{l^4} + \frac{1}{\frac{l^4}{\pi^4 \cdot B_B} + \frac{l^2}{\pi^2 \cdot S}} = \frac{\pi^4 \cdot EI_{ef}}{l^4}$$

$$B_A + \frac{1}{\frac{1}{B_B} + \frac{\pi^2}{l^2 \cdot S}} = EI_{ef}$$

$$EI_{ef} = B_A + B_B \cdot \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot B_B}{l^2 \cdot S}}$$

Equação 42

Portanto, a equação 42 é semelhante a equação 37, porém leva em consideração condições que permitem que os valores obtidos possam ser comparáveis aos valores obtidos pelo método γ.

2.4.3 ***Método de modelagem numéricas***

2.4.3.1 Elementos finitos

O uso de *softwares* de simulações numéricas baseados na tecnologia CAE (Computer Aided Engineering) auxilia o projetista de diversas áreas da engenharia, pois com ele é possível simular usos de determinados materiais, peças ou estruturas em situações-problemas que não seriam tão simples de fazê-lo de forma experimental ou analítica. Alguns exemplos de métodos de modelagem computacional são os Métodos dos Elementos Finitos, Métodos dos Elementos de Contorno, Método dos Volumes Finitos, Realidade Virtual e Protótipos Computacionais.

> Os problemas de engenharia que podem ser solucionados através dos Métodos Analíticos Clássicos permitem o cálculo da resposta exata dos deslocamentos, deformações e tensões nas estruturas nos seus infinitos pontos, porém essas soluções são somente conhecidas para alguns casos, que fogem da maioria das aplicações práticas que encontramos no dia-a-dia. O desenvolvimento de procedimentos aproximados mas com precisão aceitável para a engenharia, é um caminho alternativo aos procedimentos analíticos clássicos, e é a base do métodos dos elementos finitos (ALVES FILHO, 2018, p.16)

Observa-se que um dos métodos de simulação computacional mais empregado em simulação de estruturas, é o chamado Método dos Elementos Finitos (Finite Element Method – FEM) que determina soluções aproximadas através de procedimentos numéricos baseados em equações diferenciais, dividindo o problema em partes menores, chamadas de elementos finitos.

Alves Filho (2018) ressalta que o engenheiro deve saber modelar o problema a ser investigado, independentemente do *software* que analisará o problema, pois na modelagem correta é que se baseia os resultados convergentes, e assim, pode-se discretizar o problema, ou seja, particioná-lo em partes de menores complexidade e passíveis de soluções.

Atualmente existem diversos *softwares* de análises computacionais baseados em elementos finitos, tais como o ANSYS, o ABAQUS, o DIANA, o SAP2000, que são os mais utilizados para trabalhos acadêmicos e científicos. Para usos industriais e de projetos existem outros, tais como AUTODESK INVENTOR, COMSOL e DUBLAL RSFEM.

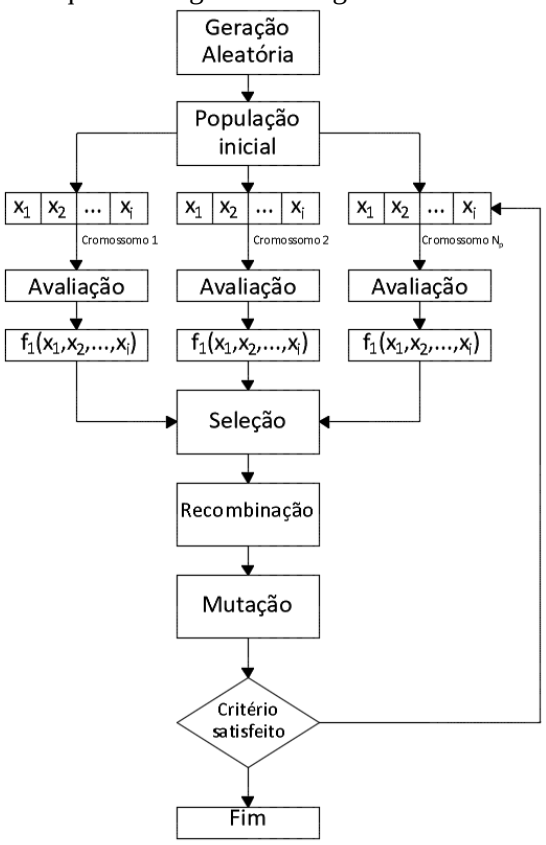
Diversos estudos utilizam as simulações numéricas por elementos finitos para prever o comportamento dos materiais sobre determinadas situações. O'Loinsigh, et. al. (2012) em seu estudo sobre vigas cavilhadas através do método da soldagem de madeira, utilizou o software ABAQUS CAE para obter resultados de parâmetros diferentes após validar a simulação baseado em uma viga experimental.

2.4.3.2 Algoritmo Genético

Uma outra forma de modelagem matemática capaz de predizer um parâmetro estrutural de placas e tabuleiros ortótropos, como é o caso dos painéis de madeira maciça, é chamado algoritmo genético. Algoritmos genéticos (AGs) são métodos de busca estocástica que imitam matematicamente os mecanismos de evolução natural das espécies, compreendendo processos da genética das populações, sobrevivência e adaptação dos indivíduos (GEN e CHENG apud CHEUNG, LINDQUIST e CALIL JUNIOR, 2004).

Cheung, Lindquist e Calil Junior (2004) explicam, de forma sucinta, que o algoritmo genético inicia com uma população de indivíduos com características representadas pelo cromossomo, que é um vetor unidimensional cujo valor representa características da possível solução do problema e podem ser representadas e codificadas de forma binária ou real. A partir da escolha da representação, o vetor cromossomo tende a evoluir buscando, através de sucessivas iterações, melhores indivíduos, gerando uma resposta mais precisa. A figura 32 apresenta um diagrama esquemático para ilustrar o funcionamento do algoritmo.

Figura 32: Processo esquemático geral dos Algoritmos Genéticos convencionais



Fonte: Próprio autor adaptado de Cheung, Lindquist, Calil Junior (2004)

Lindquist, Pigozzo e Calil Junior (2004), desenvolveram e testaram um software baseado em algoritmo genético para tabuleiros de pontes ortotrópicas, denominado de OTB (Orthotropic Timber Bridges), ou em português ATM (Análise de Tabuleiros de Madeira) desenvolvido em Borland C++. Os autores realizaram testes em pontes mistas concreto-madeira comparando os resultados experimentais com os resultados teóricos, e demonstraram a eficácia desse modelo e da análise numérica do programa para esse tipo de estrutura.

2.5 Características das madeiras

Neste estudo foram utilizadas duas espécies de madeira para a produção dos painéis de DCLT, sendo elas o Pau-roxo e o Pinus. A utilização destas espécies não exclui a possibilidade de utilização de outras espécies para a produção de painéis DCLT semelhantes ao estudado.

2.5.1 *Pau-roxo*

O pau-roxo ou roxinho como é conhecido nos estados de São Paulo e Minas Gerais, tem outros nomes populares em estados como Bahia e Espirito Santo, tais como guarabu, barabu ou

gurabu. Segundo o portal Flora do Brasil, do Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro (JBRJ), o gênero a que pertence o pau-roxo é o *Peltogyne*, da família *Leguminosae Volgel*, que possui 23 espécies, 6 subespécies e 4 variações, e uma distribuição que acontece nas regiões sudeste, centro-oeste, nordeste e norte do Brasil.

Segundo Silva (1976) o gênero *Peltogyne Vogel* tem uma distribuição desde o México, Panamá, Colômbia, Guianas, Bolívia, Trinidad, até o limite do sudeste do Brasil, sendo a Amazônia Central, seu principal centro de distribuição geográfica, como ilustrado pela figura 33.

Figura 33: Distribuição geográfica do gênero *Peltogyne*

Fonte: Silva (1976)

Segundo Rizzini (1978), as madeiras do gênero *Peltogyne* são reconhecidas principalmente pela tonalidade violácea ou vermelho-violácea, mas logo ao ser colhida a tonalidade é pardo-escura, e com o efeito da oxidação vai se tornando roxa (violácea) aos poucos. A madeira é considerada muito pesada e dura, mas tem trabalhabilidade moderada, tomando bom polimento, além de possuir grande durabilidade. É utilizada para marcenarias, obras civis externas, carrocerias de caminhão, tacos de assoalhos, tacos de bilhar, estruturas de pontes, vigas, dormentes, cruzetas, estacas, entre outros.

As propriedades físicas e mecânicas do pau-roxo, mais especificamente da *Peltogyne confertiflora (Hayne) Benth.*, apresentadas por Zenide no Manual de Uso Sustentável de

Madeiras para a Construção Civil, do Instituto de Pesquisa Tecnológicas (IPT), são descritas na tabela 5.

Tabela 5: Propriedades físicas e mecânicas do Pau-roxo (*Peltogyne confertiflora (Hayne) Benth.)*

Propriedades Físicas	
Densidade de massa (ρ)	
Aparente a 15% de umidade	880 kg/m³
Básica	740 kg/m³
Contração	
Radial	3,5%
Tangencial	6,5%
Volumétrica	10,7%
Propriedades Mecânicas	
Flexão – Resistência (f_M) [MPa]	
Madeira Verde	144,8
Madeira a 15% de umidade	184,5
Módulo de Elasticidade – madeira verde	17721
Limite de proporcionalidade – madeira verde	63,5
Compressão paralela às fibras – Resistência (f_{c0}) [MPa]	
Madeira verde	64
Madeira a 15% de umidade	84,1
Limite de proporcionalidade – madeira verde	49
Módulo de elasticidade – madeira verde	20565
Outras propriedades mecânicas	
Cisalhamento – madeira verde [MPa]	14,9
Tração normal às fibras – madeira verde [MPa]	8,3
Fendilhamento – madeira verde [MPa]	1,1
Dureza Janka paralela – madeira verde [N]	9728

Fonte: Zenide (2009)

A figura 34 apresenta imagens da face tangencial, radial e uma ampliação em 10X de uma seção de pau-roxo, disponível no portal do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2019).

Figura 34: Imagens da seção de uma peça de *Peltogyne confertiflora (Hayne) Benth*

Fonte: IPT (2019)

2.5.2 ***Pinus***

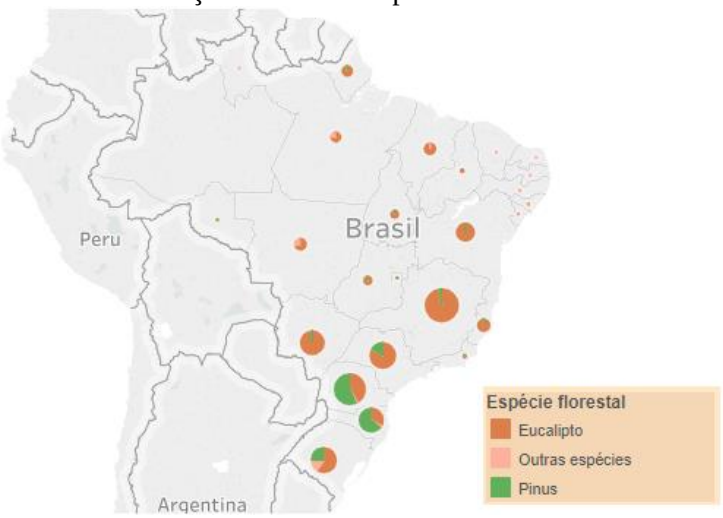
Segundo Shimizu (2008) o gênero *Pinus* vem sendo plantado no Brasil desde o final do século XIX, devido aos imigrantes europeus estabelecidos no estado do Rio Grande do Sul, mas ganhou mais força a partir da metade do século passado quando o Serviço Florestal do Estado de São Paulo incentivou o plantio de espécies exóticas norte americanas, como *P. palustris, P. echinata, P. elliottii* e *P. taeda.* As espécies que mais se difundiram e são mais conhecidas no país são as de *Pinus elliottii* e *taeda*, sendo que a primeira ocupa áreas plantadas na região Sul e Sudeste, enquanto a segunda é mais comum nos estados do Rio Grande do Sul e Paraná. Ainda segundo o autor, outras espécies como *P. caribaea, P. oocarpa, P. maximinoi, P. patula, P. kesiya* e *P. tecunumanii* são plantadas em outras regiões do país. Antes da chegada do gênero *Pinus*, a única conífera presente no país até então era o Pinho-do-Paraná, *Araucária Angustifólia*, única conífera nativa do Brasil

Tuoto e Hoeflich (2008) enfatizam que a madeira de pinus é a matéria-prima para diversas indústrias no país, tais como as produtoras de celulose de fibra longa (usadas para a produção de papelão), painéis reconstituídos (compensados, MDF – Medium Density Fiberboads, aglomerados, OSB – Oriented Strand Boards), madeira serrada para produção de pallets, cercas, portas, batentes, além de produção de cavacos para geração de energia em caldeiras e coleta de resina da árvore para produtos como terebintina.

Informações divulgadas no último boletim do Sistema Nacional de Informações Florestais (SNIF), do Serviço Florestal Brasileiro (SFB) coletadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) dão conta que em 2016 a área ocupada por florestas de pinus no país era de 2.079.162 ha, e a distribuição destas áreas é apresentada na figura 35. Segundo o relatório anual da Associação de Indústrias Brasileiras de Árvores (IBA), nos últimos cinco anos, a área plantada com o gênero *Pinus* vem caindo a uma taxa de 0,7% a.a., devido, principalmente, à substituição por eucalipto nos estados onde esta cultura não é tradicional. Nos

estados da região sul do Brasil, que possuem melhores condições de solo e clima, a área com plantios de pinus tem se mantido constante neste período (IBA, 2017).

Figura 35: Localização das florestas plantadas de 2014 a 2016



Fonte: SNIF (2019)

Segundo a American Wood Forest Service (1985), dos Estados Unidos, origem da maioria das espécies plantadas no Brasil, as árvores de *Pinus* são fácies de se distinguir, mas as madeiras serradas são semelhantes na aparência, sendo quase impossível distingui-las visualmente. Em geral, o alburno é branco amarelado e o cerne marrom avermelhado. O alburno contém menos resina do que o cerne, porém é mais fácil extrair resinas do alburno. A transição do alburno para o cerne é geralmente evidente, e a distinção entre anéis de crescimento de inverno e verão são fáceis de diferenciá-los, como é comum nas espécies coníferas.

Zenide (2009) descreve algumas características do *Pinus elliottii* tais como:

- Durabilidade natural baixa: susceptível ao ataque de fungos (emboloradores, manchadores e apodrecedores), cupins, brocas-de-madeira e perfuradores marinhos, mas por outro lado a madeira fácil de tratar tanto sob pressão em autoclave com CCA (Arseniato de Cobre Cromatado) e CCB (Bromato de Cobre Cromatado), como com creosoto.
- Trabalhabilidade: madeira fácil de ser trabalhada, nas etapas de desdobro, aplainamento, desenrolo para lâminas, lixamento, torneamento, furação, fixação de parafusos, colagem, além de permitir bom acabamento.
- Secagem: madeira é fácil de secar tanto em estufas automatizadas como ao ar.

A tabela 6 apresenta as propriedades físicas e mecânicas do *Pinus elliotti*, descritas por Zenide (2009).

Tabela 6: Propriedades físicas e mecânicas do *Pinus elliottii*

Propriedades Físicas	
Densidade de massa (ρ)	
Aparente a 15% de umidade	480 kg/m³
Básica	420kg/m³
Contração	
Radial	3,4%
Tangencial	6,3%
Volumétrica	10,5%
Propriedades Mecânicas	
Flexão – Resistência (f_M) [MPa]	
Madeira Verde	48
Madeira a 15% de umidade	69,6
Módulo de Elasticidade – madeira verde	6443
Limite de proporcionalidade – madeira verde	19,7
Compressão paralela às fibras – Resistência (f_{c0}) [MPa]	
Madeira verde	18,5
Madeira a 15% de umidade	31,5
Limite de proporcionalidade – madeira verde	13,7
Módulo de elasticidade – madeira verde	8846
Outras propriedades mecânicas	
Cisalhamento – madeira verde [MPa]	5,8
Tração normal às fibras – madeira verde [MPa]	3,0
Fendilhamento – madeira verde [MPa]	0,4
Dureza Janka paralela – madeira verde [N]	1932

Fonte: Zenide (2009)

A figura 36 apresenta imagens da face tangencial, radial e uma ampliação em 10X de uma seção de *Pinus elliottii*, disponível no portal do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2019).

Figura 36: Imagens da seção de uma peça de *Pinus elliottii*

Fonte: IPT (2019)

Uma das características da madeira de *Pinus* que influencia na sua qualidade para uso em estruturas de madeira é a grande presença de nós. O nó na madeira indica a presença de um galho, que cresce da medula em direção ao alburno, de maneira que ao seccionar a tora na direção do comprimento, estes galhos formam os nós nas peças. Ou seja, a quantidade e tamanho dos nós estão ligados ao tratamento silvicultural dado à floresta, pois em áreas onde são feitos desbastes e desgalhamentos com certa regularidade, as árvores se desenvolvem mais retilíneas e com menores nós. Os nós causam desvios nas fibras da madeira, gerando uma perda de resistência local, e um possível ponto de concentração de tensões, aonde pode haver uma ruptura da peça.

Segundo Carreira e Dias (2006), a norma brasileira de estruturas de madeira NBR 7190/1997 traz um coeficiente de modificação no qual leva-se em consideração a qualidade, o chamado $K_{mod\,3}$. Este coeficiente é adotado igual a 1,0 no caso de madeira de primeira categoria, e igual a 0,8 no caso de madeira de segunda categoria. A condição de madeira de primeira categoria descrita na norma somente pode ser admitida se todas as peças estruturais forem classificadas como isentas de defeitos, por meio de método visual normatizado, e também submetidas a uma classificação mecânica que garanta a homogeneidade da rigidez das peças que compõem o lote.

Desta forma, fica evidente que a classificação visual e mecânica é de suma importância para o uso da madeira de *Pinus* em estruturas de madeira, e para isso Carreira e Dias (2006) aplicaram o método norte-americano de classificação visual descrito nas regras de classificação visual do Southern Pine Inspection Bureau (SPIB) com base na norma ASTM D245-93 (Standard Practice for Establishing Structural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumber) para as madeiras de *Pinus elliotti e taeda* brasileiras. Este trabalho foi a base do atual projeto de norma PN-02-126.10-001-1 - Madeiras – Critérios de classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira de florestas plantadas. Na tabela 7 são apresentados os requisitos relacionado a cada tipo de defeito com os quais pode-se enquadrar

as peças em 3 classes estruturais, sendo a classe 1 a melhor, a classe dois a intermediária e a classe 3 a inferior.

Tabela 7: Requisitos da classificação visual para enquadramento nas classes estruturais para *Pinus*

Defeito	**Classe 1**	**Classe 2**	**Classe 3**
Medula	Não se admite	Não se admite	Não se admite
Nós	1/5	1/3	1/2
Inclinação das fibras (mm/mm)	1:9	1:6	1:3
Fissuras não passantes (m)	O comprimento das fissuras não deve ser maior que 1,0m e nem ¼ do comprimento da peça		
Fissuras passantes (m)	Somente se permitem as fissuras passantes nos extremos e o comprimento não deve ser maior do que a largura da peça		
Encurvamento/arqueamento (m)	Menor que 8 mm para cada 1m de comprimento		
Torcimento (mm/m)	Menor que 1 mm para cada 25 mm de comprimento		
Encanoamento (mm)	Sem restrições		
Esmoado (mm/mm)	Transversalmente menor que ¼ da espessura ou largura da peça, e sem restrições para o comprimento		
Ataques biológicos	Não se admitem zonas atacadas por fungos causadores de podridão. Admite-se zonas atacadas por fungos cromógenos, e orifícios causados por insetos com diâmetros menor que 2 mm.		
Outros	Danos mecânicos, presença de bolsa de resinas e outros defeitos se limitam por analogia com alguma característica similar		

Fonte: Projeto de norma PN-02-126.10-001-1 (2017)

Além da classificação visual, a classificação das peças deve ser feita usando um critério físico, obtido através de ensaio mecânico. Esse critério normalmente é o modulo de elasticidade que é calculado através da equação 43.

$$MOE = \frac{\Delta F}{\Delta \delta} \cdot \frac{L^3}{48I} \qquad \text{Equação 43}$$

Sendo:

ΔF = Variação da carga aplicada durante ensaio de flexão no regime elástico;

$\Delta\delta$ = Deslocamento da viga durante aplicação da carga no regime elástico;

L = vão livre da viga bi-apoiada;

I = momento de inércia da viga.

Outros métodos de ensaios podem ser utilizados para obtenção do módulo de elasticidade, por exemplo, o método da vibração transversal, que consiste na utilização de um equipamento capaz de captar a vibração gerada na peça que se encontra bi apoiada sobre tripés, causada por uma batida no centro do vão feita pelo operador do equipamento utilizando um bastão. A vibração gerada é captada por uma célula de carga, que por sua vez transmite ao equipamento, e através de equações que consideram as amplitudes das ondas, calcula o módulo de elasticidade dinâmico, que pode ser correlacionado com o módulo de elasticidade estático.

Calil Junior e Miná (2003) analisaram 326 amostras de Pinus em testes de flexão estática e dinâmica por vibração transversal e concluíram a existência de forte correlação linear entre o módulo de elasticidade estático e o módulo de elasticidade dinâmico. Através de um cálculo que envolve a frequência natural da peça, o comprimento, a seção transversal e peso, o software do equipamento calcula o módulo de elasticidade dinâmico, conforme a equação 44. A correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e o estático para madeiras de Pinus apresentado por Calil Junior e Miná (2003) é apresentado pela equação 45.

$$MOE_{din} = \frac{f^2 \cdot L^4}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \cdot I} \cdot \frac{W}{GL} \qquad \text{Equação 44}$$

Onde:

MOE_{din} = módulo de elasticidade dinâmico;

I = momento de inércia;

f = frequência natural de vibração;

L = comprimento da viga;

W = peso da viga;

G = aceleração da gravidade;

W/gL = massa por unidade de comprimento da viga.

$$MOE_{est} = 1{,}01 \cdot MOE_{din} - 634{,}49 \qquad \text{Equação 45}$$

Onde:

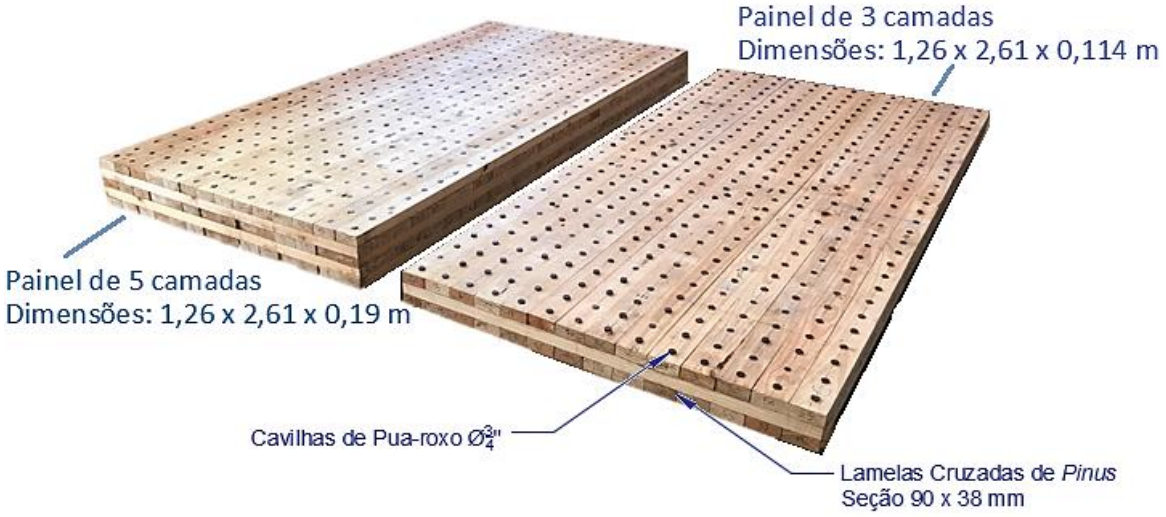
MOE_{est} = Módulo de elasticidade estático.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais para produção de Painéis de Madeira Lamelada Cruzada Cavilhada (Dowel Cross Laminated Timber – DCLT)

Os painéis DCLT com lamelas de *Pinus* e cavilhas de *Pau-roxo* que foram produzidos possuíam dimensões estruturais (2610 x 1260 mm) sendo um com 3 camadas e 114 mm de espessura, e outro com 5 camadas e 119 mm de espessura, conforme apresentados na figura 37.

Figura 37: Painéis DCLT produzidos para estudo



Fonte: Próprio autor

As camadas dos painéis foram produzidas com lamelas (tábuas) de *Pinus elliottii e Pinus taeda* com seção transversal de 38 x 90 mm e comprimento de 3 metros, provenientes de florestas da região sul do Brasil, fornecidas pela empresa Berneck, localizada em Curitibanos, Santa Catarina.

As cavilhas foram produzidas com madeira de Pau-roxo (*Peltogyne spp.*, *Leguminosae*) proveniente de florestas nativas da região norte do Brasil, fornecidas pela Madeireira César Lourenção, localizada na cidade de Brotas, São Paulo. A madeira de Pau-roxo foi fornecida em forma de vigas que foram desdobradas para a confecção das cavilhas. Foram produzidas cerca de 500 cavilhas com diâmetro de 19,03 mm (3/4”) x 120 mm para a união das peças no painel de 3 camadas, e 500 com diâmetro de 19,03 mm (3/4”) x 200 mm para união das peças no painel de 5 camadas. Além da produção de cavilhas para confecção dos painéis, foram produzidas cavilhas para a confecção dos corpos de prova para os demais ensaios. A figura 38 apresenta algumas peças de *Pinus* e pau-roxo antes do processamento das mesmas.

Figura 38: a) Tábuas de *Pinus*; b) vigotas de pau-roxo

Fonte: Próprio autor

3.2 Métodos

3.2.1 *Caracterização físico-mecânica das madeiras*

3.2.1.1 Ensaio de compressão paralela às fibras

Foram realizados ensaios de compressão paralela às fibras conforme o item 8 do anexo B da norma de estruturas de madeira NBR 7190/1997 (ABNT, 1997, p.142). Foram ensaiadas 15 amostras de madeira de Pinus retiradas de lamelas em regiões isentas de defeitos, e 15 amostras de pau-roxo. O ensaio foi realizado em uma máquina universal de ensaio, Marca Amsler. A resistência à compressão paralela às fibras ($f_{wc,0}$ ou f_{c0}) é dada pela máxima tensão de compressão que pode atuar em um corpo de prova com seção transversal quadrada de 50 mm de lado e 150 mm de comprimento, sendo dada pela equação 46. Devido às seções transversais das lamelas, os ensaios com corpos de prova de *Pinus* foram feitos com seção de 38 x 50 mm.

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,max}}{A} \qquad \text{Equação 46}$$

Onde:

$F_{c0,max}$ = máxima força de compressão aplicada ao corpo de prova durante o ensaio, em Newton (N);

A = área inicial da seção transversal comprimida, em metro quadrado (m^2);

f_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras, em MPa .

Para a determinação da rigidez da madeira na direção paralela às fibras (E_{c0}), ou módulo de elasticidade na compressão, deve-se calcular a inclinação da reta secante do trecho linear do diagrama tensão x deformação específica. Para isto usa-se os pontos ($\sigma_{10\%}$; $\varepsilon_{10\%}$) e ($\sigma_{50\%}$; $\varepsilon_{50\%}$), correspondentes respectivamente a 10% e 50% da resistência a compressão paralela as fibras medida no ensaio, calculados de acordo com a equação 47.

$$E_{c0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \qquad \text{Equação 47}$$

Onde:

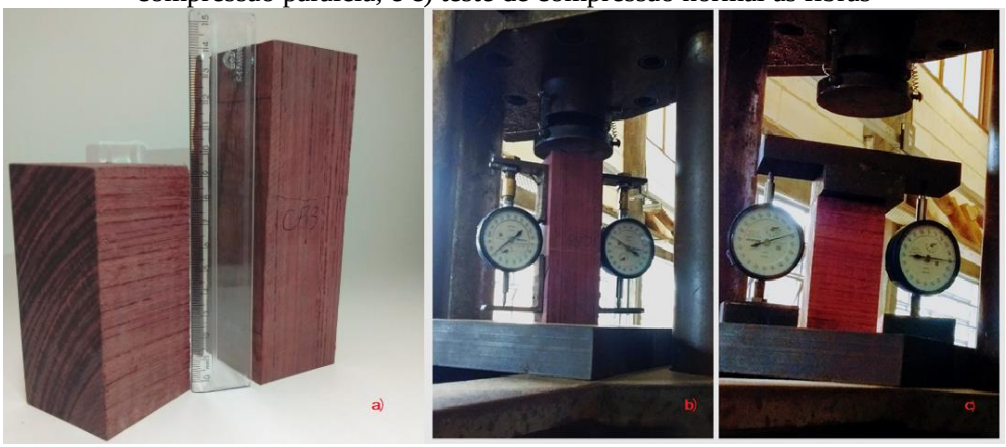
$\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$ = tensões de compressão paralelas correspondentes a 10% e 50% da resistência de f_{c0};

$\varepsilon_{10\%}$ e $\varepsilon_{50\%}$ = deformações específicas medidas no corpo de prova, correspondentes às tensões de compressão paralelas de $\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$.

Os valores característicos foram obtidos através do cálculo do quinto percentil inferior dos resultados.

A figura 39 apresenta fotos dos corpos de prova e dos tipos de ensaio realizados.

Figura 39: a) corpos de prova de pau-roxo para compressão normal e paralela às fibras; b) teste de compressão paralela, e c) teste de compressão normal às fibras



Fonte: Próprio autor

3.2.1.2 Ensaio de compressão normal às fibras

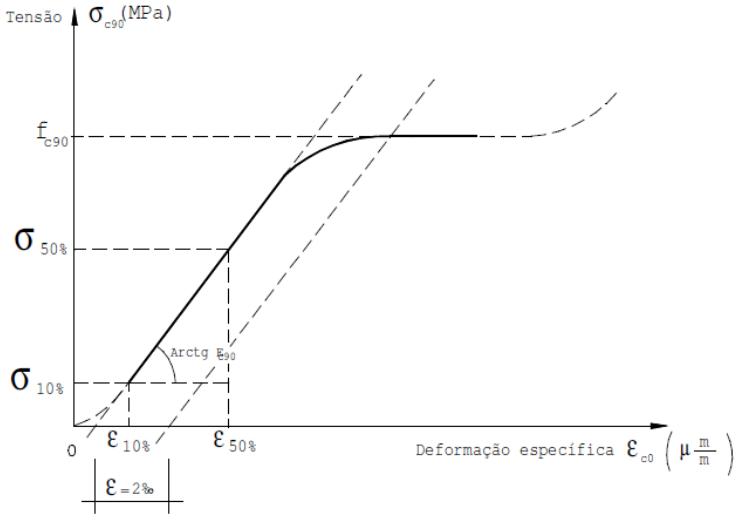
Analogamente ao item anterior, foram realizados ensaios de compressão normal às fibras conforme o item 10 do anexo B da norma de estruturas de madeira NBR 7190/1997 (ABNT, 1997, p.152). Da mesma forma, foram ensaiadas 15 amostras de madeira de *Pinus* retiradas de lamelas em regiões isentas de defeitos, e 15 amostras de pau-roxo. O ensaio foi

realizado em uma máquina universal de ensaio, Marca Amsler. A resistência à compressão paralela às fibras ($f_{wc,90}$ ou f_{c90}) é o valor convencional determinado pela deformação específica residual de 2‰, apresentado na figura 40, obtida em um ensaio de compressão uniforme em corpos-de-prova prismáticos, com seção transversal quadrada de 50 mm de lado e altura, na direção tangencial, de 100 mm. Devido às seções transversais das lamelas, os ensaios com corpos de prova de Pinus foram feitos com seção de 38 x 50 mm.

Para a determinação da rigidez da madeira na direção normal às fibras (E_{c90} deve-se calcular a inclinação da reta secante do trecho linear do diagrama tensão x deformação específica. Para isto usa-se os pontos ($\sigma_{10\%}$; $\varepsilon_{10\%}$) e ($\sigma_{50\%}$; $\varepsilon_{50\%}$), correspondentes respectivamente a 10% e 50% da resistência a compressão paralela as fibras medida no ensaio, calculados de acordo com a equação 48.

$$E_{c90} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \qquad \text{Equação 48}$$

Figura 40: Diagrama tensão deformação específica para determinação da rigidez da madeira na direção normal às fibras



Fonte: NBR 7190 (ABNT, 1997)

Onde:

$\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$ = tensões de compressão normais correspondentes a 10% e 50% da resistência de f_{c90};

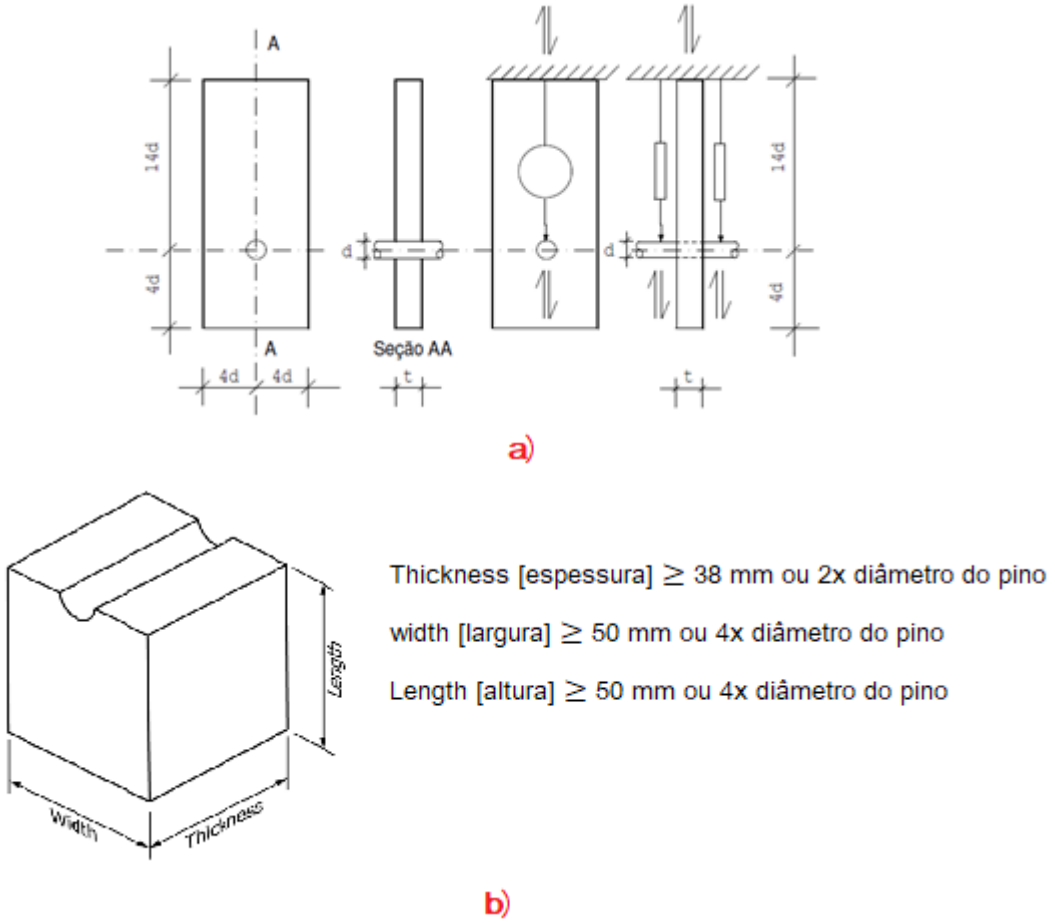
$\varepsilon_{10\%}$ e $\varepsilon_{50\%}$ = deformações específicas medidas no corpo de prova, correspondentes às tensões de compressão normais de $\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$.

Os valores característicos foram obtidos através do cálculo do quinto percentil inferior dos resultados.

3.2.1.3 Ensaio de embutimento

Os ensaios de embutimento foram realizados nas direções paralela e normal às fibras das lamelas de Pinus, utilizando os parâmetros da norma americana ASTM D5764 -97a (2018). Foi necessário o uso desta norma devido às dimensões dos corpos de prova disponíveis não atenderia as especificações da norma brasileira sendo que a norma americana apresenta dois modelos de corpos de prova, e que o menor deles se adequava às seções das lamelas disponíveis. A figura 41 apresenta as dimensões dos corpos de prova pelas duas normas. Além disso, Molina et.al. (2017) fizeram um comparativo para ensaios de embutimento entre as normas brasileira e americana e concluíram que a norma americana provê resultados menos dispersos entre si do que os da norma brasileira, além da vantagem da facilidade de fabricação dos corpos de prova.

Figura 41: Corpo de prova para ensaios de embutimento a) pela norma NBR7190; e b) pela norma ASTM D5764-97a

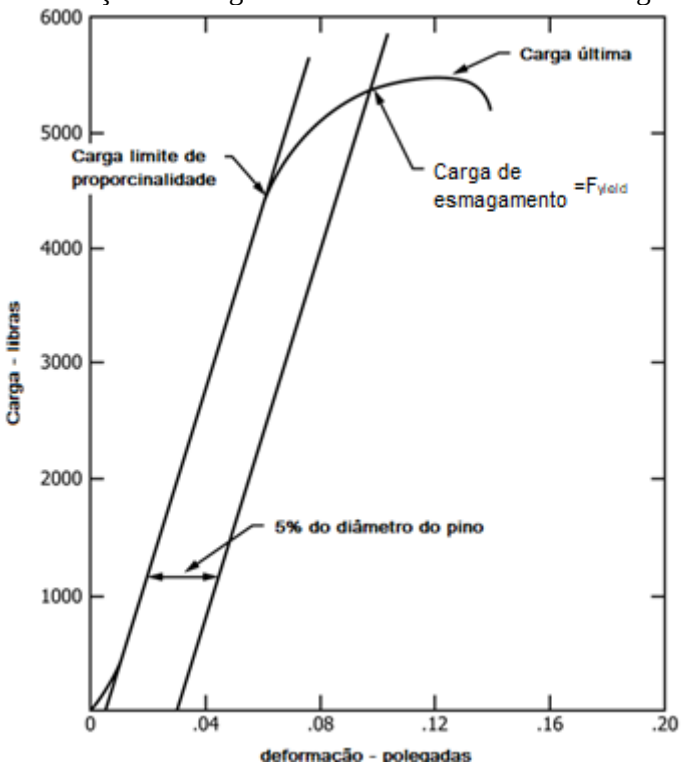


Fonte: NBR 7190 (ABNT, 1997) e ASTM D5764-97a (2018)

No ensaio para obtenção da resistência ao embutimento normal às fibras (f_{e90}), foram ensaiados 10 corpos de provas utilizando um pino metálico de ¾” (19 mm) de diâmetro, e posteriormente ensaiados 41 corpos de prova com cavilha do mesmo diâmetro do pino metálico, para comparação entre os resultados. No ensaio para obtenção da resistência de embutimento paralelo às fibras (f_{e0}), foram ensaiados 45 corpos de prova usando somente a cavilha de ¾”. Para a realização dos ensaios foi usado em uma máquina universal de ensaios Marca EMIC, modelo DL3000.

Pela ASTM D5764-97a, a resistência ao embutimento é obtida pela razão entre a carga do ponto de esmagamento do corpo de prova (F_{yield}), pela espessura (t) e o diâmetro do pino (d), dado pelas equações 49 e 50, para as resistências ao embutimento na direção paralela e normal às fibras. A carga do ponto de escoamento é obtida através da intersecção da reta secante defasada a uma distância referente a 5% do diâmetro do pino, como ilustrado na figura 42. A figura 43 apresenta uma foto do ensaio de embutimento paralelo às fibras.

Figura 42: Definição das cargas obtidas através da curva de cargas x deformação



Fonte: ASTM D5764-97a (2018)

$$f_{e0} = \frac{F_{yield,0}}{t \cdot d} \qquad \text{Equação 49}$$

$$f_{e90} = \frac{F_{yield,90}}{t \cdot d} \qquad \text{Equação 50}$$

Onde:

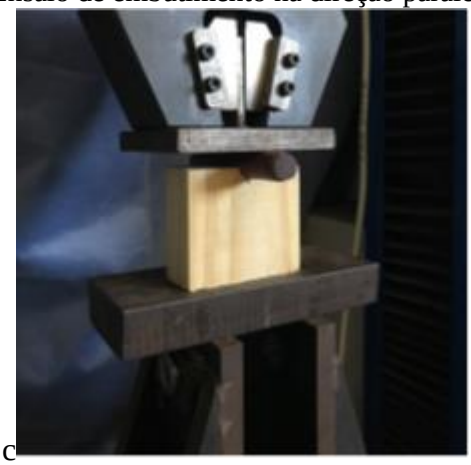
t = espessura do corpo de prova;

d = diâmetro do pino;

$F_{yield,0}$ = força de escoamento no ensaio paralelo às fibras;

$F_{yield,90}$ = força de escoamento no ensaio normal às fibras;

Figura 43: Ensaio de embutimento na direção paralela às fibras.



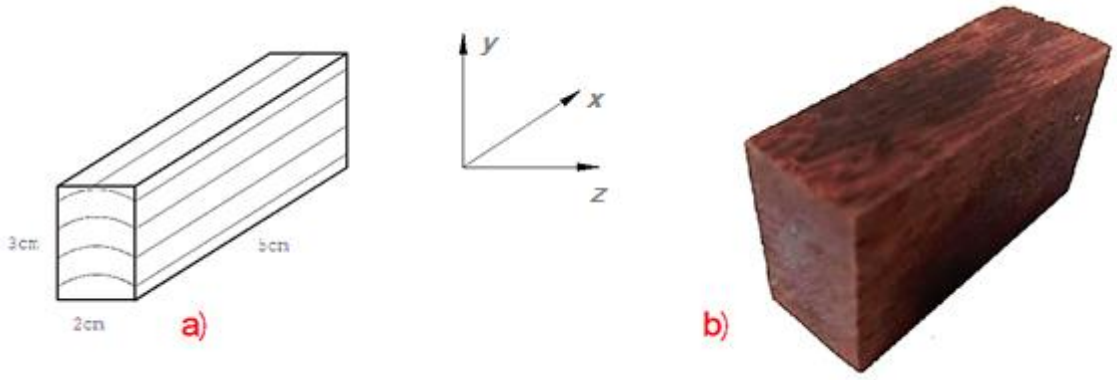
c

Fonte: Próprio autor

3.2.1.4 Ensaio de estabilidade dimensional do Pau-roxo (retratibilidade)

O ensaio de estabilidade dimensional do pau-roxo foi realizado para mensurar as propriedades de retração e de inchamento nas três direções (eixos *x*, *y* e *z*) pois, sendo a conexão da cavilha feita somente por interferência entre o furo e a cavilha, é importante considerar estas propriedades para rigidez da ligação. O ensaio foi realizado seguindo o item 7, do anexo B da norma de estruturas de madeira NBR 7190/1997 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997, p.139), e foram ensaiados 6 corpos de prova. A dimensão dos corpos de prova recomendados na norma é apresentada na figura 44.

Figura 44: a) Dimensões dos corpos de prova; b) Corpo de prova de pau-roxo



Fonte: a) NBR 7190 (ABNT, 1997); b) próprio autor

As deformações específicas de retração, (ε_r), e de inchamento, (ε_i), são consideradas como índices de estabilidade dimensional e são determinadas, para cada uma das direções preferenciais, em função das respectivas dimensões da madeira saturada (verde) e seca, sendo calculadas pelas equações 52 e 53.

$$\varepsilon_{r,(x,y,z)} = \left(\frac{L_{(x,y,z)sat} - L_{(x,y,z)seca}}{L_{(x,y,z)sat}}\right) \times 100 \qquad \text{Equação 51}$$

$$\varepsilon_{i,(x,y,z)} = \left(\frac{L_{(x,y,z)sat} - L_{(x,y,z)seca}}{L_{(x,y,z)sat}}\right) \times 100 \qquad \text{Equação 52}$$

Neste estudo analisou-se somente a retratibilidade da madeira. O procedimento do ensaio consistiu em saturar os corpos de prova em agua a 20°C±5°C até que a variação dimensional se estabilizasse em torno da diferença de 0,02 mm entre duas medidas sucessivas. Tomou-se três medidas de cada lado do corpo de prova com paquímetro com precisão centesimal. Secou-se ao ar os corpos de prova até a estabilização dimensional, e foram novamente tomadas as medidas dimensionais. Secou-se em estufa a 100°C±2°C até obtenção de 0% de umidade, e novamente foram tomadas as medidas dimensionais.

A variação volumétrica foi calculada pela equação 54.

$$\Delta V_V = \frac{V_{sat} - V_{seco}}{V_{seco}} \times 100 \qquad \text{Equação 53}$$

Onde:

$V_{sat} = L_{x,sat} \cdot L_{y,sat} \cdot L_{z,sat}$

$$V_{seco} = L_{x,seco} \cdot L_{y,seco} \cdot L_{z,seco}$$

3.2.1.5 Ensaio de cisalhamento do pau-roxo

Para a determinação da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira de pau-roxo, foi realizado o ensaio de cisalhamento, seguindo o item 12, do anexo B da norma de estruturas de madeira NBR 7190/1997 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997, p.160). Foram ensaiados 6 corpos de prova nas dimensões apresentadas na figura 45, utilizando uma máquina universal de ensaio marca AMSLER, e a resistência foi obtida através da equação 55.

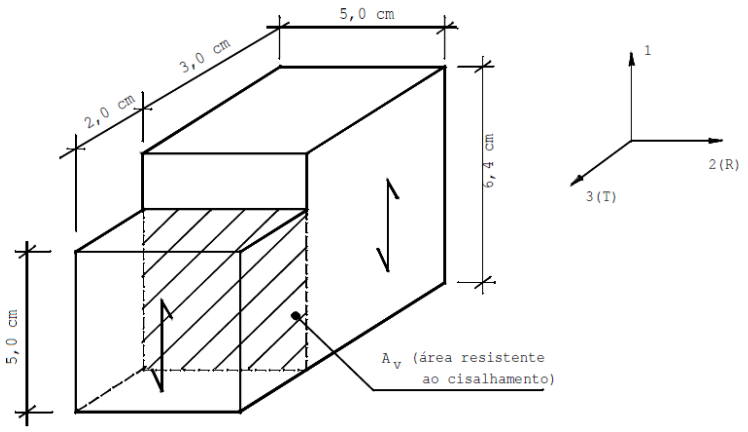
$$f_{V,0} = \frac{F_{V,0,max}}{A_{V,0}} \qquad \text{Equação 54}$$

Onde:

$F_{V,0,max}$ = força máxima cisalhante aplicada ao corpo de prova;

$A_{V,0}$ = área inicial da seção crítica do corpo de prova, num plano paralelo às fibras.

Figura 45: Dimensões do corpo de prova para ensaio de cisalhamento



3.2.2 ***Classificação visual e mecânica não destrutiva das lamelas***

As lamelas foram posicionadas nos painéis conforme sua classe visual e mecânica. Para isso, todas as lamelas foram classificadas visualmente através do método descrito no item 2.5.2, e classificadas mecanicamente através do método da vibração transversal e da flexão estática não destrutiva. As tábuas com melhores MOE (Modulo de Elasticidade) obtido no ensaio de vibração transversal e com melhores classificações visuais, ou seja, com menos e menores nós, foram escolhidas para compor as camadas longitudinais dos painéis, e as com menores MOE e

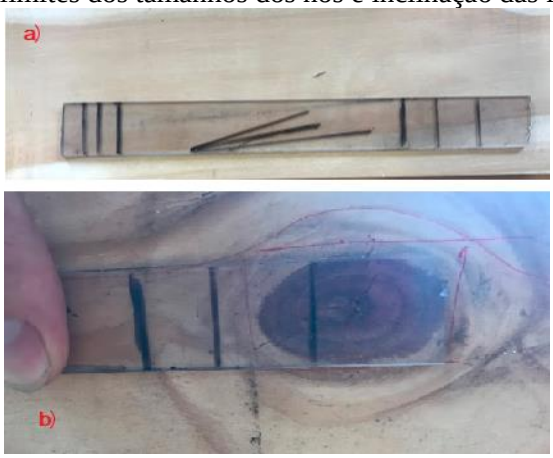
com mais defeitos, foram escolhidas para as camadas transversais. Além da vantagem estrutural, o uso das peças com maiores defeitos naturais para a confecção das lamelas transversais permite que seccione as peças que originalmente tinham 3 metros em peças de 1,26 metros podendo-se fabricar lamelas curtas sem tantos defeitos. Após o corte no comprimento de 1,26 metros, as lamelas curtas foram submetidas à teste de flexão estática para obtenção do novo MOE. A figura 46 mostra as lamelas seccionadas em comprimentos diferentes.

Figura 46: Lamelas de Pinus seccionadas em comprimentos diferentes

Fonte: Próprio autor

Para a classificação visual foi criada uma régua (gabarito) com medidas baseadas nas dimensões das tábuas seguindo os critérios apresentados na tabela 6, com a qual mediu-se a inclinação das fibras e os nós das faces largas e das faces estreitas, como ilustrado na figura 47.

Figura 47: a) régua com os limites dos tamanhos dos nós e inclinação das fibras; b) medição de um nó



Fonte: Próprio autor

A classificação mecânica foi realizada pelo método não destrutivo da vibração transversal, seguindo a metodologia adotada por Calil e Miná (2003), com o uso do equipamento marca Metriguard modelo 340E, conforme a figura 48.

Figura 48: Lamela sendo ensaiada em equipamento de Vibração Transversal

Fonte: Próprio autor

Após a classificação mecânica através do Método de Vibração Transversal, as lamelas que foram separadas para compor as camadas transversais foram cortadas no comprimento de 1,26 metros e, em seguida, submetidas à um novo teste de flexão para obtenção do MOE para o novo comprimento. Este teste foi realizado pelo método estático devido o equipamento de vibração transversal não ser capaz de ensaiar peças menores que 2 metros.

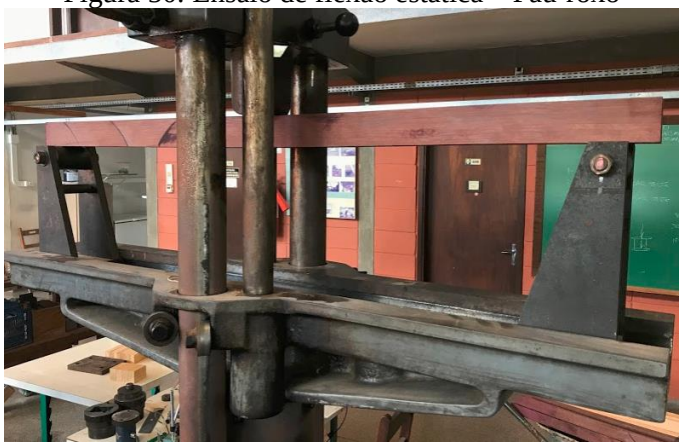
O ensaio foi realizado em uma máquina universal de ensaio, Marca Amsler, na qual as peças foram posicionadas de forma bi-apoiada com vão de 115 cm, e uma carga central foi aplicada no centro do vão de maneira crescente até o limite de flecha *L/300* (figura 49). As cargas eram captadas por uma célula de carga, e os respectivos deslocamentos foram captados por um transdutor de deslocamento elétrico (LVDT), ambos ligados a um equipamento receptor que transmitia os dados a um *laptop* no qual o *software* do dispositivo faz o tratamento e armazenamento dos valores do ensaio, com os quais, aplicando a equação 43, se obtém os valores do MOE.

Figura 49: Ensaio de flexão estática em lamelas curtas de *Pinus*

Fonte: Próprio autor

Da mesma forma foi realizado ensaio de flexão estática em amostras de pau-roxo, porém usando as dimensões descritas no item 14, do anexo B da norma NBR 7190/1997, sendo 50 x 50 x 1150 mm (figura 50). Foram ensaiadas 6 corpos de prova, o equivalente a caracterização simples pedida na norma brasileira.

Figura 50: Ensaio de flexão estática – Pau-roxo



Fonte: Próprio autor

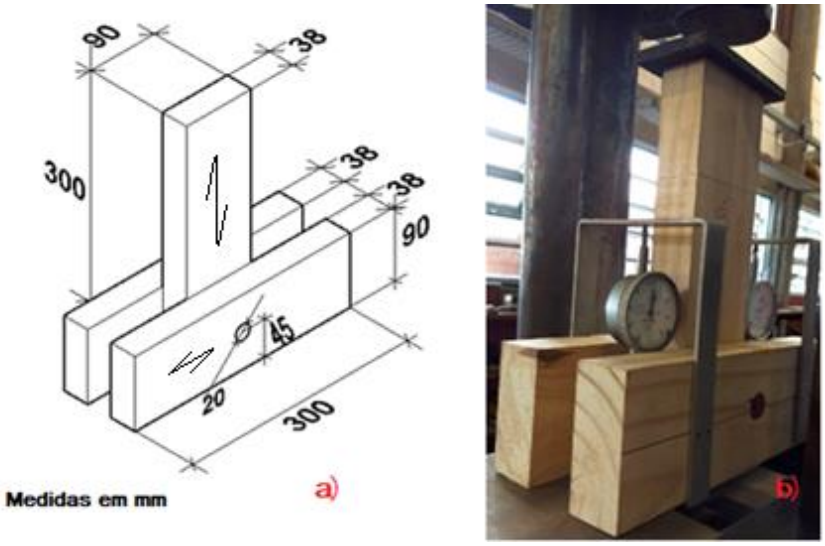
3.2.3 ***Ensaio das Ligações***

3.2.3.1 Ensaio de ligação perpendicular com duas seções de corte

Para o cálculo do momento $M_{y,Rk}$ da equação 9, foi necessário a produção de corpos de prova de ligação perpendicular com duas seções de corte. Como apresentado por Pereira e Calil Junior (2018), este procedimento é usado para o cálculo do Módulo de Deslizamento da Ligação, K_{ser}.

O método utilizado para este ensaio foi o proposto no projeto de norma brasileira sobre ligações em estruturais em madeira PN 02:126.10-001-4 – *Método de ensaio para determinação de resistências de ligações mecânicas das estruturas de madeira* – que foi baseado na norma ISO 6891/1983. O ensaio foi realizado utilizando uma máquina universal de ensaio da marca Amsler, e os deslizamentos foram aferidos com relógios comparadores com precisão de 0,01 mm. A figura 51 apresenta as dimensões do corpo-de-prova e a realização do ensaio.

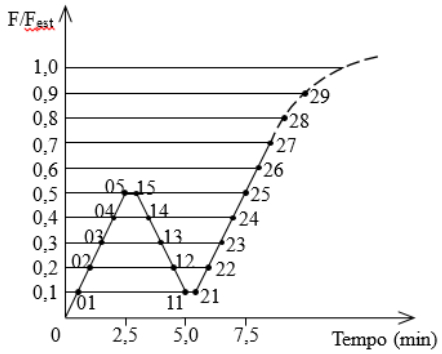
Figura 51: a) dimensão do corpo de prova; b) ensaio de ligação perpendicular com duas seções de corte



Fonte: Próprio autor adaptado de PN 02:126.10-001-4 (2017)

O procedimento da norma recomenda determinar a força máxima estimada (F_{est}) através de um teste preliminar. Neste estudo foram ensaiados 6 corpos de prova sendo um como referencial para determinação da força máxima, com o qual estimou-se a carga máxima para os demais. O procedimento do ensaio é indicado na figura 52, iniciando com a aplicação de uma carga equivalente à $0{,}5 \cdot F_{est}$, mantendo-se por 30 segundos, descarregando até uma carga de $0{,}1 \cdot F_{est}$, mantendo por mais 30 segundos. Posteriormente aumenta-se a carga novamente até atingir a força última ou o deslizamento de 15 mm, o que ocorrer primeiro. Abaixo de $0{,}7 \cdot F_{est}$, o carregamento deve ser realizado com velocidade aplicação de força ou deslizamento constante, correspondente a $0{,}2 \cdot F_{est}$, por minuto. Acima de $0{,}7 \cdot F_{est}$, a velocidade deve ser mantida constante, ajustada de forma que a força última ou o deslizamento de 15 mm seja atingido em um tempo adicional de 3 a 5 minutos.

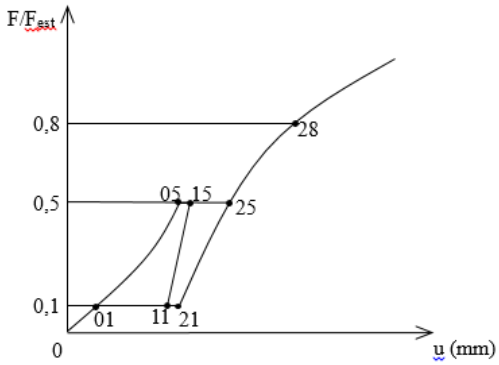
Figura 52: Forma de aplicação do carregamento.



Fonte: PN 02:126.10-001-4 (2017)

As medidas dos deslizamentos chamados de u_{01}, u_{05}, u_{14}, u_{11}, u_{21}, u_{25}, e u_{28}, apresentados na Figura 53, são registrados durante o teste para cada ponto, conforme indicado no gráfico, baseado na carga da Força Estimada.

Figura 53: Diagrama força x deslizamento da ligação.



Fonte: PN 02:126.10-001-4 (2017)

A Força Máxima (F_{max}) será o valor da força correspondente ao deslizamento de 15 mm ou o valor máximo obtido antes do deslizamento alcançar 15 mm.

A partir das medidas registradas, são determinados os seguintes valores, para cada teste:

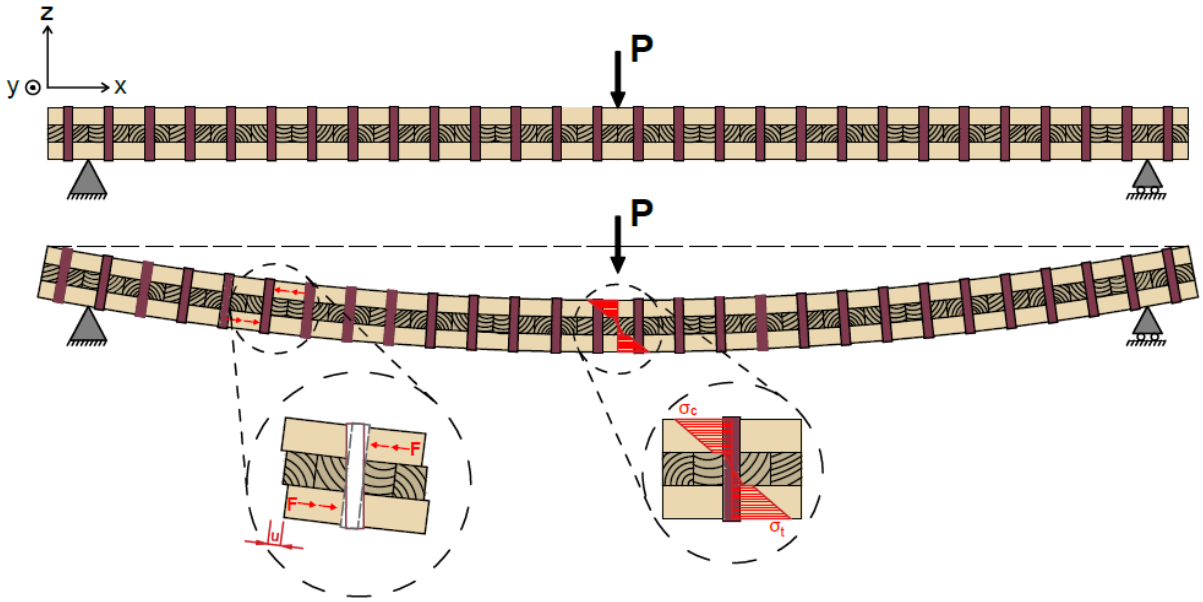
- Força máxima aplicada: F_{max}
- Força Máxima Estimada: F_{est}
- Deslizamento Inicial (1º carregamento): $u_i = u_{05}$
- Deslizamento Inicial Modificado: $u_{i,mod} = \frac{5}{4}\,(u_{05} - u_{01})$
- Acomodação da Ligação: $u_s = u_i - u_{i,mod}$
- Deslizamento a 10% (1º carregamento): u_{01}
- Deslizamento inicial modificado: $u_{i,mod}$
- Deslizamento a 50% (1º carregamento): u_{15}
- Deslizamento a 50% (2º carregamento): u_{25}
- Deslizamento a 10% (descarregamento): u_{11}
- Deslizamento a 10% (2º carregamento): u_{21}
- Deslizamento Elástico: $u_e = \frac{5}{8}\,(u_{15} + u_{25} - u_{11} - u_{21})$

- Deslizamento para 0,8 F_{max} : $u_{0,8}$
- Deslizamento para 0,8 F_{max} Modificado : $u_{0,8,mod} = u_{0,8} - u_{25} + u_{i,mod}$
- Módulo de Deslizamento Inicial: $k_i = 0{,}5\ F_{est}/u_i$
- Módulo de Deslizamento: $k_s = 0{,}5\ F_{est}/u_{i,mod}$

3.2.3.2 Ensaio de ligação perpendicular com uma seção de corte

Para determinação do módulo de deslizamento K_{ser} que atua de fato no painel em serviço, foi necessário o desenvolvimento de um novo corpo de prova não previsto nas normas. Conforme ilustrado na figura 54, o movimento realizado pela cavilha durante a flexão do painel não é o mesmo que o previsto pelos ensaios de ligação. O valor do K_{ser} utilizado no cálculo analítico pelos métodos γ e da Analogia do Cisalhamento (SAM).

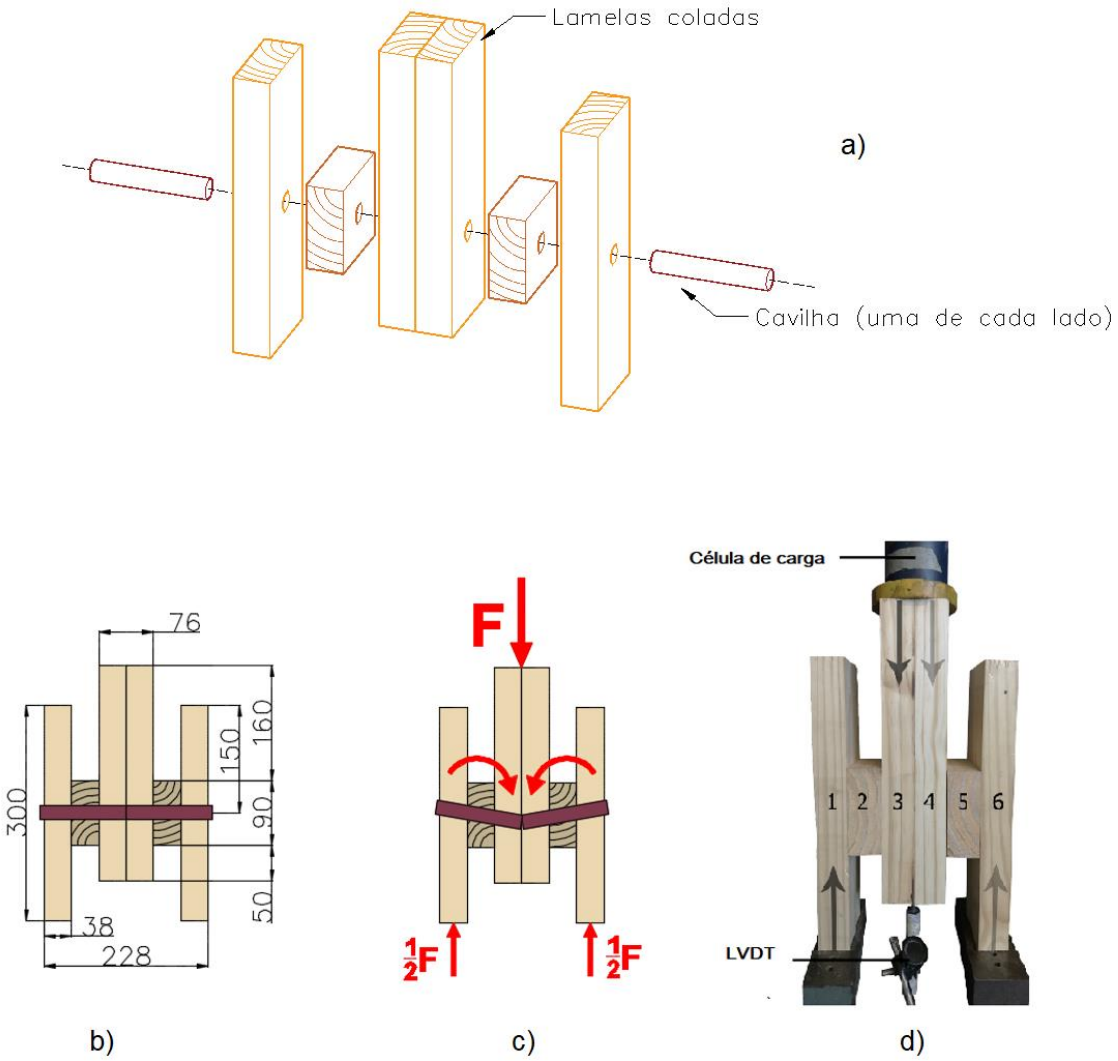
Figura 54: Detalhe da deformação da cavilha durante a aplicação da carga no painel



Fonte: Sohier (2018)

Para simular o deslizamento das camadas superiores e inferiores do painel DCLT o novo modelo de corpo de prova consistiu em duas seções de um painel DCLT de três camadas cada um, colados (ligação rígida) com adesivo Fenol Resorcinol, um ao outro, como ilustrado na figura 55. Primeiramente foram coladas as lamelas centrais, e com o adesivo já curado, foi montado o corpo de prova, com duas cavilhas de ¾” x 114 mm de cada lado. As cavilhas foram alocadas de forma a simular o comportamento delas no painel.

Figura 55: Corpo de prova para ensaio de ligação perpendicular com uma seção de corte; a) Vista explodida; b) dimensões do corpo de prova; c) Deslocamento previsto do corpo de prova durante ensaio; d) Corpo de prova durante ensaio



Fonte: a) e b) próprio autor, c) Sohier (2018)

Foram ensaiados 15 corpos de prova, e a montagem destes foi feita levando em consideração as densidades de cada peça, de forma a minimizar a influência a variação da densidade durante a flexão do corpo de prova. Portanto, todas as peças foram separadas em 4 grupos, com configurações apresentadas na tabela 8.

Tabela 8: Faixas de densidade para confecção dos corpos de prova

Grupo	Faixa de Densidade ρ (kg/m³)
1	340 a 370
2	370 a 385
3	385 a 430
4	430 a 480

Fonte: Próprio autor

O procedimento do ensaio foi um ciclo de carregamento idêntico ao descrito no item 3.2.3.1, porem foi realizado em uma máquina universal de ensaio marca EMIC, modelo DL3000, pois a automação do equipamento permitiu um controle mais refinado do tempo de aplicação da carga, da velocidade de aplicação e da ciclagem exigida pelo ensaio. Um transdutor de deslocamento elétrico (LVDT) foi posicionado abaixo do ponto central do corpo de prova, como ilustrado na figura 55-d, para captar o deslocamento real das lamelas. Esse transdutor foi ligado a um equipamento receptor que transmitia os dados a um *laptop* no qual o *software* do dispositivo fazia o tratamento e armazenamento dos valores do ensaio.

Com os valores F_{est} e $u_{i,mod}$, determina-se o valor do módulo de deslizamento da ligação, K_{ser}, calculado através da equação 51. É importante ressaltar, que a o K_{ser} foi dividido por 2 pois o ensaio foi realizado com duas cavilhas simultaneamente.

$$K_{ser} = \frac{1}{2} \cdot \frac{0{,}5F_{est}}{u_{i,mod}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{0{,}5F_{est}}{{}^{5}/_{4}\,(u_{04} - u_{01})}$$

Equação 55

$$\therefore \quad K_{ser} = \frac{1}{5} \cdot \frac{F_{est}}{(u_{04} - u_{01})}$$

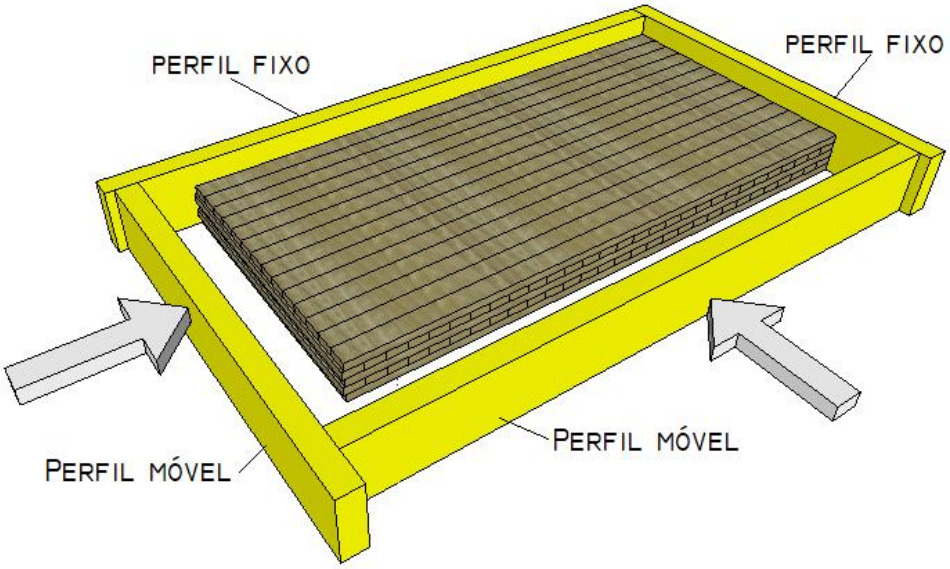
3.2.4 *Produção dos painéis DCLT*

Para a produção de painéis de lamelas cruzadas com dimensões retangulares, foi necessário fazer o bitolamento das peças, que consistiu em cortar no comprimento necessário as lamelas que iriam compor as camadas longitudinais, e da mesma forma, as lamelas que iriam compor as lamelas transversais. As peças longitudinais foram cortadas com comprimento de 2,61 m e as transversais com 1,26 m.

As lamelas foram ensaiadas e a partir dos valores dos Módulos de Elasticidade (MOE), as lamelas foram distribuídas ao longo do painel, de maneira que as camadas superiores e inferiores fossem formadas por lamelas com maiores MOEs. Para isso cada lamela foi numerada no topo, e sua posição estudada antes da montagem do painel. A distribuição detalhada das peças nos painéis consta no Anexo A.

A montagem foi realizada usando-se um gabarito formado por vigas de metal formando um quadro presas ao chão por barras roscadas, sendo que duas das vigas metálicas laterais do gabarito tinham ajustes para permitir aproximação (perfis móveis) e foram usadas para comprimir as lamelas por meio de um macaco hidráulico, conforme ilustrado na figura 56. Na direção vertical também foi usado um pistão hidráulico para comprimir as lamelas e mantê-las na posição durante a furação. Estas cargas laterais e superior somente foram retiradas após a colocação da maioria dos conectores.

Figura 56: Modelo do gabarito para montagem do DCLT



Fonte: Próprio autor

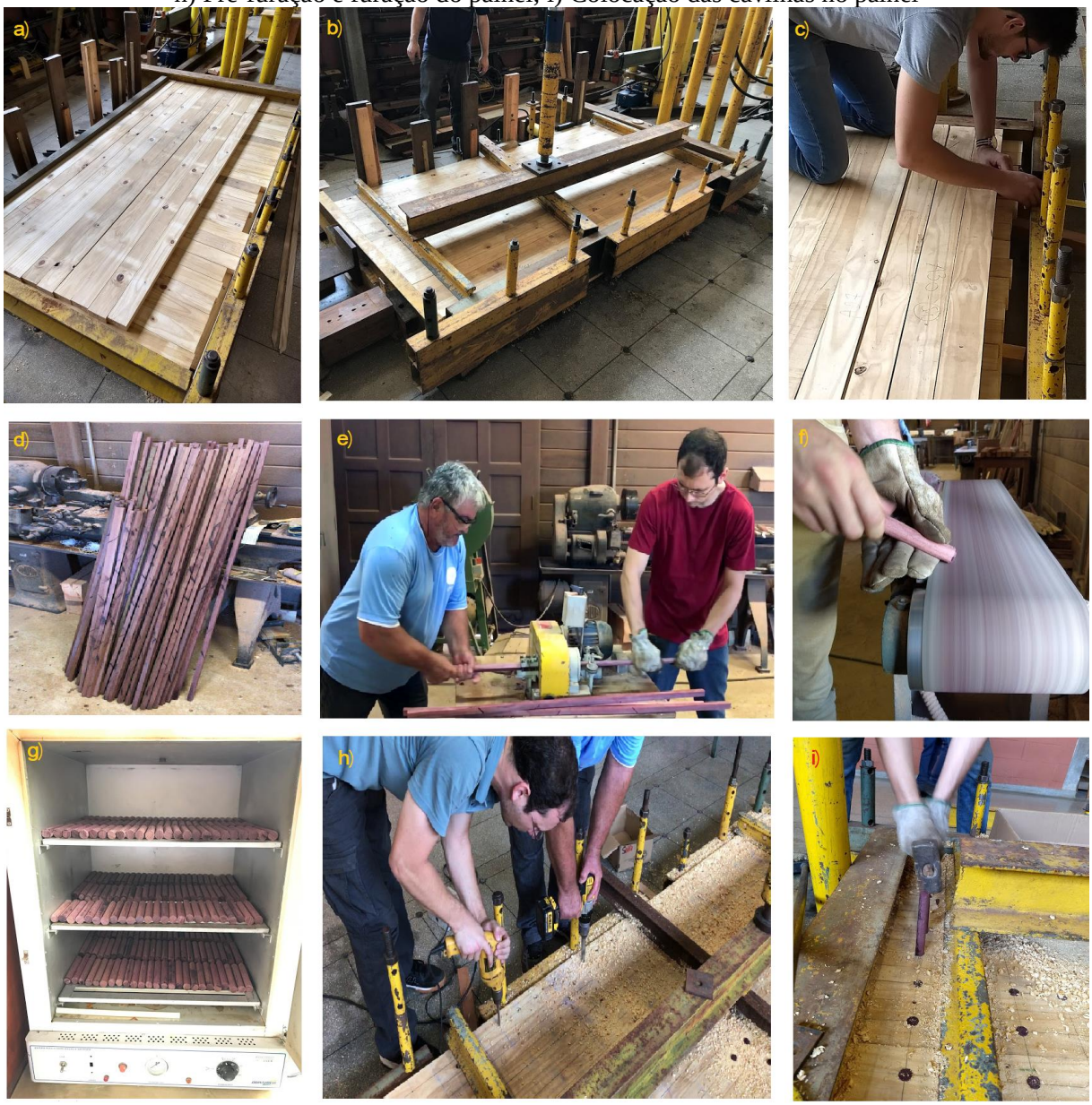
A furação foi feita com uma broca com diâmetro de 10 mm usado como pré-furação e em seguida os furos eram alargados para 19,03 mm (3/4”) com uma broca deste diâmetro. Os pontos a serem furados foram marcados à lápis na superfície dos painéis e correspondiam ao eixo longitudinal de cada lamela.

As cavilhas foram produzidas com o uso de uma máquina cavilhadeira, na qual foi acoplada uma fresa com dentes de metal duro (*Widea*®) com diâmetro interno de ¾”. Se fez necessária o uso de dentes de metal duro devido à dificuldade para usinagem da madeira de

pau-roxo. Para o uso da máquina cavilhadeira, a vigas de pau-roxo foram inicialmente desdobradas em tarugos com seção transversal de 21 x 21 mm. Após a etapa de usinagem dos tarugos em barras circulares, estas foram seccionadas no comprimento nominal, sendo 120 mm para uso no painel de 3 camadas e 200 mm para uso no painel de 5 camadas. Uma das pontas das cavilhas foi chanfrada em uma lixadeira de cinta para facilitar a colocação nos furos das lamelas, visto que eram furos com interferência.

Após a fabricação das cavilhas, elas foram levadas à uma estufa de secagem, na qual ficaram por 48 horas a uma temperatura de 100°C±2. Este procedimento se fez necessário para que as cavilhas perdessem umidade e com por meio da retratibilidade que ocorre devido a secagem, as cavilhas adentrassem mais facilmente no furo das lamelas. Assim, após a furação das lamelas, as cavilhas eram retiradas da estufa, e com elas ainda quentes, eram instaladas nos furos com o uso de uma marreta de aço de 2 quilos. Após a colocação das cavilhas quentes e secas nos furos, a troca de umidade com o ambiente fazia com que elas voltassem a umidade de equilíbrio e, consequentemente, inchassem levemente, de forma que travavam as lamelas dentro do furo. A figura 57 apresenta sequência de montagem descrita anteriormente.

Figura 57: Montagem do painel a) Posicionamento das lamelas nos gabaritos laterais; b) Aperto lateral e vertical com cilindros hidráulicos; c) Marcação da posição dos furos; d) Tarugos de pau-roxo; e) Usinagem das cavilhas; f) chanfro em uma das pontas da cavilha; g) Secagem das cavilhas em estufa; h) Pré-furação e furação do painel; i) Colocação das cavilhas no painel



Fonte: Próprio autor

3.2.5 *Ensaio de flexão longitudinal e transversal nos painéis DCLT*

Para determinação das propriedades resistência e rigidez dos painéis DCLT produzidos, eles foram ensaiados na flexão em ensaios de três pontos, como o ensaio descrito no item 3.3.3, e o equipamento utilizado foi um pórtico de aço montando sobre uma laje de reação, onde no pórtico foi instalado um cilindro hidráulico com capacidade de 25 toneladas força (*tf*), conectado a uma central hidráulica. O painel foi posicionado abaixo do pórtico apoiado em

bases de concreto com cerca de 60 cm de altura. No ensaio foi utilizado perfis I de aço para distribuição da carga ao longo da largura do painel nas duas direções. A instrumentação utilizada para aquisição dos dados referente ao deslocamento foram 16 transdutores de deslocamento (*Displacement Transducer* – DT), marca Kyowa, modelo DT-A com 100 mm de curso, ligados a um equipamento aquisitor de dados marca Measurements Group, modelo System 5000, com capacidade para 20 canais. A captação da carga aplicada realizada por meio de uma célula de carga com capacidade para 25 toneladas, ligada ao equipamento aquisitor. A carga aplicada foi referente ao limite de flexão de L/300, e o ensaio foi repetido três vezes para cada direção. O cálculo da rigidez (EI) foi obtido através da equação 56.

$$EI = \frac{\Delta P \cdot L_0^3}{\Delta\delta \cdot 48} \qquad \text{Equação 56}$$

Onde:

ΔP = Variação da carga aplicada;

$\Delta\delta$ = Variação do deslocamento;

L_0 = vão livre;

O ensaio de flexão na direção transversal para o painel de 5 camadas não foi realizado devido a relação L/h = 5,6. Valores muito baixo da relação vão x espessura refletem uma influência muito grande do cisalhamento no ensaio de flexão. Posteriormente foi calculado através do *software* ATM o valor da flexão transversal.

Os valores dos módulos de ruptura (MOR) dos painéis foram obtidos após a ruptura na direção longitudinal, sendo calculado através da equação 57. A figura 58 apresenta os ensaios de flexão.

$$MOR = \frac{1{,}5\, PL_0}{bh^2} \qquad \text{Equação 57}$$

Onde:

P = carga de ruptura;

L_0 = vão livre;

b = largura do painel;

h = altura do painel

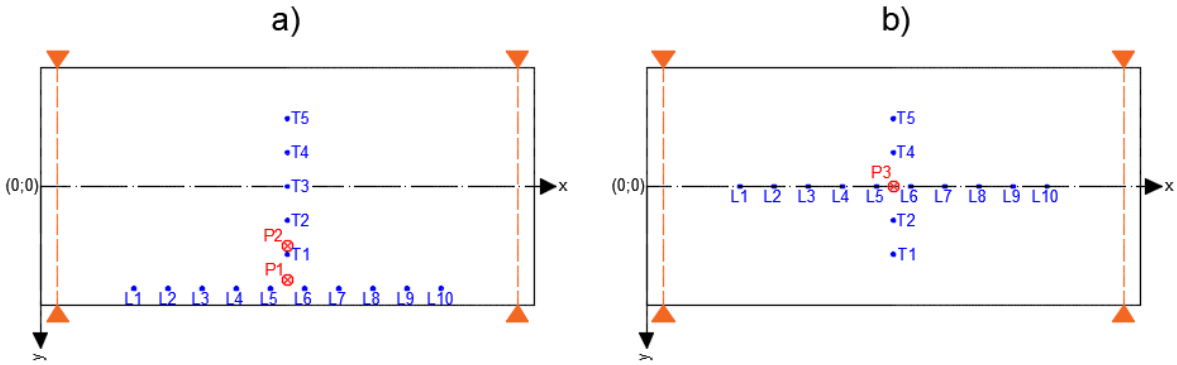
Figura 58: a) Ensaio de flexão longitudinal no painel de 3 camadas; b) ensaio de flexão transversal no painel de 3 camadas; e c) ensaio de flexão longitudinal no painel de 5 camadas

Fonte: próprio autor

3.2.6 *Ensaio de flexão com carga pontual*

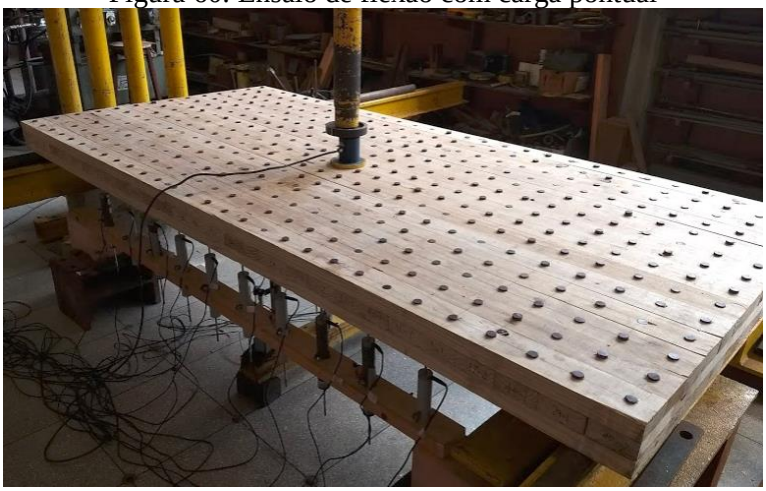
Para a utilização do *software* ATM descrito no item 2.4.4.2, foram realizados uma sequência de ensaios de flexão com cargas pontuais para captação dos valores de deslocamentos, com os quais o *software* ATM, através dos algoritmos genéticos, determina as propriedades elásticas de tabuleiros ortótropos de madeira. Foram utilizados os mesmos equipamentos descritos no item anterior, porém a carga aplicada foi pontual, até o limite de deslocamento de L/300. Os pontos de aplicação das cargas são apresentados na figura 59, e o ensaio na figura 60. Os pontos de aplicação de carga são representados pela letra P, e os pontos de captura do deslocamento são representados pelas letras L (longitudinais) e T (transversais).

Figura 59: a) Pontos de aplicação de carga P1 e P2, b) ponto de aplicação da carga P3



Fonte: próprio autor

Figura 60: Ensaio de flexão com carga pontual



Fonte: próprio autor

3.2.7 *Ensaio de flexão em painéis com vão pequenos para análise do cisalhamento*

Conforme descrito anteriormente, quanto menor a relação L/h maiores os efeitos do cisalhamento durante a flexão. Para examinar como o efeito do cisalhamento ocorre nos painéis DCLT foram obtidos 6 painéis – três de cada configuração – com dimensões pequenas (360 x 1260 mm) a partir dos painéis maiores, após o ensaio de flexão e ruptura dos mesmos. Os painéis menores foram ensaiados na flexão a três pontos até a ruptura, semelhante ao ensaio nos painéis maiores, porém, somente com a aquisição dos dados referente à carga, feita com o uso de uma célula de carga ligada ao equipamento aquisitor de dados.

Os painéis de três camadas foram ensaiados com vão de 72 cm e os painéis de 5 camadas foram ensaiados com vão de 108 cm para uma das amostras e 90 cm para as demais. A figura 61 apresenta os ensaios realizados.

Figura 61: a) Ensaio do painel pequeno de 5 camadas; b) ensaio do painel pequeno de 3 camadas; e c) detalhe para efeito do cisalhamento na camada central

Fonte: próprio autor

3.2.8 *Estudo analítico*

Foram desenvolvidos dois estudos analíticos, conforme descritos no item 2.4.2, o Método das Vigas Compostas (método γ) e o Método da Analogia do Cisalhamento (Shear Analogy Method – SAM). Os resultados foram comparados aos experimentais.

3.2.9 *Análise numérica[3] do corpo de prova desenvolvido para DCLT*

A análise numérica foi realizada com o uso do *software* de elementos finitos ABAQUS CAE, versão 6.14, na qual foi desenvolvido e simulado o modelo de ligação do painel visando auxiliar no desenvolvimento de modelos analíticos. As simulações permitem que diferentes parâmetros sejam avaliados. Neste estudo foram investigadas as influências de diferentes diâmetros de cavilhas, diferentes espessuras de lamelas e diferentes módulos de elasticidade das lamelas, e seus efeitos no módulo de deslizamento K_{ser}.

A simulação foi desenvolvida para o corpo de prova de ligação descrito no item 3.2.3.2, usando os parâmetros apresentados na tabela 9.

Tabela 9: Parâmetros dos materiais usados para a simulação numérica

Parâmetros [MPa]	Pinus	Pau-roxo
MOE (E_2)	9064	25482
MOE perpendicular às fibras (E_1 e E_3)	300	1151
Módulo de cisalhamento paralelo às fibras (G_{12} e G_{13})	419	1923
Módulo de cisalhamento perpendicular às fibras (G_{23})	40	280
Relação de Poisson (v_{12}, v_{13}, v_{23})	0,18	0,20

Foram criadas duas seções, uma chamada de "*dowel*" atribuída à cavilha e outra chamada de "*member*" atribuída às lamelas de *Pinus*. Uma rotação de 90° foi atribuída à lamela que representa a camada transversal.

Duas formas de contato e interações entre as lamelas foram criadas usando a ferramenta "*Interaction Property Manager*":

1. *Entre a cavilha e o painel*: o contato entre a cavilha e o as partes do corpo de prova de *Pinus*, foram definidos como comportamentos tangenciais e normais,

[3] A análise numérica foi realizada em parceria com o mestrando Luc Arthur Pascal Sohier, intercambista que desenvolveu dissertação de mestrado no Brasil, sob orientação do professor Thierry Descamps da Faculdade Politécnica da Universidade de Mons, na Bélgica, e com co-orientação do professor Carlito Calil Junior da Escola de Engenharia de São Carlos da USP.

sendo o normal definido como “*Hard*” (difícil) e a separação após o contato era permitida. O método de imposição de restrição não foi alterado e foi deixado em "*Default*" (padrão). Para o comportamento tangencial, o método de sanção escolhido foi considerando o atrito. O coeficiente de atrito definindo para o comportamento tangencial foi inicialmente fixado como sendo 1. As propriedades "*Shear Stress*" (tensão de cisalhamento) e "*Elastic Slip*" (escorregamento elástico) não foram alteradas.

2. *Sem atrito entre as peças de Pinus*: entre as peças de pinus do corpo de prova não foi considerado atrito, somente nas regiões do entorno das cavilhas. O comportamento na direção normal foi definido como o contato "*Dowel to board*" (cavilha com a lamela). Em algumas amostras ensaiadas experimentalmente, as lamelas do corpo de prova mantiveram o contato, mas em outros não, ou seja, criou-se uma separação entre as partes. Como ambas as situações aconteceram, o impacto nos resultados finais foi avaliado como pequeno, portanto este componente de atrito não foi levado em consideração no modelo numérico.

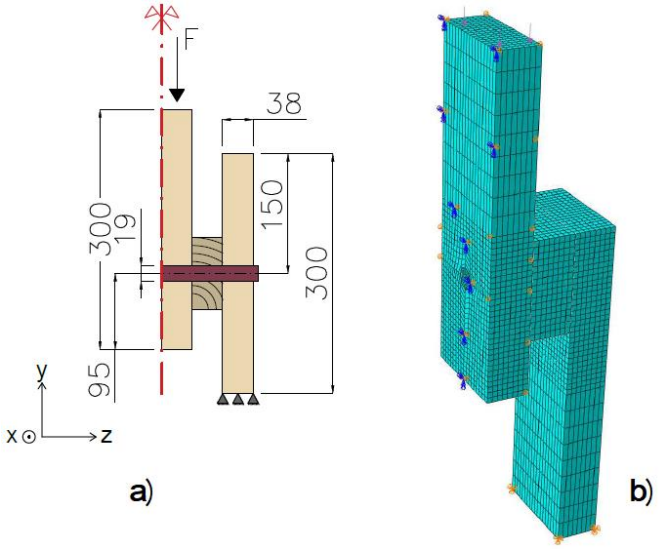
Algumas condições de contorno foram criadas para a simulação:

- *Apoio, deslocamento e rotação:* os deslocamentos U_1, U_2 e U_3 foram travados e a força foi aplicada na superfície menor da lamela mais externa, como ilustrado na figura 68a. É importante destacar que o deslizamento lateral dos apoios foram medidos em alguns corpos de prova durante os ensaios experimentais para confirmar esta hipótese. Nenhum deslocamento significante foi detectado antes da ruptura.
- *Simetria:* Foi considerado um corpo de prova simétrico na simulação, com a outra metade idêntica a primeira e a conexão entre elas totalmente engastada. A função “ZSYMM” foi utilizada para a simulação considerar a outra superfície simétrica.
- *Sem instabilidades:* para evitar qualquer instabilidade não foi permitido a lamela central mover-se ao longo do eixo x, ou seja, deslocamento U_1 foi travado para a lamela central.

Foram aplicadas cargas verticais sobre a lamela central na mesma magnitude que as cargas experimentais, das quais foram calculados o valor médio da carga de ruptura, 5000 N. As densidades não foram introduzidas na simulação, portanto o peso próprio dos componentes não foi considerado.

Para a criação da malha (*mesh*) diferentes partições foram criadas no modelo para definir e refinar a malha em torno dos furos. Uma malha global de 10 mm foi escolhida e uma malha local de 5 mm foi definida para as três lamelas de *Pinus* onde houve mais contato e a tensão aplicada. Para a cavilha foi utilizada uma malha de 3 mm. Quanto ao tipo de família do elemento, foi utilizada o modelo "*3D Stress*". A figura 62b apresenta o modelo coma representação da malha.

Figura 62: a) Geometria usada para a modelagem numérica; b) modelo numérico em forma de malha



Fonte: Adaptado de Sohier (2018)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados dos ensaios de caracterização físico-mecânicos

4.1.1 *Compressão paralela e normal às fibras* Pinus

A tabela 10 apresenta os resultados médios e característicos obtidos nos ensaios que determinaram a resistência e a rigidez à compressão paralela e normal às fibras para madeira de *Pinus* usando corpos de prova isentos de defeito. O valor característico foi obtido pelo cálculo do valor do quinto percentil mais baixo dentre os resultados.

Tabela 10: Resultados dos ensaios para determinação da resistência e rigidez à compressão do *Pinus*

Direção	Resistência [MPa]			Rigidez [MPa]		
Paralela	$f_{c0,m}$	$f_{c0,k}$	[CV]	$E_{c0,m}$	$E_{c0,k}$	[CV]
	34,09	26	17,9	9064	5442	21,7
Normal	$f_{c90,m}$	$f_{c90,k}$	[CV]	$E_{c90,m}$	$E_{c90,k}$	[CV]
	8,52	7	17,9	300	188	27,8

4.1.2 *Ensaios de embutimento*

A tabela 11 apresenta os resultados obtidos para os ensaios de embutimento realizados na madeira de *Pinus elliottii* e *taeda.*

Tabela 11: Resultados para ensaio de embutimento paralelo e normal às fibras

	α = 0°	α = 90°
$f_{e,\alpha,m}$ [MPa]	30,5	19,8
$f_{e,\alpha,k}$[MPa]	21,5	14,3
[CV]	16,7	21,2

4.1.3 *Considerações a respeito dos resultados dos ensaios no* Pinus

Os valores obtidos nos ensaios realizados na madeira de *Pinus*, mostraram valores compatíveis ao apresentado por Zenid (2009), e seguindo os requisitos descritos na tabela 8 da norma brasileira de estruturas de madeira NBR 7190/1997, a madeira seria enquadrada na classe de resistência C25. Atualmente uma nova versão da norma de estruturas de madeira NBR 7190

está em estudo, onde o enquadramento das madeiras nas classes de resistência é diferente da atual norma, pois os ensaios são feitos em peças estruturais com a presença de defeitos naturais. A classificação passa a ser feita pelo módulo de elasticidade à flexão E_M, e não mais pela resistência à compressão de corpos de prova isentos de defeitos. Seguindo este critério, a madeira de *Pinus* seria enquadrada como classe de resistência C16.

Em termos dos valores obtidos no ensaio de embutimento, o lote composto de *P. elliottii* e *P. taeda* mostraram boa resistência. Dados publicados por Almeida et. al. (2014) para *P. oocarpa* e *P. taeda* foram de $f_{e,0,k}$ = 10,53 MPa e $f_{e,0,k}$ = 23,8 MPa, respectivamente. Comparando-se aos resultados apresentados na tabela 13, percebe-se que o valor está coerente com o da espécie *taeda*, e que a espécie *oocarpa* não é uma boa opção para uso em painéis cavilhados pois o embutimento é uma das propriedades mais exigidas pelo material.

Em termos gerais, a madeira de *Pinus* se apresenta como uma boa alternativa para uso em materiais estruturais no Brasil como é o caso dos painéis DCLT, pois depois do eucalipto, é o grupo florestal com maior área plantada, e ao ser classificada visual e mecanicamente, é possível compor estruturas com as melhores peças nas posições mais solicitadas.

4.2 Resultados dos ensaios na madeira de pau-roxo (*Peltogyne spp., leguminosae*)

4.2.1 *Compressão paralela e normal às fibras pau-roxo (*Peltogyne spp., leguminosae*)*

A tabela 12 apresenta os resultados médios e característicos obtidos dos ensaios que determinaram a resistência e rigidez à compressão paralela e normal às fibras para madeira de pau-roxo (*Peltogyne spp., leguminosae*) usando corpos de prova isentos de defeitos. O valor característico foi obtido através do cálculo do valor do quinto percentil mais baixo dentre os resultados.

Tabela 12: Resultados dos ensaios para determinação da resistência e rigidez à compressão de *Peltogyne spp., leguminosae*

Direção	Resistência [MPa]			Rigidez [MPa]		
Paralela	$f_{c0,m}$	$f_{c0,k}$	[CV]	$E_{c0,m}$	$E_{c0,k}$	[CV]
	83,70	80,95	2,5	25482	23041	11,8
Normal	$f_{c90,m}$	$f_{c90,k}$	[CV]	$E_{c90,m}$	$E_{c90,k}$	[CV]
	20,44	18,77	6,1	1151	1377	9,3

4.2.2 *Flexão estática do pau roxo*

A tabela 13 apresenta os resultados médios e característicos obtidos nos ensaios que determinaram a resistência e rigidez à flexão para madeira de pau-roxo (*Peltogyne spp., leguminosae*) usando 6 corpos de prova isentos de defeito. O valor característico foi obtido através do cálculo do valor do quinto percentil mais baixo dentre os resultados.

Tabela 13: Resultados dos ensaios para determinação da resistência e rigidez à flexão de *Peltogyne spp., leguminosae*

Resistência [MPa]			Rigidez [GPa]		
$f_{M,m}$	$f_{M,k}$	[CV]	$E_{M,m}$	$E_{M,k}$	[CV]
161,33	155,56	3,4	21	20	5,8

4.2.3 *Estabilidade dimensional do pau roxo (retratibilidade)*

Os resultados obtidos para o ensaio de estabilidade dimensional para a madeira de pau-roxo (*Peltogyne, ssp. leguminosae*) estão resumidas na tabela 14 na qual a letra ε representa a retratibilidade obtida, e os respectivos índices representam as direções radial (R), tangencial (T) e axial (A).

Tabela 14: Resultados do ensaio de estabilidade dimensional (retratibilidade) do pau-roxo

CP	ε_R	ε_T	ε_A	$\Sigma\varepsilon$	ΔV (%)
1	4,53	7,78	0,27	*12,58*	*12,96*
2	4,76	7,62	0,36	*12,74*	*13,15*
3	4,67	7,68	0,25	*12,60*	*12,99*
4	4,62	7,20	0,25	*12,06*	*12,42*
5	4,72	7,82	0,23	*12,76*	*13,16*
6	4,71	7,59	0,22	*12,52*	*12,90*

4.2.4 *Cisalhamento*

Os resultados obtidos para o ensaio de cisalhamento da madeira de pau-roxo (*Peltogyne, ssp. leguminosae*) estão apresentados na tabela 15. O valor característico foi obtido através do cálculo do valor do quinto percentil mais baixo dentre os resultados.

Tabela 15: Resultado do ensaio de cisalhamento do pau-roxo

$f_{V,m}$ [MPa]	$f_{V,k}$ [MPa]	[CV]
17,37	14,86	12,7

4.2.5 *Considerações a respeito dos resultados dos ensaios no pau-roxo (***Peltogyne, ssp. leguminosae***)***

A madeira de pau-roxo se enquadraria pela atual NBR 7190/1997 como classe de resistência D60. Os ensaios evidenciaram que a madeira de pau-roxo possui alta resistência e rigidez, e um coeficiente de retratibilidade baixo. Para uso como cavilha se mostrou uma boa alternativa, já que a norma brasileira recomenda que cavilhas estruturais sejam produzidas com madeira de, no mínimo, classe estrutural D60.

Além de possuir boas propriedades físicas e mecânicas, a madeira de pau-roxo tem uma distribuição bem ampla pelo território nacional, como apresentado na figura 33, de maneira que se coloca como uma alternativa viável para uso em estruturas de madeiramentos em geral. Especialmente o uso para confecções de cavilhas poderia ser uma alternativa para o aproveitamento dos resíduos e peças de pequenas dimensões que normalmente não são aproveitadas pelas serrarias.

4.3 Resultados da Classificação visual e mecânica das lamelas

A tabela 16 apresenta os resultados das classificações das lamelas por camadas nos painéis, sendo a camada 1 referente a camada superior do painel, a camada 2 referente a segunda camada de cima para baixo, e assim sucessivamente. Os módulos de elasticidades dinâmicos obtidos nos ensaios de vibração transversal foram corrigidos pela equação 44, portanto os valores apresentados na tabela 16 se referem ao MOE estático, representado por E_M..

A partir dos valores dos módulos de elasticidade de cada peça, bem como da sua classificação visual, as lamelas foram posicionadas ao longo das camadas dos painéis. O anexo A apresenta essa distribuição de forma detalhada, bem como os resultados da rigidez individual e a classificação visual de cada lamela.

Tabela 16: Resultados da classificação visual e mecânica para lamelas dos painéis

Painel/camada		$E_{M,m}$ [GPa]	$\rho_{médio}$ [Kg/m³]	Classificação Visual (%) S1	S2	S3
3 camadas	Camada 1	5,7	490	50	44	6
	Camada 2	8,3	450	48	35	16
	Camada 3	8,9	455	43	50	7
5 camadas	Camada 1	8,9	486	7	64	29
	Camada 2	7,0	417	42	39	19
	Camada 3	7,2	452	29	43	29
	Camada 4	9,3	435	62	38	0
	Camada 5	10,5	502	71	29	0

4.4 Resultados dos ensaios para análise das ligações

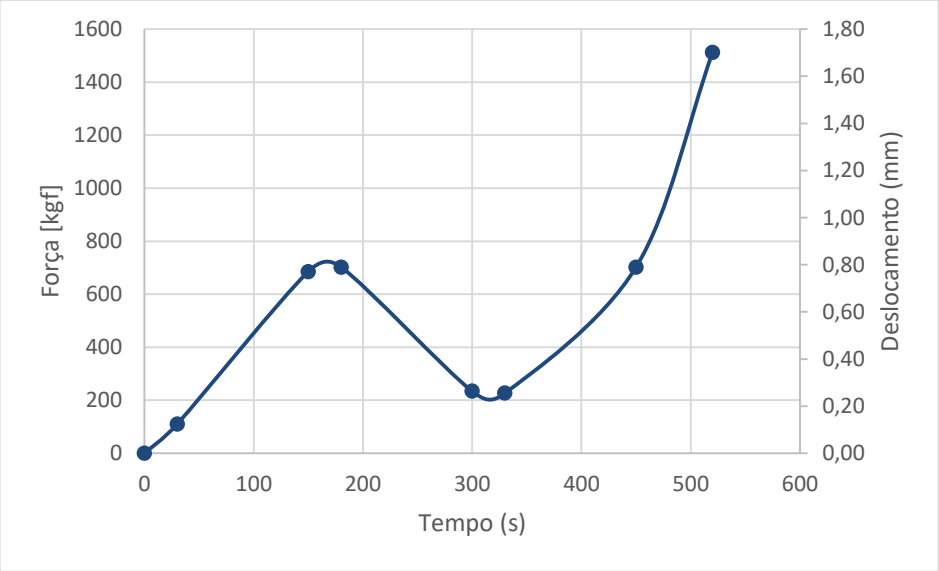
4.4.1 *Ensaio de ligações: duas seções de corte*

Os resultados obtidos para o ensaio de ligações considerando duas seções de corte, conforme descrito no item 3.2.3.1 é apresentado na tabela 17. A figura 63 apresenta o deslocamento relativo médio dos cinco corpos de prova, de forma gráfica, demostrando o comportamento ocorrido durante o ensaio ao longo do tempo.

Tabela 17: Parâmetros medidos durante ensaio de ligação com corte duplo

Parâmetros		Corpos de Prova CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
Força máxima aplicada [kgf]	F_{max}	*1360*	*1590*	*1630*	*1560*	*1630*
Força máxima estimada [kgf]	F_{est}	*1500*	*1500*	*1500*	*1500*	*1500*
Deslizamento inicial (1º carregamento) [mm]	$u_i=u_{05}$	0,93	0,83	0,51	0,78	0,82
Deslizamento a 10% (1º carregamento) [mm]	u_{01}	0,22	0,175	0,06	0,095	0,07
Deslizamento inicial modificado [mm]	$u_{i,mod}$	0,88	0,81	0,56	0,85	0,94
Acomodação da Ligação [mm]	u_s	0,04	0,01	-0,05	-0,08	-0,12
Desliz. 50% (1º carregamento) [mm]	u_{15}	0,94	0,825	0,53	0,795	0,86
Desliz. 50% (2º carregamento) [mm]	u_{25}	0,96	0,85	0,54	0,73	0,89
Desliz. 10% (descarregamento) [mm]	u_{11}	0,18	0,36	0,22	0,26	0,32
Desliz. 10% (2º carregamento) [mm]	u_{21}	0,18	0,345	0,21	0,245	0,3
Desliz. Elástico [mm]	u_e	0,97	0,61	0,40	0,64	0,71
Desliz. 80% da Força (2º carregamento) [mm]	$u_{0,8}$	1,91	1,77	1,17	1,45	2,22
Desliz. 80% da Força Modificado [mm]	$u_{0,8mod}$	1,84	1,73	1,19	1,58	2,27
Módulo de deslizamento inicial [Kgf/mm]	k_i	*811*	*909*	*1471*	*968*	*915*
Módulo de deslizamento [Kgf/mm]	k_s	*851*	*923*	*1333*	*882*	*800*

Figura 63: Deslocamento relativo médio dos cinco corpos de prova



Os valores obtidos e apresentados na tabela 17 foram calculados pelo método proposto pelo atual projeto de norma brasileira PN 02:126.10-001-4, apresentado de forma mais simples pela equação 58. Comparando-se o método proposto pela norma brasileira com o método proposto pela norma europeia EN 26891/1991- *Timber structures: Joints made with mechanical fasteners*, existe uma diferença no método de cálculo do módulo de deslizamento, como pode ser visto na equação 59. Branco, Cruz e Piazza (2009), demonstram que o valor da regressão linear dos valores de força e deformação (equação 60) obtido no ensaio para medição do deslizamento são equivalentes ao método do Eurocode EN 26891, com a vantagem de ser de mais fácil obtenção.

$$K_{ser} = \frac{0{,}5 \cdot F_{est}}{\frac{5}{4}(u_{05} - u_{01})} \quad \rightarrow PN02: 126.10 - 001 - 4 \qquad \text{Equação 58}$$

$$K_{ser} = \frac{0{,}4 \cdot F_{est}}{\frac{4}{3}(u_{05} - u_{01})} \quad \rightarrow EUROCODE\ 26891 \qquad \text{Equação 59}$$

$$K_{ser} = \frac{(0{,}5F_{est} - 0{,}1F_{est})}{(u_{05} - u_{01})} \quad \rightarrow REGRESSÃO\ LINEAR \qquad \text{Equação 60}$$

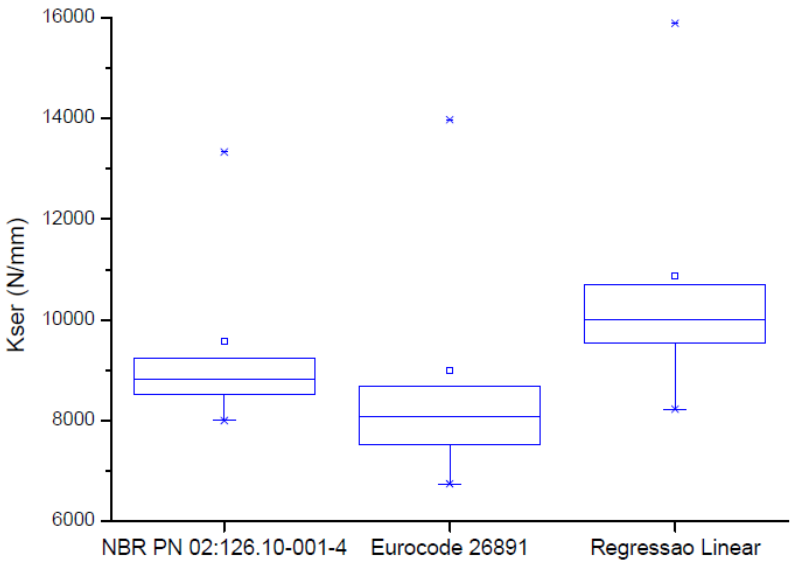
Baseado nestas equações, foi realizado um comparativo entre os módulos de deslizamento obtido pelos três métodos de cálculo. Os valores são apresentados na tabela 18.

A figura 60 apresenta um comparativo estatístico através de *box plot* dos três métodos, no qual pode-se analisar e comparar os valores médios, as dispersões e os *outlines*.

Tabela 18: Valores do módulo de deslizamento K_{ser} através de três modelos de cálculo para duas seções de corte

CP	Módulo de deslizamento da ligação K_{ser} [N/mm]		
	Regressão Linear	Eurocode 26891	NBR PN 02:126.10-001-4
1	8227	6743	8510
2	10692	8672	9230
3	15888	13971	13333
4	10000	8069	8823
5	9533	7523	8000
$K_{ser,Medio}$	*10868*	*8996*	*9579*
$K_{ser,K}$	*8488*	*6899*	*8102*
Des. Pad.	*2947*	*2871*	*2146*
C.V.	*27,1*	*31,9*	*22,4*

Figura 64: *Box plot* dos valores do K_{ser} para cada método de cálculo



Analisando os dados coletados percebe-se que para este ensaio os valores obtidos através do método proposto na NBR PN02:126.10-001-4 obteve os valores médios entre os outros dois métodos, mostrando-se uma dispersão menor que os demais.

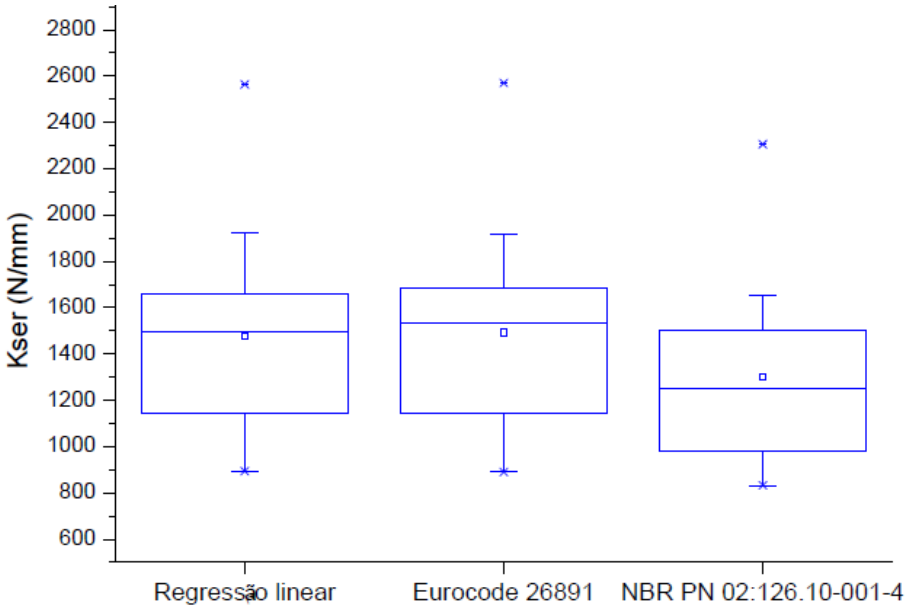
4.4.2 *Ensaio de ligações: uma seção de corte (corpo de prova desenvolvido neste estudo)*

Os resultados para o módulo de deslizamento com uma seção de corte são apresentados na tabela 19 e a figura 65 apresenta o *box plot* dos três métodos de cálculo.

Tabela 19: Valores do módulo de deslizamento K_{ser} através de três modelos de cálculo para uma seção de corte

CP	Módulo de deslizamento da ligação K_{ser} [N/mm]		
	Regressão Linear	Eurocode 26891	NBR PN 02:126.10-001-4
1	1289	1278	1267
2	2563	2570	2305
3	1519	1757	1171
4	1141	1143	983
5	1660	1534	1458
6	1685	1685	1501
7	1399	1607	1154
8	1497	1451	1376
9	1021	1009	954
10	1924	1917	1651
11	1061	1063	866
12	894	890	832
13	1552	1541	1525
14	1564	1564	1239
15	1374	1369	1250
$K_{ser,Medio}$	*1476*	*1492*	*1302*
$K_{ser,K}$	*983*	*974*	*856*
Des. Pad.	*410*	*417*	*371*
C.V.	*27,8*	*28,0*	*28,5*

Figura 65: *Box plot* dos valores do K_{ser} para cada método de cálculo para ensaio com uma seção de corte



Neste caso é possível notar que o método de regressão linear e a norma europeia EN 16891 são praticamente equivalentes em termos de dispersão das medidas e do valor médio obtido. O valor obtido pelo método da NBR PN 02:126.10-001-4 foi menor que os demais, porém com um coeficiente de variação pequeno, da ordem de 7,4.

4.4.3 *Considerações sobre os ensaios de ligações*

O ensaio de ligação com duas seções de corte é normalizado, porém foi concebido para ligações entre elementos de treliças ou conectores e não retrata a realidade do comportamento atuante no painel DCLT. Para tanto foi desenvolvido o ensaio apresentado como sugestão de um método de ensaio de ligação para uma seção de corte que retratasse o comportamento estrutural da ligação cavilhada no painel. Os valores do k_{ser} obtido no primeiro ensaio, cerca de 10 KN/mm, são bem superiores ao obtido no segundo ensaio, cerca de 1,5 KN/mm, evidenciando que o comportamento da ligação em ambos os ensaios é diferente. Portanto, o valor utilizado nos demais cálculos deste estudo foram baseados no k_{ser} obtido no ensaio de ligação com uma seção de corte.

4.5 Resultados dos ensaios de flexão nos painéis DCLT

4.5.1 *Rigidez dos painéis na flexão longitudinal e transversal*

Os ensaios de flexão longitudinal e transversal foram realizados conforme descrito no item 3.3.10, e os valores da rigidez calculados através da equação 56. A tabela 20 apresenta os

resultados obtidos e as figuras 66 e 67 os painéis de 3 e 5 camadas após ensaio. Na tabela 20, o índice *x* refere-se à direção longitudinal e o índice *y* refere-se à direção transversal do painel.

Tabela 20: Rigidez dos painéis DCLT

	$(EI)_{x,medio}$ [KNm²]	$(EI)_{y,medio}$ [KNm²]
DCLT 3 camadas	727	85
Desv. Pad (σ)	*9,2*	*2,2*
DCLT 5 camadas	1353	--
Desv. Pad (σ)	24,8	--

O ensaio na direção transversal (*y*) no painel de 5 camadas não foi realizado, pois, como explicado no item 3.2.5, o valor da relação entre L/h nesta direção é pequeno de forma que o efeito do cisalhamento predomina no ensaio. Este valor $(EI)_y$ para o painel de 5 camadas foi estimado através do *software* ATM, como descrito no próximo item deste estudo.

Figura 66: Painel DCLT 3 camadas após ensaio de flexão longitudinal

Figura 67: Painel DCLT 5 camadas após ensaio de flexão longitudinal

4.5.2 *Resistência dos painéis na flexão longitudinal e transversal*

Após os ensaios de flexão com captação dos deslocamentos para o cálculo da rigidez, os painéis foram levados à ruptura para a determinação da força última e posterior cálculo do módulo de resistência, usando a equação 57. A tabela 21 apresenta os resultados obtidos, e as figuras 68 e 69 apresentam as regiões das rupturas dos painéis.

Tabela 21: Resistência dos painéis DCLT

Painel	MOR [MPa]	F_{max} ruptura [KN]
3 camadas	20,36	92,6
5 camadas	16,67	198

Figura 68: Painel de 3 camadas: a) Detalhe da ruptura na lateral; b) ruptura ao longo da camada inferior do painel

Figura 69: painel de 5 camadas: a) Detalhe da ruptura na lateral b) ruptura ao longo da camada inferior do painel

4.5.3 *Módulo de elasticidade (MOE)*

Considerando o momento de inércia do painel como sendo o mesmo de um elemento prismático no qual é possível obter o momento de inércia da seção transversal ($I = bh^3/12$), é possível calcular o modulo de elasticidade dos painéis através da equação 45. A tabela 22 apresenta os valores do MOE médio obtido para a direção longitudinal.

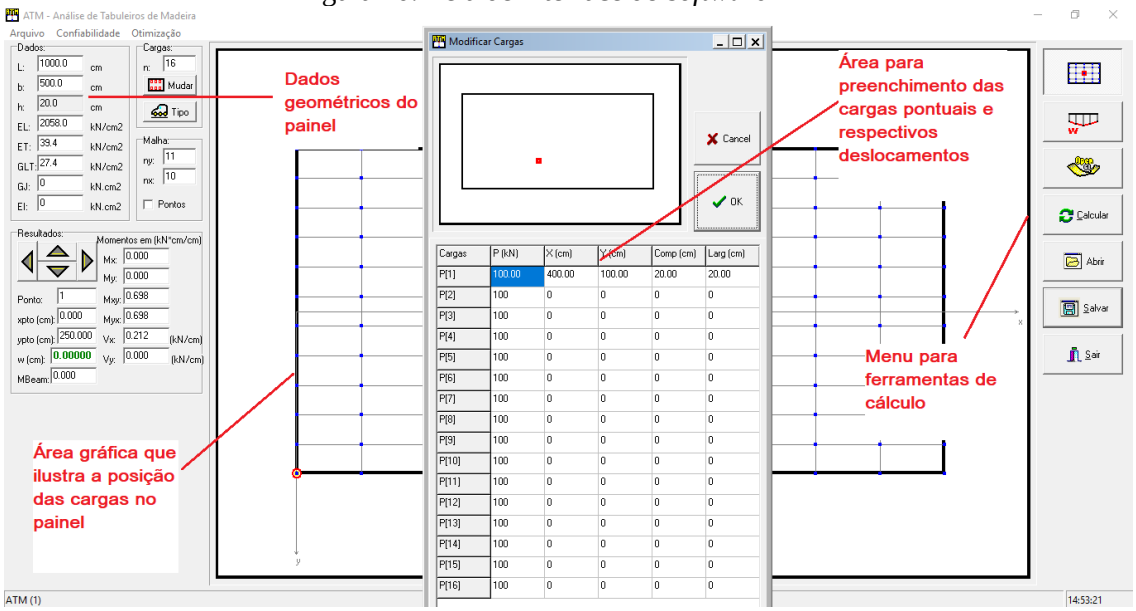
Tabela 22: Modulo de Elasticidade na direção longitudinal

Painel	$MOE_{0,x}$ [MPa]
3 camadas	4675
5 camadas	1879

4.5.4 *Ensaio de flexão com carga pontual para aplicação do ATM*

Para aplicação e uso do *software* ATM que estima as propriedades de tabuleiros ortótropos de madeira baseado em algoritmos genéticos, como explicado no item 3.2.6, foi necessário a aplicação de cargas pontuais em alguns pontos da superfície do painel para determinação dos deslocamentos e posterior alimentação dos dados no *software*. A figura 70 a tela de interface do *software* ATM.

Figura 70: Tela de interface do *software* ATM



As figuras 71 e 72 ilustram os deslocamentos gerados no painel de 3 camadas devido a carga pontual P3 de 17 KN, aplicada no centro geométrico do painel.

Figura 71: Deslocamento do painel de 3 camadas na direção longitudinal com carga pontual de 17 KN

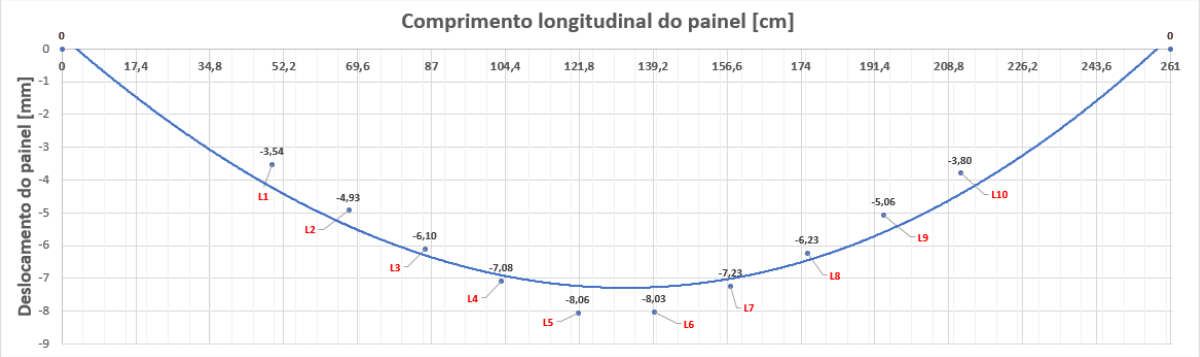
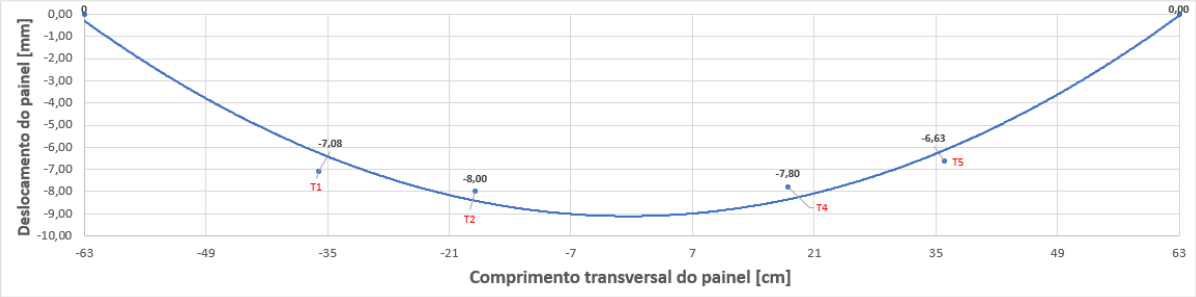


Figura 72: Deslocamento do painel de 3 camadas na direção transversal com carga pontual de 17 KN



Baseado nos deslocamentos e dados geométricos dos painéis, o *software* ATM forneceu os valores de rigidez apresentados na tabela 23, e os valores dos módulos de elasticidade e torção equivalentes apresentados na tabela 24.

Tabela 23: Valores de Rigidez na flexão obtidos pelo *software* ATM

	$(EI)_x$ [KNm²]	$(EI)_y$ [KNm²]
DCLT 3 camadas	726	112
DCLT 5 camadas	1382	224

Tabela 24: Módulos de elasticidade e torção equivalentes para painéis DCLT de 3 e 5 camadas

	$E_{0,x,eq}$ [MPa]	$E_{90,y,eq}$ [MPa]	$G_{xy,eq}$ [MPa]
DCLT 3 camadas	864	69,5	10,7
DCLT 5 camadas	1645	139	25,6

4.5.5 *Ensaio de flexão em painéis com vãos pequenos para análise do cisalhamento*

No ensaio de painéis DCLT com pequenas dimensões e consequentemente pequenos vãos, para investigação da ruptura por cisalhamento, mesmo com vãos pequenos onde a relação L/h é baixa, não houve ruptura por cisalhamento nos painéis. Ocorreram somente rupturas por

tração nas camadas inferiores dos painéis. A tabela 25 apresenta os valores das cargas máximas de rupturas para cada amostra ensaiada. A figura 73 apresenta o deslocamento ocorrido no painel onde é possível notar que a camada transversal se desloca da sua posição original perdendo o contato de duas arestas das lamelas com as camadas superior e inferior, forçando as cavilhas na flexão. Outra imagem apresentada na figura é a uma cavilha deformada por flexão após ensaio.

Tabela 25: Resultados do ensaio de flexão de painéis em pequenos com vãos

Painel	CP	Vão [cm]	F_{max} [kN]
DCLT 3 camadas	1	72	82,55
	2	72	61,86
	3	72	100,07
DCLT 5 camadas	1	108	99,39
	2	90	100,29
	3	90	110,26

Figura 73: a) Detalhe da ruptura por cisalhamento com rotação das lamelas transversais; b) detalhe do tipo de flexão sofrida nas cavilhas

4.5.6 *Considerações sobre os ensaios nos painéis*

Nos ensaios de flexão, os dois painéis apresentaram ruptura por tração na camada inferior iniciadas a partir de um furo preenchido com uma cavilha. Este comportamento mostra uma desvantagem deste painel frente ao painel colado (CLT), pois os furos funcionam como um defeito natural, (um nó no centro da lamela), no qual a concentração de tensões faz com que surja uma trinca e partir dela a ruptura.

A rigidez obtida para o painel de 3 camada na direção longitudinal ($EI,_x$ = 726 KNm²) pode ser considerada satisfatória, pois ao comparar com valores de referência, como os apresentados pela tabela 4 do anexo A da norma americana e canadense ANSI/APA PRG 320, a rigidez para um CLT de três camadas com 105 mm de espessura composto por *Southern Pine* (E_0 = 8300 MPa), é $EI,_x$ de 772 KNm². Para o painel de 5 camadas ($EI,_x$=1382) comparando-se

com um painel de 5 camadas com espessura de 175 mm, segundo a mesma tabela da norma americana, o $EI,_x$ é 2956 MPa, ou seja, o painel DCLT de 5 camadas não obteve uma rigidez tão satisfatória a ponto de ser comparável ao requisito da referida norma.

A mesma tendência foi observada para o cálculo do Módulo de Ruptura (MOR) na direção longitudinal no qual o painel de 3 camadas obteve um resultado superior ao de 5 camadas, sendo 20,36 MPa e 16,67 MPa, respectivamente. Tais resultados podem ser explicados pelo fato do painel de 3 camadas se mostrar mais eficiente em termos de orientação das camadas, pois possui duas camadas resistindo ao carregamento e uma camada que não contribui, porem esta camada está posicionada na linha neutra do painel, ou seja, na posição que menos influencia na resistência. No painel de 5 camadas são três camadas resistindo ao carregamento, e duas não contribuindo com a resistência, porem estas duas estão posicionadas fora da linha neutra de maneira que elas estão sendo sujeitas aos esforços de tração e compressão. Por estarem na transversal, estas duas camadas recebem esforços de tração e compressão perpendicular às fibras, que tem menores resistências que na direção paralela.

Pelas figuras 78 e 79 é possível notar que os painéis têm deslocamentos acentuados com a carga aplicada no centro do vão, isso devido ao sistema de ligação entre as camadas, que diferentemente do painel colado que transfere o esforço por toda a face da lamela, este painel concentra tensões nas cavilhas, onde ocorre compressão normal e paralela nas lamelas, gerando maiores deslocamentos. Mesmo assim os valores de ruptura foram bastante elevados quando comparados aos valores obtidos em ensaios de CLT com dimensões e madeira semelhante, apresentados por Pereira e Calil Jr. (2019). Isso demonstra que o DCLT tem um comportamento elastoplástico mais dúctil que o CLT.

As simulações realizadas pelo *software* ATM foram consistentes, pois através do método dos algoritmos genéticos foi possível obter os mesmos valores de rigidez encontrados nos ensaios de flexão longitudinal, de maneira que os danos referentes à rigidez do painel de 5 camadas na direção transversal e os módulos de torção fornecidos pelo *software* podem ser considerados com resultados válidos.

O ensaio de flexão em painéis curtos com vãos pequenos teve por intuito investigar a ruptura por cisalhamento na camada transversal, chamado de *Rolling Shear*, porém como citado no item 4.4.5, não houve ruptura por cisalhamento nos painéis ensaiados. As rupturas ocorreram por tração nas lamelas inferiores, de maneira que é possível concluir que a resistência a tração paralela às fibras é menor que a resistência à flexão das cavilhas de pau roxo, que transferiram a carga para as lamelas inferiores sem romper as lamelas transversais através do cisalhamento.

4.6 Resultados analíticos

4.6.1 *Teoria das Vigas Compostas Mecanicamente ou Método Gamma (γ-method)*

Aplicando o método das vigas compostas descrito no item 3.2.8, obtiveram-se os valores das tensões aplicadas nos painéis DCLT. Com o uso das equações 10, 22, 23, 24 e 25 (reproduzidas a seguir), usando os dados coletados nos ensaios e resumidos na tabela 26 juntamente com os resultados das tensões atuantes no painel de 3 camadas, sendo que a distribuição das tensões apresentadas na figura 74.

- Rigidez efetiva

$$EI_{ef} = \sum_{i=1}^{3} (E_i \cdot I_i + \gamma \cdot E_i \cdot A_i \cdot a_i^2) \qquad \text{Equação 10}$$

- Tensões normais:

$$\sigma_{i,local} = \frac{\gamma_i \cdot E_i \cdot a_i \cdot M}{(EI)_{eff}} \qquad \text{Equação 22}$$

$$\sigma_{m,i,global} = \frac{0{,}5E_i \cdot h_i \cdot M}{(EI)_{eff}} \qquad \text{Equação 23}$$

- Tensão de cisalhamento máximo

$$\tau_{max} = \frac{\gamma_3 \cdot E_3 \cdot A_3 \cdot a_3 + 0{,}5E_2 \cdot b_2 \cdot h_2^2}{b_2 (EI)_{eff}} \cdot V \qquad \text{Equação 24}$$

- Força no conector (cavilha)

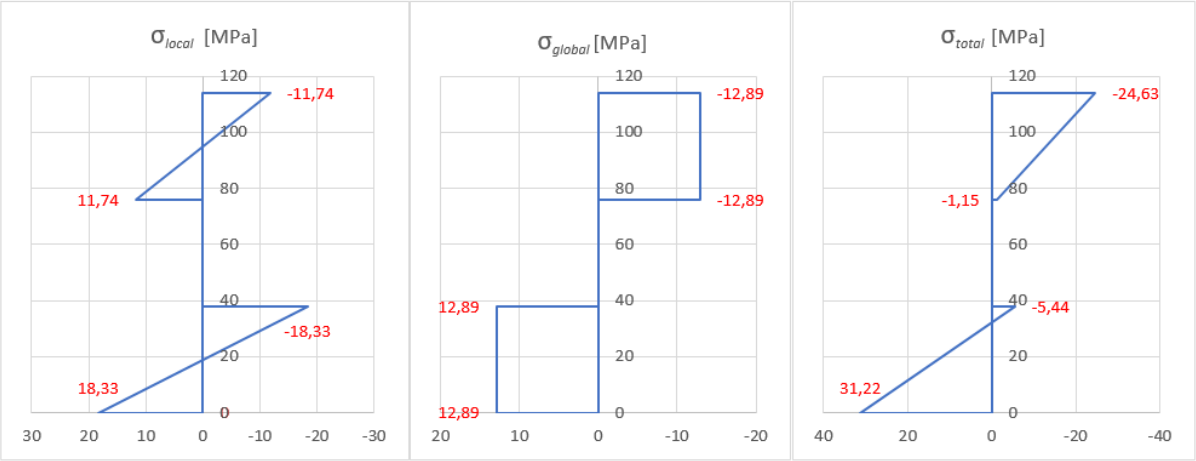
$$F_i = \frac{\gamma_i \cdot E_i \cdot A_i \cdot a_i \cdot S_i}{(EI)_{eff}} \cdot V \qquad \text{Equação 25}$$

Tabela 26: Propriedades usadas para o cálculo analítico pelo método γ e os resultados obtidos para o painel de 3 camadas

Propriedades geométricas			
$b_1=b_2=b=$	90	*mm*	*Largura de cada lamela longitudinal*
$n=$	14	-	*Número de lamelas longitudinais*
$h_1=$	38	*mm*	*Espessura da camada 1 (componente 1)*
$h_2=$	38	*mm*	*Espessura da camada 2*

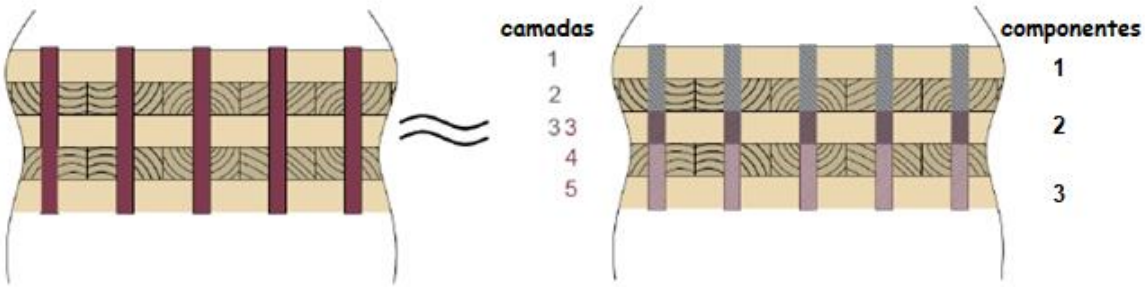
h_3=	38	*mm*	*Espessura da camada 3 (componente 2)*
l=	2420	*mm*	*Vão efetivo*
Propriedades mecânicas do painel			
$E_{0,1}$=	5700	*MPa*	*MOE paralelo às fibras da camada 1 (ver tabela 10)*
$E_{0,2}$=	8300	*MPa*	*MOE paralelo às fibras da camada 2 (ver tabela 10)*
$E_{0,3}$=	8900	*MPa*	*MOE paralelo às fibras da camada 3 (ver tabela 10)*
Propriedades dos conectores			
K_i=	1476	*N/mm*	*Módulo de deslizamento (ver tabela 19)*
s_i=	90	*mm*	*Distância entre dois conectores ao longo de uma lamela*
Método das vigas compostas (método γ)			
γ_1=	0,34	-	*Fator de redução de inércia entre a lamela 1 e 2*
γ_2=	1,00	-	*Fator de redução de inércia entre a lamela 2 e 2*
a_2=	13,65	*mm*	*Distância entre a linha neutra e o centroide do componente 2*
a_1=	62,35	*mm*	*Distância entre a linha neutra e o centroide do componente 1*
EI_{ef}=	37,6	*kNm²*	*Rigidez efetiva na flexão de uma lamela (equação 10)*
$EI_{ef,total}$=	526,2	*kNm²*	*Rigidez efetiva do painel (EI_{ef} x n)*
P=	92600	*N*	*Carga pontual aplicada (ver tabela 21)*
M=	56023000	*Nmm*	*Momento na flexão (P·L/4)*
V=	46300	*N*	*Força de cisalhamento (P/2)*
δ_{max}=	52,0	*mm*	*Deflexão no centro do vão*
Tensões de compressão [-] e tração [+]			
$\sigma_{1,local}$=	11,74	*MPa*	*[Local] Tensões no comp. 1 devido à flexão somente do comp. 1*
$\sigma_{2,local}$=	18,33	*MPa*	*[Local] Tensões no comp. 2 devido à flexão somente do comp. 2*
$\sigma_{1,global}$=	-12,93	*MPa*	*[Global] Tensões no comp. 1 devido à flexão de toda a seção*
$\sigma_{2,global}$=	12,93	*MPa*	*[Global] Tensões no comp. 2 devido à flexão de toda a seção*
$\sigma_{1,max}$=	-24,46	*MPa*	*[TOTAL] Tensão máxima no componente 1 (compressão)*
$\sigma_{1,min}$=	-1,41	*MPa*	*[TOTAL] Tensão mínima no componente 1 (compressão)*
$\sigma_{2,min}$=	-5,07	*MPa*	*[TOTAL] Tensão mínima no componente 2 (compressão)*
$\sigma_{2,max}$=	30,94	*MPa*	*[TOTAL] Tensão máxima no componente 2 (tração)*
$\tau_{2,max}$=	0,41	*MPa*	*Tensão de cisalhamento máximo no comp. 2 (eq.24)*
F_1=F_3=	3290,34	*N*	*Carga exercida em uma linha de cavilhas (eq.25)*
F_{cav}=	235,02	*N*	*Carga exercida em cada cavilha (F_1/n)*

Figura 74: Distribuição de tensões locais, globais e totais calculadas através do método das vigas compostas (método γ) para uma carga linear (92,6 KN) no centro do vão do painel de 3 camadas



Similar à análise descrita para o painel de 3 camadas, também foram realizados os mesmos cálculos para o painel de 5 camadas, porém para este caso é necessário usar uma condição de contorno pois o método das vigas compostas foi desenvolvido para cálculo de até 3 elementos. Para tanto, considerou-se a três componentes, sendo o 1 e o 3 formados pelas camadas 1 e 2, e 4 e 5, respectivamente, como ilustrado na figura 75.

Figura 75: Discretização da conexão de 5 camadas em duas conexões de 3 camadas



Fonte: próprio autor adaptado de Sohier (2018)

A tabela 27 apresenta os dados coletados nos ensaios e os resultados das tensões atuantes no painel, sendo que a figura 76 demonstra a distribuição das tensões.

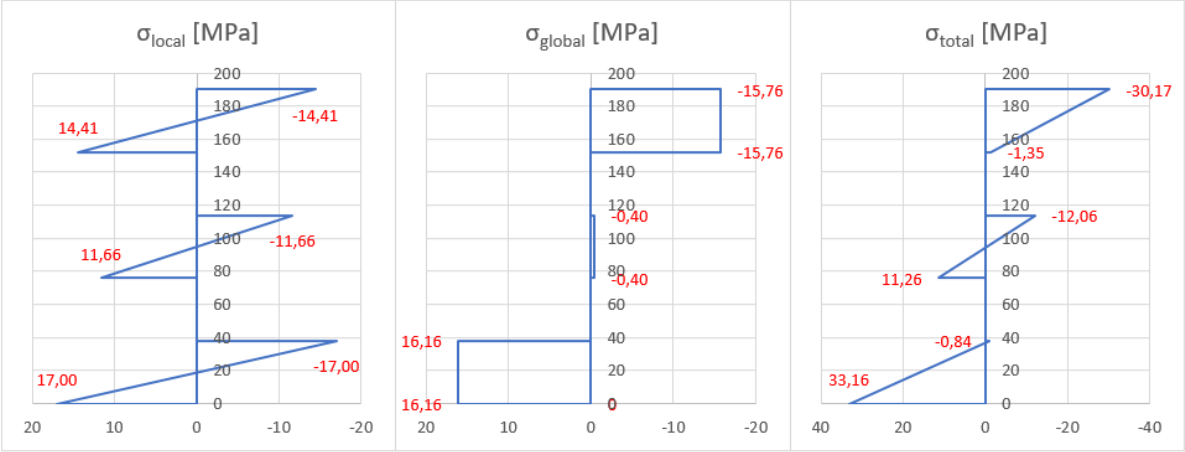
Tabela 27: Propriedades usadas para o cálculo analítico pelo método γ e os resultados obtidos para o painel de 5 camadas

Propriedades geométricas			
b=	90	*mm*	*Largura de cada lamela longitudinal*
n=	14	-	*Número de lamelas longitudinais*
h_1=	38	*mm*	*Espessura da camada 1 (componente 1)*

h_2=	38	*mm*	*Espessura da camada 2*
h_3=	38	*mm*	*Espessura da camada 3 (componente 2)*
h_4=	38	*mm*	*Espessura da camada 4*
h_5=	38	*mm*	*Espessura da camada 5 (componente 3)*
l=	2420	*mm*	*Vão efetivo*
Propriedades mecânicas do painel			
$E_{0,1}$=	8900	*MPa*	*MOE paralelo às fibras da camada 1 (ver tabela 10)*
$E_{0,2}$=	7200	*MPa*	*MOE paralelo às fibras da camada 2 (ver tabela 10)*
$E_{0,3}$=	10500	*MPa*	*MOE paralelo às fibras da camada 3 (ver tabela 10)*
Propriedades dos conectores			
K_i=	1476	*N/mm*	*Módulo de deslizamento (ver tabela 19)*
s_i=	90	*mm*	*Distância entre dois conectores ao longo de uma lamela*
Método das vigas compostas (método γ)			
γ_1=	0,27	-	*Fator de redução de inércia entre a lamela 1 e 2*
γ_2=	1,00	-	*Fator de redução de inércia entre a lamela 2 e 2*
γ_3=	0,24	-	*Fator de redução de inércia entre a lamela 2 e 3*
a_1=	-0,65	*mm*	*Distância entre a linha neutra e o centroide do componente 2*
a_2=	76,65	*mm*	*Distância entre a linha neutra e o centroide do componente 1*
a_3=	75,35	*mm*	*Distância entre a linha neutra e o centroide do componente 3*
EI_{ef}=	108	*kNm²*	*Rigidez efetiva na flexão de uma lamela (equação 10)*
$EI_{ef,total}$=	1369	*kNm²*	*Rigidez efetiva do painel (EI_{ef} x n)*
P=	198000	*N*	*Carga pontual aplicada (ver tabela 21)*
M=	129195000	*Nmm*	*Momento na flexão (P·L/4)*
V=	99000	*N*	*Força de cisalhamento (P/2)*
δ_{max}=	48,4	*mm*	*Deflexão no centro do vão*
Tensões de compressão [-] e tração [+]			
$\sigma_{1,local}$=	14,41	*MPa*	*[Local] Tensões no comp. 1 devido à flexão somente do comp. 1*
$\sigma_{2,local}$=	11,66	*MPa*	*[Local] Tensões no comp. 2 devido à flexão somente do comp. 2*
$\sigma_{3,local}$=	17,00	*MPa*	*[Local] Tensões no comp. 2 devido à flexão somente do comp. 3*
$\sigma_{1,global}$=	-15,76	*MPa*	*[Global] Tensões no comp. 1 devido à flexão de toda a seção*
$\sigma_{2,global}$=	-0,40	*MPa*	*[Global] Tensões no comp. 2 devido à flexão de toda a seção*
$\sigma_{3,global}$=	16,16	*MPa*	*[Global] Tensões no comp. 3 devido à flexão de toda a seção*
$\sigma_{1,max}$=	-30,17	*MPa*	*[TOTAL] Tensão máxima no componente 1 (compressão)*
$\sigma_{1,min}$=	-1,35	*MPa*	*[TOTAL] Tensão mínima no componente 1 (compressão)*
$\sigma_{2,min}$=	-12,06	*MPa*	*[TOTAL] Tensão mínima no componente 2 (compressão)*
$\sigma_{2,max}$=	11,26	*MPa*	*[TOTAL] Tensão máxima no componente 2 (tração)*
$\sigma_{3,min}$=	-0,84	*MPa*	*[TOTAL] Tensão mínima no componente 3 (compressão)*
$\sigma_{3,max}$=	33,16	*MPa*	*Tensão máxima no componente 3 (tração)*
$\tau_{2,max}$=	0,55	*MPa*	*Tensão de cisalhamento máximo no comp. 2 (eq.24)*

F_1=	3716,7	*N*	*Carga nas cavilhas na junção da camada 1-2 (eq.25)*
F_3=	3810,9	*N*	*Carga nas cavilhas na junção da camada 4-5 (eq.25)*
F_{cav}=	128,16	*N*	*Carga exercida em cada cavilha (F_1/29)*

Figura 76: Distribuição de tensões locais, globais e totais calculadas através do método das vigas compostas (método γ) para uma carga linear (198 KN) no centro do vão do painel de 5 camadas

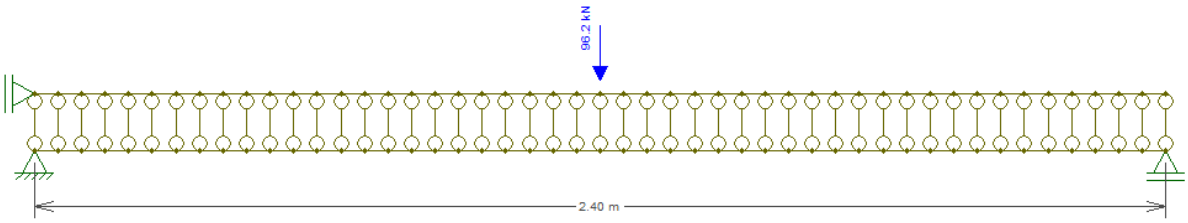


4.6.2 *Método da analogia do cisalhamento (Shear Analogy Method)*

4.6.2.1 Painel de 3 camadas

O método da analogia do cisalhamento (Shear Analogy Method) foi descrito no item 3.2.8 e os resultados obtidos pela aplicação deste método estão descritos na tabela 28. Para aplicação do método foi utilizado uma viga fictícia com valores de momento e forças cortantes calculadas através do *software* Ftool versão 3.01, conforme ilustrado na figura 77.

Figura 77: representação da viga fictícia usada para cálculo dos momentos e cortantes usados no método da analogia do cisalhamento



Fonte: Próprio Autor

Tabela 28: Propriedades usadas para o cálculo analítico pelo método da analogia do cisalhamento e os resultados obtidos para o painel de 3 camadas

Propriedades mecânicas do painel			
$E_{0,1}$=	5700	*MPa*	*MOE paralelo às fibras da camada 1 (ver tabela 10)*
$G_{0,1}$=	356	*MPa*	*Módulo de cisalhamento da camada 1 [$E_{0,1}$/16]*
$E_{0,2}$=	8300	*MPa*	*MOE paralelo às fibras da camada 2 (ver tabela 10)*
$E_{90,2}$=	0	*MPa*	*MOE perpendicular as fibras da camada 2*
$G_{0,2}$=	519	*MPa*	*Módulo de cisalhamento da camada 2 [$E_{0,2}$/16]*
$G_{R,2}$=	52	*MPa*	*Módulo do Rolling shear da camada 2 [$G_{0,2}$/10]*
$E_{0,3}$=	8900	*MPa*	*MOE paralelo às fibras da camada 3 (ver tabela 10)*
$G_{0,3}$=	556	*MPa*	*Módulo de cisalhamento da camada 3 [$E_{0,3}$/16]*
Propriedades geométricas			
b=	90	*mm*	*Largura de cada lamela longitudinal*
n=	14	-	*Número de lamelas longitudinais*
h_1=	38	*mm*	*Espessura da camada longitudinal 1*
h_2=	38	*mm*	*Espessura da camada transversal*
h_3=	38	*mm*	*Espessura da camada longitudinal 3*
z_{01}=	-38,00	*mm*	*Distância entre o centro de gravidade da camada 1 para o eixo e referencia 0*
z_{02}=	0,00	*mm*	*Distância entre o centro de gravidade da camada 2 para o eixo e referencia 0*
z_{03}=	38,00	*mm*	*Distância entre o centro de gravidade da camada 3 para o eixo e referencia 0*
z_{0s}=	8,33	*mm*	*Posição do centro de gravidade S da viga inteira, em relação ao eixo de referência 0 [Eq. 31]*
z_{s1}=	-46,33	*mm*	*Distância entre o centro de gravidade da camada 1 para o centro de gravidade S da viga inteira*
z_{s2}=	-8,33	*mm*	*Distância entre o centro de gravidade da camada 2 para o centro de gravidade S da viga inteira*
z_{s3}=	29,67	*mm*	*Distância entre o centro de gravidade da camada 3 para o centro de gravidade S da viga inteira*
a=	76,00	*mm*	*Distância entre os centroides da camada inferior e superior*
l=	2610	*mm*	*Vão efetivo*
Propriedades dos conectores			
K_i=	1476	*Nmm*	*Módulo de deslizamento (ver tabela 19)*
s_i=	90	*mm*	*Distância entre dois conectores ao longo de uma lamela*
k_i=	16,40	*N/mm²*	*Relação K_i/s_i*
Método da analogia do cisalhamento			
$(EI)_A=B_A$	6,01	*KNm²*	*Rigidez na flexão (viga A) [Eq. 26]*
$(EI)_{A,\,tot}=B_{A,tot}$	84,12	*KNm²*	*Rigidez na flexão (viga A) para todas as lamelas [$(EI)_A$ x n]*
$(EI)_B=B_B$	31,58	*KNm²*	*Rigidez na flexão (viga B) [Eq. 27]*
$(EI)_{B,tot}=B_{B,tot}$	442	*KNm²*	*Rigidez na flexão (viga B) para todas as lamelas [$(EI)_B$ x n]*
$(GA)_A=S_A$	∞	*N*	*Rigidez no cisalhamento (Viga A)*
$(GA)_B=S_B$	98,6	*KN*	*Rigidez no cisalhamento (Viga B) considerando deformação das lamelas [Eq. 28]*
$(EI)_{ef\ total}$	527	*KNm²*	*Rigidez efetiva do painel ($B_{B\ total}$ + $B_{A\ total}$)*

M_A=	14,5	*KNm*	*Momento na flexão da viga fictícia A [obtido no software]*
V_A=	42,3	*KN*	*Força cisalhante viga A [obtido no software]*
M_B=	40,6	*KNm*	*Momento na flexão da viga fictícia B [obtido no software]*
V_B=	41,3	*KN*	*Força cisalhante viga B [obtido no software]*
Tensões de Flexão			
$\pm\sigma_{A1}$=	18,67	*MPa*	*Tensão de flexão na camada 1 da viga fictícia A (± $d_1/2$) [Eq. 29]*
$\pm\sigma_{A2}$=	0,00	*MPa*	*Tensão de flexão na camada 2 da viga fictícia A (± $d_1/2$) [Eq. 29]*
$\pm\sigma_{A3}$=	29,15	*MPa*	*Tensão de flexão na camada 3 da viga fictícia A (± $d_1/2$) [Eq. 29]*
σ_{B1}=	-11,16	*MPa*	*Tensão de flexão na camada 1 da viga fictícia B (± z_{s1}) [Eq. 30]*
σ_{B2}=	0,00	*MPa*	*Tensão de flexão na camada 2 da viga fictícia B (± z_{s1}) [Eq. 30]*
σ_{B3}=	11,16	*MPa*	*Tensão de flexão na camada 3 da viga fictícia B (± z_{s1}) [Eq. 30]*
$\sigma_{tot1,\,max}$=	-29,83	*MPa*	*Tensão de flexão máxima total na camada 1 da viga composta real [$-\sigma_{A1}+\sigma_{B1}$]*
$\sigma_{tot1,\,min}$=	7,51	*MPa*	*Tensão de flexão mínima total na camada 1 da viga composta real [$+\sigma_{A1}+\sigma_{B1}$]*
$\sigma_{tot2,max}$=	0,00	*MPa*	*Tensão de flexão máxima total na camada 2 da viga composta real*
$\sigma_{tot2,min}$=	0,00	*MPa*	*Tensão de flexão mínima total na camada 2 da viga composta real*
$\sigma_{tot3,max}$=	-17,99	*MPa*	*Tensão de flexão máxima total na camada 3 da viga composta real [$-\sigma_{A3}+\sigma_{B3}$]*
$\sigma_{tot3,min}$=	40,31	*MPa*	*Tensão de flexão mínima total na camada 3 da viga composta real [$+\sigma_{A3}+\sigma_{B3}$]*
Tensões de cisalhamento			
τ_{A1}=	0,52	*MPa*	*Tensão de cisalhamento na camada 1 da viga fictícia A [Eq. 32]*
τ_{A2}=	0,00	*MPa*	*Tensão de cisalhamento na camada 2 da viga fictícia A [Eq. 32]*
τ_{A3}=	0,81	*MPa*	*Tensão de cisalhamento na camada 3 da viga fictícia A [Eq. 32]*
τ_{B12}=	0,43	*MPa*	*Tensão de cisalhamento na conexão entre as camadas 1 e 2 [Eq. 33]*
τ_{B23}=	0,43	*MPa*	*Tensão de cisalhamento na conexão entre as camadas 2 e 3 [Eq. 33]*

As figuras 78 e 79 apresentam as distribuições de tensões resultantes do cálculo do método de analogia do cisalhamento.

Figura 78: Distribuição de tensões normais através do método da analogia do cisalhamento para uma carga distribuída no centro do painel de 3 camadas

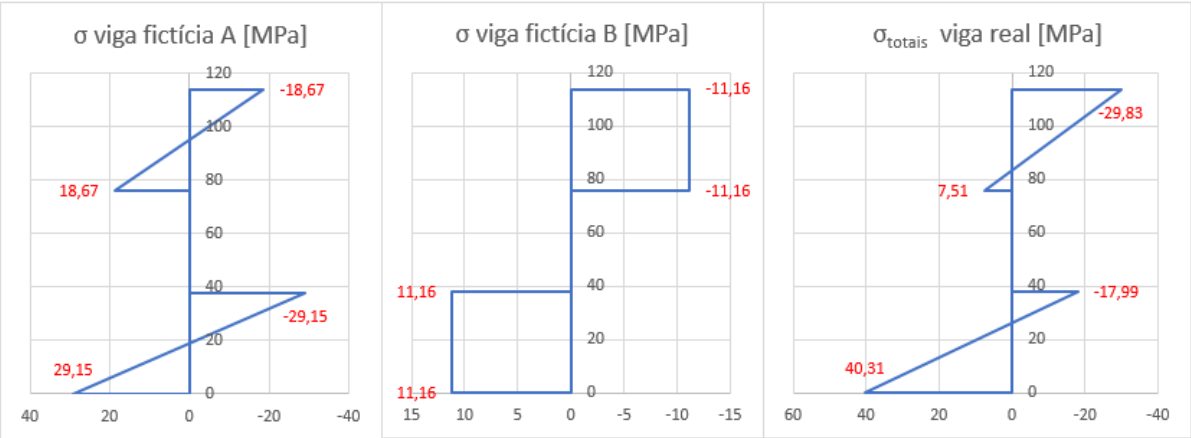
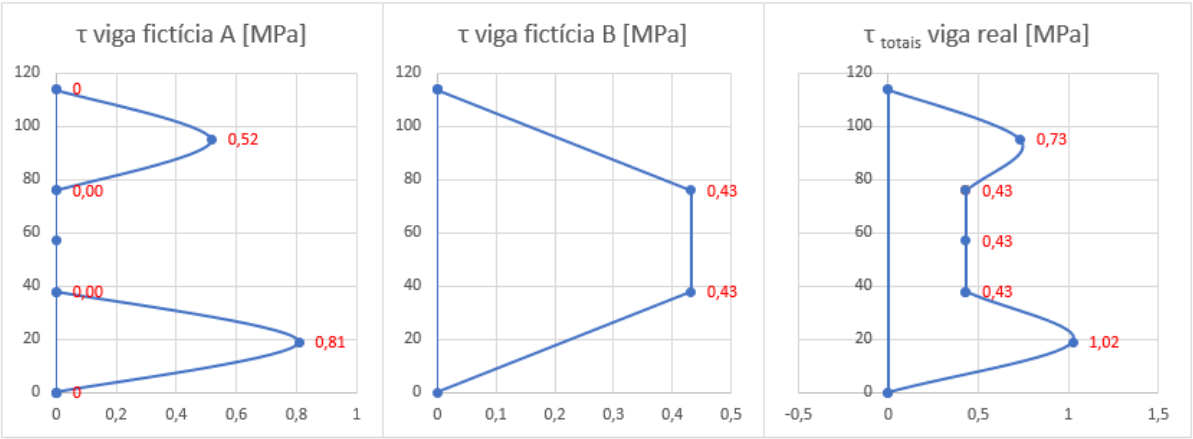


Figura 79: Distribuição de tensões cisalhamento através do método da analogia do cisalhamento para uma carga linear (92,6 KN) no centro do painel de 3 camadas



4.6.2.2 *Painel de 5 camadas*

A tabela 29 apresenta os resultados obtidos com o uso do método da analogia do cisalhamento com dados do painel de 5 camadas. Da mesma forma que o painel de 3 camadas, foi simulado uma viga fictícia com valores de momento e forças cortantes calculadas através do *software* Ftool versão 3.01. As figuras 80 e 81 apresentam a distribuições de tensões normais e de cisalhamento obtidos a partir do método.

Tabela 29: Propriedades usadas para o cálculo analítico pelo método da analogia do cisalhamento e os resultados obtidos para o painel de 5 camadas

Propriedades mecânicas do painel			
$E_{0,1}$=	8900	*MPa*	*MOE paralelo às fibras da camada 1 (ver tabela 10)*
$G_{0,1}$=	556	*MPa*	*Módulo de cisalhamento da camada 1 [$E_{0,1}$/16]*
$E_{0,2}$=	7000	*MPa*	*MOE paralelo às fibras da camada 2 (ver tabela 10)*
$E_{90,2}$=	0	*MPa*	*MOE perpendicular as fibras da camada 2*
$G_{0,2}$=	438	*MPa*	*Módulo de cisalhamento da camada 2 [$E_{0,2}$/16]*
$G_{R,2}$=	44	*MPa*	*Módulo do Rolling shear da camada 2 [$G_{0,2}$/10]*
$E_{0,3}$=	7200	*MPa*	*MOE paralelo às fibras da camada 3 (ver tabela 10)*
$G_{0,3}$=	450	*MPa*	*Módulo de cisalhamento da camada 3 [$E_{0,3}$/16]*
$E_{0,4}$=	9300	*MPa*	*MOE paralelo às fibras da camada 4 (ver tabela 10)*
$E_{90,4}$=	0	*MPa*	*MOE perpendicular as fibras da camada 4*
$G_{0,4}$=	581	*MPa*	*Módulo de cisalhamento da camada 4 [$E_{0,2}$/16]*
$G_{R,4}$=	58	*MPa*	*Módulo do Rolling shear da camada 4 [$G_{0,2}$/10]*
$E_{0,5}$=	10500	*MPa*	*MOE paralelo às fibras da camada 5 (ver tabela 10)*
$G_{0,5}$=	656	*MPa*	*Módulo de cisalhamento da camada 5 [$E_{0,3}$/16]*

Propriedades geométricas			
$b=$	90	*mm*	*Largura de cada lamela longitudinal*
$n=$	14	-	*Número de lamelas longitudinais*
$h_1 = h_5=$	38	*mm*	*Espessura da camada longitudinal 1*
$h_2 = h_4=$	38	*mm*	*Espessura da camada transversal*
$h_3=$	38	*mm*	*Espessura da camada longitudinal 3*
$z_{01}=$	-76	*mm*	*Distância entre o centro de gravidade da camada 1 para o eixo e referencia 0*
$z_{02}=$	-38	*mm*	*Distância entre o centro de gravidade da camada 2 para o eixo e referencia 0*
$z_{03}=$	0	*mm*	*Distância entre o centro de gravidade da camada 3 para o eixo e referencia 0*
$z_{04}=$	38	*mm*	*Distância entre o centro de gravidade da camada 4 para o eixo e referencia 0*
$z_{05}=$	76	*mm*	*Distância entre o centro de gravidade da camada 5 para o eixo e referencia 0*
$z_{0s}=$	4,87	*mm*	*Posição do centro de gravidade S da viga inteira, em relação ao eixo de referência 0 [Eq. 31]*
$z_{s1}=$	-80,87	*mm*	*Distância entre o centro de gravidade da camada 1 para o centro de gravidade S da viga inteira*
$z_{s2}=$	-42,87	*mm*	*Distância entre o centro de gravidade da camada 2 para o centro de gravidade S da viga inteira*
$z_{s3}=$	4,87	*mm*	*Distância entre o centro de gravidade da camada 3 para o centro de gravidade S da viga inteira*
$z_{s4}=$	33,13	*mm*	*Distância entre o centro de gravidade da camada 2 para o centro de gravidade S da viga inteira*
$z_{s5}=$	71,13	*mm*	*Distância entre o centro de gravidade da camada 3 para o centro de gravidade S da viga inteira*
$a=$	152	*mm*	*Distância entre os centroides da camada inferior e superior*
$l=$	2610	*mm*	*Vão efetivo*
Propriedades dos conectores			
$K_i=$	1476	*Nmm*	*Módulo de deslizamento (ver tabela 19)*
$s_i=$	90	*mm*	*Distância entre dois conectores ao longo de uma lamela*
$k_i=$	16,40	*N/mm²*	*Relação* K_i/s_i
Método da analogia do cisalhamento			
$(EI)_A=B_A$	11,28	*KNm²*	*Rigidez na flexão (viga A) [Eq. 26]*
$(EI)_{A,\,tot}=B_{A,tot}$	158	*KNm²*	*Rigidez na flexão (viga A) para todas as lamelas [$(EI)_A$ x n]*
$(EI)_B=B_B$	380	*KNm²*	*Rigidez na flexão (viga B) [Eq. 27]*
$(EI)_{ef\ total}$	1373	*KNm²*	*Rigidez efetiva do painel ($B_{B\ total} + B_{A\ total}$)*
$(GA)_A=S_A$	∞	*N*	*Rigidez no cisalhamento (Viga A)*
$(GA)_B=S_B$	378	*KN*	*Rigidez no cisalhamento (Viga B) considerando deformação das lamelas [Eq. 28]*
$(GA)_{B,tot}=S_{B,tot}$	5292	*KN*	*Rigidez no cisalhamento (Viga B) para todas as lamelas [$(GA)_B=S_B$ x n]*
$M_A=$	25,6	*KNm*	*Momento na flexão da viga fictícia A [obtido no software]*
$V_A=$	89,7	*KN*	*Força cisalhante viga A [obtido no software]*
$M_B=$	93,4	*KNm*	*Momento na flexão da viga fictícia B [obtido no software]*
$V_B=$	94,4	*KN*	*Força cisalhante viga B [obtido no software]*
Tensões de Flexão			

$\pm\sigma_{A1}$=	28,25	*MPa*	*Tensão de flexão na camada 1 da viga fictícia A (± d_1/2) [Eq. 29]*
$\pm\sigma_{A2}$=	0,00	*MPa*	*Tensão de flexão na camada 2 da viga fictícia A (± d_1/2) [Eq. 29]*
$\pm\sigma_{A3}$=	22,85	*MPa*	*Tensão de flexão na camada 3 da viga fictícia A (± d_1/2) [Eq. 29]*
$\pm\sigma_{A4}$=	0,00	*MPa*	*Tensão de flexão na camada 4 da viga fictícia A (± d_1/2) [Eq. 29]*
$\pm\sigma_{A5}$=	33,32	*MPa*	*Tensão de flexão na camada 5 da viga fictícia A (± d_1/2) [Eq. 29]*
σ_{B1}=	-12,59	*MPa*	*Tensão de flexão na camada 1 da viga fictícia B (± z_{s1}) [Eq. 30]*
σ_{B2}=	0,00	*MPa*	*Tensão de flexão na camada 2 da viga fictícia B (± z_{s1}) [Eq. 30]*
σ_{B3}=	0,61	*MPa*	*Tensão de flexão na camada 3 da viga fictícia B (± z_{s1}) [Eq. 30]*
σ_{B3}=	0,00	*MPa*	*Tensão de flexão na camada 4 da viga fictícia B (± z_{s1}) [Eq. 30]*
σ_{B3}=	13,06	*MPa*	*Tensão de flexão na camada 5 da viga fictícia B (± z_{s1}) [Eq. 30]*
$\sigma_{tot1,\,max}$=	-40,84	*MPa*	*Tensão de flexão máxima total na camada 1 da viga composta real [-σ_{A1}+ σ_{B1}]*
$\sigma_{tot1,\,min}$=	15,66	*MPa*	*Tensão de flexão mínima total na camada 1 da viga composta real [+σ_{A1}+ σ_{B1}]*
$\sigma_{tot2,max}$=	0,00	*MPa*	*Tensão de flexão máxima total na camada 2 da viga composta real*
$\sigma_{tot2,min}$=	0,00	*MPa*	*Tensão de flexão mínima total na camada 2 da viga composta real*
$\sigma_{tot3,max}$=	-22,24	*MPa*	*Tensão de flexão máxima total na camada 3 da viga composta real [-σ_{A3}+ σ_{B3}]*
$\sigma_{tot3,min}$=	23,46	*MPa*	*Tensão de flexão mínima total na camada 3 da viga composta real [+σ_{A3}+ σ_{B3}]*
$\sigma_{tot4,max}$=	0,00	*MPa*	*Tensão de flexão máxima total na camada 4 da viga composta real [-σ_{A4}+ σ_{B4}]*
$\sigma_{tot4,min}$=	0,00	*MPa*	*Tensão de flexão mínima total na camada 4 da viga composta real [+σ_{A4}+ σ_{B4}]*
$\sigma_{tot5,max}$=	-20,26	*MPa*	*Tensão de flexão máxima total na camada 5 da viga composta real [-σ_{A5}+ σ_{B5}]*
$\sigma_{tot5,min}$=	46,39	*MPa*	*Tensão de flexão mínima total na camada 5 da viga composta real [+σ_{A5}+ σ_{B5}]*
Tensões de cisalhamento			
τ_{A1}=	-0,94	*MPa*	*Tensão de cisalhamento na camada 1 da viga fictícia A [Eq. 32]*
τ_{A2}=	0,00	*MPa*	*Tensão de cisalhamento na camada 2 da viga fictícia A [Eq. 32]*
τ_{A3}=	0,76	*MPa*	*Tensão de cisalhamento na camada 3 da viga fictícia A [Eq. 32]*
τ_{A4}=	0,00	*MPa*	*Tensão de cisalhamento na camada 4 da viga fictícia A [Eq. 32]*
τ_{A5}=	-1,11	*MPa*	*Tensão de cisalhamento na camada 5 da viga fictícia A [Eq. 32]*
τ_{B12}=	0,73	*MPa*	*Tensão de cisalhamento na conexão entre as camadas 1 e 2 [Eq. 33]*
τ_{B23}=	-0,01	*MPa*	*Tensão de cisalhamento na conexão entre as camadas 2 e 3 [Eq. 33]*
τ_{B34}=	0,00	*MPa*	*Tensão de cisalhamento na conexão entre as camadas 3 e 4 [Eq. 33]*
τ_{B45}=	-0,32	*MPa*	*Tensão de cisalhamento na conexão entre as camadas 4 e 5 [Eq. 33]*

Figura 80: Distribuição de tensões normais através do método da analogia do cisalhamento para uma carga linear (198KN) no centro do painel de 5 camadas

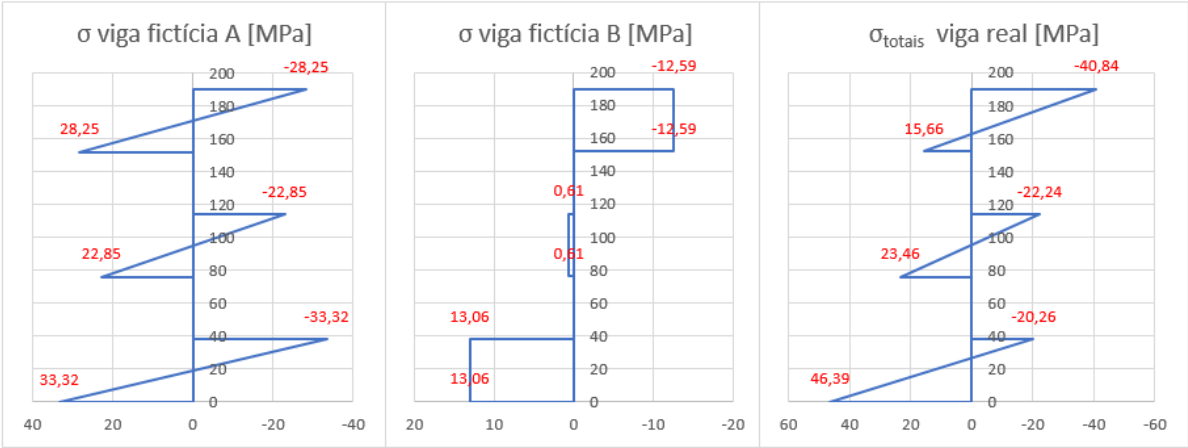
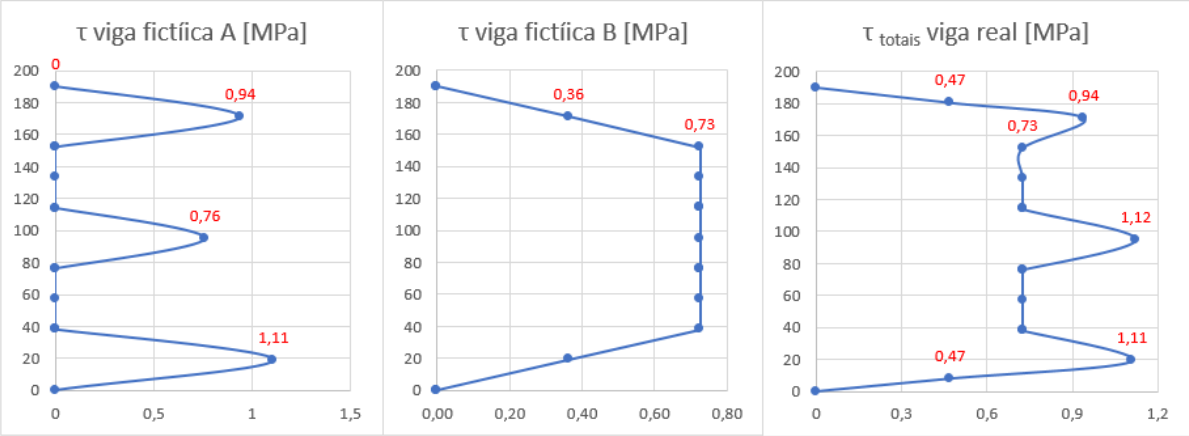


Figura 81: Distribuição de tensões de cisalhamento através do método da analogia do cisalhamento para uma carga distribuída no centro do painel de 5 camadas



4.6.2.3 Considerações sobre as metodologias analíticas

Observando os gráficos de tensões normais é possível perceber que os valores das tensões de tração e compressão nas bordas superiores e inferiores obtiveram os valores com uma diferença média de 10 MPa, sendo que pelo método γ os valores foram sempre menores que os valores do método da analogia do cisalhamento. Nas camadas centrais as diferenças entre os valores foram um pouco maiores que os da borda. Percebe-se que o método da analogia do cisalhamento é mais sensível, resultando valores mais precisos.

Segundo Kreuzinger (2017), o método da analogia do cisalhamento é mais preciso e pode ser aplicado diretamente para cálculos de membros de estruturas bidimensionais com camadas individuais cruzadas, pois o *rolling shear* é levado em consideração pela rigidez de cisalhamento S_B, enquanto que no método γ, as camadas perpendiculares são consideradas como uma ligação semirrígida que pouco contribuem para transmissão de tensões.

Em termos de rigidez, a tabela 30 apresenta um comparativo entre os valores obtidos analiticamente pelos dois métodos e experimentalmente, para a direção longitudinal dos painéis.

Tabela 30: Rigidez longitudinal dos painéis para os três métodos estudados e pelo software ATM

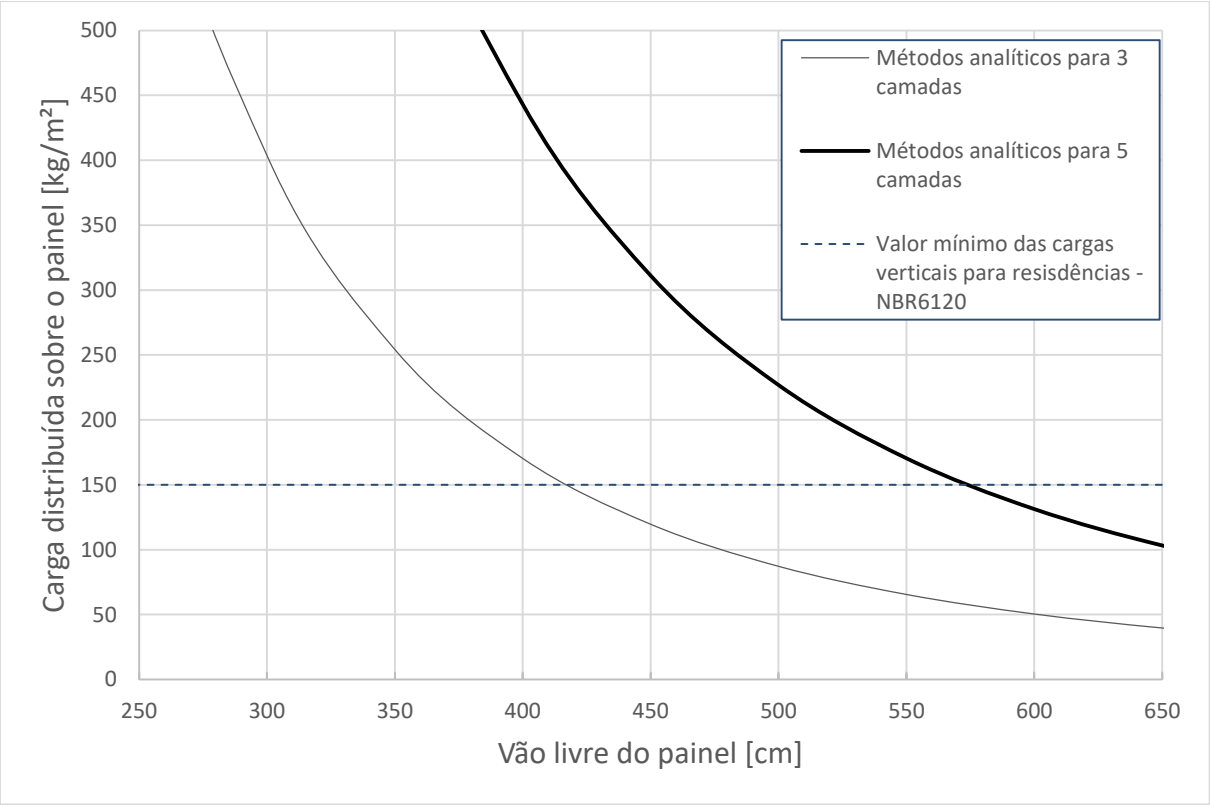
	Rigidez $(EI)_{ef}$ [KNm²]			
Painel	Método experimental	Software ATM	Método γ	Método da Analogia do Cisalhamento
3 camadas	727	726	526	527
5 camadas	1353	1382	1369	1373

Observando o comparativo apresentado na tabela 30, percebe-se que a rigidez do painel de 5 camadas foi duas vezes maior que o de 3 camadas. Os valores dos métodos analíticos se mostraram equivalentes e bem próximo aos valores experimentais, sendo que para o caso do painel de 5 camadas os valores foram mais análogos com o valor experimental do que no caso do painel de 3 camadas. Os valores obtidos pelo software ATM baseado em algoritmos genéticos obteve valores praticamente idênticos aos experimentais.

A figura 82 apresenta um comparativo gráfico dos resultados dos métodos analíticos e do método experimental para os dois painéis, em termos de capacidade de resistir a um carregamento distribuído sobre o painel bi apoiado *versus* o vão livre do painel. Os valores foram calculados tendo como base o critério de deslocamento L/300, utilizando a equação 61.

$$P = \frac{384(EI)}{5 \cdot 300 \cdot L^3} \qquad \text{Equação 61}$$

Figura 82: Variação de uma carga distribuída uniforme sobre o painel *versus* o vão máximo, para um critério de flexão L/300



É possível perceber que em termos de rigidez, o painel de 5 camadas resiste mais carregamento e supera um vão livre maior que o de 3 camadas. A figura também apresenta em destaque o valor que a norma brasileira NBR 6120/1980 – Cargas para o cálculo de estruturas – estabelece como carga mínima para residências. Com isso percebe-se que, em termos de rigidez, os dois painéis poderiam vencer vãos entre 4 a 5 metros, medidas que são comuns em residências, o que demostra um potencial uso em estruturas do tipo térrea ou de dois pavimentos, unifamiliar.

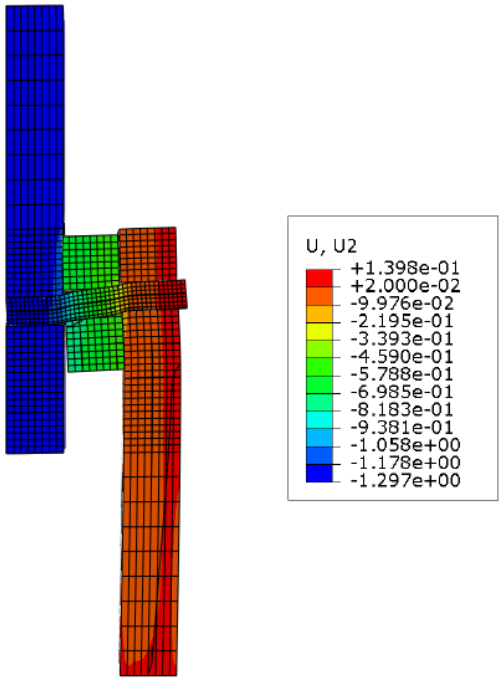
4.7 Resultados das análises numéricas para o modelo de corpo de prova de ligação desenvolvido

A análise numérica foi realizada em parceria com o mestrando Luc Arthur Pascal Sohier, intercambista da Faculdade Politécnica da Universidade de Mons, na Bélgica que desenvolveu sua dissertação no Brsail, no LaMEM (Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira) da EESC – USP.

Inicialmente para a modelagem somente o coeficiente de atrito entre a cavilha e as lamelas era conhecido. No ABAQUS foi ajustado esse parâmetro até se obter um comportamento numérico do modelo idêntico ao experimental, através da ferramenta de análise do comportamento tangencial. Na verdade, o parâmetro de atrito era ajustado até que o módulo de escorregamento (rigidez) da conexão do modelo numérico fosse igual à rigidez média medida durante os testes experimentais (K_{ser} = 1476 N mm).

O módulo de deslizamento numérico foi calculado da mesma forma que para os testes experimentais, ou seja, entre 10% e 40% da carga aplicada. Portanto, foi calculado com os deslocamentos relativos a 2000 N e 500 N. O coeficiente de atrito envolvendo um K_{ser} = 1476 Nmm é de 0,72. A figura 83 mostra os deslocamentos verticais das diferentes partes que constituem o modelo original sob uma carga de $0{,}4 \cdot F_{max} = 2000\ N$.

Figura 83: Deformações do modelo numérico original (fator de escala de deformação = 15)



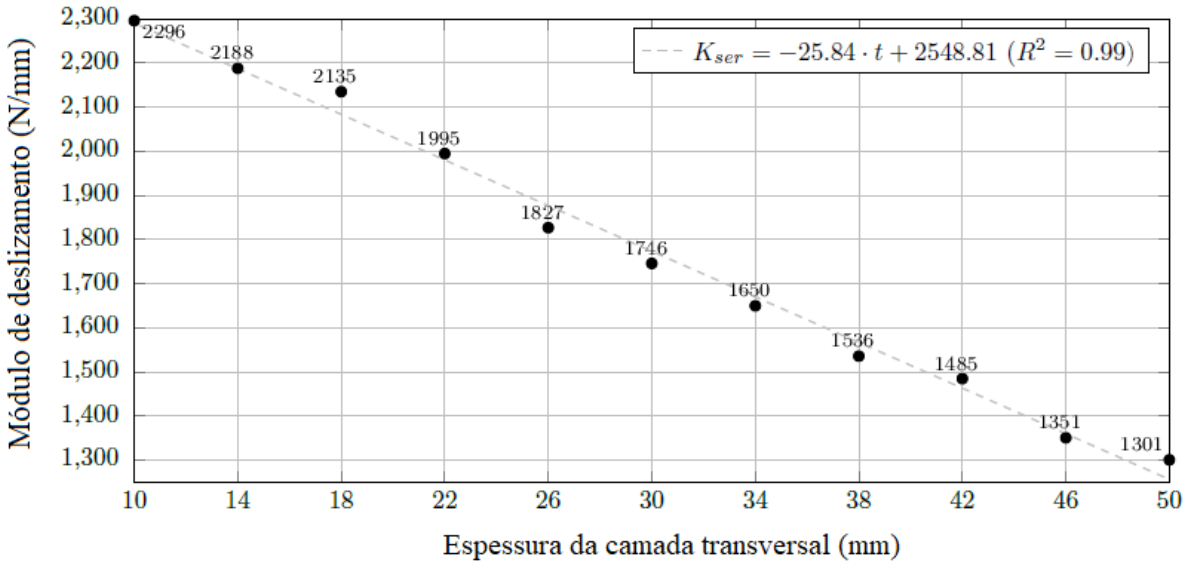
Fonte: Sohier (2018)

A partir do modelo ajustado foram avaliadas modificações em três parâmetros: Espessura das lamelas cruzadas, Módulo de Elasticidade das lamelas e diâmetro das cavilhas. Os resultados para cada simulação são descritos a seguir.

4.7.1 *Influência da espessura das lamelas*

Foram simuladas espessuras de 10 a 50 mm para a camada transversal, mantendo-se as camadas longitudinais com espessura de 38 mm e diâmetro de cavilha de 19 mm. A figura 84 apresenta a evolução o gráfico com a relação entre o módulo de deslizamento com a espessura da camada transversal.

Figura 84: Variação do módulo de deslizamento *versus* variação da camada transversal para painéis de 3 camadas

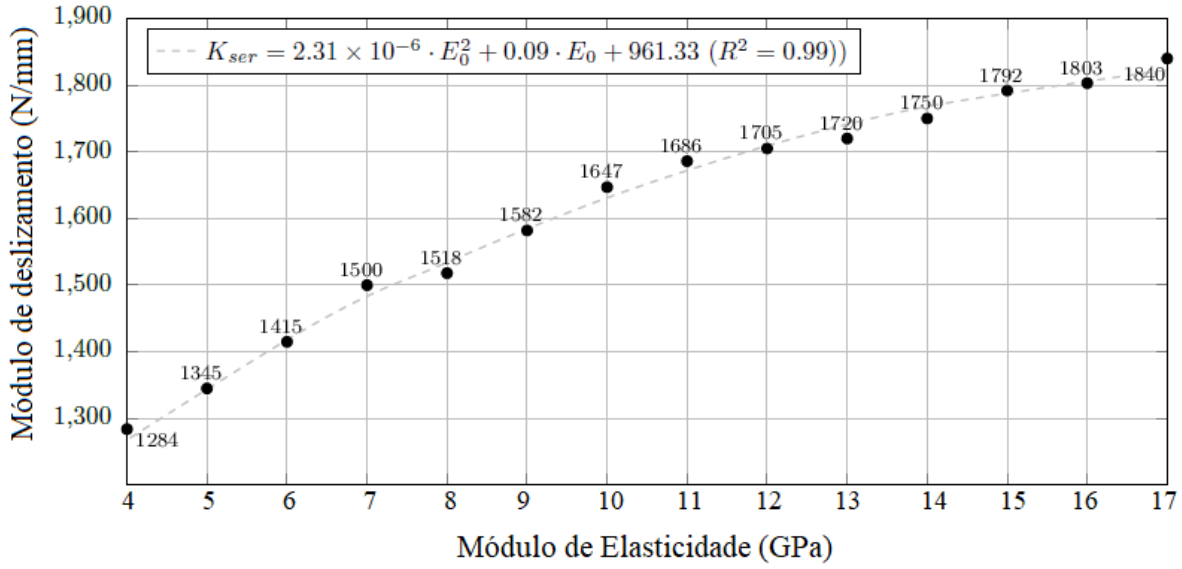


Fonte: Sohier (2018)

4.7.2 *Influência do Módulo de Elasticidade das lamelas*

A análise numérica variou o Módulo de Elasticidade (E_0) entre 4,0 e 17 GPa, pois essa faixa abrange a grande maioria das resistências das madeiras de *Pinus* brasileiras. A figura 85 apresenta um gráfico com os resultados obtidos da variação dos MOEs versus a variação do módulos de deslizamento.

Figura 85: Variação do módulo de deslizamento *versus* variação do MOE

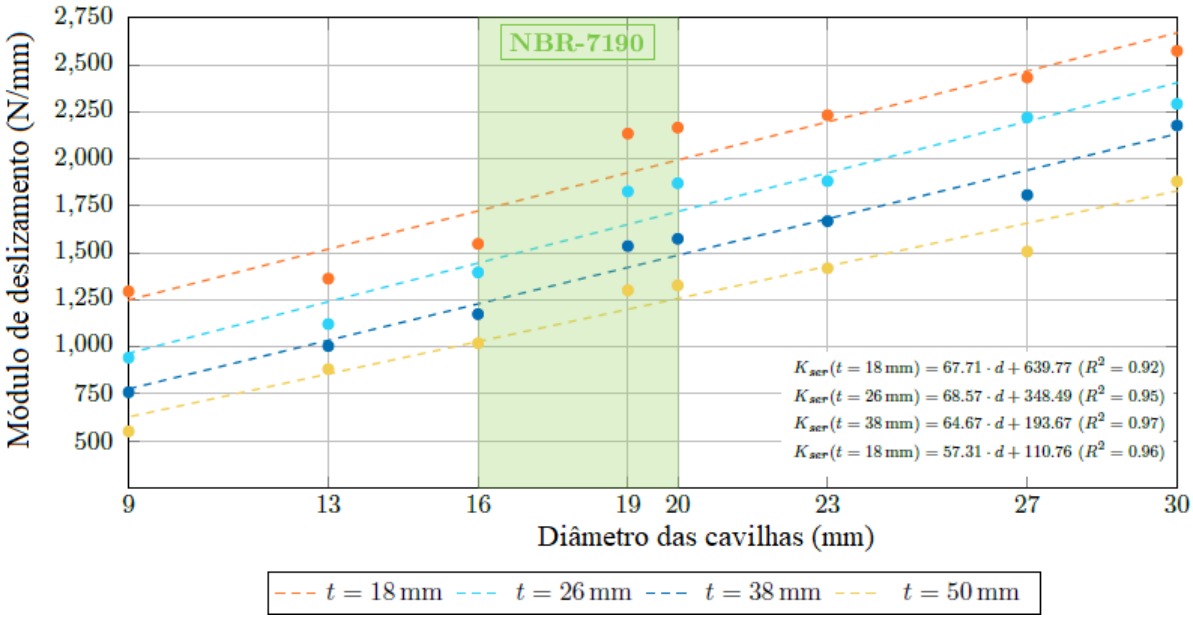


Fonte: Sohier (2018)

4.7.3 *Influência do diâmetro das cavilhas*

A figura 86 apresenta um gráfico com os resultados da variação do diâmetro das cavilhas com relação ao módulo de deslizamento para quatro espessuras de camadas. A simulação foi feita baseada nos diâmetros admissíveis para cavilhas pelas normas europeia e brasileira, sendo eles 9, 13, 16, 19, 20, 23, 27, 30 mm. As espessuras das camadas foram 18, 26, 38 e 50 mm.

Figura 86: Variação do módulo de deslizamento *versus* variação do diâmetro das cavilhas para quatro espessuras de camadas



Fonte: Sohier (2018)

4.7.4 *Considerações sobre as análises numéricas*

Com a análise numérica através do *software* ABAQUS foi possível desenvolver equações que podem predizer o módulo de deslizamento para algumas situações especificas. A primeira delas foi a variação da espessura da camada transversal. É possível notar no gráfico da figura 91 que a espessura da lamela transversal tem forte influência nos valores do módulo de deslizamento da ligação cavilhada, pois valores menores de espessura aumentam significativamente os valores do K_{ser}.

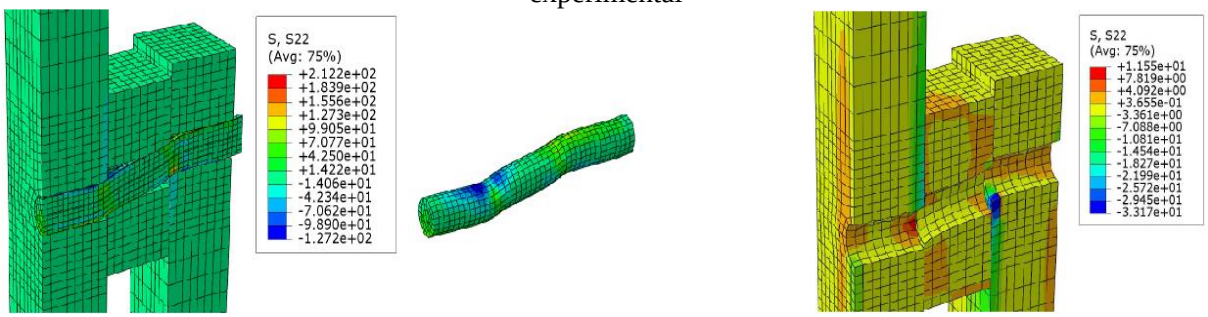
Com relação à variação do módulo de elasticidade apresentado na figura 92, foi possível constatar um aumento do módulo de deslizamento conforme o aumento do módulo de elasticidade das lamelas, com a tendência de estabilização a partir de 17 GPa. Porém, a variabilidade do módulo de deslizamento para este parâmetro foi bem menor que o ocorrido para o parâmetro de variação da espessura da camada transversal.

A variação do diâmetro da cavilha apresentado no gráfico da figura 93 deixou evidente que a correlação existente entre este parâmetro e o módulo de deslizamento, sendo que para diferentes espessuras de lamelas, o comportamento crescente do K_{ser} foi praticamente o mesmo.

Uma outra consideração a ser feita baseada nos resultados, é que quanto maior o diâmetro da cavilha, maior o módulo de deslizamento, mas consequentemente maior a perda de área da lamela a ser conectada, pois o diâmetro da cavilha representa uma perda de área útil da lamela, reduzindo o módulo de elasticidade do painel como um todo, e fragilizando a conexão.

A simulação no ABAQUS foi feita utilizando um modelo elástico linear ortotrópico. Esse modelo permite calcular a estabilidade da conexão usando cargas pequenas em comparação com a capacidade de carga. Não foi definido um domínio plástico, pois o cálculo não foi considerado que o corpo de prova atingiria a fase plástica e a ruptura, portanto o modelo não pode ser usado para prever a carga última, e dimensionamento para o estado limite último (ELU). Neste sentido, é possível predizer as deformações baseadas no modelo até o limite de 40% da força do ensaio experimental, como é o caso das tensões apresentadas na figura 87.

Figura 87: Tensão de compressão perpendicular às fibras para uma carga de 40% da força do ensaio experimental



Fonte: Sohier (2018)

Analisando os resultados do modelo percebe-se que ele é mais rígido que o modelo experimental pois não está considerando a plasticidade e ruptura que ocorreu na cavilha do modelo experimental. No entanto, para predição das propriedades da ligação e do painel no regime elástico, o modelo se mostrou convergente.

5 CONCLUSÕES

O desempenho estrutural dos painéis em termos de valores de resistência e rigidez se mostraram satisfatórios, sendo que o painel de 3 camadas obteve melhores resultados. Conforme discutido, o valor da rigidez do painel de 3 camadas se mostrou equivalente ao painel de 3 camadas da classe E1 (*Southern pine*) da norma americana e canadense ANSI/APA PGR 320 (2011), porém o painel de 5 camadas ficou abaixo dos valores de referência para a mesma norma. Comparando-se as rigidezes entre os dois painéis, naturalmente o painel de 5 camadas obteve uma rigidez maior que o painel de 3 camadas. Em termos de resistência, o painel de 3 camadas se mostrou mais resistente, pois com uma dimensão menor, resistiu proporcionalmente mais carga, o que se deve ao arranjo geométrico, já que o painel de 3 camadas possui uma camada na direção transversal situada na linha neutra, enquanto o de 5 camadas possui duas camadas transversais e que estão fora da linha neutra.

De maneira geral, os dois painéis se mostraram eficientes para uso estrutural, como é possível observar na figura 89, onde é estimou-se que os painéis suportam as ações verticais de 150 Kgf/m², vencendo vãos de pelo menos 4 metros. Esta carga é o carregamento imposto pela norma ABNT NBR 6120 (1980) na qual estima-se as ações permanentes para edificações, e este valor é referente às ações em residências. Desta forma, concluiu-se que o painel DCLT é um potencial produto a base de madeira que poderá vir a ser utilizado em estruturas, inicialmente de pequeno porte. Para tanto é necessário desenvolvimento de rotinas de projetos e dimensionamento, bem como novos estudos referentes a outros pontos importantes, como resistência em situação de incêndio, por exemplo.

O corpo de prova e o ensaio desenvolvido para simular o comportamento da ligação cavilhada se mostrou eficiente, pois os valores obtidos neste ensaio foram usados nos métodos analíticos e na simulação numérica, as quais convergiram com os resultados experimentais dos painéis produzidos, como é demostrado nos valores apresentados na tabela 31.O uso do software ATM baseado em algoritmos genéticos também se mostrou eficiente, pois com os dados de três carregamentos não destrutivos no painel o programa convergiu para valores quase idênticos aos experimentais.

Novos estudos com painéis de diferentes espécies de madeira nas lamelas e cavilhas podem ser feitos para validar o ensaio desenvolvido, mas em relação aos painéis deste estudo, conclui-se que o ensaio foi apropriado para a determinação do módulo de deslizamento, e consequentemente os métodos analíticos empregados convergiram com os valores experimentais, sendo que o método γ, por ser mais simples, se mostrou com uma alternativa

mais viável que o método da analogia do cisalhamento (SAM), já que os dois métodos retornaram valores praticamente idênticos.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, D.H. et. al. Comparação das resistências ao embutimento paralelo às fibras de madeiras de pínus oocarpa, cumaru e pínus taeda. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 3, p.113-119, set. 2014.

ALVES FILHO, A. **Elementos Finitos: A base da tecnologia CAE**. 6. ed. São Paulo: Erica Saraiva, 2018. 583 p.

AMERICAN WOOD FOREST SERVICE (Estados Unidos). **The Southern Pine**. Madison: United States Department of Agriculture, 1985. p.11

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D5764-97A:** Standard Test Method for Evaluating Dowel-Bearing Strength of Wood and Wood- Based Products. West Conshohocken: ASTM International, 2018. 5 p.

APA THE ENGINEERED WOOD ASSOCIATION. **ANSI/APA PRG 320**: Standard for Performance-Rated Cross Laminated Timber, Tacoma, Washington, 2011, 29 p.

AQUINO, A.R. et al. **Sustentabilidade Ambiental**. Rio de Janeiro: Rede Sirius, OUERJ, 2015. 167 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de Estruturas de Madeira. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 1980.

BLAß, H.J.; SANDHAAS, C. Annex 6: Derivation Johansen equations. In: **Timber Engineering - Principles for design.** BLAß, H.J.; SANDHAAS, C. (Ed.). Karlsruhe, DE: Kit Scientific Publishing, 2017. p. 639-644

BOGENSPERGER, T.; SILLY, G.; SCHICKHOFER, G.. **Comparison of Methods of Approximate Verification Procedures for Cross Laminated Timber.** Graz: Holz.bau Forschungs Gmbh / Institute for Timber Engineering and Wood Technology / Graz University of Technology, 2012.

BRANCO, J.M.; CRUZ, P.J.S.; PIAZZA, M. Experimental analysis of laterally loaded nailed timber-to-concrete connections. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 23, n. 1, p.400-410, jan. 2009. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.11.011.

BRANDNER, R. Cross laminated timber (CLT) in compression perpendicular to plane: Testing, properties, design and recommendations for harmonizing design provisions for structural timber products. **Engineering Structures**, v. 171, p.944-960, set. 2018. Doi: 10.1016/j.engstruct.2018.02.076.

BRANDNER, R. Production and Technology of Cross Laminated Timber (CLT): A state-of-the-art Report. In: FOCUS SOLID TIMBER SOLUTIONS - EUROPEAN CONFERENCE ON CROSS LAMINATED TIMBER (CLT), **Proceedings**, Graz, Austria, 2013

BRIBIÁN, I.Z.; CAPILLA, A.V.; USÓN, A.A. Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. **Building and Environment**, [s.l.], v. 46, n. 5, p.1133-1140, 2011. Elsevier. http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.12.002.

BRITO, L.D.; CALIL Jr., C. Avaliação de Estruturas de Madeira da Hauff e Sucessoras Consolidadas em São Paulo e Minas Gerais, Brasil. In: Congresso Latino-americano de Estructuras de Madeira e Congresso Ibero-Latinoamericano de la Madeira en la Construción, 2017, Júnin, **Anais do II CLEM+CIMAD.** Junin: Unnoba, 2017. p. 1 - 12.

BUCK, D. et. al. Comparison of Different Assembling Techniques Regarding Cost, Durability, and Ecology - A Survey of Multi-layer Wooden Panel Assembly Load-Bearing Construction Elements. **BioResouces**, v. 10, p. 8378–8396, 2015.

CALIL JUNIOR, C.; MINÁ, A.J.S. Vibração transversal: Um método eficiente para classificação Um método eficiente para classificação de peças estruturais de madeira. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.** Campina Grande, p. 335-338. fev. 2003.

CARREIRA, M.; DIAS, A.A. Critérios para Classificação Visual de Peças Estruturais de *Pinus sp*. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**. São Carlos, p. 17-43. jan. 2006.

CECOBOIS CENTRE D'EXPERTISE SUR LA CONSTRUCTION COMMERCIALE EN BOIS (Canada). **Guide de conception des assemblages pour les charpentes en bois.** Quebec, Ca: Cecobois, 2015. 99 p.

CESAR, S.F.; **Estruturas hauff de madeira do brasil.** 1991. 204f. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991.

CHEUNG, A.B.; LINDQUIST, M.; CALIL JUNIOR, C. Calibração das propriedades elásticas de uma placa ortótropa utilizando algoritmos genéticos. **Revista Sul-americana de Engenharia Estrutural,** Passo Fundo, v. 1, n. 2, p.75-95, dez. 2004. Quadrimestral.

CLARK, D. et al. Innovative wood-based products: 2011-2012. In: UNECE/FAO. Nações Unidas (Org.). **Forest Products Annual Market Review** 2011-2012. Nova York: United Nations Publications, 2012. Cap. 13. p. 141-150.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Timber structures. Joints made with mechanical fasteners.** EN 26891:1991, Bruxelas, 1991.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 5: Design of timber structures -** Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings, EN 1995-1-1:2004, Bruxelas, 2004.

FLORA DO BRASIL. **Peltogyne em Jardim Botânico do Rio de Janeiro**. Disponível em: <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB78741>. Acesso em: 13 Fev. 2019

GAGNON, S.; POPOVSKI, M. Structural design of cross-laminated timber elements. In: **CLT Handbook - Cross Laminated Timber - Canadian Edition.** GAGNON, S.; PIRVU, C. (Ed.). Quebec-CA: Fpinnovation, 2011. Cap. 3. p. 1-82.

GAVA, M. **Viabilidade técnica e econômica da produção de componentes construtivos para habitação social utilizando madeira serrada de pinus de terceira classe de qualidade**. 2005. 233 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005

GESUALDO, F.A.R. **Ligações de peças estruturais de madeira através de cavilhas partidas de eucalipto citriodora.** 1982. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Departamento de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1982.

GOMES, O.F.G. **Estudo das ligações cavilhadas impregnadas com resinas estirênicas empregadas em estruturas de madeira.** 1997. 281 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Departamento de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

GUAN, Z. et al. Development of Adhesive Free Engineered Wood Products –Towards Adhesive Free Timber Buildings. In: WCTE 2018. **Annals of WCTE 2018**. Seul, 2018.

HENDERSON, J. **Brettstapel: An Investigation into the Properties and Merits of Brettstapel Construction.** 2009. 92f. Dissertação (Mestrado) - Department of Architecture and Building Design, Faculty of Engineering, University of Strathclyde, Glasgow, Scotland, UK, 2009.

HOLZBAUTECHNIK SOHM GMBH (Áustria), **Diagonaldübelholz.** 2018. Disponível em: < http://www.sohm-holzbau.at/diagonalduebelholz>. Acesso em: 21 nov. 2018

IBA INDUSTRIA BRASILEIRA DE ARVORES (Brasil). **Relatório 2017**. Brasília: Iba, 2017. p.80

IPT - INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICAS. **Informações sobre madeiras**. São Paulo, 2019. Disponível em: <http://www.ipt.br/informacoes_madeiras3.php?madeira=49>. Acesso em: 14 fev. 2019.

JOHANSEN. K.W. Theory of Timber Connections. **International Association of Bridge and Structural Engineering,** Copenhagen, vol. 9, p. 249-262, 1949.

KREUZINGER, H., **Flächentragwerke: Platten, Scheiben und Schalen; Berechnungsmethoden und Beispiele.** Informationsdienst Holz, Brücken aus Holz, 1999, p.43-60.

KREUZINGER, H. Mechanically jointed members and CLT elements. In: **Timber Engineering - Principles for design.** BLAß, H.J.; SANDHAAS, C. (Ed.). Karlsruhe, DE: Kit Scientific Publishing, 2017. p. 249-262

KREUZINGER, H., **SAM for CLT joined by dowels** [Mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <marcoscesar@sc.usp.br> em 08 de abril 2019.

LEVIN, H. Building Ecology: An Architect's Perspective on Healthy Buildings. In: HEALTHY BUILDINGS 95, 1995. **Annals of Heathy Buildings.** Milão-IT: 1995. p. 1 - 25.

LINDQUIST, M.; PIGOZZO, J.C.; CALIL JUNIOR, C. Análise Numérica do Comportamento de uma Ponte Mista de Madeira-Concreto através da Teoria de Placa Equivalente. In: Jornadas Sud-Americanas de Ingeniería Estructural, 31., 2004, Mendoza. **Anais do XXXI ornadas Sud-Americanas de Ingeniería Estructural.** Mendoza: Universidad Nacional de Cuyo., 2004. p. 1 - 15.

MAHALLE, L.; O'CONNOR, J.; BARRY, A. Environmental performance of cross-laminated timber. In: **CLT Handbook - Cross Laminated Timber - Canadian Edition.** GAGNON, S.; PIRVU, C. (Ed.). Quebec-CA: Fpinnovation, 2011. Cap. 11. p. 1-45.

MARCAL, L.M. et al. Fundamentos da Análise do Ciclo de Vida. In: 33º Encontro Nacional De Engenharia De Produção, **Anais do 33º Encontro Nacional de Engenharia de Produção.** Salvador: Abepro, 2013. v. 1, p. 1 - 12.

MESTEK, P. **Punktgestützte Flächentragwerke aus Brettsperrholz (BSP):** Schubbemessung unter Berücksichtigung von Schubverstärkungen Dipl.-Ing.. 2011. 246 f. Dissertação (Mestrado) - Lehrstuhl Für Holzbau Und Baukonstruktion, Technische Universität München, Karlsruhe, 2011.

MOLINA, J.C.; CALIL Jr., C. Sistema construtivo em “wood frame” para casas de madeira. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 31, n. 2, p. 143, 2010.

MOLINA, J.C. et al. Embedment strength of steel dowel in wood specimens according to ABNT NBR 7190:1997 and ASTM D5764: 2007 Standards. **Revista Chilena de Ingeniería**. Santiago, p. 492-500. jan. 2017.

MOLITERNO, A. Cadernos de projetos de telhados em estruturas de madeira. São Paulo: Edgard Blüncher, 1981. 419p.

MÜLLER, M.T. et al. Soldagem da Madeira. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 1, n. 1, p.1-10, maio 2010

O’LOINSIGH, C. et al. Mechanical behaviour and 3D stress analysis of multi-layered wooden beams made with welded-through wood dowels. **Composite Structures,** [s.l.], v. 94, n. 2, p.313-321, jan. 2012. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.08.029.

PASSARELLI, R.; INO, A. Produção de painéis maciços de tábuas e cavilhas de madeira (“stack-board”): estudo de caso de uma fábrica austríaca. In: ELECS, 2013, Curitiba. **Anais do Encontro Latino-americano de Edificações e Comunidade Sustentáveis.** Curitiba: ANTAC, 2013. p. 26 - 35. Doi: 10.12702/978-85-89478-40-3-a029

PEREIRA, M.C.M.; CALIL JUNIOR. C. **Metodologia para estudo da caracterização estrutural de painéis de CLT:** método de ensaio para Cross Laminated Timber (CLT) e aplicação em um painel modelo, Saarbrücken: NEA, 2016.

PEREIRA, M.C.M; CALIL JUNIOR, C. Resistência de Ligações Cavilhadas Aplicando a Proposta do Novo Método de Ensaio de Ligações Mecânicas em Estruturas de Madeira In: XVI

Encontro Brasileiro de Madeiras e Estruturas de Madeira + III Congresso Latino-americano de Estruturas de Madeira, 2018, São Carlos. **Anais do XVI EBRAMEM+IIICLEM.** São Carlos: IBRAMEM, 2018.

PEREIRA, M.C.M; CALIL JUNIOR, C. **Strength and Stiffness of Cross Laminated Timber (CLT) panels produced with Pinus and Eucalyptus: experimental and analytical comparisons.** Matéria (Rio de Janeiro), [s.l.], v. 24, n. 2, p.1-14, 2019. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620190002.0684.

PEREIRA, M.C.M; SOHIER, L.A.P.; CALIL JUNIOR, C. Theoretical and experimental analysis of the wooden dowel connection to a DLT panel. In: XX Simpósio em Ciência e Engenharia de Materiais, 2018, São Carlos. **Anais do XX Simpósio em Ciência e Engenharia de Materiais.** São Carlos: EESC, 2018. p. 1 - 4.

PIEDADE JUNIOR, C. **Ligações de peças de peroba rosa e pinho do paraná com cavilhas de eucalipto citriodora.**1972. 123 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Rural, Faculdade de Ciências Médicas e Biológicas de Botucatu, Botucatu, 1972.

PIZZI, A. et. al. Mechanically- induced wood welding. **Maderas, Ciencia y tecnología,** v.5, n.2, Concepción, Chile, 2004.

PLOWAS, W. et al. Understanding the compatibility of UK resource for dowel laminated timber construction. In: TH Building Construction, 2015, Edinburgh. **Annals of TH Building construction.** Edinburgh: Edinburgh Napier University, 2015. p. 1 – 12

PROJETO DE NORMA PN-02-126.10-001-1 - **Critérios de classificaçao visual e mecânica de peças estruturais de madeira de florestas plantadas**, São Carlos, 2017.

PROJETO DE NORMA PN 02:126.10-001-4: **Método de ensaio para determinação de resistências de ligações mecânicas das estruturas de madeira**, São Carlos, 2017.

RACHER, P. Joints in timber structures. In: **Timber Engineering - Principles for design.** BLAß, H.J.; SANDHAAS, C. (Ed.). Karlsruhe, DE: Kit Scientific Publishing, 2017. p. 323-509

RIZZINI, Carlos Toledo. **Árvores e madeiras úteis do Brasil: Manual de dendrologia brasileira**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blüncher, 1978. 296 p.

ROBERTSON, A.B. **A Comparative Life Cycle Assessment of mid-rise office building construction alternatives: Laminated Timber or Reinforced Concrete.** 2011. 159 f. Tese (Doutorado) - Curso de Estudos Florestais, University of British Columbia, Vancouver-CA, 2011.

SATER, A; TEIXEIRA, R. **Tocando em frente**. Rio de Janeiro: Phillips Records: 1990. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=2XRYfff7-pQ >. Acesso em: 12 mar. 2019.

SCHOLZ, A. **Ein Beitrag zur Berechnung von Flächentragwerken,** 210f. Tese (doutorado) - Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Technischen Universität München, Munique, 2004.

SHIMIZU, J.Y. (Ed.). **Pínus na Silvicultura Brasileira**. Colombo: Embrapa Florestas, 2008. 226 p.

SILVA, M.F. Revisão taxônomica do gênero Peltogyne Vog. (Leguminosae-Caesalpinioideae). **Acta Amazônica**, Manaus, v. 6, n. 1, p.1-60, mar. 1976.

SILVA, A.M.R. **Elemento de viga de formulação mista para aplicações estruturais.** 164 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2014.

SILVA, M.F.O.; PEREIRA, F.S.; MARTINS, J.V.B. A bioeconomia brasileira em números. In: **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, v. 47, n. 1, p.277-334, mar. 2018. Semestral.

SOARES, S.R.; SOUZA, D.M.; PEREIRA, S.W. A avaliação do ciclo de vida no contexto da construção civil. In: **Coletânea Habitare: Construção e meio ambiente – Volume 7**. (Ed) SATTLER, M.A.; PEREIRA, F.O.R., Rio de Janeiro: Antac, 2006. Cap. 4. p. 96-127

SOCHACKI, B. **Brettstapel panels: in-plane strength and stiffness.** 2014. 45 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura, Department of Architecture and Civil Engineering, University of Bath, Bath, UK, 2014.

SOHIER, L.A.P. **Development of a new mass timber slab: the dowelled cross-laminated timber:** Analytical design methods and experimental validation. 2018. 79 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Architectural Engineering Degree, Faculty of Engineering of Mons, Mons, 2018.

STRUCTURE CRAFT (Canadá), **Dowellam™ - DLT** 2018. Disponível em: <https://structurecraft.com/>. Acesso em: 29 nov. 2018

THOMA HOLZ GMBH (Áustria). **Live healthily and sustainably with wood**. 2018. Disponível em: <https://www.thoma.at/?lang=en>. Acesso em: 21 nov. 2018

THOMA, E. **Volholz Häuser: das Baum-prinzip für naturnahes Wohnen.** Vienna - AT: Christian Brandstätter Verlag, 2008. 175 p.

TRADA TECHNOLOGY. **Case Study: Stadthaus, Murray Grove.** Londres, UK: TRADA, 2009

TUOTO, M.; HOEFLICH, V.A. A Indústria Florestal Brasileira Baseada em Madeira de Pinus: Limitações e Desafios. **In: Pínus na Silvicultura Brasileira,** SHIMIZU, J.Y. (Ed.). Colombo: Embrapa Florestas, 2008. p. 17-48.

ZENID, G.J. (Org.). **Madeira: Uso sustentável na construção civil**. 2. ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas IPT, 2009, p.103

ANEXO A

Nesta seção é apresentado em detalhes os valores obtidos para a classificação visual e mecânica das lamelas de *Pinus elliottii* e *taeda*, com seções de 38 x 90 mm, usadas para a fabricação dos painéis, bem como o posicionamento de cada uma na configuração de montagem dos painéis.

Tabela A1: Classificação visual e mecânica das lamelas do painel DCLT de 3 camadas

Camada	Lamela	Classe Visual	Comp. (m)	Peso (kg)	ρ (kg/m³)	MOE (GPa)
1	A53	S2	2,6	4	449,8	7,6
	A36	S2	2,6	4,3	483,6	7,5
	A2	S1	2,6	4,65	522,9	7,4
	A6	S1	2,6	5,2	584,8	7
	A18	S2	2,6	4,05	455,5	6,85
	A52	S3	2,6	4,65	522,9	6,2
	A27	S1	2,6	3,7	416,1	6,1
	A35	S1	2,6	4,25	478,0	5,85
	A3	S2	2,6	3,45	388,0	5,7
	A8	S2	2,6	4,05	455,5	5,6
	A30	S1	2,6	3,75	421,7	5,6
	A13	S2	2,6	3,05	343,0	5,55
	A56	S1	2,6	4,4	494,8	5,2
	A33	S2	2,6	3,95	444,2	4,37
2	A43-2	S2	1,3	2,05	461,1	13
	A28-1	S2	1,3	2,1	472,3	11,3
	A43-1	S1	1,3	2,05	461,1	11,3
	A 7-1	S1	1,3	2	449,8	10,7
	A34-2	S2	1,3	1,9	427,4	10,5
	A44-2	S2	1,3	2,25	506,1	10
	A 10-1	S1	1,3	2,4	539,8	9,8
	A21-1	S1	1,3	2,1	472,3	9,8
	A39-1	S2	1,3	2,25	506,1	9,3
	A 4-1	S1	1,3	1,8	404,9	9,2
	A34-1	S2	1,3	1,85	416,1	8,9
	A1-2	S1	1,3	2,05	461,1	8,8
	A31-2	S1	1,3	1,9	427,4	8,8
	A31-1	S2	1,3	1,9	427,4	8,7
	A 5-1	S3	1,3	2	449,8	8,6
	A40-1	S1	1,3	2,05	461,1	8,5
	A47-1	S2	1,3	2	449,8	8,5
	A 11-1	S1	1,3	1,75	393,6	8,4
	A11-2	S1	1,3	1,7	382,4	8,2
	A1-1	S2	1,3	2,2	494,8	8
	A12-1	S3	1,3	1,75	393,6	7,9

	A12-2	S3	1,3	1,9	427,4	7,9
	A46-1	S1	1,3	1,95	438,6	7,7
	A44-1	S1	1,3	2,2	494,8	6,4
	A 10-2	S1	1,3	2,55	573,5	6,3
	A23-2	S1	1,3	1,55	348,6	6,3
	A29-1	S2	1,3	1,85	416,1	6
	A23-1	S3	1,3	1,6	359,9	5,8
	A40-2	S3	1,3	2,05	461,1	5,3
	A45-1	S2	1,3	1,9	427,4	4,9
	A20-1	S1	1,3	2,1	472,3	4
3	A49	S2	2,6	5,65	635,4	13,3
	A17	S1	2,6	4,35	489,2	11,2
	A9	S1	2,6	4,3	483,6	10,5
	A48	S1	2,6	4,3	483,6	10,35
	A57	S1	2,6	4,3	483,6	10,3
	A26	S3	2,6	4,6	517,3	9,97
	A32	S2	2,6	4,5	506,1	9,7
	A15	S1	2,6	4,5	506,1	9,5
	A42	S1	2,6	4,75	534,2	8,7
	A55	S2	2,6	4,6	517,3	8,7
	A38	S1	2,6	4	449,8	8,4
	A54	S2	2,6	4,45	500,4	8,3
	A37	S2	2,6	3,9	438,6	8
	A58	S1	2,6	3,8	427,4	8
	A41	S2	2,6	3,7	416,1	7,8
	A25	S2	2,6	3,8	427,4	7,67

Os diagramas a seguir representam os painéis DCLT produzidos sendo que, para o painel de 3 camadas, a camada 1 se refere a camada superior, a camada 2 se refere a camada intermediaria e camada 3 se refere a camada inferior. Da mesma forma, para o painel de 5 camadas, o número 1 se refere a camada superior e assim sucessivamente.

Lamelas posicionadas na direção longitudinal no painel DCLT

1	A52	A33	A56	A30	A3	A27	A2	A36	A53	A6	A18	A35	A8	A13	A26
2															
3	A25	A41	A37	A55	A42	A32	A9	A17	A49	A48	A57	A15	A38	A54	A58

Lamelas posicionadas na direção transversal no painel DCLT de 3 camadas

A45-1	A23-1	A23-2	A 10-2	A46-1	A12-1	A11-2	A47-1	A 5-1	A31-2	A21-1	A44-2	A 7-1	A28-1	A43-2	A43-1	A34-2	A 10-1	A39-1	A34-1	A1-2	A31-1	A40-1	A 11-1	A1-1	A12-2	A44-1	A29-1	A40-2	A20-1

Tabela A2: Classificação visual e mecânica das lamelas do painel DCLT de 5 camadas

Camada	Lamela	Classe Visual	Comp. (m)	Peso (kg)	ρ (kg/m³)	MOE (GPa)
1	B29	S2	2,6	4,15	466,7	9,5
	B55	S2	2,6	4,1	461,1	9,4
	B56	S2	2,6	4,4	494,8	9,3
	B62	S3	2,6	4,25	478,0	9,2
	B97	S2	2,6	3,9	438,6	9,2
	B60	S2	2,6	4,1	461,1	9,05
	B41	S2	2,6	4,1	461,1	9
	B89-1	S2	2,6	3,85	433,0	8,9
	B49	S2	2,6	4,75	534,2	8,7
	B57	S2	2,6	4,25	478,0	8,7
	B35	S3	2,6	4,9	551,1	8,6
	B2	S1	2,6	3,8	427,4	8,4
	B10	S3	2,6	5,1	573,5	10,8
	B87	S3	2,6	4,9	551,1	13,5
2	B53-1	S3	1,3	2	449,8	9,7
	B27-2	S1	1,3	1,85	416,1	8,2
	B6-1	S3	1,3	2,15	483,6	7,9
	B83-1	S1	1,3	2,2	494,8	7,7
	B68-1	S1	1,3	2,05	461,1	7,6
	B20-1	S2	1,3	1,85	416,1	7,5
	B32-2	S1	1,3	1,8	404,9	7,5
	B89-2	S1	1,3	1,8	404,9	7,4
	B12-1	S2	1,3	1,85	416,1	7,3
	B80-2	S1	1,3	1,9	427,4	7,3
	B52	S1	1,3	2,1	472,3	7,2
	B25-2	S2	1,3	1,75	393,6	7
	B68-2	S2	1,3	2	449,8	7
	B84-1	S2	1,3	1,95	438,6	7
	B24-1	S2	1,3	1,6	359,9	6,9
	B25-1	S2	1,3	1,8	404,9	6,9
	B7-1	S1	1,3	1,65	371,1	6,8
	B7-2	S2	1,3	1,75	393,6	6,8
	B32-1	S2	1,3	1,8	404,9	6,7
	B78-1	S3	1,3	1,75	393,6	6,6
	B80-1	S2	1,3	1,85	416,1	6,6
	B59-1	S3	1,3	2	449,8	6,5
	B67	S1	1,3	1,75	393,6	6,5
	B81-1	S1	1,3	1,7	382,4	6,5
	B20-2	S1	1,3	1,7	382,4	6,3
	B39-2	S2	1,3	1,7	382,4	6,2
	B102	S3	1,3	1,8	404,9	6,2
	B44-1	S1	1,3	1,75	393,6	6,1
3	B59-2	S3	1,3	2,15	483,6	6,1

	B92	S2	2,6	3,75	421,7	8,35
	B26	S1	2,6	4	449,8	8,3
	B76	S2	2,6	4,3	483,6	8,11
	B93	S3	2,6	4,6	517,3	8,1
	B9	S3	2,6	4,55	511,7	7,6
	B48	S1	2,6	3,5	393,6	7,6
	B58	S1	2,6	3,85	433,0	7,6
	B14	S2	2,6	3,85	433,0	7,5
	B65	S2	2,6	3,65	410,5	7,5
	B88	S1	2,6	4	449,8	7,4
	B95	S3	2,6	4,25	478,0	7,35
	B1	S2	2,6	4,2	472,3	7,3
	B85	S3	2,6	3,25	365,5	7,3
4	B79-2	S1	1,3	2,15	483,6	12
	B19-1	S1	1,3	2,1	472,3	11
	B33-1	S2	1,3	2,35	528,6	10,7
	B81-2	S2	1,3	2,1	472,3	10,5
	B34-1	S1	1,3	1,85	416,1	10,4
	B21-1	S1	1,3	1,85	416,1	10,3
	B40-1	S1	1,3	2,2	494,8	10,2
	B22-1	S1	1,3	1,95	438,6	9,9
	B45-1	S1	1,3	2	449,8	9,8
	B54-1	S1	1,3	1,85	416,1	9,8
	B75-1	S2	1,3	1,95	438,6	9,8
	B6-2	S2	1,3	2,15	483,6	9,6
	B79-1	S1	1,3	2	449,8	9,6
	B69-1	S1	1,3	1,95	438,6	9,1
	B94-1	S2	1,3	2	449,8	9,1
	B13	S1	1,3	1,8	404,9	9
	B64-1	S1	1,3	1,8	404,9	9
	B78-2	S1	1,3	1,8	404,9	9
	B38-1	S2	1,3	2,05	461,1	8,9
	B17-2	S2	1,3	1,7	382,4	8,8
	B36-1	S1	1,3	1,85	416,1	8,7
	B50-1	S2	1,3	2	449,8	8,6
	B21-2	S2	1,3	1,8	404,9	8,4
	B17-1	S1	1,3	1,75	393,6	8,3
	B22-2	S2	1,3	1,9	427,4	8,3
	B5-1	S1	1,3	1,85	416,1	7,9
	B23-1	S1	1,3	1,85	416,1	7,9
	B64-2	S2	1,3	1,7	382,4	7,8
	B34-2	S1	1,3	1,9	427,4	7,7
	B27-1	S2	1,3	1,8	404,9	6,3
5	B37	S1	2,6	5	562,3	13,1
	B66	S1	2,6	4,6	517,3	13,1

	B96	S2	2,6	4,1	461,1	12,02
	B28	S2	2,6	4,75	534,2	11,8
	B90	S1	2,6	4,9	551,1	11,6
	B3	s2	2,6	5,25	590,4	11
	B15	S1	2,6	5,1	573,5	11
	B18	S1	2,6	4	449,8	11
	B16	S1	2,6	4,1	461,1	10,5
	B86	S1	2,6	4,6	517,3	10,5
	B42	S1	2,6	3,75	421,7	10
	B46	S1	2,6	4,25	478,0	10
	B8	S1	2,6	4,1	461,1	9,7
	B74	S2	2,6	4	449,8	9,6

Lamelas posicionadas na direção longitudinal no painel DCLT de 5 camadas

1	B35	B57	B49	B60	B62	B56	B10	A53	A6	A18	A35	A8	A13	A26
2														
3	B85	B1	B58	B48	B9	B26	B92	B4	B76	B93	B14	B65	B88	B95
4														
5	B74	B8	B86	B16	B15	B28	B66	B37	B96	B90	B3	B18	B42	B46

Lamelas posicionadas na direção transversal no painel DCLT de 5 camadas

B44-1	B102	B39-2	B59-1	B80-1	B78-1	B32-1	B24-1	B84-1	B80-2	B12-1	B89-2	B32-2	B6-1	B53-1	B83-1	B68-1	B20-1	B52	B25-2	B68-2	B25-1	B7-1	B7-2	B67	B81-1	B20-2	B27-2	B59-2
B64-2	B23-1	B5-1	B27-2	B22-2	B17-1	B21-2	B50-1	B94-1	B69-1	B79-1	B6-2	B81-2	B33-1	B19-1	B79-2	B34-1	B21-1	B40-1	B22-1	B45-1	B54-1	B75-1	B36-1	B13	B64-1	B78-2	B38-1	B17-2