UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

MARCOS CESAR DE MORAES PEREIRA

Metodologia para estudo da caracterização estrutural de painéis de Madeira Laminada
Colada Cruzada

São Carlos

2014

MARCOS CESAR DE MORAES PEREIRA

**Metodologia para estudo da caracterização estrutural de painéis de Madeira Laminada
Colada Cruzada**

Versão corrigida

A versão original encontra-se na Escola de Engenharia de São Carlos

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de mestre em Ciências.

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

Orientador: Prof. Dr. Carlito Calil Junior

São Carlos

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

D436e de Moraes Pereira, Marcos Cesar
Metodologia para estudo da caracterização
estrutural de painéis de Madeira Laminada Colada
Cruzada / Marcos Cesar de Moraes Pereira; orientador
Carlito Calil Junior. São Carlos, 2015.
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-
Graduação em Ciências 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, 2015.
1. Madeira Laminada Colada Cruzada. 2. Cross
Laminated Timber. 3. Caracterização. 4. Método de
ensaio.
I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

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

Título da dissertação: "Metodologia para estudo da caracterização estrutural de painéis de madeira laminada colada cruzada".

Data da defesa: 30/01/2015

Comissão Julgadora:

Resultado:

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

APROVADO

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

APROVADO

Prof. Associado **Juliano Fiorelli**
(Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos/FZEA-USP)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais:
Prof. Associado **Antonio José Félix de Carvalho**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

Dedico este trabalho,

À Nair, minha mãe que sempre me incentivou e me apoiou em tudo na minha vida, e um dia estaremos juntos novamente.

Ao Walther, meu pai que sempre está ao meu lado, e ao André meu grande irmão.

À Sabrina, pela inestimável ajuda, compreensão e amor em todos os momentos.

À minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Carlito Calil Junior pela atenção, amizade e orientação no decorrer deste trabalho.

Aos meus amigos Carlito Calil Neto e Felipe Icimoto que contribuíram enormemente para a realização deste trabalho.

À Escola de Engenharia de São Carlos, pela oportunidade de realização do curso de mestrado, e ao departamento de Engenharia de Materiais e ao programa de pós-graduação em ciências de materiais.

Aos funcionários e técnicos do LaMEM, em especial ao Samuel Inácio de Sá, e todos os amigos e colegas que no laboratório compartilham da experiência e dificuldades da pós-graduação e que contribuíram de alguma forma para este trabalho.

Ao Sr. Gerse da Silva Reis e família, da serraria Ibaiti, que contribuíram muito com este trabalho e a quem tenho muita gratidão, pela doação da madeira e uso do espaço industrial e sobretudo pela amizade e experiências compartilhadas.

À Akzo Nobel, na pessoa do eng. Renato Lara, pela doação do adesivo utilizado.

Ao profs. Francisco Rocco Lahr (EESC-USP) e Luis Felipe de Carvalho Jorge (IPCB-Portugal) pelas contribuições feitas ao trabalho.

Ao amigo Alexandre J. D. Souza pela ajuda e contribuição.

À CAPES pela apoio financeiro durante o tempo deste estudo.

Muito obrigado a todos.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.
(Marthin Luther King)

RESUMO

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

O CLT (Cross Laminated Timber) ou MLCC (Madeira Laminada Colada Cruzada) é um painel compósito estrutural formado por lamelas de madeira unidas com adesivos próprios para uso estrutural, com as camadas montadas de maneira perpendicular à camada anterior. É utilizado como elemento estrutural principal em edificações térreas e multipavimentos por ter características estruturais semelhantes ao concreto armado. Os objetivos gerais deste trabalho foram desenvolver uma metodologia de ensaios para a caracterização estrutural de painéis de MLCC visando a contribuição para a normatização do produto no Brasil e o estudo da rigidez de um painel modelo. Foi fabricado um painel com dimensões estruturais utilizando madeira de *Pinus elliotti* e adesivo estrutural à base de melamina-ureia formaldeído. Os ensaios mecânicos realizados foram adequados para caracterização estrutural de painéis de MLCC e podem compor uma futura normatização. Os valores de rigidez para o painel avaliado apresentaram módulo de elasticidade abaixo dos especificados pela norma americana ANSI/APA PGR 320 e pela especificação técnica europeia ETA06/0138, porém os módulos de rigidez do rolling shear e de compressão obtiveram valores similares aos recomendados.

Palavras chaves: MLCC, Cross Laminated Timber, Caracterização, Métodos de ensaio.

ABSTRACT

PEREIRA, M. C. M. (2014). **Methodology for the study of structural characterization of wood panels of Cross Laminated Timber (CLT)**. 107p. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

The CLT (Cross Laminated Timber) is a structural composite panel formed by wooden slats together with own stickers for structural use, with the layers mounted perpendicular to the previous layer. It is used as the main structural element in single-story buildings with one or more floors for having structural features similar to reinforced concrete. The aims of this study were to develop a test methodology for structural characterization of MLCC panels aimed at contributing to the standardization of the product in Brazil and the study of rigidity of a panel model. A panel with structural dimensions using wood of *Pinus elliottii* and structural adhesive melamine urea formaldehyde base was manufactured. The mechanical tests were suitable for structural characterization of MLCC panels and can compose a future standardization. The stiffness values reported for the modulus of elasticity panel presented below specified by the US standard ANSI / APA PGR 320 and the European Technical Specification ETA06/0138, but the stiffness of the rolling shear and compression modules obtained similar to recommended values

Keywords: Cross Laminated Timber, characterization, test methods.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Edifício Stadhaus Murray Grove em Londres.	28
Figura 2: Residência familiar construída em MLCC na Áustria.	28
Figura 3: Prédio de escritórios na Áustria.	29
Figura 4: MLCC x MLC.....	32
Figura 5: Etapas de fabricação do MLCC	34
Figura 6: Painel de pré-qualificação com indicação dos blocos para teste de cisalhamento e delaminação.	41
Figura 7: Classes de madeira classificadas visualmente.	47
Figura 8: Seções transversais e distribuições de tensões do Eurocode 1993.....	52
Figura 9: Diagrama de forças normais e de cisalhamento em uma placa de MLCC	54
Figura 10: Características geométricas para o cálculo de um painel de 5 camadas.	56
Figura 11: Fatores de Composição “K”.....	60
Figura 12: Características físicas efetivas a partir do fator K.....	61
Figura 13: Diferenciação dos feixes A e B no Shear Analogy.....	62
Figura 14: Exemplo de rolling shear em um MLCC de 5 camadas.	62
Figura 15: Exemplo de rolling shear numa placa fletida.....	63
Figura 16: Modelo para ensaio de rolling shear.	64
Figura 17: Área com plantações de pinus spp. no Brasil em 2013.....	65
Figura 18: Adesivo utilizado, resina Melamina Ureia Formaldeído	68
Figura 19: Materiais utilizados para a aplicação do adesivo	68
Figura 20: Madeira de <i>Pinus elliottii</i> utilizada para confecção do painel	69
Figura 21: Chegada da madeira após a etapa de aplainamento	70
Figura 22: Medição das dimensões finais das lamelas	71
Figura 23: Medição da umidade das peças	71
Figura 24: Pesagem das partes de catalisador para preparação do adesivo	72
Figura 25: Aplicação do adesivo nas lamelas.....	72
Figura 26: Montagem das lamelas no prato da prensa	73
Figura 27: Prensagem do painel	73
Figura 28: Corpo de prova para ensaio de cisalhamento na linha de cola.	74
Figura 29: Esquema de ensaio para o teste de cisalhamento na linha de cola.....	75
Figura 30: Ciclo do ensaio de delaminação. FONTE: adaptado de Calil Neto, 2011	76
Figura 31: Esquema para ensaio de flexão longitudinal.....	77

Figura 32: Esquema para ensaio de flexão transversal	77
Figura 33: Esquema para ensaio de flexão para obtenção do Módulo de Elasticidade de Torção (G)	78
Figura 34: Modelo de corpo de prova para determinação do Coeficiente de Poisson.....	80
Figura 35: Corpo de prova para teste de rolling shear	84
Figura 36: Esquema para ensaio de rolling shear	84
Figura 37: Área resistente ao cisalhamento no teste de rolling shear	85
Figura 38: Corpo de prova durante ensaio para medição da deformação	88
Figura 39: Sistema de aquisição de dados System 5000 e software win5000	88
Figura 40: Corpo de prova antes do ensaio de rolling shear	91
Figura 41: Corpo de prova ao final do ensaio de rolling shear	91
Figura 42: Corpos-de-prova durante ensaio de delaminação.....	92
Figura 43: Corpos-de-prova após ensaio de delaminação	93
Figura 44: a) corpo de prova com fissura na linha de cola; b) corpo de prova sem fissuras ou delaminação.	93
Figura 45: Corpos-de-prova para ensaio de compressão	94
Figura 46: Ensaio de compressão normal	95
Figura 47: Ensaio de compressão normal	96
Figura 48: Seção do MLCC com índices geométricos	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Mudanças no processo e os testes necessários.	43
Tabela 2: Dimensões admitidas dos defeitos em cada classe.	46
Tabela 3: Valores (em PSI) característicos exigidos em testes para painéis CLT ^(a, b, c, d)	48
Tabela 4: Valores (em MPa) característicos exigidos em testes para painéis CLT ^(a, b, c, d)	48
Tabela 5: Valores resistência e rigidez para CLT segundo ETA 06/0138	49
Tabela 6: Propriedades de resistência e rigidez do <i>Pinus elliotti</i>	66
Tabela 7: Dados utilizados no ensaio de flexão e torção	86
Tabela 8: Resultados do ensaio de flexão longitudinal	86
Tabela 9: Resultados do ensaio de flexão transversal	87
Tabela 10: Resultados do ensaio de torção: carga aplicada em pontos da diagonal 1	89
Tabela 11: Resultados do ensaio de torção: carga aplicada em pontos da diagonal 2	89
Tabela 12: Área resistente ao cisalhamento	90
Tabela 13: Resultados do teste de rolling shear	90
Tabela 14: Resultados dos ensaios de delaminação.	92
Tabela 15: Resultados para ensaio de compressão tipo B	94
Tabela 16: Resultados para ensaio de compressão tipo A	95
Tabela 17: Resultados para ensaio de densidade	96
Tabela 18: Resultados para ensaio de cisalhamento direto na linha de cola	97
Tabela 19: Resumos dos resultados	100
Tabela 20: Comparativo entre os valores obtidos nos ensaios com os valores de referência	101

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	52
Equação 2	53
Equação 3	53
Equação 4	54
Equação 5	54
Equação 6	55
Equação 7	55
Equação 8	56
Equação 9	56
Equação 10	56
Equação 11	57
Equação 12	57
Equação 13	57
Equação 14	57
Equação 15	57
Equação 16	58
Equação 17	58
Equação 18	58
Equação 19	63
Equação 20	63
Equação 21	64
Equação 22	74
Equação 23	77
Equação 24	78
Equação 25	78
Equação 26	79
Equação 27	79
Equação 28	79
Equação 29	79
Equação 30	80
Equação 31	81
Equação 32	81

Equação 33	82
Equação 34	82
Equação 35	83

SUMÁRIO

1	Introdução	25
1.1	A madeira e a produção florestal brasileira	25
1.2	Sistemas construtivos de madeira	26
1.3	Pesquisas atuais no Brasil	29
2	Objetivo	30
3	Referencial TEÓRico	31
3.1	Introdução ao MLCC (CLT)	31
3.2	Breve Histórico	32
3.3	Processo de Fabricação: etapas, classificação e testes.....	33
3.3.1	Etapas de fabricação	33
3.3.2	Testes para qualificação do MLCC (CLT)	40
3.4	Requisitos do MLCC (CLT)	44
3.4.1	Tolerâncias finais dos painéis.....	44
3.4.2	Classes de resistência.....	45
3.5	Métodos para dimensionamento de estruturas em MLCC (como elementos de pisos e lajes) 51	
3.5.1	Método Gama (anexo B do Eurocode)	51
3.5.2	Método K (composite theory).....	58
3.5.3	Método "Shear Analogy" (Kreuzinger)	61
3.6	Rolling Shear: Cisalhamento com escorregamento das fibras.....	62
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	65
4.1	Materiais utilizados para fabricação da Amostra.....	65
4.2	Características do <i>Pinus elliottii</i>	65
4.3	Características do adesivo.....	66
4.4	Fabricação do painel MLCC	67

4.5	Métodos de ensaio	74
4.5.1	Teste de cisalhamento direto na linha de cola.....	74
4.5.2	Ensaio de delaminação	75
4.5.3	Ensaio de Flexão transversal e longitudinal.....	76
4.5.4	Ensaio de torção	78
4.5.5	Ensaio para determinação do Coeficiente de Poisson do MLCC	80
4.5.6	Compressão Paralela	81
4.5.7	Valores característicos das resistências.....	82
4.5.8	Densidade.....	82
4.5.9	Testes de cisalhamento na camada central “Rolling Shear”	83
5	RESULTADOS.....	86
5.1	Ensaio de flexão	86
5.2	Determinação do Poisson	87
5.3	Ensaio de torção	89
5.4	Ensaio de Rolling Shear	89
5.5	Resultados do ensaio de delaminação	92
5.6	Ensaio de compressão	93
5.7	Resultado ensaio de densidade	96
5.8	Resultado cisalhamento na linha de cola.....	96
5.9	Exemplo de Cálculo para uma laje usando o método gama.....	97
6	DISCUSSÕES DOS RESULTADOS.....	101
7	CONCLUSÕES	104
8	BIBLIOGRAFIA	106

1 INTRODUÇÃO

1.1 A madeira e a produção florestal brasileira

A madeira é um material que acompanha a humanidade desde seu surgimento, e por sua versatilidade é empregada em diversos usos, desde a geração de energia calorífica até o uso como material construtivo. É um compósito natural formado basicamente por três polímeros naturais, a celulose, a hemicelulose e a lignina. As quantidades de cada polímero variam conforme a espécie de madeira, mas essa variação fica mais evidente quando se compara a classificação botânica das árvores. As coníferas são formadas por 48 a 56% de celulose, 23 a 26% de hemicelulose e 26 a 30% de lignina, enquanto as dicotiledôneas são compostas por 46 a 48% de celulose, 19 a 28% de hemicelulose e 26 a 35% de lignina, (CALIL JUNIOR, R. LAHR e DIAS, 2003). Estes compostos formam cadeias de moléculas longas e repetitivas, com ligações primordialmente covalentes, que fornecem ao material características físico-mecânicas relevantes, como uma alta relação resistência versus peso específico.

Estas características levam a madeira a ser matéria-prima para diversas indústrias em diferentes ramos de atividade, desde o corte e desdobro em tábuas, passando pela indústria de transformação como as moveleiras, por exemplo, até a indústria que utiliza os componentes da madeira como matéria-prima, como as fabricantes de pasta de madeira para celulose (wood pulp) para posterior confecção de papel e papelão. Baseado na demanda por produtos à base de madeira o setor florestal se tornou a principal fonte de renda de alguns polos do Brasil, sendo eles a região sul e parte da região sudeste, e a região norte. O sul e sudeste se caracterizam pelas grandes áreas de florestas plantadas, principalmente com as espécies de Eucaliptos e Pinus. A atividade madeireira na região norte é caracterizada pela extração de madeira da floresta amazônica, sendo que o código florestal brasileiro permite a seleção de espécies e árvores adultas para o abatimento, e não o corte predatório. A área total ocupada por florestas plantadas em 2013 estava em torno de 7.185.943ha, sendo que cerca de 5.102.030 ha são de espécies de eucalipto e 1.562.782ha são de espécies de pinus, e a área ocupada por plantios florestais de espécies não convencionais, como Acácia, Araucária, Pópulus, Teca, Seringueira e Paricá, foi de 521.131 há (ABRAF, 2013). Segundo o relatório técnico Florestas Nativas de Produção Brasileiras, o Brasil possui a segunda maior área florestal do mundo, ficando atrás apenas da Rússia e a frente de Canadá, Estados Unidos e China. (SFB E IPAM, 2011).

1.2 Sistemas construtivos de madeira

Dentro do setor madeireiro, um dos maiores consumidores de madeira serrada é a construção civil, onde madeira a serrada é empregada principalmente como estrutura de coberturas e a madeira beneficiada é usada para a confecção de caixilhos, portas, janelas e pisos. Ainda assim, o uso de madeira como estrutura principal da edificação não representa um volume significativo das obras civis no Brasil. A grande maioria das obras são feitas principalmente no sistema tradicional de alvenaria com tijolos de barro ou blocos de concreto estruturados com pilares e vigas em concreto armado ou em estruturas metálicas. A escolha pelo sistema construtivo tradicional está ligada a fatores como a cultura, a facilidade de acesso ao material, à grande disseminação do conhecimento do sistema construtivo, ao valor econômico destes materiais e a facilidade de revenda do imóvel.

Novos sistemas construtivos têm sido desenvolvidos em todo o mundo para atender os déficits habitacionais, porém a aceitação por parte dos consumidores é lenta. A construção em estruturas de madeira é mais tradicional em países do centro e norte da Europa e na América do Norte, onde o uso deste material é mais culturalmente aceito. O sistema construtivo wood frame é utilizado por 95% das residências nos Estados Unidos (MOLINA e CALIL JUNIOR, 2010). O wood frame é um sistema onde a estrutura interna das paredes e piso são formadas por montantes de madeira espaçados entre si, normalmente 40 cm, formando um quadro rígido que é fechado por um contraplacado de madeira que pode ser uma chapa de compensado ou de OSB (oriented strand board) em uma das faces deste quadro. Na face que ficará interna, o quadro pode ser fechado com uso de uma chapa cimentícia ou gesso acartonado.

Existem sistemas construtivos pré-fabricados semelhantes ao wood frame mas utilizando outros materiais como por exemplo, o steel frame, onde os montantes são feito em perfis de aço. Porém, de todos os materiais usados na construção civil, a madeira é único material de construção de fonte renovável, que demanda baixo consumo energético para produção, e sequestra carbono da atmosfera durante o crescimento da árvore (MOLINA e CALIL JUNIOR, 2010).

O perfil sustentável associado à madeira torna-a num forte aliado das recentes políticas ambientais que visam a diminuição das emissões de dióxido de carbono, sendo que a indústria da construção é responsável pela emissão de um terço do total das emissões de dióxido de carbono para a atmosfera (SILVA, BRANCO e LOURENÇO, 2012). Neste sentido, a construção civil tem caminhado para minimização dos custos de fabricação e redução do

impacto ambiental das obras. Na Europa os estudos sobre o tema atualmente trata da análise do ciclo de vida (ACV) da construção, que leva em consideração todos os custos associados à obra desde o projeto até o descarte após a demolição, visando usar materiais eco-eficientes, com um consumo energético mínimo, com redução da geração de resíduos entre outros fatores (TORGAL e JALALI, 2010). Normas ambientais cada vez mais rígidas também reforçam esta tendência. A International Organization for Standardization (ISO), além da norma ISO 14000 que apresenta recomendações de caráter ambiental, também possui as normas ISO 6240:1980, ISO 6241:1984 e ISO 7162:1992 que discorre sobre o desempenho dos sistemas construtivos.

Além das vantagens ambientais, o uso de sistemas construtivos baseados em madeira tem a vantagens da facilidade da pré-fabricação, evitando os desperdícios de material que ocorrem em obras convencionais e ganhando tempo de execução, o que afeta positivamente o desempenho dos sistemas construtivos como um todo. O déficit habitacional no Brasil, segundo dados do Ministério das Cidades mostravam que em 2008 faltavam mais de 5,5 milhões de domicílios no país (PASSARELLI, 2013). Com o tempo de obra sendo reduzido, a oferta de moradias no país poderia ser aumentada num espaço mais curto de tempo e assim suprir a demanda existente.

Neste sentido o sistema construtivo que utiliza como material estrutural o Cross Laminated Timber (CLT), ou Madeira Laminada Colada Cruzada (MLCC), vem obtendo sucesso e ganhando mercado desde seu desenvolvimento, no final da década de 80, e atualmente este tipo de construção é o sistema construtivo em maior ascensão em países da Europa. O uso do MLCC (CLT) e o sistema de construção associado a ele estabeleceu-se como uma nova técnica europeia de construção de madeira sólida, e está em plena concorrência com o sistema até então mais utilizado, o woodframe e os sistemas tradicionais baseados em tijolos e concreto (BOGENSPERGER, AUGUSTIN e SCHICKHOFER, 2011).

A Madeira Laminada Colada Cruzada (MLCC), é um compósito formado por madeira e um adesivo químico, que devido a sua característica de cruzamento das camadas consegue obter uma rigidez semelhante às placas de concreto armado. O sistema construtivo se baseia na utilização dos painéis de MLCC como elemento estrutural principal, tanto para paredes quanto para lajes e pisos, e as conexões entre estes elementos são feitas através de parafusos auto atarraxantes desenvolvidos para este tipo de aplicação, facilitando e reduzindo o tempo de montagem. Este sistema tem tido grande aceitação no mercado europeu e norte americano que além de ser capaz de executar residências térreas, é possível a construção de prédios

multipavimentos, como por exemplo, o edifício Stadhaus Murray Grove, localizado em Londres, Reino Unido, que possui 30 metros de altura e nove pavimentos, montado em 2008 totalmente em estrutura de MLCC, apresentado da figura 1.

Figura 1: Edifício Stadhaus Murray Grove em Londres. FONTE: Trada Technology, (2009)

Outro exemplo de aplicação do material é em obras residenciais e prédios comerciais, como ilustram as figuras 2 e 3.

Figura 2: Residência familiar construída em MLCC na Áustria. FONTE: CLT Handbook FPInnovations, (2011)

Figura 3: Prédio de escritórios na Áustria. FONTE: Tisem, (2014)

1.3 Pesquisas atuais no Brasil

Apesar de recente, o MLCC (CLT) está começando a ser divulgado no Brasil e alguns pesquisadores tem se dedicado à pesquisa sobre o tema. Passarelli em 2013 publicou em sua dissertação “Cross Laminated Timber: Diretrizes para projetos de painel maciço em madeira no estado de São Paulo” onde desenvolveu as bases da produção para um painel construtivo semelhante ao MLCC, usando as bases da laminação cruzada, tendo em vista a adequação ao setor madeireiro paulista, além da descrição do processo ds principais fábricas de CLT da Áustria, explicando as semelhanças e diferenças entre cada produto.

2 OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho consistiu em desenvolver uma metodologia de ensaios para a caracterização estrutural de painéis de Madeira Laminada Colada Cruzada e contribuir para a normatização do produto.

Os objetivos específicos:

- Estudar as características físicas e mecânicas do material fabricado em laboratório com matéria-prima nacional comparando com as produzidas em escala industrial no exterior;
- Contribuir e fomentar discussões para melhorias no processo produtivo do material em escala industrial;
- Elaborar recomendações para o dimensionamento estrutural e processamento de painéis de MLCC.

3 REFERÊNCIAL TEÓRICO

3.1 Introdução ao MLCC (CLT)

CLT é a abreviação do termo em inglês Cross Laminated Timber, e em português seria Madeira Laminada Colada Cruzada (MLCC), para o painel formado por lamelas de madeiras coladas em camadas transversais defasadas 90° entre si, com números de camadas variando de 3 a 9, sempre em números ímpares, de modo a obter espessuras de dimensões estruturais, variando de 57 a 500 mm. As dimensões de largura e comprimento do MLCC são variáveis, mas geralmente são usadas larguras de 3m com comprimentos que podem atingir até 24m. Tais dimensões proporcionam o uso do MLCC como componente principal de construções como paredes e pisos, sendo que a largura da placa equivale ao pé direito de um prédio. Outros autores da bibliografia classificam o MLCC como um painel de madeira serrada multi camadas, onde cada uma é colada transversalmente à camada adjacente para aumentar a rigidez e estabilidade em número ímpar de camadas, simétrica em torno da camada intermediária (CRESPELL e GAGNON, 2010). A norma americana PRG 320 2011 Standard for Performance-Rated Cross-Laminated Timber descreve o MLCC como um painel sólido de madeira engenheirada e pré-fabricado, composto de pelo menos três camadas ortogonais coladas podendo ser de madeira maciça serrada ou de Structural Composite Lumber (SCL), sendo que as camadas são formadas por lamelas unidas por colagem longitudinal e transversal com uso de adesivos estruturais, formando uma placa sólida retangular, retilínea, com acabamento plano, que é destinada a coberturas, pisos, paredes ou outras aplicações (ANSI/APA, 2011).

A tecnologia da união de peças de madeira através da colagem já existe há mais de um século e originou-se na região central da Europa, na Suíça e na Alemanha, onde já não havia árvores com grandes diâmetros para fornecer elementos estruturais de grande porte. A solução encontrada no final do século XIX foi a união de peças menores, como tábuas, através de ligações metálicas. As tábuas foram chamadas de laminas, pois são empilhadas umas sobre as outras com as fibras na mesma direção. O uso de peças com dimensões menores exige árvores mais jovens, com menor diâmetro, que unidas formam um elemento estrutural maior e mais rígido. Já no início do século XX as ligações metálicas em vigas lameladas foram substituídas por cola, inicialmente feita à base de caseína, proteína encontrada no leite. Após a segunda guerra mundial o desenvolvimento de adesivos produzidos por componentes químicos sintetizados em laboratório teve um desenvolvimento acentuado, fazendo a produção de madeira laminada colada (Glulam) ter um aumento expressivo. Hoje existem grandes estruturas

em países da América do Norte e Europa que contam com vigas, pilares, pórticos e demais elementos estruturais fabricados em MLC.

A figura 4 ilustra a diferença entre o MLCC (CLT) e o MLC (Glulam), (FPINNOVATION, 2011). Os mesmos autores ressaltam as vantagens do MLCC, que por sua configuração cruzada oferece uma estabilidade dimensional muito grande para usos em pisos, paredes e lajes. Além da estabilidade o cruzamento das laminas proporciona propriedades de ação nos dois sentidos, semelhante à uma laje de concreto armado, e o permite o uso de sistemas de conectores que simplificam a montagem das estruturas.

Figura 4: MLCC (CLT) (a) x MLC (b).

FONTE: adaptado de CLT Handbook FPInnovations, 2013

A estabilidade dimensional do painel de MLCC também é destacada por Silva ET. AL (2012), que afirma que a variação dimensional é da ordem de 2% na direção perpendicular e de 1% na direção paralela as fibras, com a madeira seca, ou seja, com umidade de equilíbrio em torno de 12% (SILVA, BRANCO e LOURENÇO, 2012).

3.2 Breve Histórico

A MLCC foi desenvolvido no final da década de 80 e início da década de 90 na Áustria e na Alemanha, para uso residencial. Durante a década de 90 um esforço conjunto entre a universidade e a indústria desenvolveu um MLCC de melhor qualidade e métodos de produção mais padronizados e rápidos. No início do século XXI, houve um aumento expressivo nas vendas e produção, pois o mercado começou a aceitar o MLCC como um material capaz de substituir o concreto e o aço sem prejudicar as características do prédio e com vantagens como

a grande resistência a abalos sísmicos, leveza, facilidade de pré-fabricação, menor quantidade de resíduos na obra e tempo de execução reduzido.

3.3 Processo de Fabricação: etapas, classificação e testes.

Para a fabricação da MLCC , o primeiro passo deve ser a escolha da matéria prima mais adequada semelhante ao processo de fabricação da MLC, ou seja, definir qual a espécie, o adesivo e o tratamento preservante mais adequado e compatível entre si. Calil Neto (2011) apresenta detalhes dos testes de compatibilidade de três espécies de madeira, dois adesivos e dois tratamentos preservantes para vigas de MLC (CALIL NETO, 2011).

A partir da definição da espécie, adesivo e tratamento, é necessária uma classificação visual e mecânica da matéria prima antes da entrada desta no processo de fabricação. Essa classificação deve ser feita conforme recomendação da norma americana ANSI/APA PRG 320:2011 Standard for Performance-Rated Cross-Laminated Timber. A seguir são detalhadas as etapas de fabricação e nos tópicos seguintes a pré-classificação recomenda pela APA e os testes necessários para o painel pronto.

3.3.1 Etapas de fabricação

O CLT Handbook FPIInnovations (2011) apresenta um diagrama que ilustra de forma simples e didática as etapas da fabricação do MLCC :

- 1- Seleção das peças
- 2- Organizar as lamelas
- 3- Aplainar lamelas
- 4- Destopar no comprimento
- 5- Aplicar adesivo
- 6- Montar painel
- 7- Prensagem
- 8- Acabamento, corte e controle de qualidade
- 9- Marcação, empacotamento e despache.

Figura 5: Etapas de fabricação do MLCC .

FONTE: adaptado de CLT Handbook FPInnovations, 2013, cap. 2, p. 10

No diagrama da figura 5 as etapas estão simplificadas, elas podem conter mais atividades envolvidas. Por exemplo, no caso de fábricas com volume de produção acima de 30 mil m³ é necessário que as lamelas sejam emendadas através de juntas tipo dentadas (finger-joint) e emendas laterais para aumentar o comprimento dos painéis além de aumentar a agilidade na fabricação.

3.3.1.1 Seleção das peças

Nesta etapa é necessário fazer uma classificação visual das peças, principalmente no caso do uso de madeira de coníferas, para descartar peças com defeitos acima dos permitidos como nós, bolsas de resinas, fendas, rachas, encanoamentos, encurvamentos e ainda classificar a densidade pela quantidade de anéis por polegada na seção transversal da peça, como recomenda o projeto de revisão da norma brasileira de estruturas de madeira NBR 7190 (ABNT - ASSOCIAÇÃO

BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011) .Caso o painel for utilizado sem algum tipo de acabamento superficial que cubra sua área por inteiro, é interessante que haja uma seleção mais rigorosa de peças para formar a camada superior e inferior do painel com peças que tenham o aspecto visual desejável pelo cliente final. Na MLCC, é possível utilizar peças com defeitos anatômicos mais acentuados como nós (classes S3 e S4) nas camadas centrais do painel, já que o efeito cruzado do painel irá garantir que estes defeitos não gerem perdas significativas de resistência mecânica.

A classificação mecânica das peças em países europeus ou nos EUA e Canadá geralmente é realizada pelas serrarias, durante o processo de desdobro, e as fabricas de produtos engenheirados de madeira já adquirem o material com a classificação mecânica desejada. Esta ainda não é a realidade no Brasil, portanto é necessário fazer uma classificação mecânica antes do início da produção por meio de ensaios em equipamentos portáteis que funcionam com tecnologias como a vibração transversal ou a vibração longitudinal, que podem rapidamente ensaiar uma grande quantidade de peças, ou ainda o ensaio laboratorial, onde é possível ensaiar por flexão ou tração algumas amostras do lote e assim, extrapolar o resultado da resistência e rigidez para o lote todo. É interessante realizar o ensaio com a peça na dimensão final de uso, ou seja, com as faces aplainadas assim como irão ser antes do processo de aplicação do adesivo.

Outro parâmetro que faz parte da etapa de classificação é o controle de umidade das peças de madeira. O controle da umidade é de extrema importância, já que isso afeta diretamente a qualidade da ancoragem química do adesivo no interior das células da madeira, além da retratibilidade e tensões internas das peças. Alguns adesivos à base de poliuretanos utilizam a umidade da madeira como reagente para o início da colagem. A umidade considerada ideal é de $12\% \pm 3$, para lamelas de madeira maciça ou $8\% \pm 3$ para lamelas compostas por SCL (Structural Composite Lumber) que é a família de produtos engenheirados que incluem o LVL (laminated veneer lumber), o PSL (parallel strand lumber), o LSL (laminated strand lumber) e o OSL (oriented strand lumber) (APA Wood, 2014).

A diferença de umidade entre lamelas adjacentes não deve ser superior a 5%. A recomendação é que a madeira seja seca em estufa equipada com sistemas capazes de monitorar a umidade das peças. Durante a fabricação é necessário manter um controle de qualidade que verifique a umidade das peças antes e após a colagem, além da temperatura e umidade relativa da fabrica como um todo, ou ao menos do setor onde é realizada a passagem de cola e prensagem do painel.

O tempo de montagem, (tempo entre a aplicação do adesivo e o início da cura) e o tempo de cura podem ser afetados com temperatura ambiente mais elevada. A temperatura ambiente deve ser em torno de 15°C e a umidade ambiente em torno de 30 a 40%. O ambiente fabril deve ser controlado para manter esses parâmetros mesmo com as alterações climáticas ao longo do ano para manter o padrão de qualidade da colagem.

Além das recomendações anteriores, vários autores citados nas referências bibliográficas, recomendam que peças com esmoado, torções e empenamentos devem ter uso reduzido já que estas características reduzem a área de contato entre as peças e assim diminuem a área de colagem (FPINNOVATION, 2011). A norma ANSI/APA PRG 320 recomenda que cada lamela tenha, no mínimo, 80% de sua área em contato com as lamelas adjacentes, para formar uma linha de adesão eficaz.

3.3.1.2 Organizar as lamelas

A organização das lamelas na produção do MLCC deve seguir alguns cuidados e variam de acordo com o tamanho e espessura do painel. Além das classificações já citadas referente ao teor de umidade de peças adjacentes (diferença < 5%) e seleção visual, outro dado importante é de que as peças na direção da aplicação da força principal no painel, os quais devem apresentar propriedades de resistência e rigidez ou módulos de elasticidade similares. Áreas que irão receber ferragem ou parafusos para fazer a ligações entre painéis são regiões que devem ser formadas por lamelas de qualidade superior, pois são pontos de solicitação da estrutura. Como já mencionado anteriormente as camadas superior e inferior do painel podem ser organizadas para receber peças com aspecto visual e estético mais agradável.

3.3.1.3 Aplainar as lamelas

O aplainamento das lamelas antes da colagem é necessário para retirar a camada superficial de madeira oxidada e permitir que ocorra a abertura dos poros da madeira, melhorando a penetração do adesivo nas células e assim, melhorar a colagem. Além disso, o aplainamento pode garantir a uniformidade dimensional das peças, principalmente se for feito nas quatro faces da madeira (S4S), mesmo se não for aplicada cola nas laterais das lamelas. Os autores da bibliografia recomendam a retirada através de aplainamento de 2,5 mm (0,1 polegadas) de madeira na espessura e 3,8 mm (1,5 polegadas) na largura da peça (FPINNOVATION, 2011). Após o aplainamento, a umidade da peça pode apresentar teores um pouco mais elevados que o inicial, por isso a verificação da umidade deve ser novamente controlada. Este procedimento de usinagem requer cuidados quanto à velocidade de avanço e a ferramenta utilizada que devem

ser adequados a cada tipo de madeira. Parâmetros incorretos de usinagem podem causar deformações nas superfícies da madeira, como ondulações que irão prejudicar o contato entre as peças resultando numa colagem menos eficiente.

3.3.1.4 Destopar no comprimento

Nesta etapa é feito o corte das peças de madeira no comprimento do prato da prensa, tanto para camadas longitudinais, quanto para camadas transversais. É possível aproveitar pedaços de lamelas destopadas da posição longitudinal para compor a posição transversal em camadas centrais do painel, no caso da prensa ter dimensões retangulares. Quando a prensa possuir dimensões quadradas, as peças na direção transversal e longitudinal deverão ter o mesmo comprimento.

3.3.1.5 Aplicação de Adesivo

Geralmente a aplicação de adesivo em fabricas de MLCC e MLC são realizadas por máquinas chamadas coladeiras, que espalham o adesivo sobre as lamelas de madeira de forma contínua, fazendo uma linha de produção, com velocidades que variam de 18 a 60 m/min. Estas máquinas possuem um cabeçote que recebe o adesivo e o envia para um espalhador (compartimento com furos de lado a lado, por onde a cola é despejada sobre a lamela de madeira). Existe a possibilidade de formar a camada de MLCC antes da aplicação do adesivo, mas nesse modelo o aplicador de adesivo se desloca sobre a placa inteira despejando a quantidade adequada de produto.

A maioria dos fabricantes utilizam o adesivo à base de poliuretano PUR que reagem com a umidade contida na madeira e iniciam o processo de reação ou PRF (phenol-resorcinol formaldeído) que é um adesivo bi-componente onde a reação inicia quando os dois componentes são misturados. A colagem deve ser iniciada após o aplainamento, pois este processo abre os poros da madeira ajudando a ancoragem química do adesivo. Caso o tempo após o aplainamento seja muito longo (acima de 24 horas), a oxidação pode fechar os poros, dificultando a colagem.

A quantidade a ser aplicado varia com tipo de adesivo e geralmente é especificada pelo fabricante. O adesivo deve ser espalhado de forma uniforme sobre a peça de maneira a obter a quantidade correta de massa de adesivo por unidade de área (g/m^2) da madeira.

As superfícies das lamelas de madeira devem estar limpas e livres de substâncias que podem dificultar a colagem como óleo e graxas, além de pó de serra da própria madeira.

A aplicação do adesivo deve ser feita dentro do período de assemblagem da cola, que é o período de tempo entre a aplicação e o início da cura do adesivo. Deve-se ter o máximo de controle sobre as variáveis da produção neste ponto, pois qualquer problema que acarrete um atraso no início da prensagem pode fazer com que se exceda o tempo de assemblagem, e a cura do adesivo se inicie. Cada adesivo tem um tempo de assemblagem que é definido pelo fabricante e geralmente este prazo é inversamente proporcional ao aumento da temperatura do ambiente da colagem, ou seja, ambientes com umidade e temperatura controlados são mais indicados para a etapa de aplicação do adesivo. É recomendado que todas as etapas e em especial a aplicação do adesivo tenha um mapa de processos para criar um padrão produtivo que reduza a probabilidade de falhas durante a etapa.

Existe a possibilidade de colar uma fita de borda ao redor do painel, porém não é uma prática comum entre os fabricantes de MLCC .

3.3.1.6 Montagem do Painel

A montagem do painel é feita colocando-se camadas de lamelas de madeira inicialmente em uma posição e a próxima camada perpendicular à primeira, e a terceira perpendicular a segunda e assim por diante até todas as camadas estarem montadas. A norma ANSI APA PRG 320:2011 define que a área mínima de colagem deve ser de 80% da área da peça de forma que o fabricante deve ficar atento às peças com esmoados excessivos que retiram área da superfície das lamelas. A orientação dos anéis de crescimento deve ser invertida em relação à camada inferior para minimizar a deformação do painel.

Como foi explicado no item 3.3.1.5, a montagem do painel deve ser feita dentro do tempo de assemblagem do adesivo, e este tempo pode ser reduzido se a temperatura e umidade relativa forem mais elevadas.

3.3.1.7 Prensagem

A prensagem é a etapa mais crítica para a produção do MLCC. Esta dificuldade se refere à necessidade de uma prensa com grandes dimensões que exige uma capacidade de aplicação de força muito alta (FPINNOVATION, 2011). Prensas hidráulicas são as mais recomendadas para este trabalho porém existe a possibilidade de uso de prensas a vácuo (membranas flexíveis). Esta segunda tem a característica de conseguir no máximo 0,1 MPa de pressão o que geralmente não atende aos requisitos de pressão recomendados pelos fabricantes dos adesivos além da baixa pressão não ser suficiente para suprimir a deformação potencial de camadas e suprimir as irregularidades da superfície, e não conseguir criar um contato mais efetivo entre as peças de

madeira. Ainda assim é possível utilizar tais prensas se as lamelas receberem um friso na parte inferior para aliviar as tensões internas após o aplainamento, e assim facilitar o contato entre as lamelas durante a colagem, porém é recomendado que este painel seja testado antes do uso comercial para certificar que ele atende os requisitos das normas (FPINNOVATION, 2011).

As prensas hidráulicas são mais recomendadas por conseguirem cargas muito elevadas, tanto que é necessário uma pequena prensagem lateral da ordem de 0,276 a 0,550 MPa (40 a 80 psi) para evitar que as lamelas se desloquem lateralmente criando lacunas durante a aplicação da carga vertical. A pressão vertical deve ser a recomendada pelo fabricante do adesivo, mas geralmente são acima de 0,6 MPa (870 psi). Para adesivos poliuretanos, ou base de ureia formaldeído e resorcinol-formaldeído, as pressões recomendadas são, no mínimo de 0,9 MPa.

O tempo de prensagem também varia conforme o adesivo e é especificado pelo fabricante, porém a temperatura e umidade relativa do ar também afeta esta etapa do processo da mesma forma como no processo de aplicação do adesivo. Recomenda-se que a temperatura ambiente não seja abaixo de 15° C (60° F), pois neste caso o tempo de cura do adesivo e prensagem fica muito longo.

Os adesivos estruturais à base de poliuretanos, ureia formaldeído e resorcinol formaldeído podem ser prensados a frio, ou seja, não exigem prensas com aquecimento, porém estes adesivos possuem custos mais elevados que os adesivos que são prensados a quente. No caso de prensagem à quente é recomendado o uso de ondas de Radio Frequência (RF) para conseguir aquecimento no interior do painel de forma simultânea à superfície. No entanto, o custo de uma prensa com tecnologia de ondas de radio frequência é muito elevado (FPINNOVATION, 2011).

3.3.1.8 Acabamento, corte e controle de qualidade

O acabamento superficial do painel de MLCC é feito com uso de uma lixadeira industrial similar as utilizadas para acabamento em contraplacados, e esta usinagem tem como tolerância 0,1mm.

O corte de esquadrejamento final do painel e as aberturas para possíveis portas e janelas podem ser realizadas em máquinas de comando numérico computadorizado (CNC) com plataformas CAD/CAM de forma a manter uma precisão muito grande no posicionamento e qualidade dos cortes.

Nesta etapa também é possível corrigir pequenas imperfeições nas superfícies dos painéis de MLCC com uso de massa para madeira.

3.3.1.9 Marcação, empacotamento e despacho

Para os produtores americanos e canadenses que são regidos pela norma ANSI/APA PRG 320:2011, é necessário a marcação no produto de algumas informações, tais como:

- Nota de qualificação segundo a norma;
- Dimensões do MLCC ;
- Nome do fabricante ou número de identificação;
- Nome da agencia que aprovou o produto;
- Símbolo com nome da norma ANSI/APA PRG 320:2011
- Identificação de uso (teto ou parede);

Outras marcações são recomendadas como, por exemplo, o melhor local para colocação de conectores e parafusos, ou ainda a melhor orientação do uso do painel para que as forças de atuação sejam mais bem transferidas.

Durante o transporte e despacho dos painéis é recomendado que estes fiquem abrigados da umidade e calor excessivo, inclusive durante a construção da obra.

3.3.2 Testes para caracterização do MLCC (CLT) segundo a ANSI/APA PRG 320:2011

3.3.2.1 Corpo de prova para teste de caracterização

A norma ANSI/APA PRG 320 2011 recomenda que seja feito dois painéis para testes chamados de caracterização. Os testes também avaliam a qualidade das instalações, a matéria prima e as etapas de fabricação do painel. O painel deve ter as dimensões descritas na figura 6, sendo que as amostras nomeadas com a letra B (B1, B2 e B3) são usadas para o teste de cisalhamento e as amostras nomeadas com a letra D (D1, D2 e D3), são usadas para o teste de delaminação.

Figura 6: Painel de pré-qualificação com indicação dos blocos para teste de cisalhamento e delaminação.

FONTE: Adaptado de ANSI/APA PRG 320 2013 p. 13

Os resultados da pré-qualificação devem ser documentados e servirão de referência para os fatores de produção e controle de qualidade da fabrica de MLCC .

3.3.2.2 Teste de delaminação

A norma ANSI/APA PRG 320:2011 recomenda testes de delaminação como forma de avaliar a qualidade da linha de cola sob a influência da umidade. No teste de delaminação, um corpo de prova quadrado (ou núcleo do MLCC) obtido a partir de um painel de pré-qualificação ou da produção é saturado com água e em seguida é seco. Esse procedimento visa avaliar a capacidade da linha de cola em resistir à retração da madeira e as tensões de inchamento. O teste de delaminação também avalia tanto a capacidade do adesivo em resistir à ação por umidade. Neste teste, trincas na madeira próximas a linha de cola, mas não na linha de cola, não são considerados delaminação. Os limites para a quantidade de delaminação são baseados nos requisitos exigidos para o MLC, descritos na revisão da NBR 7190/1997. Este ponto será revisto pela norma americana assim que obtiverem mais dados recolhidos através de testes realizados pelos produtores de MLCC, porém as exigências atuais são consideradas adequadas

e fornecem uma qualidade aceitável. Os testes de delaminação realizados pelo FPInnovations confirmam que o método de vácuo e pressão são suficientes para averiguar a qualidade da ligação na linha de cola. Os detalhes do procedimento deste ensaio estão descritos no item 4.5.2, nos métodos de ensaios.

3.3.2.3 Qualificação de desempenho estrutural

Para averiguar as maiores propriedades físicas e mecânicas do MLCC, são necessários testes de desempenho estrutural conforme previsto na ANSI/APA PRG 320:2011. Estes testes incluem resistência à flexão, rigidez à flexão e ao cisalhamento interlaminar tanto na direção da maior força quanto na direção da menor força. O tamanho da amostra para a rigidez à flexão deve ser suficiente para estimar a média da população dentro de 5% de precisão com 75% de confiança ou 10 amostras, o que for maior. O tamanho da amostra para a resistência à flexão e ao corte interlaminar deve ser suficiente para a estimativa do valor característico, com 75% de confiança, em conformidade com a norma ASTM D291: Standard Practice for Evaluating Allowable Properties for Grades of Structural Lumber.

Os ensaios de flexão necessitam de uma face plana para que as cargas sejam aplicadas perpendicularmente à face da camada do MLCC, em conformidade com o ensaio de carga em três pontos ASTM D198: Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes ou ASTM D4761: Standard Test Methods for Mechanical Properties of Lumber and Wood-Base Structural Material, usando a largura da amostra de pelo menos 305 mm (12 polegadas) e da extensão no centro de aproximadamente 30 vezes a profundidade da amostra.

A norma americana considerou que é necessária uma largura mínima da amostra de 305 mm (12 polegadas) para distinguir um MLCC de elementos típicos como vigas. No entanto, tem sido relatado em testes que, em algumas configurações de MLCC, a utilização desta razão de largura e profundidade de 30 vezes para testes de flexão na direção da força menor pode resultar em desvio excessivo antes da amostra atingir o pico de carga, portanto espera-se que este ponto seja revisado em breve pela norma americana. O peso do painel de MLCC pode ser incluído na determinação da resistência à flexão.

Os ensaios de cisalhamento devem ser feitos sobre a face plana (as cargas são aplicadas perpendiculares à face da MLCC), de acordo com o método de carga centro-ponto descritos nas seções 4 a 12 da norma ASTM D198 ou ASTM D4761 usando a largura da amostra de pelo menos 305 mm (12 polegadas) e o espaço no centro igual a 5-6 vezes a profundidade da amostra. (ANSI D198, 2012)

O comprimento de apoio deve ser suficiente para evitar que o corpo de prova gire, mas não deve ser maior do que a profundidade da amostra. Todas as amostras devem ser cortadas com o mesmo comprimento e saliências não são permitidas.

3.3.2.4 *Mudança no processo de produção: Requalificação*

Em caso de mudanças no processo de fabricação do MLCC, a norma pede que sejam feitos testes para requalificar o produto. A tabela 1 apresenta algumas modificações e suas consequências para o controle de qualidade do MLCC.

Tabela 1: Mudanças no processo e os testes necessários.

Mudanças no processo	Consequências
Equipamentos de prensagem Formulação do adesivo Substituição da espécie de madeira ou grupo de espécies As alterações nas regras de classificação visual Alteração da área efetiva de colagem Alteração da área de prensagem	Refazer os testes de pré-qualificação e os testes de desempenho estrutural
Outras mudanças no processo de fabricação ou qualidade dos componentes não listados acima; Mudança na composição do adesivo (enchimentos e catalisadores)	Refazer os testes de pré-qualificação
Aumento da largura ou comprimento do painel em mais de 20%	Refazer os testes de desempenho estrutural

FONTE: Adaptado de ANSI/APA PGR 320 2011 p. 15.

3.3.2.5 *Garantia de Qualidade do MLCC (CLT)*

A norma americana recomenda que os fabricantes de MLCC façam um controle de qualidade nos seus produtos de forma contínua, avaliando principalmente por meio de inspeção visual as junções (caso sejam utilizadas), se área de colagem está sendo atendida de maneira eficaz, o grau de qualidade das lamelas. A garantia final do produto é auditada no EUA por uma agência de certificação independente que verifica se o produto atende as especificações do código de construção local. Estes auditores também avaliam se a planta produtiva tem condições de

produzir e controlar as variáveis que afetam o produto final e se existe uma política de controle de qualidade.

3.3.2.6 Controle da umidade e qualidade visual do painel

A retração da madeira é diferente nas três direções devido à natureza anisotrópica da madeira, e se o teor de umidade relativa do ambiente local onde o painel de MLCC for instalado for muito diferente da umidade do local de fabricação do painel podem surgir fissuras devido as tensões de tração na madeira. A presença destas fissuras podem dificultar a venda do produto no mercado devido tanto ao aspecto visual quanto a garantia de qualidade do painel. Uma das alternativas para reduzir estas fissuras consiste em posicionar as lamelas com os anéis de crescimento alinhados para a mesma direção, e não invertidos como é recomendado, porém este arranjo não irá ajudar na redução de uma possível deformação do painel. Outra alternativa consiste em fazer uma borda em torno do painel para impedir maiores deslocamentos das lamelas, no entanto isto acrescenta uma etapa de produção a mais no processo.

Algumas fissuras no painel ou nas bordas não acarreta um impacto significativo nas propriedades de rigidez e resistência, mas podem afetar o desempenho térmico, facilitar a difusão da umidade, afetar o desempenho de resistência ao fogo, e de forma mais ampla, afetar o desempenho energético do edifício como um todo.

3.4 Requisitos do MLCC (CLT)

3.4.1 Tolerâncias finais dos painéis

A norma ANSI/APA PRG 320/2011 recomenda que a espessura máxima do painel não exceda à 508 mm (20 polegadas), devido às dificuldades durante a fabricação, prensagem, transporte e manuseio. As tolerâncias para o painel são:

- Espessura: $\pm 1,6$ mm ou 2% da espessura do painel de MLCC , o que for maior;
- Largura: $\pm 3,2$ mm da largura do painel de MLCC ;
- Comprimento: $\pm 6,4$ mm do comprimento do painel de MLCC .

As texturas ou demais acabamentos podem exceder as tolerâncias especificadas porém caso haja perda de seção acima do permitido o projetista deve compensar a perda da seção devida a esta alteração.

O esquadreamento do painel também é importante, de modo que a diferença medida entre as duas diagonais traçadas entre os dois cantos do painel não podem ter valores superiores a

3,2mm. A retidão do painel medida com a formação de uma linha reta entre uma borda e outra do painel não deve exceder uma tolerância máxima de 1,6 mm.

3.4.2 *Classes de resistência*

A norma ANSI/APA PRG 320/2011 criou sete classes de resistência e três grupos de espécies de madeira para padronizar o produto tanto nos Estados Unidos quanto no Canadá. Essa classificação é baseada em dois tipos: a caracterização mecânica que leva em consideração a resistência e a rigidez à flexão e a resistência ao cisalhamento, e a classificação visual das peças, que considera os defeitos naturais presentes nas lamelas. Isso permite aos fabricantes ter opções de espécies para a confecção do MLCC, ao mesmo tempo em que dá aos projetistas os dados necessários do material que irá ser empregado.

Estas classes de tensão publicadas no Anexo A da ANSI/APA PRG 320/2011 foram baseadas nas seguintes espécies comuns nos Estados Unidos e Canadá: Douglas fir-larch (*Pseudotsuga menziesii*), Spruce Pine-fir (grupo de madeiras canadenses de média densidade) e Southern Pine (conjunto de quatro espécies de Pinus americano: *Pinus taeda*, *Pinus palustris*, *Pinus echinata* e *Pinus elliottii*) (FPL - AN AMERICAN WOOD, 1985).

- E1: 1950f – 1,7E Spruce pine-fir MSR: madeira classificada mecanicamente em todas as camadas paralelas e madeira classificada visualmente classe Número 3 de Spruce pine-fir em todas as camadas perpendiculares.
- E2: 1650f – 1,5E Douglas fir MSR: madeira classificada mecanicamente em todas as camadas paralelas e madeira classificada visualmente classe número 3 de Douglas fir em todas as camadas perpendiculares.
- E3: 1200f – 1,2E Madeiras macias do Leste (dos EUA), espécies do Norte e do lado ocidental (dos EUA) MSR: madeira classificada mecanicamente em todas as camadas paralelas e madeira classificada visualmente classe número 3 de madeiras macias do Leste (dos EUA), espécies do Norte e do lado ocidental (dos EUA) em todas as camadas perpendiculares.
- E4: 1950f – 1,7E Southern pine MSR: madeira classificada mecanicamente em todas as camadas paralelas e madeira classificada visualmente classe número 3 de Southern pine em todas as camadas perpendiculares.
- V1: Número 2 Douglas fir: madeira classificada visualmente classe número 2 em todas as camadas paralelas e Número 3 em todas as camadas perpendiculares.

- V2: Num. 1 / Num. 2 madeira Spruce pine-fir: madeira classificada visualmente classe número 1 e 2 em todas as camadas paralelas e número 3 em todas as camadas perpendiculares.
- V3: Num. 2 Southern pine: madeira classificada visualmente classe número 2 em todas as camadas paralelas e número 3 em todas as camadas perpendiculares.

A classificação visual é realizada conforme procedimentos descritos pelo American Lumber Standart Committee, onde são considerados os tamanhos e posições dos defeitos naturais das madeiras, principalmente de coníferas. (CARREIRA, 2003) apresenta um estudo detalhado das normas de classificação visual de coníferas e seus critérios que relacionam os defeitos naturais como nós, esmoados, inclinação de fibras, rachaduras anelares passantes e superficiais, densidade, com uma nota classificatória, onde a madeira com menor índice de defeitos, tem a melhor nota e a madeira com maior índice de defeitos admissível tem a menor nota. Em vigas de madeira laminada colada as madeiras com classes SS e S1 são posicionadas nas regiões de maiores solicitações, e as de menores classes na região central da viga próxima a linha neutra, onde a solicitação é menor (CALIL NETO, 2011). A tabela 2 mostra as dimensões dos defeitos naturais admitidos para cada classe.

Tabela 2: Dimensões admitidas dos defeitos em cada classe.

Classe visual	Nós		Inclinação das fibras	Rachas anelares		Fendas
	Face estreita e canto da face larga.	Centro da face larga.		Passantes	Superficial	
SS	20%	35%	1 : 12	1 vez larg.	até 60 cm	1 vez larg.
nº 1	25%	45%	1 : 10	1 vez larg.	até 60 cm	1 vez larg.
nº 2	33%	50%	1 : 08	1,5 vez. larg.	até ¼ comp.	1,5 vez.
nº 3	50%	75%	1 : 04	1/6 comp. peça	sem limites	1/6 comp. peça

Fonte: CARREIRA (2003).

O Wood Handbook mostra que as classes usadas nos EUA para descrever o grau de defeitos naturais são nomeadas como sendo Número 1, Número 2, Número 3 e Número 4, como exemplifica a figura 7 (FPL-FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010).

Figura 7: Classes de madeira classificadas visualmente.

FONTE: Wood Handbook – Forest Products Laboratory 2010, p. 153

As classes de tensão E1, E2, E3 e E4 possuem classificação mecânica, ou seja, são testadas por meio de aparelhos que realizam a classificação das peças onde é possível obter o Modulo de Elasticidade (MOE) ou Modulo de Young, além da densidade das peças. Frequentemente o termo MSR é usado logo após a classe ou nome da madeira para mostrar que ela foi testada por meio de aparelhos que usam a tecnologia MSR (machine stress rated), ou seja, maquina de classificação por tensão. Por exemplo, a classe de tensão E1: 1950f – 1,7E exige uma resistência à flexão característica (f_{b0}) de pelo menos 1950 psi (13,44 MPa) e um módulo de elasticidade de $1,7 \times 10^6$ psi (11,7 GPa). Da mesma forma para as demais classes de tensão, cada qual com um limite mínimo de resistência à flexão e um módulo de elasticidade. A tabela 3, apresenta para todas as classes, os valores das propriedades mecânicas, observando que os valores na

tabela 3 e 4 são valores característicos e foram obtidos como explicado na alínea (d) abaixo das tabelas.

Tabela 3: Valores (em PSI) característicos exigidos em testes para painéis CLT ^(a, b, c, d)

Direção do maior comprimento							Direção do menor comprimento			
CLT Classes	f_{b0} (psi)	E_0 (10 ⁶ psi)	$f_{t,0}$ (psi)	$f_{c,0}$ (psi)	$f_{v,0}$ (psi)	$f_{s,0}$ (psi)	$f_{b,90}$ (psi)	E_{90} (10 ⁶ psi)	$f_{v,90}$ (psi)	$f_{s,90}$ (psi)
E1	4095	1,7	2880	3420	425	140	1050	1,2	425	140
E2	3465	1,5	2140	3230	565	190	1100	1,4	565	190
E3	2520	1,2	1260	2660	345	115	735	0,9	345	115
E4	4095	1,7	2885	3420	550	180	1205	1,4	550	180
V1	1890	1,6	1205	2565	565	190	1100	1,4	565	190
V2	1835	1,4	945	2185	425	140	1050	1,2	425	140
V3	2045	1,6	1150	2755	550	180	1205	1,4	550	180

FONTE: ANSI/APA PRG 320/2011, p. 10.

Tabela 4: Valores (em MPa) característicos exigidos em testes para painéis CLT ^(a, b, c, d)

Direção do maior comprimento							Direção do menor comprimento			
CLT Classes	f_{b0} (MPa)	E_0 (MPa)	$f_{t,0}$ (MPa)	$f_{c,0}$ (MPa)	$f_{v,0}$ (MPa)	$f_{s,0}$ (MPa)	$f_{b,90}$ (MPa)	E_{90} (MPa)	$f_{v,90}$ (MPa)	$f_{s,90}$ (MPa)
E1	28	11721	20	24	2,9	0,9	7,25	8274	2,9	0,9
E2	24	10342	15	22	3,9	1,3	7,6	9653	3,8	1,3
E3	17	8274	8,5	19	2,4	0,8	5,0	6205,5	2,3	0,8
E4	28	11721	20	24	3,8	1,2	8,30	9653	3,7	1,2
V1	13	11032	8,5	17	3,9	1,3	7,6	9653	3,9	1,3
V2	12	9653	6,5	15	2,9	0,9	7,25	8274	2,9	0,9
V3	14	11032	8,0	19	3,8	1,2	8,30	9653	3,8	1,2

FONTE: Adaptado de ANSI/APA PRG 320/2011, p. 10.

(a) Símbolos:

$f_{b,0}$ – resistência à flexão na direção paralela à força aplicada e $f_{b,90}$ na direção perpendicular;

E_0 módulo de elasticidade na direção paralela à força aplicada e E_{90} na direção perpendicular;

$f_{t,0}$ – resistência à tração direção paralela à força aplicada;

$f_{c,0}$ – resistência à compressão direção paralela à força aplicada;

$f_{v,0}$ – resistência à cisalhamento direção paralela à força aplicada e $f_{b,90}$ na direção perpendicular;

$f_{s,0}$ – resistência ao cisalhamento interlaminar (rolling shear) direção paralela à força aplicada e $f_{s,90}$ na direção perpendicular;

(b) Os valores tabelados são valores de teste e não devem ser usados para projetos.

(c) Categorias de CLT personalizados que não estão listados nesta tabela serão permitidas em conformidade com a Seção 8.2.1. da norma ANSI/APA PRG 320/2011.

(d) Os valores característicos devem ser determinados da seguinte forma a partir do valor publicado de projeto permitido, salvo justificada pela agência aprovação:

$f_b = 2,1 \times \text{tensão de flexão admissível publicado (Fb)},$

$f_t = 2,1 \times \text{tensão de tração admissível publicado (Ft)},$

$f_c = 1,9 \times \text{tensão de compressão paralela às fibras admissível publicado (Fc)},$

$f_v = 3,15 \times \text{tensão de cisalhamento admissível publicado (Fv)},$

$f_s = 1/3 \times \text{o valor de calculado de } f_v.$

Na Europa ainda não há uma norma exclusiva sobre CLT, o documento técnico European Technical Approval ETA 06/0138 apresenta os valores mínimos de resistência do CLT para obtenção do selo CE – Conformidade Europeia. A tabela 5 apresenta os dados indicados neste documento (ETA 06/0138, 2012).

Tabela 5: Valores resistência e rigidez para CLT segundo ETA 06/0138

	Requisito	Método de verificação	Classe /categoria de uso / valor numérico
Resistência Mecânica e estabilidade cargas ou carregamento perpendiculares para painel maciço de madeira			
<i>Módulo de elasticidade ³⁾</i>	Paralelo à fibras na borda ($E_{0,med}$)	Anexo 4 CUAP 03.04/06, 4.1.1.1	12.000 MPa
	Perpendicular as fibras do painel ($E_{90,med}$)	EN338	370 MPa
<i>Módulo de Cisalhamento ³⁾</i>	Paralelo às fibras no painel ($G_{90,med}$)	EN338	690 MPa
	Perpendicular às fibras no painel, módulo de rolling shear ($G_{90,med}$)	CUAP 03.04/06, 4.1.1.1	50 MPa
<i>Res. à flexão</i>	Perpendicular às fibras do painel ($f_{m,k}$)	Anexo 4 CUAP 03.04/06, 4.1.1.1	24 MPa

<i>Res. à tração</i>	Perpendicular as fibras do painel ($f_{t,90,k}$)	EN 1194, reduzida	0,12 MPa
<i>Res. à compressão</i>	Perpendicular as fibras do painel ($f_{c,90,k}$)	EN 1194	2,7 MPa
<i>Res. ao cisalhamento</i>	Paralelo às fibras no painel ($f_{v,k}$)	EN 1194	2,7 MPa
	Perpendicular às fibras do painel, (tensão de rolling shear) ($f_{v,R,k}$)	Anexo 4 CUAP 03.04/06, 4.1.1.3	0,8 a 1,2 MPa
cargas ou carregamento em um plano de laje de madeira maciça			
<i>Módulo de elasticidade ³⁾</i>	Paralelo à fibras na borda ($E_{0,med}$)	A_{net} , I_{net} , Anexo 4 CUAP 03.04/06, 4.1.2.1	12000 MPa
<i>Módulo de Cisalhamento ³⁾</i>	Paralelo às fibras no painel ($G_{90,med}$) ¹⁾	A_{net} , Anexo 4 CUAP 03.04/06, 4.1.2.3	500 MPa ¹⁾
<i>Res. à flexão</i>	Paralelo às fibras do painel ($f_{m,k}$)	W_{net} , Anexo 4 CUAP 03.04/06, 4.1.2.1	24 MPa
<i>Res. à tração ²⁾</i>	Paralelo às fibras do painel ($f_{t,0,k}$)	EN 1194	16,5 MPa
<i>Res. à compressão</i>	Paralelo às fibras do painel ($f_{c,90,k}$)	EN 1194	24 MPa
	Carga concentrada, Paralelo às fibras do painel ($f_{c,0,k}$)	CUAP 03.04/06, 4.1.2.2	$k_{c,0}$ anexo 4, 2,4
<i>Res. ao cisalhamento</i>	independentemente da direção do carregamento, por linha de cola ($f_{v,K,k}$)	Anexo 4 – cisalhamento por fluência	90 N/mm
	Paralelo às fibras no painel ($f_{v,k}$)	Anexo 4 – tensão de cisalhamento	3,9 a 8,4 MPa
Outras cargas			
	Deformação e duração da carga	EN 1995-1-1	Classe de serviço 1 e 2
	Fator de deformação K_{fat}	EN 1995-1-1	Equivalente ao GLT

	Fator de Modificação K_{mod}	EN 1995-1-1	Equivalente ao GLT
	Estabilidade dimensional – o teor de umidade durante o serviço não deve mudar para não gerar deformações adversas		
	Fixadores	Anexo 5	Classe de serviço 1 e 2
<i>Tolerância dimensional</i>	Contração perpendicular ao plano do painel de madeira maciça	0,24% em espessura por ponto % de variação da umidade	
	Contração no plano do painel de madeira maciça como laje	0,01% em comprimento por ponto % de variação de umidade	

- 1) Este valor é aplicável para 2 estruturas dimensionais, painéis ortotrópicos. Para uma análise viga simplificada, esse valor será reduzido para 50%.
- 2) No caso de uma distribuição da tensão não uniforme, a resistência à flexão característica pode ser aplicada.
- 3) Para a determinação dos valores do quantil de 5% da propriedade de rigidez, os valores médios podem ser multiplicados por 5/6.

3.5 Métodos para dimensionamento de estruturas em MLCC (como elementos de pisos e lajes)

O tópico a seguir resume os principais métodos de cálculo para elementos de MLCC usados como piso e laje e apresenta um deles em maiores detalhes.

Desde que começou a ser usado em países da Europa, foram desenvolvidos alguns métodos de análise estrutural para o dimensionamento da estrutura de MLCC, sendo que pelo menos três deles são comumente utilizadas atualmente, a saber: 1 - método gama (γ -method), 2 - Composite Theory (k-méthod) e, 3 - Shear analogy method (conhecido como método de Kreuzinger) (FPINNOVATION, 2011).

3.5.1 Método Gama (anexo B do Eurocode)

O primeiro é a teoria de vigas unidas mecanicamente, ou método gama, que consta no anexo B da norma de estruturas de madeira europeia, (Eurocode 5 EN 1995,1-1-2004, p. 112), para cálculo de elementos cruzados. Nesta teoria, é acrescentado um fator de eficiência de conexão chamado de γ_i , que pode assumir valor igual a 1 caso os elementos estejam completamente colados ou igual a 0 se os elementos não estiverem completamente soltos. Esta abordagem fornece uma solução exata para a equação diferencial para vigas/painéis apoiadas com uma

distribuição senoidal de carga. No entanto, as diferenças entre a solução exata e aqueles para uma carga ou pontos distribuídos uniformemente são aceitáveis para a prática de engenharia (FPINNOVATION, 2011). Este método também está sendo incorporado à norma NBR 7190 – Projetos de Estruturas de Madeira através da sua atual revisão, no item que versa sobre peças compostas, como no caso de ligações pregadas ou parafusadas para compor seções “T” e “I”, (figura 8) (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997).

Figura 8: Seções transversais e distribuições de tensões do Eurocode 1993. FONTE: Projeto de revisão da NBR 7190

Pelo método gama, foi necessária uma adaptação da equação para o cálculo mais apropriado, sendo esta mudança feita através do fator γ_i , que originalmente era calculado como a equação 1 a seguir:

$$\gamma_i = \frac{1}{\left[1 + \frac{\pi^2 \cdot E_i \cdot A_i \cdot S_i}{K_i \cdot L^2} \right]} \quad \text{Equação 1}$$

Sendo:

E_i = módulo de elasticidade de cada elemento da seção transversal;

A_i = área de cada parte da seção transversal;

S_i = espaçamento dos pregos na interface do elemento i com o elemento 2;

K_i = módulo de deslizamento da ligação do elemento i com o elemento 2;

L = vão efetivo da viga (L = vão, para vigas biapoiadas), ($L = 0,8 \times \text{vão}$, para vigas contínuas) e ($L = 2 \times \text{vão}$, para vigas em balanço).

Para o uso no cálculo de painéis de MLCC é necessário levar em consideração a deformação de cisalhamento através de uma deformação global na junção entre as peças de madeira, diferentemente do caso de ligações pregadas ou parafusadas (FPINNOVATION, 2011). Com isso as componentes S_i e K_i da equação apresentada foram substituídas pelas componentes $\bar{h}$, G_{90} e b , sendo, portanto:

$$\frac{\bar{h}}{G_{90} \cdot b}$$

Equação 2

Sendo:

$\bar{h}$ = espessuras das camadas transversais do MLCC ;

G_{90} = módulo de rigidez do rolling shear;

b = espessura total da laje de MLCC .

Portanto, substituindo a equação 2 na equação 1 temos:

$$\gamma_i = \frac{1}{\left[1 + \frac{\pi^2 \cdot E_i \cdot A_i \cdot \bar{h}}{G_{90} \cdot L^2 \cdot b} \right]}$$

Equação 3

O fator γ_i entra como redutor no cálculo da inércia efetiva do MLCC .

O módulo de rigidez G_{90} pode ser obtido através das seguintes relações apresentadas nas equações 4 e 5, segundo a norma (ANSI/APA, 2011).

$$G_{90} = \frac{G_0}{10} \quad \text{Equação 4}$$

e

$$G_{90} = \frac{G_0}{16} \quad \text{Equação 5}$$

Sendo:

G_0 = módulo de rigidez paralelo ao sentido da maior força;

E_0 = módulo de elasticidade na flexão paralelo ao sentido da maior força.

A inércia do painel de MLCC deve ter uma redução devido a sua característica cruzada que faz com que as camadas que trabalhem na direção longitudinal, não contribuem para a resistência na direção perpendicular. A figura 9 ilustra este comportamento.

Figura 9: Diagrama de forças normais e de cisalhamento em uma placa de CLT . FONTE: European Technical aproval ETA 06/0138 - KLH

Se o painel de MLCC for usado como laje, dependendo da posição onde os apoios estiverem colocados, somente as camadas longitudinais irão trabalhar para a resistência da carga enquanto as transversais não irão contribuir, e no caso de inverter a posição dos apoios, acontece o inverso. Se o painel for usado como elemento de parede, as camadas que estão na mesma direção da principal carga irão trabalhar como colunas e as perpendiculares a esta irão trabalhar

como vigas. Portanto a seção efetiva que está resistindo ao carregamento não é a seção total do painel e necessita ser calculada, e com isso a sua inércia total será reduzida. Este cálculo é feito através da equação B.1 do item B.2 do Eurocode 1995 (EN 1995, 2004) da rigidez efetiva (EI_{eff}), como descrito na equação 6:

$$(EI)_{ef} = \sum_{i=1}^3 (E_i \cdot I_i + \gamma_i \cdot E_i \cdot A_i \cdot a_i^2) \quad \text{Equação 6}$$

Sendo:

E_i = módulo de elasticidade da camada i ;

I_i = inércia das camadas longitudinais;

$A_i = b_i \times h_i$ = area da camada i ;

a_i = distância do centróide da área de cada elemento que compõe a seção transversal até a linha neutra y-y;

A inércia é calculada por:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad \text{Equação 7}$$

Sendo:

b = largura da base do painel;

h = altura da camada;

A figura 10 mostra um exemplo de um painel de 5 camadas onde é ilustrado as propriedades h , $\bar{h}$, a e largura b .

Figura 10: Características geométricas para o cálculo de um painel de 5 camadas. FONTE: CLT Handbook, Canadian Edition, 2013)

Existem casos em que o módulo de elasticidade E_i é diferente em cada camada, ou seja, existe um E_1 , E_2 e um E_3 que devem ser calculados separadamente, e casos em que o módulo de elasticidade de todas as camadas são iguais, então $E_1=E_2=E_3$.

Para o caso de módulos de elasticidade diferentes, é necessário o cálculo do γ para cada camada, ou seja, um γ_1 , γ_2 e um γ_3 . No caso de módulos iguais $E_1=E_2=E_3$, e simetrias geométricas das camadas, os valores $\gamma_1=\gamma_2$.

Os parâmetros geométricos a_1 , a_2 e a_3 são calculados pelas equações a seguir:

$$a_1 = \frac{h_1}{2} + \bar{h}_1 + \frac{h_2}{2} - a_2 \quad \text{Equação 8}$$

$$a_3 = \frac{h_2}{2} + \bar{h}_2 + \frac{h_3}{2} - a_2 \quad \text{Equação 9}$$

$$a_2 = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot \left(\frac{h_1}{2} + \bar{h}_1 + \frac{h_2}{2}\right) - \gamma_3 \cdot E_3 \cdot A_3 \cdot \left(\frac{h_2}{2} + \bar{h}_2 + \frac{h_3}{2}\right)}{\sum_{i=1}^3 (\gamma_i \cdot E_i \cdot A_i)} \quad \text{Equação 10}$$

Sendo que no caso de:

$$E_1 = E_3 ;$$

$$A_1 = A_3 \text{ e}$$

$$\frac{h_1}{2} + \bar{h}_1 + \frac{h_2}{2} = \frac{h_2}{2} + \bar{h}_2 + \frac{h_3}{2}$$

Equação 11

Temos:

$$\therefore a_2 = 0$$

Nessa mesma situação, o cálculo da rigidez efetiva EI se resume a:

$$EI_{eff} = EI \left[3 + \frac{2 \cdot \gamma \cdot A \cdot a^2}{I} \right]$$

Equação 12

A Inércia efetiva do painel será, portanto:

$$I_{eff} = \frac{EI_{eff}}{E}$$

Equação 13

A partir da inércia efetiva pode-se calcular a tensão perpendicular as fibras atuantes no painel, através das equações abaixo:

$$\sigma_{90,d} = \frac{M}{\frac{I_{eff}}{y}}$$

Equação 14

Sendo:

M = momento devido a carga sobre o painel;

y = distância entre a face externa do painel e centroide na direção y-y.

A equação 6.3 do EN 1995 define o limite da tensão como sendo:

$$\sigma_{c,90,d} \leq k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}$$

Equação 15

Sendo:

$f_{c,90,d}$ = é a resistência de projeto à compressão perpendicular às fibras;

$k_{c,90}$ = fator que considera a configuração de carga, a possibilidade de separação e o grau de deformação à compressão. No item 3.6 do European Technical Approval ETA-06/0138 é recomendado que o valor do $k_{c,90}$ seja 2,2 para apoios ou cargas colocadas no final do membro,

ou $k_{c,90}$ 3,0 para as áreas de contato com pequenas rotações, por exemplo suportes internos de lajes contínuas com vãos constantes. De forma mais geral, o item 6.1.5 do Eurocode 1995-1-1:2004 abrange outras situações de carga onde o valor do $k_{c,90}$ pode ser calculado, porém em nenhum caso terá valor menor que 1 ou maior que 4.

O $f_{c,90d}$ é calculado com a equação 16:

$$f_{c,90,d} = \frac{f_{c,90,k}}{k_{mod}} \quad \text{Equação 16}$$

Para a resistência a flexão no painel MLCC , o calculo é feito conforme a equação 17:

$$\Delta_L = \frac{5 \cdot w \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_{eff}} \quad \text{Equação 17}$$

Onde:

W = Carga sobre o painel MLCC ;

L = vão;

E = módulo de elasticidade do painel;

I_{eff} = Inércia efetiva;

O European Technical Approval ETA-06/0138, no item 3.4 define como $L/400$ o limite para deflexão para piso e lajes em MLCC , ou seja:

$$\Delta_L \leq \frac{L}{400} \quad \text{Equação 18}$$

3.5.2 Método K (*composite theory*)

Segundo o item 2.3.2 do CLT Handbook, Canadian Edition, este método é baseado nas formas como a indústria de painéis dimensiona seus produtos, principalmente o compensado que tem propriedades parecidas com o MLCC devido a sua natureza cruzada, similar ao MLCC . Na versão original deste método, o módulo de elasticidade na flexão perpendicular as fibras não é levado em consideração, ou seja $E_{90} = 0$. Para superar esta deficiência, calcula-se a rigidez efetiva EI_{eff} baseada nos seguintes pressupostos:

- A relação tensão-deformação e a hipótese de um plano de Bernoulli para uma seção cruzadas remanescente é admitida;
- O método de cálculo baseia-se nas propriedades de resistência e de rigidez de todas as camadas; existem camadas com carga aplicada paralelamente às fibras e outras com cargas perpendiculares às fibras. A Rigidez das camadas cruzadas é admitida como sendo $E_{90} = E_0 / 30$;
- A deformação de cisalhamento não é levada em conta neste método. Portanto, o método pode ser utilizado somente para casos onde a relação altura-profundidade é grande, ou seja, $l / h \geq 30$);
- Fator K: os fatores de composição (K) são fatores que modificam as propriedades dos painéis e variam de acordo com a configuração de aplicação de carga.

A figura 11 apresenta estas configurações.

Load Configuration	k_i
$k_1 = 1 - \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0}\right) \cdot \frac{a_{m-2}^3 - a_{m-4}^3 + \dots \pm a_1^3}{a_m^3}$
$k_2 = \frac{E_{90}}{E_0} + \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0}\right) \cdot \frac{a_{m-2}^3 - a_{m-4}^3 + \dots \pm a_1^3}{a_m^3}$
$k_3 = 1 - \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0}\right) \cdot \frac{a_{m-2} - a_{m-4} + \dots \pm a_1}{a_m}$
$k_4 = \frac{E_{90}}{E_0} + \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0}\right) \cdot \frac{a_{m-2} - a_{m-4} + \dots \pm a_1}{a_m}$

Figura 11: Fatores de Composição “K”. FONTE: Blass, 2004 apud CLT Handbook, Canadian Edition, 2011

A partir dos fatores de composição é possível obter os valores das características físicas dos painéis, conforme ilustrado na figura 12:

Loading	To the grain of outer skins	Effective strength value	Effective stiffness value
Perpendicular to the plane loading			
Bending	Parallel	$f_{b,0,eff} = f_{b,0} \cdot k_1$	$E_{b,0,eff} = E_0 \cdot k_1$
	Perpendicular	$f_{b,90,eff} = f_{b,0} \cdot k_2 \cdot a_m/a_{m-2}$	$E_{b,90,eff} = E_0 \cdot k_2$
In-plane loading			
Bending	Parallel	$f_{b,0,eff} = f_{b,0} \cdot k_3$	$E_{b,0,eff} = E_0 \cdot k_3$
	Perpendicular	$f_{b,90,eff} = f_{b,0} \cdot k_4$	$E_{b,90,eff} = E_0 \cdot k_4$
Tension	Parallel	$f_{t,0,eff} = f_{t,0} \cdot k_3$	$E_{t,0,eff} = E_0 \cdot k_3$
	Perpendicular	$f_{t,90,eff} = f_{t,0} \cdot k_4$	$E_{t,90,eff} = E_0 \cdot k_4$
Compression	Parallel	$f_{c,0,eff} = f_{c,0} \cdot k_3$	$E_{c,0,eff} = E_0 \cdot k_3$
	Perpendicular	$f_{c,90,eff} = f_{c,0} \cdot k_4$	$E_{c,90,eff} = E_0 \cdot k_4$

Figura 12: Características físicas efetivas a partir do fator K. FONTE: CLT Handbook, Canadian Edition, 2011

A partir destes valores os cálculos e verificações podem ser realizados com o uso dos requisitos do Eurocode 1995 ou a norma de estruturas de madeira de cada país.

3.5.3 Método "Shear Analogy" (Kreuzinger)

Este método de cálculo é, de acordo com a Blass e Fellmoser, (2004) apud CLT Handbook FPInnovations, (2011), o método mais preciso para o cálculo da resistência do MLCC. É usado, com a ajuda de um programa de análise numérica, para considerar os diferentes módulos de elasticidade e módulos de corte de camadas individuais para praticamente qualquer configuração de painéis. O efeito das deformações de corte não é desprezado. Neste método, as características de uma seção transversal multi-camadas ou de superfície são separadas em dois feixes virtuais A e B. No A é dado a soma inerente da resistência à flexão das camadas individuais ao longo dos seus eixos neutros, enquanto para o feixe B os pontos da resistência à flexão são dados através do teorema de Steiner, também a resistência ao cisalhamento na flexão, bem como a flexibilidade de todas as ligações. Estas duas vigas são ligadas como sendo um membro rígido de uma rede infinita, de modo que a flexão obtida entre as vigas A e B pode ser considerada como sendo iguais. Através da sobreposição do momento de fletor e as forças de cisalhamento (tensões) de ambos os feixes, o resultado final de toda a seção transversal pode ser obtida, como ilustrado na figura 13.

Figura 13: Diferenciação dos feixes A e B no Shear Analogy. FONTE: Adaptado de CLT Handbook, Canadian Edition, FPInnovation, 2011.

A partir desta analogia, é possível deduzir as equações para o cálculo da rigidez efetiva de cada camada $(EI)_{i, \text{eff}}$.

3.6 Rolling Shear: Cisalhamento com escorregamento das fibras

O rolling shear é um fenômeno que pode ocorrer nas camadas transversais do painel durante a aplicação da carga, geralmente na flexão, devido às forças cisalhantes que estão sendo aplicadas no painel, mas que nas camadas transversais é aplicada perpendicularmente a direção das fibras das lamelas, de forma que estas fibras tem a tendência de romper as ligações e “rolar” umas sobre as outras. O efeito é semelhante ao efeito produzido num teste de tração perpendicular as fibras, porém neste caso cada face da lamela está sendo tracionada numa direção oposta a outra face. A figura 14 demonstra como ocorre o rolling shear e a figura 15 um exemplo real.

Figura 14: Exemplo de rolling shear em um MLCC de 5 camadas. FONTE: CLT Handbook FPInnovations, 2011.

Figura 15: Exemplo de rolling shear numa placa fletida. FONTE: Chen, Y. (2011)

A norma ANSI/APA PGR 320 (2011) apresenta algumas relações entre o módulo de elasticidade e o módulo de rigidez ao cisalhamento paralelo à aplicação da carga, com as quais é possível se obter o valor do rolling shear (G_{90}), também chamado de módulo de rigidez ao cisalhamento perpendicular à aplicação da carga, como demonstrado pelas equações 19 e 20.

$$G_0 = \frac{E_0}{16} \quad \text{Equação 19}$$

Onde:

E_0 = módulo de elasticidade na flexão paralelo ao sentido da maior força aplicada ao painel;

G_0 = módulo de rigidez ao cisalhamento paralelo à aplicação da maior força;

$$G_{90} = \frac{G_0}{10} \quad \text{Equação 20}$$

G_{90} = módulo de rigidez ao cisalhamento perpendicular à aplicação da maior força;

Esta relação também é usada na Europa pelo documento técnico de aprovação de produtos para obtenção do selo “CE” (comunidade europeia), o European Technical Approval ETA-06/0138. Existem propostas de teste para o cálculo mais preciso do rolling shear, entre eles o modelo abaixo, desenvolvido por Simon Aicher e Gerhard Dill-Langer (2000), onde é usado corpos de prova de pequenas dimensões, como ilustrado na figura 16. (AICHER e DILL-LANGER, 2000)

Figura 16: Modelo para ensaio de rolling shear. FONTE: Aicher, S. e Dill-Langer, G., (2000),

Neste trabalho, para obter o módulo de rigidez perpendicular ao sentido da força na camada transversal, foi montado um ensaio semelhante ao apresentado por Aicher e Dill-Langer, (2000), e o cálculo foi obtido a partir da equação que relaciona o módulo de elasticidade com a tensão e a deformação:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \rightarrow G'_{90} = \frac{\sigma}{\frac{\Delta l}{l}} = \frac{F/A}{\Delta l/l} = \frac{F \cdot l}{A \cdot \Delta l} \quad \text{Equação 21}$$

Onde:

G'_{90} = é o módulo de rigidez perpendicular ao sentido da força na camada transversal. Foi nomeado como G' para diferenciar do G usado pela norma americana ANSI/APA PGR 320 (2011);

F = força cisalhante aplicada no corpo de prova;

A = área da seção cisalhante;

l = comprimento inicial do corpo de prova;

Δl = Variação do comprimento em relação ao ponto inicial do ensaio.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais utilizados para fabricação da MLCC

A MLCC que é o alvo deste estudo é uma placa de fabricada utilizando madeira de *Pinus elliottii* proveniente de florestas do nordeste do estado do Paraná e adesivo a base de melamina ureia-formaldeído.

4.2 Características do *Pinus elliottii*

A madeira utilizada para a confecção do painel de MLCC usado neste trabalho foi de *Pinus elliottii*, proveniente de florestas plantadas no norte do Estado do Paraná, e beneficiadas em uma serraria da cidade de Ibaiti, também no Paraná. O *Pinus elliottii* é conífera natural da América do Norte e foi introduzida no Brasil, principalmente na região Sudeste e Sul, e no estado do Mato Grosso do Sul, por volta das décadas de 1950 e 60. Atualmente a área com plantações de pinus spp, ou seja, de vários gêneros da espécie pinus, ocupam uma área de mais de 1,5 milhões de ha, segundo dados do SNIF - Sistema Nacional de Informações Florestais, portal de informações do governo federal, como é possível verificar através da figura 17 (SNIF, 2014) .

Figura 17: Área com plantações de pinus spp. no Brasil em 2013. FONTE:SNIF, 2014.

As propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Pinus elliotti* são apresentadas na tabela 6, baseadas no anexo E da norma NBR 7190 (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997).

Tabela 6: Propriedades de resistência e rigidez do *Pinus elliotti*

Nome Comum	Nome Científico	P_{ap} (12%) [kg/m ³]	Comp. f_{c0} [MPa]	Tração f_{t0} [MPa]	Tração f_{t90} [MPa]	Cisalhamento f_{v0} [MPa]	Mod. Elast. E_{c0} [MPa]
<i>Pinus</i>							
<i>Pinus elliottii</i>	<i>elliottii</i> <i>var. elliottii</i>	560	40,4	66,0	2,5	7,4	11.889

4.3 Características do adesivo

O adesivo utilizado para unir as lamelas e formar o painel foi o MUF 1242 com catalisador 2542, fabricado e fornecido pela empresa Akzo Nobel / Casco adesives. Este produto é uma resina melaminica-urea formaldeído com catalisador tipo líquido-líquido, com as seguintes características (AKZO NOBEL, 2008):

- Coloração: adesivo cor branca; catalisador cor branca acinzentada;
- Proporção de mistura para colagem de vigas: 100 partes por peso de cola para 20 a 15 partes por peso de catalisador;
- Tempo para início da cura (potlife):
 - à 15°C – 150 min. para 20 partes de catalisador ou 120 para 25 partes;
 - à 20°C – 100 min. para 20 partes de catalisador ou 80 para 25 partes;
 - à 30°C – 50 min. para 20 partes de catalisador ou 40 para 25 partes;
- Gramatura: recomenda-se uma gramatura de 400 a 450g de adesivo por m²;
- Tempo de montagem (assembly time):
 - Tempo máximo (min): 110 para 20 partes de catalisador e 100 para 25 partes;
 - Tempo mínimo (min): 10 minutos para ambos os casos;
- Tempo de colagem:
 - à 20°C – 10 horas para 20 partes de catalisador ou 9 horas para 25 partes;
 - à 30°C – 3 horas para 20 partes de catalisador ou 2,45 horas para 25 partes;
- Pressão: Mínimo de 0,5 N/mm² (5 kg/cm²) para madeiras com densidade baixa, como o pinus. Mínimo de 1,0 N/mm² (10 kg/cm²) para madeiras com densidade elevada, como

as madeiras de lei. Para a produção de vigas laminadas coladas recomenda-se no mínimo $0,7 \text{ N/mm}^2$ (7 kg/cm^2) para pranchas de até 33 mm e $0,9 \text{ N/mm}^2$ (9 kg/cm^2) para pranchas de até 45 mm.

4.4 Fabricação do painel MLCC

A madeira da pinus foi doada pela Serraria Ibaiti, que também disponibilizou a prensa e espaço físico para a confecção do painel. O adesivo foi doado pela empresa Akzo Nobel.

A quantidade de madeira utilizada foi:

- 33 tábuas com $130 \times 16 \times 2130 \text{ mm}$ para a formação da camada superior, inferior e central;
- 32 tábuas com $130 \times 16 \times 1500 \text{ mm}$ para a formação das duas camadas centrais intermediárias;

Foram utilizados 10 kg de adesivo Akzo Nobel Melamina uréia formaldeído 1242 e 2 kg de catalisador 2542.

O aplainamento foi realizado numa plaina automática 4 faces (S4S) marca Omil, a prensagem foi realizada em uma prensa para compensado marca Becker e Van Kumer, ambas pertencentes a Serraria Ibaiti. As dimensões das peças foi aferida com o uso de um paquímetro mecânico de 150 mm marca Mitutoyo.

A pesagem das proporções para mistura do adesivo e do catalisador, e a pesagem para ajuste da gramatura de cola, foram realizadas numa balança digital marca Filizola, e aplicação do adesivo foi realizada com uso de pincéis e luvas plásticas.

O controle da umidade das peças de madeira foi realizado utilizando um medidor de umidade tipo indutivo da marca Marrari. As figuras 18, 19 e 20 ilustram os insumos utilizados.

Figura 18: Adesivo utilizado, resina Melamina-Ureia Formaldeído

Figura 19: Materiais utilizados para a aplicação do adesivo

Figura 20: Madeira de *Pinus elliottii* utilizada para confecção do painel

Para a fabricação do painel foi utilizado como base o processo descrito no item 3.3.1. As tabuas de pinus foram classificadas visualmente na serraria e aplainadas em uma plaina 4 faces. Em seguida foram destopadas no comprimento para se ajustar ao tamanho do prato da prensa, sendo as mais longas com 2130 mm e as mais curtas com 1500mm. As dimensões das lamelas foram verificadas com o uso do paquímetro.

Antes do início da aplicação do adesivo foram mensuradas as umidades das peças com o uso do medidor de umidade. A preparação do adesivo foi feita aos poucos em potes plásticos com capacidade de 1,5 kg, de forma que só era preparado mais adesivo quando se findava a aplicação do anterior evitando que o tempo de assemblagem do adesivo com um todo não fosse ultrapassado até chegar às últimas lamelas. A proporção de resina e catalisador foi de 100 partes por peso de resina para 20 partes por peso de catalisador, conforme recomendação do fabricante. Antes da aplicação do adesivo a superfície das peças foram limpas para eliminar resíduos que poderiam atrapalhar a colagem.

A gramatura do adesivo recomendada pela fabricante é de 400g/m² em um lado da lamela, ou 200g/m² passando nas duas faces. Foi utilizada neste trabalho a passagem de cola nos dois lados das lamelas para garantir a boa distribuição do adesivo sobre toda a superfície. Para a medição da gramatura, foi medida a área da lamela em m² e então calculada a quantidade de gramas necessária para cada lamela. A lamela foi pesada sem cola na balança digital, o valor obtido foi

tarado e o adesivo aplicado. Posteriormente, foi verificado se o peso do adesivo na lamela ultrapassou o valor necessário de gramas de adesivo por unidade de área.

A etapa de passagem de aplicação do adesivo e montagem do painel na prensa durou cerca de 50 minutos e ficou dentro do tempo de assemblagem do adesivo que é de 110 minutos para a proporção de 100 partes de resina para 20 partes de catalisador a 20° C de temperatura ambiente e umidade relativa do ar de 65%. A montagem das lamelas na prensa foi feita de forma manual, onde cada lamela que recebia a aplicação do adesivo era levada à prensa e colocada na posição final. A temperatura média no local foi de 25,5° C e a umidade relativa do ar foi de 37%.

O tempo de prensagem total foi de 15 h, sendo que o fabricante recomenda um tempo mínimo de 10 h para a proporção de 100 partes de resina para 20 partes de catalisador a 20° Celsius de temperatura ambiente e umidade relativa do ar de 65%.

A prensa utilizada era composta por 3 cilindros hidráulicos com uma área total de 0,22m². A pressão colocada nos cilindros foi de 100 bar (1019716 kgf/m²), o que resultou em uma força sobre o painel de 224337,52 kgf. A área do painel era de 3,19 m² que resultou numa pressão específica para a prensagem de 70325,24 kgf/m² (0,7MPa), ficando dentro da faixa de pressão indicada pelo CLT Handbook (FPINNOVATION, 2011) e acima do mínimo recomendado para colagem de madeiras de baixa densidade pelo fabricante do adesivo que é de 0,5 N/mm² (0,5MPa) no boletim técnico do adesivo. As figuras 21 a 27 ilustram as etapas de fabricação.

Figura 21: Chegada da madeira após a etapa de aplainamento

Figura 22: Medição das dimensões finais das lamelas

Figura 23: Medição da umidade das peças

Figura 24: Pesagem das partes de catalisador para preparação do adesivo

Figura 25: Aplicação do adesivo nas lamelas

Figura 26: Montagem das lamelas no prato da prensa

Figura 27: Prensagem do painel

Após a prensagem o painel foi levado para o Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeiras LaMEM, EESC-USP, onde foi esquadrejado para as dimensões finais 2115x1400x80mm e submetido aos testes. Para este estudo foram realizados testes de cisalhamento na linha de cola, delaminação, flexão, torção, compressão paralela às fibras no painel de MLCC .

4.5 Métodos de ensaio

Os métodos de ensaios apresentados a seguir são os ensaios aplicados em madeira laminada colada e madeira serrada, e serão usados como proposta para a caracterização do MLCC.

4.5.1 Teste de cisalhamento direto na linha de cola

O teste de cisalhamento da linha de cola foi feito seguindo o método de ensaio descrito no item B.18 do anexo B do projeto de revisão da norma de estruturas de madeira NBR 7190 (ABNT, 2011), Determinação das propriedades das madeiras para projeto de estruturas, que descreve os detalhes do teste.

A resistência ao cisalhamento direto na lâmina de cola paralelo às fibras da madeira laminada colada ($F_{gv,0}$) é dada pela máxima tensão de cisalhamento que pode atuar na lâmina de cola de um corpo de prova prismático, sendo dada pela equação 22:

$$F_{gv,0} = \frac{F_{g0,max}}{A_{gv,0}} \quad \text{Equação 22}$$

$F_{gv,0,max}$ é a máxima força cisalhante aplicada ao corpo de prova, em Newton (N);

$A_{gv,0}$ é a área inicial da lâmina de cola do corpo de prova, num plano paralelo às fibras, em metro quadrado (m²).

O corpo de prova para o teste de cisalhamento direto na linha de cola deve ter as dimensões indicadas na figura 28.

Figura 28: Corpo de prova para ensaio de cisalhamento na linha de cola.

FONTE: Anexo B do projeto de revisão da norma de estruturas de madeira

Na última etapa de secagem as delaminações (linhas de cola abertas) devem ser mensuradas com precisão milimétrica. As falhas e rachaduras ou linha de cola aberta devido a nós e delaminações inferiores a 2,5 mm ou com 5mm de distância de qualquer linha traçada não devem ser consideradas delaminações (CALIL NETO, 2011). A figura 30 ilustra o ciclo do ensaio..

Figura 30: Ciclo do ensaio de delaminação. FONTE: adaptado de Calil Neto,(2011)

4.5.3 Ensaio de Flexão transversal e longitudinal

O ensaio de flexão no painel MLCC conforme recomendado pela ASTM PRG 320 citado no item 3.3.2.3 deste trabalho é similar aos ensaios de tabuleiros de pontes como usados por Scaliante (2014), e foi realizado por Mestek, et al, (2008), em seu trabalho Design for Cross Laminated Timber CLT (MESTEK, KREUZINGER e WINTER, 2008) . Os esquemas dos ensaios são apresentados nas figuras 31 e 32.

Figura 31: Esquema para ensaio de flexão longitudinal

Figura 32: Esquema para ensaio de flexão transversal

A determinação do valor do módulo de elasticidade, para a situação de uma carga concentrada (P) no centro do vão e deslocamento vertical (δ), é obtido pela Equação 23:

$$E = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot I \cdot \delta}$$

Equação 23

Onde:

E = módulo de elasticidade longitudinal da peça;

L = vão entre apoios da peça;

I = inércia da seção da peça fletida;

δ = média dos deslocamentos gerados pela aplicação de carga no painel durante o ensaio;

4.5.4 Ensaio de torção

O ensaio é realizado com um perfil metálico que distribui a carga para dois pontos diagonais no painel através de rótulas metálicas sob o perfil, enquanto a outra diagonal está apoiada. O ensaio é realizado nas duas diagonais. O esquema é ilustrado na figura 33..

Figura 33: Esquema para ensaio de flexão para obtenção do Módulo de Elasticidade de Torção (G)

Com esta configuração, pode ser feita a correlação com uma viga bi-apoiada. Para o cálculo do módulo de elasticidade de torção (G_{xy}) do painel, podem ser determinadas segundo as equações a seguir (TROISKY, 1987 apud SCALIANTE, 2014).

$$D_x = \frac{E_x \cdot t^3}{12(1 - \nu_x \cdot \nu_y)} \quad \text{Equação 24}$$

$$D_y = \frac{E_y \cdot t^3}{12(1 - \nu_x \cdot \nu_y)} \quad \text{Equação 25}$$

$$D_{xy} = \frac{G_{xy} \cdot t^3}{12}$$
Equação 26

Onde:

t é a espessura do painel;

E_x e E_y são os módulos de elasticidade nas direções x e y do painel;

ν é o coeficiente de poisson;

Com isso, pode-se calcular D_x e D_y , sendo o valor de ν determinado no ensaio específico descrito no item a seguir.

$$2H = D_x \cdot \nu_x + D_y \cdot \nu_y + 4D_{xy}$$
Equação 27

A propriedade H pode ainda ser obtida por:

$$H = \sqrt{D_x \cdot D_y}$$
Equação 28

Porém, segundo Scialante (2014), algumas condições devem ser atendidas, as chamadas condições de Kirchoff, sendo elas:

- A espessura da placa de ser constante;
- As deformações devem ser puramente elásticas;
- Os deslocamentos da placa devem ser relativamente pequenos.

Com a obtenção do valor de H , é possível obter o valor de D_{xy} na equação 27, e consequentemente calcular o valor de G_{xy} , portanto:

$$G_{xy} = \frac{D_{xy} \cdot 12}{t^3}$$
Equação 29

4.5.5 Ensaio para determinação do Coeficiente de Poisson do MLCC

O valor do Coeficiente de Poisson pode ser obtido mensurando o alongamento transversal e longitudinal de um corpo de prova prismático quando submetido a uma tensão uniaxial. \o numero de corpos de prova mínimo para uma caracterização segundo a NBR7190/1997 são de seis corpos-de-prova. A equação que determina o valor do coeficiente de Poisson é dada pela equação 30.

$$\nu = \left| \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z} \right| = \left| \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} \right| \quad \text{Equação 30}$$

Sendo:

ε_y = alongamento na direção y;

ε_x = alongamento na direção x;

ε_z = alongamento na direção z.

O corpo de prova para determinação do coeficiente de Poisson deve ter as dimensões apresentadas na figura 34.

Figura 34: Modelo de corpo de prova para determinação do Coeficiente de Poisson

Para obtenção dos valores do alongamento é necessário o uso de strain gages, afixados em duas faces do corpo de prova, uma oposta a outra, sendo que um strain gage deve ser afixado no eixo

x do centro do corpo de prova, ortogonalmente ao eixo z. O outro strain gages deve ser instalado no eixo z, formando um “T” com o primeiro strain gage. Da mesma forma para a direção y.

A carga da tensão aplicada deve ser de 50% da carga de ruptura do corpo de prova, desprezando-se os valores dos primeiros 10%, conforme recomendado pelo Anexo B da norma NBR 7190 (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997). Determinação das propriedades das madeiras para projeto de estruturas.

4.5.6 *Compressão Paralela*

Conforme item B.8 do anexo B da norma NBR 7190 (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997), para a determinação da resistência e da rigidez à compressão paralela às fibras da madeira de um lote considerado homogêneo. 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 5,0 cm de lado e 15,0 cm de comprimento, sendo dada por:

$$F_{c0} = \frac{F_{c0,max}}{A} \quad \text{Equação 31}$$

onde:

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

A é a área inicial da seção transversal comprimida, em metro quadrado (m²);

O valor característico da resistência à compressão paralela às fibras $f_{c0,k}$ deve ser determinado pelo estimador apresentado na seção 4.5.7 deste trabalho.

A rigidez da madeira na direção paralela às fibras deve ser determinada por seu módulo de elasticidade, obtido do trecho linear do diagrama tensão deformação específica, expresso em MPa. Para esta finalidade, o módulo de elasticidade deve ser determinado pela inclinação da reta secante à curva tensão deformação, definida pelos pontos ($\sigma_{10\%}; \epsilon_{10\%}$) e ($\sigma_{50\%}; \epsilon_{50\%}$), correspondentes respectivamente a 10% e 50% da resistência a compressão paralela as fibras medida no ensaio, sendo calculado pela seguinte expressão:

$$E_{c0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\epsilon_{50\%} - \epsilon_{10\%}} \quad \text{Equação 32}$$

Sendo:

$\sigma_{50\%}$ e $\sigma_{10\%}$ valores da tensão de compressão referentes a 10% e 50% da resistência f_{c0} ;

$\varepsilon_{50\%}$ e $\varepsilon_{10\%}$ são as deformações específicas medidas no corpo-de-prova, correspondentes às tensões de $\sigma_{50\%}$ e $\sigma_{10\%}$.

4.5.7 Valores característicos das resistências

Os valores característicos das resistências são calculados pela equação 33.

$$X_{wk} = \left(2 \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_{\frac{n}{2}-1}}{\frac{n}{2} - 1} \right) \cdot 1,1 \quad \text{Equação 33}$$

Onde:

X_{wk} = resistência característica genérica, em MPa;

n = número de corpos-de-prova;

x_1 = resistência do corpo de prova 1, em MPa;

x_2 = resistência do corpo de prova 2, em MPa;

x_n = resistência do enésimo corpo de prova, em MPa.

Os resultados devem ser colocados em ordem crescente $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$, desprezando-se o valor mais alto, em caso de número ímpar de corpos-de-prova, e não possuindo x_{wk} valor inferior a x_1 e nem a 0,7 do valor médio (x_m).

4.5.8 Densidade

Conforme item B.6 do anexo B da norma NBR 7190 (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997), a “densidade básica” é uma massa específica convencional definida pela razão entre a massa seca e o volume saturado, sendo dada pela equação 34.

$$\rho_{bas} = \frac{m_s}{V_{sat}} \quad \text{Equação 34}$$

onde:

m_s é a massa seca da madeira, em kg;

V_{sat} é o volume da madeira saturada, em metro cúbico (m^3).

O volume saturado é determinado pelas dimensões finais do corpo de prova submerso em água até que atinja massa constante ou com no máximo uma variação de 0,5% em relação à medida anterior. A secagem das amostras em estufa de secagem com temperatura máxima de $103^\circ \text{C} \pm 2^\circ \text{C}$, e novas medições devem ser realizadas em intervalos de seis horas até que as medidas não variem mais que 0,02mm em duas medições sucessivas.

Os corpos-de-prova devem ter forma prismática com seção transversal retangular de 2,0 cm x 3,0 cm de lado e comprimento ao longo das fibras de 5,0 cm. Se a distância radial entre os anéis de crescimento for maior que 4 mm, a seção transversal do corpo de prova deve ser aumentada para abranger pelo menos 5 anéis de crescimento.

4.5.9 Testes de cisalhamento na camada central “Rolling Shear”

O roling shear, como citado anteriormente é o efeito de cisalhamento onde, durante a aplicação da carga, às forças cisalhantes que estão sendo aplicadas perpendicularmente a direção das fibras das lamelas transversais tem a tendência de romper as ligações e “rolar” umas sobre as outras.

Conforme apresentado no item 3.6, o cálculo do rolling shear pode ser feito através da equação 35:

$$G'_{90} = \frac{F \cdot l}{A \cdot \Delta l} \quad \text{Equação 35}$$

Onde:

G'_{90} = é o módulo de rigidez perpendicular ao sentido da força na camada transversal. Foi nomeado como G' para diferenciar do G usado pela norma americana (ANSI/APA, 2011);

F = força cisalhante aplicada no corpo de prova;

A = área da seção cisalhante;

l = comprimento inicial do corpo de prova;

Δl = Variação do comprimento em relação ao ponto inicial do ensaio.

Os corpos-de-prova utilizados para os ensaios possuem as dimensões listadas na figura 35 e o esquema de ensaio é apresentado na figura 36 e 37..

Figura 35: Corpo de prova para teste de rolling shear. FONTE: Autor.

Figura 36: Esquema para ensaio de rolling shear FONTE: Autor.

Figura 37: Área resistente ao cisalhamento no teste de rolling shear. FONTE: Autor.

5 RESULTADOS

Nos tópicos a seguir são apresentados os resultados dos ensaios descritos anteriormente, bem como fotos dos procedimentos realizados.

5.1 Ensaio de flexão

O ensaio foi realizado com uso de um pórtico metálico montado sobre uma laje de reação nas dependências do LaMEM – Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira, EESC-USP. A aplicação das cargas foram feitas através de um cilindro hidráulico alimentado por uma central hidráulica. Na base do cilindro foi instalado um anel dinamométrico de constante igual a 4,778, conforme esquema de ensaio apresentado nas figuras 31 e 32. A tabela 7 apresenta os dados utilizados nos ensaios realizados.

Tabela 7: Dados utilizados no ensaio de flexão e torção

Ensaio	Vão (L) [mm]	Relação L/300	Inércia [mm ⁴]	Const. Relógio
Flexão Longitudinal	1950	0,65	91733333	4,778
Flexão Transversal	1200	0,4	91733333	4,778
Torção	2749	0,91	91733333	4,778

As tabelas 8 e 9 apresentam os resultados para os testes de flexão realizados no painel de MLCC

Tabela 8: Resultados do ensaio de flexão longitudinal

Divisões	Carga (N)	ΔN (N)	Leitura Relógio 1 (mm)	Leitura Relógio 2 (mm)	Leitura Relógio 3 (mm)	ΔL rel 1	ΔL rel 2	ΔL rel 3
30	1405	1405	0,53	1,00	0,49	-	-	-
60	2811	1405	0,80	1,50	1,12	0,27	0,50	0,63
90	4217	1405	1,61	2,35	1,56	0,81	0,85	0,44
120	5622	1405	2,15	2,75	2,23	0,54	0,40	0,67
150	7028	1405	2,70	3,30	2,55	0,55	0,55	0,32
180	8434	1405	3,22	3,88	3,32	0,52	0,58	0,77
210	9839	1405	3,74	4,43	3,65	0,52	0,55	0,33
240	11245	1405	4,25	4,98	4,38	0,51	0,55	0,73
270	12651	1405	4,75	5,50	4,60	0,50	0,52	0,22
300	14056	-	5,23	6,03	5,34	0,48	0,53	0,74
Médias ΔL						0,522	0,559	0,539
Média geral						0,540		
E_L						4383,58	Mpa	

Tabela 9: Resultados do ensaio de flexão transversal

Divisões	Carga (N)	ΔN (N)	Leitura Relógio 1 (mm)	Leitura Relógio 2 (mm)	Leitura Relógio 3 (mm)	ΔL rel 1	ΔL rel 2	ΔL rel 3
30	1405	1405	0,33	0,45	0,43	-	-	-
60	2811	1405	0,71	0,9	0,85	0,38	0,45	0,42
90	4217	1405	1,12	1,35	1,26	0,41	0,45	0,41
120	5622	1405	1,52	1,78	1,65	0,40	0,43	0,39
150	7028	1405	1,93	2,25	2,06	0,41	0,47	0,41
180	8434	1405	2,34	2,65	2,44	0,41	0,40	0,38
210	9839	1405	2,72	3,06	2,79	0,38	0,41	0,35
240	11245	1405	3,05	3,43	3,12	0,33	0,37	0,33
270	12651	1405	3,4	3,8	3,45	0,35	0,37	0,33
300	14056	-	3,7	4,15	3,75	0,30	0,35	0,30
Médias ΔL						0,374	0,411	0,369
Média geral						0,385		
E_T						1433,54	Mpa	

Da equação 23, os Módulos de Elasticidade obtidos foram:

$$E_L = 4383,58 \text{ MPa}$$

$$E_T = 1433,54 \text{ MPa}$$

5.2 Determinação do Poisson

Com a metodologia de ensaio descrita em 4.5.5, utilizando o sistema de aquisição de dados system 5000 e o programa win5000 para interpretação dos valores obtidos pelos strain gages, foi possível obter o seguinte valor para o coeficiente de Poisson:

$$v_x = 0,0083 \text{ e } v_y = 0,008$$

As figuras 38 e 39 ilustram a realização do ensaio para a obtenção do valor do Poisson.

Figura 38: Corpo de prova durante ensaio para medição da deformação

Figura 39: Sistema de aquisição de dados System 5000 e software win5000

5.3 Ensaio de torção

Tabela 10: Resultados do ensaio de torção: carga aplicada em pontos da diagonal 1

Divisões	Carga (N)	ΔN (N)	Leitura Relógio 1 (mm)	Leitura Relógio 2 (mm)	Leitura Relógio 3 (mm)	ΔL rel 1	ΔL rel 2	ΔL rel 3
10	468,56	468,56	1,40	0,91	1,70	2,080	0,910	2,000
20	937,12	468,56	3,48	1,82	3,70	1,080	0,970	2,150
30	1405,69	468,56	4,56	2,79	5,85	2,040	0,910	2,000
40	1874,25	468,56	6,60	3,70	7,85	1,000	0,860	1,900
50	2342,81	468,56	7,60	4,56	9,75	1,080	0,930	2,050
60	2811,37	468,56	8,68	5,49	11,80	1,120	0,950	2,050
70	3279,93	-	9,80	6,44	13,85	-	-	-
Médias ΔL						1,400	0,922	2,025
Média geral						1,449		

Tabela 11: Resultados do ensaio de torção: carga aplicada em pontos da diagonal 2

Divisões	Carga (N)	ΔN (N)	Leitura Relógio 1 (mm)	Leitura Relógio 2 (mm)	Leitura Relógio 3 (mm)	ΔL rel 1	ΔL rel 2	ΔL rel 3
10	468,56	468,56	1,90	0,96	1,55	0,280	0,880	1,800
20	937,12	468,56	2,18	1,84	3,35	1,170	0,890	2,000
30	1405,69	468,56	3,35	2,73	5,35	1,010	0,830	1,900
40	1874,25	468,56	4,36	3,56	7,25	1,130	0,940	2,150
50	2342,81	468,56	5,49	4,50	9,40	0,960	0,820	1,950
60	2811,37	468,56	6,45	5,32	11,35	1,050	0,910	2,050
70	3279,93	-	7,50	6,23	13,40	-	-	-
Médias ΔL						0,933	0,878	1,975
Média geral						1,262		

Conforme método de cálculo descrito em 4.5.4, o módulo de elasticidade à torção para este painel G_{xy} é:

$$G_{xy} = 1242,50 \text{ MPa}$$

5.4 Ensaio de Rolling Shear

Foram retirados 6 corpos de prova do painel com as dimensões citadas no item 4.3.11 e ensaiadas na conforme a descrição e foi utilizada uma maquina universal de ensaio marca Amsler, e a deformação captada por um relógio comparador centesimal instalado na parte de

baixo da base da máquina de ensaio. A tabela 13 apresenta os valores da área resistente ao cisalhamento e seguir os resultados obtidos.

Tabela 12: Área resistente ao cisalhamento

	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
L (mm)	107	105	104	104	104	106
h (mm)	87	87	86	87	87	86
Área (mm²)	9309	9135	8944	9048	9048	9116

Tabela 13: Resultados do teste de rolling shear

	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
ϵ	0,0060	0,0059	0,0084	0,0042	0,0069	0,0112
ΔP (N)	9800	9800	15680	5880	9800	13720
σ (MPa)	1,05	1,07	1,75	0,64	1,08	1,50
G'_{90} (Mpa)	176,01	181,68	209,57	153,61	156,45	134,06
G'_{90} médio (Mpa)	168,56					
$G'_{90,k}$ (Mpa)	144,34					

As figuras 40 e 41 ilustram a realização do teste de rolling shear.

Figura 40: Corpo de prova antes do ensaio de rolling shear

Figura 41: Corpo de prova ao final do ensaio de rolling shear

5.5 Resultados do ensaio de delaminação

Conforme apresentado no item 4.5.2 os corpos-de-prova para o ensaio de delaminação, são submetidos ao teste em um autoclave, sob ciclos de pressão e vácuo, e após a sua retirada deve ser feita uma análise visual, identificando a ocorrência de delaminação e com auxílio de um medidor de folga qual a espessura desta delaminação.

As figuras 42, 43 e 44 demostram os corpos-de-prova após o ensaio. Foi possível constatar que na maioria das amostras não houve delaminação ou mesmo fissuras próximas a linha de cola somente no corpo de prova número 3 que houve uma fissura na linha de cola, conforme a imagem 44.

Tabela 14: Resultados dos ensaios de delaminação.

Corpo de prova	Delaminação ou fissura	Tamanho
CP1	Não houve	-
CP2	Não houve	-
CP3	Fissura em 2 linhas de cola	1 a 3 mm
CP4	Não houve	-
CP5	Não houve	-

Figura 42: Corpos-de-prova durante ensaio de delaminação

Figura 43: Corpos-de-prova após ensaio de delaminação

Figura 44: a) corpo de prova numero 3 com fissura na linha de cola; b) corpo de prova sem fissuras ou delaminação.

5.6 Ensaio de compressão

Foram realizados ensaios de compressão com dois tipos de corpos-de-prova: o primeiro com 3 lamelas na direção longitudinal, ou seja, predominância de compressão paralela às fibras em 3 lamelas e normal às fibras em duas lamelas; e o segundo tipo foram corpos-de-prova com 2 lamelas na direção longitudinal e 3 na direção transversal, ou seja, predominância de compressão normal às fibras, como ilustra a figura 45. Por esta característica cruzada o ensaio de compressão paralela às fibras teve dois resultados, um para cada tipo de corpo de prova, sendo um nomeado de $f_{c0,a}$ e outro $f_{c0,b}$, sendo o “a” o corpo de prova com 3 lamelas na direção longitudinal e o “b”, o corpo de prova com 2 lamelas.

Figura 45: Corpos-de-prova para ensaio de compressão

As tabelas a 15 e 16 apresentam os resultados dos ensaios em sete corpos de prova de cada tipo, sendo que foram obtidos os valores da rigidez e da resistência à compressão.

Tabela 15: Resultados para ensaio de compressão tipo B

CP	Seção transversal			Carga de ruptura (Kgf)	f_{c0b} (MPa)	Módulo de elasticidade				
	a (mm)	b (mm)	A (mm ²)			$\sigma_{10\%}$ (MPa)	$\sigma_{50\%}$ (MPa)	$\epsilon_{10\%}$	$\epsilon_{50\%}$	E_{c0} (MPa)
1	83,0	82,5	6847	12300	17,6	1,5	7,5	0,9990	0,9981	6327
2	81,6	82,4	6723	11050	16,1	1,5	7,6	0,99981	0,9972	2340
3	85,3	84,4	7199	11150	15,1	1,4	7,1	0,9992	0,9968	2347
4	70,3	81,7	5747	8000	13,6	1,7	8,9	0,9989	0,9961	2535
5	85,4	82,4	7036	10900	15,1	1,4	7,3	0,9998	0,9980	3835
6	81,7	75,5	6177	6500	10,3	1,6	8,3	0,9988	0,9952	1850
7	81,3	72,9	5932	8750	14,4	1,7	8,6	0,9995	0,9981	4785
$f_{c0,b}$ médio					14,64	E_{c0} médio				3431,83
Variância (S^2)					5,21	Variância (S^2)				2674535,5
DesvPad. (S)					2,28	DesvPadrão (S)				1635,40

Pela equação do valor característico, foi calculado o valor característico da resistência à compressão normal às fibras ($f_{c0,k}$):

$$f_{c0,b,k} = 10,44 \text{ MPa}$$

$$E_{c90,k} = 2028,09 \text{ MPa}$$

Tabela 16: Resultados para ensaio de compressão tipo A

C P	Seção transversal			Carga de ruptura (Kgf)	$f_{c0,a}$ (MPa)	Módulo de elasticidade				
	a (mm)	b (mm)	A (mm ²)			$\sigma_{10\%}$ (MPa)	$\sigma_{50\%}$ (MPa)	$\epsilon_{10\%}$	$\epsilon_{50\%}$	E_{c0} (MPa)
1	79,4	81,5	6473	15900	24,0	2,4	12,0	0,999 7	0,9983	6551
2	79,9	81,8	6543	14200	21,2	2,3	11,8	0,999 4	0,9978	5755
3	70,1	81,7	5731	15450	26,4	2,7	13,5	0,999 2	0,9974	6022
4	79,3	80,1	6360	14400	22,2	2,4	12,2	0,999 6	0,9983	7513
5	81,0	83,7	6780	14700	21,2	2,3	11,4	0,998 7	0,9964	3899
6	79,4	81,0	6437	15400	23,4	2,4	12,0	0,999 8	0,9987	8503
7	79,5	82,2	6543	17800	26,6	2,3	11,8	0,999 5	0,9988	8439
				$f_{c0,a}$ médio	23,61				E_{c0} médio	6669,32
				Variância (S ²)	5,1				Variância (S ²)	2691991,1
				DesvPad. (S)	2,25				Desv. Padrão (S)	1640,73

$$f_{c0,a,k} = 20,81 \text{ MPa}$$

$$E_{c0,k} = 3994,87 \text{ MPa}$$

As imagens 46 e 47 ilustram a realização do ensaio.

Figura 46: Ensaio de compressão normal – corpo de prova tipo B

Figura 47: Ensaio de compressão normal– corpo de prova tipo A

5.7 Resultado ensaio de densidade

Para o ensaio de densidade, conforme descrição no item 4.3.8, os resultados para seis corpos-de-prova são apresentados na tabela 17.

Tabela 17: Resultados para ensaio de densidade

CP	Densidade (Kg/m ³)
1	323,39
2	328,06
3	340,04
4	324,42
5	329,88
6	346,08
Média	331,98
Variância (S ²)	82,89
Desv. Padrão (S)	9,104

5.8 Resultado cisalhamento na linha de cola

Para o ensaio de cisalhamento direto na linha de cola, conforme descrição no item 4.5.1, os resultados para seis corpos-de-prova são apresentados na tabela 18.

Tabela 18: Resultados para ensaio de cisalhamento direto na linha de cola

	Área cisalhante (mm ²)	Carga de ruptura (kgf)	f_{gv} (Mpa)
CP1	3912	870	2,1
CP2	3778	2020	5,2
CP3	4086	1670	4,0
CP4	4474	1200	2,6
CP5	4128	1470	3,4
CP6	4029	1490	3,6

Pela equação do valor característico, foi calculado o valor característico da resistência à cisalhamento na linha de cola ($f_{gv,k}$):

$$f_{gv,k} = 2,47 \text{ MPa}$$

5.9 Exemplo de Cálculo para uma laje usando o método gama

Foi realizada uma simulação de aplicação do painel fabricado para uma situação real hipotética como uso em estrutura de laje de uma residência, e foi utilizado o método gama descrito no item 3.5.1, que é o método baseado no anexo B do Eurocode EN1995.

Dados considerados:

- Carga: 3KN/m
- Vão livre: 5m

Baseado nas configurações do painel, temos os índices a_1 e a_2 , e h_1 , h_2 e h_3 demonstrados pela figura 48.

Figura 48: Seção do MLCC com índices geométricos

Os resultados abaixo foram obtidos através do cálculo descrito no item 3.5.1 com as equações de números 7 a 10.

- Inércia: $I = 341\text{mm}^4$ (considerando uma seção de 1m de comprimento, $b=1\text{m}$);
- $a_1 = a_3 = 32\text{mm}$
- $a_2 = 0$

Pela equação 4 temos o valor de G_{90} , que é baseado na relação com o valor de E_0 , e temos o valor G'_{90} que foi obtido através do valor característico dos resultados obtidos no ensaio de rolling shear descrito no item 5.6. Para o cálculo do fator gama, foram utilizados os dois valores, gerando assim um γ e γ' . O valor E_0 utilizado foi o valor do módulo de elasticidade obtido no ensaio de flexão, descrito no item 5.1, sendo o valor de E_L .

- $G_{90} = 27,40 \text{ MPa}$
- $G'_{90,k} = 134,34 \text{ MPa}$

Através da equação 3 temos:

$$\gamma = \frac{1}{\left[1 + \frac{\pi^2 \cdot E_i \cdot A_i \cdot \bar{h}}{G_{90} \cdot L^2 \cdot b}\right]} = \frac{1}{\left[1 + \frac{\pi^2 \cdot 4383,6 \cdot 1000 \times 80 \cdot 16}{27,40 \cdot 5000^2 \cdot 1000}\right]} = 0,92$$

$$\gamma' = \frac{1}{\left[1 + \frac{\pi^2 \cdot E_i \cdot A_i \cdot \bar{h}}{G_{90} \cdot L^2 \cdot b}\right]} = \frac{1}{\left[1 + \frac{\pi^2 \cdot 4383,6 \cdot 1000 \times 80 \cdot 16}{134,40 \cdot 5000^2 \cdot 1000}\right]} = 0,98$$

Com os valores de γ e γ' , usando a equação 6 temos o valor de EI para cada caso:

$$(EI)_{ef} = 3,3 \times 10^{11}$$

$$(EI)'_{ef} = 3,52 \times 10^{11}$$

Calculando pela equação 13 a inércia efetiva

$$I_{eff} = \frac{EI_{eff}}{E} = \frac{3,3 \times 10^{11}}{4383,6} = 75280592\text{mm}^4 = 7528\text{cm}^4$$

$$I'_{eff} = \frac{EI_{eff}}{E} = \frac{3,52 \times 10^{11}}{4383,6} = 80299297 mm^4 = 8029 cm^4$$

Com o valor da inércia efetiva do painel foi calculado o valor da tensão devido ao momento, dada pela equação 14:

$$\sigma_{c90,d} = \frac{M}{I_{eff}} = \frac{\frac{PL^2}{8}}{I_{eff}} = \frac{\frac{3Kgf/cm \cdot 500^2 cm}{8}}{7528 cm^4} = 12,45 MPa$$

$$\sigma'_{c90,d} = \frac{M}{I_{eff}} = \frac{\frac{PL^2}{8}}{I_{eff}} = \frac{\frac{3Kgf/cm \cdot 500^2 cm}{8}}{8029 cm^4} = 11,67 MPa$$

A verificação é dada pela equação 15, onde foi admitido que o valor do $k_{c,90}$ é de 2,2, o valor do k_{mod} é 0,68 e a relação entre $f_{c90,k}/f_{c0,k}$ é 0,25, sendo o valor de $f_{c0,k} = 20,81 MPa$ obtido no ensaio de compressão.

$$\sigma_{c,90,d} \leq k_{c,90} \cdot f_{c,90,d} = k_{c,90} \cdot \frac{f_{c,90,k}}{k_{mod}} = 2,2 \cdot \frac{5,2}{0,68} = 16,83 MPa$$

Ou seja, tanto o valor de rolling shear estimado quanto o obtido pelo ensaio atendem a verificação de tensão.

Para o calculo e verificação da flecha no painel, foi utilizada as equações 17 e 18.

$$\Delta_L = \frac{5 \cdot w \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_{eff}} = \frac{5 \cdot 3kgf/cm \cdot 500^4 cm^4}{384 \cdot 43836 \frac{kgf}{cm^2} \cdot 7528 cm^4} = 7,39 cm$$

$$\Delta'_L = \frac{5 \cdot w \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_{eff}} = \frac{5 \cdot 3kgf/cm \cdot 500^4 cm^4}{384 \cdot 43836 \frac{kgf}{cm^2} \cdot 8029 cm^4} = 6,94 cm$$

$$\Delta L \leq \frac{L}{400} = \frac{500}{400} = 1,25 cm$$

Portanto o painel não atende à requisição da flecha máxima para o vão de 5m, e seria necessária a colocação de apoios para redução do vão ou outras soluções durante o projeto da residência.

5.10 Compilação dos resultados obtidos

A tabela 19 apresenta todos os resultados obtidos de forma resumida.

Tabela 19: Resumos dos resultados

Ensaio Realizado	Resultado
Flexão Longitudinal	$E_L = 4383,58 \text{ MPa}$
Flexão Transversal	$E_T = 1433,54 \text{ MPa}$
Poisson	$\nu_x = 0,0083$ e $\nu_y = 0,008$
Torção no painel	$G_{xy} = 1242,50 \text{ MPa}$
Rolling Shear, característico	$G'_{90,k}(\text{Mpa}) = 144,34$
Compressão Normal “tipo A”	$f_{c0,a,k} = 20,81 \text{ MPa}$
Compressão Normal “tipo B”	$f_{c0,b,k} = 10,44 \text{ MPa}$
Cisalhamento na linha de cola	$f_{gv,k} = 2,47 \text{ MPa}$
Densidade	$331,98 \text{ Kg/m}^3$
Delaminação	Atendeu aos requisitos

6 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos nos testes realizados podem ser comparados com os valores de referência da norma norte americana ANSI/APA PGR 320 e com a aprovação técnica europeia ETA 06/0138 que referência os produtos para Europa, entre eles os produtos da KLH Massivholz GmbH, a maior fabricante de CLT atualmente. A tabela 20 apresenta estes comparativos.

Tabela 20: Comparativo entre os valores obtidos nos ensaios com os valores de referência

Parâmetro	MLCC laboratório (MPa)	ETA 06/0138 (MPa)	ANSI/APA PGR 320 (MPa)
E ₀ (maior comp)	4383,58	12000	11032
E ₀ (menor comp)	1433,56	-	9653
G _{xy}	1242,50	500	1103*
G ₉₀	144,34	50	69*
f _{c0,k}	20,81	24	19
f _{c90,k}	5,20	2,70	-

* valores obtidos pela relação $G_0=E_0/10$ e $G_{90}=G_0/16$

Analisando os resultados obtidos nos ensaios com os de referência, nota-se que os valores dos módulos de elasticidade na longitudinal e na transversal do painel foram os resultados que mais se distanciaram dos valores de referência, sendo cerca de um terço menor para a maior direção e um sexto para a menor direção. Isto pode estar relacionado com a classe da madeira do *Pinus elliottii* utilizado, que devido ao crescimento rápido no Brasil, tem suas propriedades mecânicas reduzidas frente ao pinus e demais coníferas utilizadas na América do Norte e Europa como foi verificado no teste de densidade do painel, apresentado na tabela 17, onde o valor obtido de fato é inferior às densidades das coníferas americanas e europeias.

Outros fatores que influenciam na fabricação de um compósito como o MLCC é a interação entre a matriz e soluto, no caso a madeira e o adesivo. Neste caso, esta interação foi analisada principalmente, pelos ensaios de delaminação e de cisalhamento na linha de cola. No ensaio de delaminação o uso da madeira de *Pinus elliotti* com adesivo MUF se mostraram eficiente já que os testes revelaram um baixo índice de abertura na linha de cola após a realização do ensaio. E no ensaio de cisalhamento na linha de cola, os resultados revelaram uma boa resistência até a ruptura e a análise visual após a ruptura revelou boa quantidade de fibras de madeira rompidas, ou seja, a aderência foi suficiente para que a ruptura ocorresse nas fibras da madeira e não somente na região da colagem.

Os parâmetros de fabricação utilizados foram os recomendados pela literatura, principalmente o CLT Handbook FPInnovation (2013) e manual técnico da Akzo Nobel (2008) no tocante à gramatura de adesivo, tempo de montagem e prensagem, e pressão aplicada, se mostraram eficientes uma vez que o painel fabricado atendeu os requisitos das normas referentes ao teste de delaminação.

Apesar do módulo de elasticidade não superar o recomendado a simulação do uso deste painel como um elemento de laje apresentado no item 5.9 obteve um resultado positivo atendendo os requisitos do Eurocode EN1995 para as tensões de uma carga distribuída de 3KN/m, porém não superou o requisito quanto a flecha devido ao vão de 5 metros, mas revelou que é viável o uso estrutural do material para um projeto de engenharia com o dimensionamento adequado.

O cálculo apresentado foi desenvolvido em paralelo com os dois valores do G_{90} , sendo um obtido experimentalmente no ensaio apresentado no item 5.4 e o outro calculado por meio das relações sugeridas pela norma ANSI/APA PGR 320, apresentado nas equações 4 e 5. Apesar do valor experimental ser cerca de 5,5 vezes maior que o calculado, foi possível verificar que a influência do valor do G_{90} na inércia efetiva e posteriormente nos valores das tensões e na variação da flecha não foi significativo, ficando na ordem de 6% de variação para os dois parâmetros. Outro ponto a ser ressaltado que o G_{90} (calculado) não atendia os requisitos das normas enquanto o G'_{90} (experimental) atendeu os dois requisitos normativos. Na prática, o efeito do rolling shear não pode ser desprezado, pois em um painel submetido à flexão, as fibras das lamelas das camadas transversais tem a tendência de rolar devido às forças cisalhantes. Este ponto tem sido alvo de várias pesquisas no exterior. No Brasil o MLCC ainda é um tema novo, mas novos estudos podem ser feitos para investigar melhor o efeito do rolling shear para o pinus e para outras espécies de madeira que podem ser utilizadas para fabricação de painéis MLCC.

O ensaio de compressão revelou que a resistência mecânica à compressão nos corpos-de-prova com 3 lamelas com fibras paralelas a direção da aplicação da carga, quando se compara os valores característicos, é o dobro do resultado obtido para os corpos-de-prova com direções opostas, ou seja, 3 lamelas com fibras na perpendicular a direção da aplicação da carga. Esta característica mostra a importância do correto uso do painel no projeto estrutural, já que em determinadas posições o MLCC resiste a compressão e em outras ele é solicitado com uma viga. Cabe ao projetista o dever de prever para cada parede e laje do edifício a melhor configuração para as lamelas do MLCC, e assim encomendar para um fabricante uma lista específica de painéis, onde já esteja prevista no projeto o posicionamento de cada um.

7 CONCLUSÕES

Pode-se concluir através das pesquisas realizadas no decorrer deste estudo que o MLCC (CLT) é um material construtivo ainda recente, mas que teve grande aceitação no mercado da construção e na arquitetura, na América do Norte e Europa, por diversas vantagens ambientais e competitivas que o deixa a frente dos materiais convencionais ou mesmo de outros tipos de construção em madeira, porém por ser um material ainda novo, existem diversos pontos e configurações a serem investigadas. O objetivo principal deste estudo foi alcançado, com a contribuição para o desenvolvimento de uma metodologia de ensaios para caracterização estrutural de painéis de madeira laminada colada cruzada no Brasil. Este é o início de um trabalho que visa à normatização do produto no país, de modo que as empresas fabricantes tenham requisitos mínimos de referência a serem cumpridos para as características mecânicas dos painéis.

Os resultados dos testes realizados não superaram, para alguns itens, os requisitos mínimos exigidos pelas duas normas de referência, a norma Americana ANSI/APA PGR 320 e a aprovação técnica europeia ETA 06/0138, porém se pode concluir que os ensaios estão adequados e equivalentes ao modelo de testes que são realizados no exterior. Apesar disso o painel fabricado apresentou uma boa interação entre a espécie de madeira utilizada e o adesivo a base de melaminica-ureia formaldeído, demonstrada pelos bons resultados nos testes de delaminação.

Nos países onde o uso do MLCC em construções está mais consolidado, já existem métodos de cálculo para o dimensionamento das peças estruturais, dos quais os três métodos principais recomendados na bibliografia internacional foram apresentados neste estudo. O método gama que é baseado no anexo B do Eurocode EN1995 é o método mais utilizado até o momento pelos projetistas e engenheiros. Este método foi apresentado, detalhado e exemplificado usando o painel fabricado para este estudo como elemento principal, para cumprir o objetivo de contribuir para a criação de recomendações de dimensionamento estrutural para painéis de madeira laminada colada cruzada na norma brasileira de estruturas de madeira.

É importante salientar a importância do controle de qualidade durante a fabricação do painel, desde a seleção da madeira que será usada para as lamelas, até a colagem e prensagem, passando pelas classificações visual e mecânica das peças. O controle de qualidade em empresas madeireiras no Brasil ainda é renegado, mas produtos engenheirados estruturais de grande porte como vigas de madeira laminada colada (MLC) e os painéis MLCC devem ter seus parâmetros

produtivos controlados para evitar produtos fora da conformidade que venham a colapsar durante seu uso, causando acidentes e colocando vidas humanas em risco. Com a fabricação do painel utilizado para este estudo, as atividades de produção forneceram informações importantes que podem colaborar com estudos futuros sobre o material e sobre o processo produtivo do MLCC.

Como já citado anteriormente, o MLCC ainda é um material recente e com campo aberto a novos estudos. Sugere-se para trabalhos futuros a realização de ensaios em situação de incêndios para elementos de paredes e de laje, estudos para avaliação do conforto térmico e acústico dos painéis, ensaios para utilização de outras espécies de madeiras de florestas plantadas como paricá e a teca, estudo para substituição da colagem por outros tipos de conectores entre as lamelas cruzadas.

8 BIBLIOGRAFIA

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projetos de estruturas de madeira NBR7190**. São Paulo, 1997.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de revisão da norma projetos em estruturas de madeira NBR7190**. São Paulo, 2011.

ABRAF. **Anuário Estatístico da Abraf**. Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. Brasília, p. 142. 2013. (1980-8550).

AICHER, S.; DILL-LANGER, G. BASIC CONSIDERATIONS TO ROLLING SHEAR MODULUS IN WOODEN BOARDS. **Graf-Journal**, v. Vol. 11, 2000.

AKZO NOBEL. **Boletim Técnico - MUF 1242/2542**. Akzo Nobel / Casco Adhesives. Curitiba, p. 3. 2008.

ANSI D198. **Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes1**. ASTM International. West Conshohocken, PA, p. 27. 2012.

ANSI/APA. **Standard for Performance-Rated Cross-Laminated Timber PGR 320-2011**. ANSI/APA. Tacoma, WA, p. 29. 2011.

BOGENSPERGER, T.; AUGUSTIN, M.; SCHICKHOFER, G. **Properties of CLT-Panels Exposed to Compression Perpendicular to their Plane**. International Council for Research and Innovation in Building and Construction, Working Commission W18 - Timber Structures. Alghero, Italia: [s.n.]. 2011. p. 15.

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

CALIL NETO, C. **Madeira Laminada Colada (MLC) Controle de qualidade em combinações espécie-adesivo-tratamento preservativo**. São Carlos: Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação em Ciencias dos Materiais, 2011.

CARPINETTI, L. C. R. **Gestão da Qualidade: Conceitos e técnicas**. São Paulo: Atlas, 2010. 241 p.

CARREIRA, M. R. **Criteria para classificação visual de peças estruturais de pinus sp**. São Carlos: Dissertação apresentada EESC, Depto de Estruturas, 2003.

CRESPELL, P.; GAGNON, S. **Cross Laminated Timber**: a primer. 1. ed. Canadá: [s.n.], v. 1, 2010.

EN 1995. **Design of timber structures**. Zurich: CEN, 2004.

ETA 06/0138. **European Technical Approval - KLH MassivHolzplatten**. European Organisation for Technical Approvals. Viena, AT, p. 43. 2012.

FPINNOVATION. **CLT Handbook**. Pointe-Claire, QC, Canadá: [s.n.], 2011.

FPINNOVATION. **CLT Handbook Canadian Edition**. Port-Calire, CN: [s.n.], 2011.

FPL-FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood Handbook-Centennial Edition**. Madison, WI: USDA, 2010.

MESTEK, P.; KREUZINGER, H.; WINTER, S. **Design of cros laminated timber (CLT)**. 10th World Conference on Timber Engineering. Miyazaki, Japan: [s.n.]. 2008.

MOLINA, J.; CALIL JUNIOR, C. Sistema construtivo em wood frame para casas de madeira. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, Londrina, v. 31, n. 2, p. 143-156, jul./dez. 2010.

PASSARELLI, R. N. **Cross Laminated Timber**: Diretrizes para projeto de painel maciço em madeira no estado de São Paulo. São Carlos: Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, 2013.

SCALIANTE, R. D. M. **pontes em vigas e tabuleiros em painéis de madeira laminada colada (MLC)**. São Carlos: Dissertação de mestrado apresentado a EESC, 2014.

SFB E IPAM. **Florestas Nativas de Produção Brasileira**. Instituto de Pesquisa ambiental da Amazônia - IPAM. Brasília, p. 28. 2011.

SILVA, C.; BRANCO, J. M.; LOURENÇO, P. B. **MLCCna construção em altura**. 4º Congresso Nacional da Construção. Coimbra, Portugal: [s.n.]. 2012. p. 12.

SNIF. <http://www.florestal.gov.br/snif/>. **Sistema Nacional de Informações Florestais**, 2014. Acesso em: 02 novembro 2014.

TORGAL, F. P.; JALALI, S. **A sustentabilidade dos materiais de construção**. 2ª ed. ed. Vila Verde, Portugal: Vilaverdense, v. 1, 2010.