 <https://doi.org/10.56238/tecavanaborda-040>

Leonor da Cunha Mastela

Doutorado em Ciências Florestais
Universidade Federal do Espírito Santo
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1393-3283>

Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho

Doutorado em Engenharia de Estruturas
Universidade Federal do Espírito Santo
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4393-8686>

André Luis Christoforo

Doutorado em Engenharia de Estruturas
Universidade Federal de São Carlos
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4066-080X>

Fabricio Gomes Gonçalves

Doutorado em Ciências
Universidade Federal do Espírito Santo
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2010-9508>

Clara Gaspar Fossi de Souza

Bacharel em Engenharia Industrial Madeireira
Universidade de São Paulo
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4811-4037>

Francisco Antônio Rocco Lahr

Doutorado em Engenharia de Estruturas
Universidade de São Paulo
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3510-8498>

Vinicius Borges Taquetti

Mestrado em Ciências Florestais
Universidade Federal do Espírito Santo
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6067-1664>

RESUMO

Os produtos resultantes do desenvolvimento tecnológico da madeira incorporam cada vez mais controle e precisão nos processos construtivos. Os painéis de CLT são uma alternativa bastante versátil, aplicável como um elemento estrutural rígido e autoportante. A modelagem numérica somada aos estudos experimentais, apresenta-se como uma ferramenta capaz de representar o comportamento mecânico dos painéis de CLT. Este capítulo tem como objetivo investigar a aplicação do método dos elementos finitos (MEF) em madeira lamelada colada cruzada (CLT). Para tanto, o estudo apresenta um breve histórico do emprego do material, bem como o desenvolvimento da tecnologia do sistema construtivo da CLT no Brasil e no mundo. Além da aplicação da simulação numérica em MEF como uma ferramenta na análise estrutural do produto. Conclui-se que o processo de fabricação é padronizado e a que a montagem é rápida, o que garante produtividade e racionalização da construção civil. Além disso, este tipo de método construtivo possui aspectos ambientais consideráveis, já que utiliza madeira de reflorestamento de menor valor agregado. As pesquisas que utilizam a modelagem em MEF para a verificação do comportamento mecânico de painéis de CLT indicam que há uma boa aproximação entre a análise numérica e os resultados experimentais.

Palavras-chave: Produtos engenheirados, Modelagem numérica, Pannel de madeira.

1 INTRODUÇÃO

A madeira é conhecida por ser um recurso natural renovável com propriedades que possibilitam seu uso na construção civil. Considerando a crescente preocupação com medidas construtivas sustentáveis que permitam a redução na geração de resíduos e o uso de materiais renováveis, a madeira apresenta-se como excelente opção. A possibilidade de emprego de florestas plantadas, o baixo consumo energético, além de baixa taxa de poluição no processo extrativo quando comparado a fabricação de produtos convencionais, como concreto e cerâmica, demonstram sua valorização mediante a medidas ambientalmente corretas.

Em comparação com outros materiais construtivos usuais, a madeira apresenta também eficiência em relação à diminuição de gases responsáveis pelo efeito estufa. Estudos apontam que a produção de concreto representa cerca de 8% das emissões de CO₂ à nível mundial (MILLER, S. A.; HORVATH, A.; MONTEIRO, 2016). Quando se trata da madeira, cada metro cúbico pode armazenar cerca de 0,8 toneladas de carbono (KUNZ; SILVA; SILVA, 2016).

Apesar dos benefícios apresentados, o uso da madeira como material de construção apresenta algumas limitações. Deve-se observar que as propriedades da madeira não são homogêneas, e variam de acordo com a espécie, estrutura anatômica, teor de umidade e dentro da mesma árvore (STARK; CAI; CARLL, 2010). Portanto, a aplicação da madeira está condicionada ao conhecimento de suas propriedades físicas e mecânicas de forma a garantir seu bom desempenho. Além disso, existem questões relacionadas à vida útil das estruturas de madeira, afetadas predominantemente por sensibilidade à umidade e ataque de organismos xilófagos (RAMAGE et al. 2017; OLIVEIRA; PAES; VIDAURRE, 2017).

Uma alternativa as características limitantes da madeira é o desenvolvimento de produtos processados mecanicamente, que permitam maior controle do processo de fabricação e o emprego de madeira de menor valor agregado. Os produtos resultantes do desenvolvimento tecnológico da madeira incorporam cada vez mais controle e precisão nos processos construtivos. Dentre estes produtos destacam-se painéis *Oriented Strand board* – OSB (CHIROMITO et al, 2016), elementos em Madeira Lamelada Colada – MLC (ZANGIÁCOMO et al., 2017) e painéis de madeira lamelada colada cruzada, em inglês *Cross Laminated Timber* – CLT (BRANDNER et al., 2016).

Os painéis de CLT são um material versátil, o que possibilita sua aplicação como um elemento estrutural rígido e autoportante e, também, como sistema de vedação (AMORIM; MANTILLA; CARRASCO, 2017). Estes apresentam bom isolamento térmico e acústico, além de boa resistência ao fogo. O método construtivo, já consagrado na Europa, é caracterizado pelo alto grau de industrialização, alta precisão, rapidez na montagem e baixa geração de resíduos (MALO; ESPINOZA, 2015).

Os estudos sobre CLT são novos e mesmo em países precursores dessa tecnologia, as normas para o projeto de estruturas de painéis de CLT foram aprovadas recentemente e em outros países, ainda estão em um estado muito preliminar de desenvolvimento (YEH et al, 2012; BRANDNER et al., 2016). Diferentes métodos foram adotados para a determinação das propriedades mecânicas da CLT, compreendendo abordagens analíticas e experimentais. No entanto, até o momento, nenhum método foi universalmente aceito pelos fabricantes e projetistas de painéis de CLT (FLORES et al., 2015). Portanto, torna-se necessário um maior conhecimento sobre o comportamento mecânico desses

produtos além do desenvolvimento de conceitos de projeto e processos de fabricação (BRANDNER, 2013).

Neste sentido, a modelagem numérica somada aos estudos experimentais, apresenta-se como uma ferramenta capaz de representar o comportamento mecânico dos painéis de CLT. Modelos numéricos podem auxiliar a criar uma base científica sólida para o melhor entendimento da mecânica da madeira, e em particular estruturas compostas de CLT (FLORES et al., 2015).

A maioria das simulações numéricas de representação de comportamento estrutural aplicam o método dos elementos finitos (MEF), particularmente, no que diz respeito a estruturas metálicas e de concreto. Além disso, o método tem apresentado bons resultados na modelagem de estruturas de madeira lamelada colada (MLC) (UZEL et al., 2018; KANDLER et al., 2018). A aplicação de modelagem numérica embasada no MEF implica na simulação do comportamento real da estrutura, permitindo o uso estrutural eficiente do material (GUINDOS; POLOCOSER, 2015).

Neste contexto, o capítulo em questão tem como objetivo investigar a aplicação do método dos elementos finitos (MEF) em madeira lamelada colada cruzada (CLT). Por meio de revisão bibliográfica, pretende-se verificar a eficácia de técnicas de modelagem para simular o comportamento de painéis de CLT.

2 MADEIRA LAMELADA COLADA CRUZADA (CLT)

A madeira lamelada colada cruzada (CLT) consiste num painel formado por tábuas de madeira sobrepostas de forma cruzada, geralmente em 90°, em que as faces mais largas são coladas entre si e, em alguns casos, as faces menores também (Figura 1). Os painéis de CLT são compostos por um número ímpar de camadas, comumente de 3 a 7. A espessura das peças para cada camada deve variar entre 16 e 51 mm e a largura pode variar de 60 a 240 mm (KARACABEYLI; DOUGLAS, 2013)

Figura 1– Configuração do painel de CLT

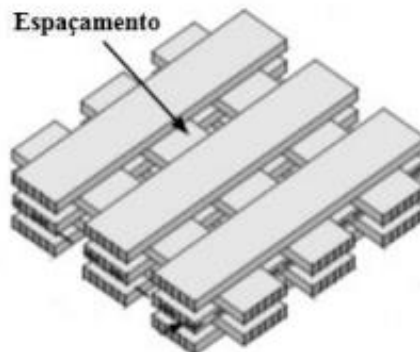


Fonte: Oliveira (2018).

A disposição ortogonal das lâminas de madeira proporciona estabilidade dimensional, o que reduz significativamente os efeitos de retração e inchamento do material devido às variações de umidade e resulta em um elemento de placa com expressivas propriedades de rigidez em diferentes direções (KUILEN et al., 2011; STEIGER; GÜLZOW; GSELL, 2008).

Em casos particulares, duas camadas seguidas podem estar coladas na mesma direção com o objetivo de obter características estruturais específicas (LI et al., 2019). Existem ainda, configurações pouco utilizadas que permitem a existência de aberturas entre as lamelas de cada camada, como representado na Figura 2 (ECKER; MIOTTO; TURMINA, 2017). Para formar estruturas maiores, as peças podem ser coladas utilizando-se emendas dentadas (BRANDNER et al., 2016).

Figura 2 – Paineis de CLT com abertura



Fonte: Ecker; Miotto; Turmina (2017).

Quando os painéis de CLT são empregados como paredes, as peças das camadas exteriores são normalmente orientadas paralelamente às cargas verticais para se garantir maior resistência. No caso

do emprego dos painéis como lajes, as lamelas das camadas exteriores são paralelas à direção do vão principal (KARACABEYLI; DOUGLAS, 2013).

2.1 BREVE HISTÓRICO

A primeira patente que apresenta os conceitos básicos de CLT foi obtida por Frank J. Walsh e Robert L. Watts, em 1923, nos Estados Unidos. Entretanto, o produto não alcançou amplo interesse e por muitas décadas foi preterido. Somente em 1990, surgiram novos estudos sobre o assunto na Áustria e na Alemanha, com o objetivo de utilizar madeiras de menor valor agregado. Após as primeiras experiências eficazes, em meados da década de 90, pesquisadores austríacos juntamente com empreendedores buscaram aprimorar o produto de forma a garantir a qualidade e padronizar sua produção. Assim, a CLT ganhou popularidade na Europa na construção de casas e edifícios de 5 a 10 andares tendo em vista o apelo ambiental, seu fácil manuseio durante a execução da obra e a sua rápida execução. A produção europeia de CLT teve um aumento de 25.000 m³ em 1996 para 340.000 m³ em 2010 (MALLO; ESPINOZA, 2015).

A Figura 3 apresenta a execução da *Open Academy Norwich* que, atualmente, é o maior edifício do Reino Unido executado exclusivamente em CLT (KLH UK, 2020).

Figura 3– Construção em CLT da *Open Academy Norwich*, no Reino Unido



Fonte: KLH UK (2020).

Recentemente, a CLT começou a ganhar mercado no Canadá e Estados Unidos. Em 2012, foi publicado a norma americana ANSI/APA PRG 320-2012 que apresenta a padronização para o produto CLT. Em 2018, a norma ANSI/APA PRG 320-2018 passou pela primeira revisão. Os pesquisadores canadenses desenvolveram uma nova metodologia para CLT em formato de caixa (Figura 4), com o

objetivo de reduzir o peso próprio do painel e em contrapartida aumentar a capacidade de carga, além de garantir economia (LI et al, 2019).

Figura 4 – Sistema canadense inovador, CLT em formato de caixa



Fonte: Li et al. (2019).

Baseada nos estudos sobre o assunto desenvolvidos no Canadá, a China iniciou suas pesquisas em CLT. As primeiras construções são de edifícios de pequeno porte. Em 2014, o primeiro edifício em CLT de vários andares na Ásia foi concluído na província de Taiwan, China (LI et al, 2019). Nesta edificação, as varandas foram feitas em balanço e toda a parte interna foi feita em CLT aparente (Figura 5). Atualmente, os chineses vêm desenvolvendo estudos em CLT empregando o bambu como matéria prima. Essa necessidade surgiu tendo em vista que grande parte da madeira utilizada no país para fabricação de CLT é importada, o que aumenta o custo (SU; HE, LI, 2020).

Figura 5– Edifício de 5 andares construído em Taiwan, China



Fonte: Panels & Furniture (2016).

No Brasil, a introdução de CLT é bastante recente, tendo sido iniciada nos últimos 7 anos, e, até o momento, tem-se conhecimento de um fabricante localizado no estado de São Paulo. Existem poucas edificações brasileiras executadas em CLT, dentre as quais a maioria é de uso residencial (Figura 6). Deve-se observar que as diferenças de espécies vegetais, as condições climáticas e a ausência de normas próprias influenciam no processo produtivo de CLT (OLIVEIRA, 2018). Basicamente, as matérias primas empregadas no país são as madeiras das espécies de pinus, em particular de *Pinus Taeda*, e o adesivo de poliuretano monocomponente, livre de formaldeídos.

Entretanto, alguns estudos mostram que painéis de CLT fabricados com o eucalipto obtiveram propriedades (resistência e rigidez) adequadas para uso estrutural, o que demonstra que essa espécie pode ser uma alternativa viável para essa tecnologia (LIAO et al., 2017; PEREIRA; CALIL JUNIOR, 2019).

Figura 6– Residência Valinhos, construída pela empresa Crosslam



Fonte: Crosslam (2020).

2.2 PROCESSO DE FABRICAÇÃO

De acordo com Brandner (2013), o processo de fabricação de painéis de CLT compreende seis etapas principais, quais sejam: (1) seleção da madeira serrada, (2) descarte de peças com defeito e agrupamento e aplainamento da madeira que será utilizada, (3) corte e união de elementos para personalização das peças, (4) aplicação de adesivo e prensagem do painel, (5) usinagem de superfície, (6) marcação e embalagem.

A primeira etapa do processo de fabricação trata da classificação visual e mecânica das peças serradas. Segundo Carreira e Dias (2005), a classificação visual possibilita a avaliação da qualidade visual, por meio da verificação da quantidade e posição dos defeitos. Para a classificação mecânica pode-se utilizar ensaios não-destrutivos, evitando desperdício de material com a retirada de corpos de

prova. Os resultados podem ser obtidos por meio de métodos dinâmicos de excitação por impulso e varredura por frequência.

Nessa etapa, é importante a verificação do teor de umidade das peças, que deve ser de $12\% \pm 3\%$, de forma a garantir um melhor desempenho do adesivo e evitar instabilidade dimensional e fendas superficiais (ECKER; MIOTTO; TURMINA, 2017). Além disso, a norma americana ANSI/APA PRG 320:2012 preconiza o emprego de espécies de madeira com densidade superior a $0,35 \text{ g/cm}^3$. Em geral, para a produção de painéis de CLT, utiliza-se madeiras de média a baixa densidade. As principais espécies utilizadas são de madeira de coníferas. Na Europa, destacam-se as seguintes espécies: o abeto da Noruega (*Picea abies*), abeto branco (*Abies alba*), pinheiro silvestre (*Pinus sylvestris*) (BRANDNER, 2013). No Brasil, as espécies advindas de florestas plantadas como, pinus e eucalipto, são opções para a fabricação de produtos mecanicamente fabricados de madeira. Ainda nesta fase, as peças devem passar por tratamento preservativo para melhorar a durabilidade e conter ataques por organismos xilófagos (LEITE; SANCHEZ; BLUMENSCHNEIN, 2018).

Na segunda etapa, as peças que apresentam defeitos acima dos permitidos por norma são descartadas (PEREIRA, 2015). Já as peças ensaiadas e aprovadas, conforme normatização, são agrupadas e aplainadas para posterior montagem dos painéis. Na terceira etapa, quando necessário, as peças são ligadas por meio de emendas dentadas, comumente usadas em MLC. Estas emendas possuem formato triangular e permitem melhor aderência entre as peças, desde que sejam utilizados adesivos com propriedades elásticas e de cisalhamento semelhantes às dos aderentes (BRANDNER et al., 2016).

Na quarta etapa, as peças passam pelo processo de colagem por meio de adesivos estruturais. Em geral, utiliza-se os mesmos adesivos empregados na fabricação da MLC, sendo estes o poliuretano, a melamina e outros à base de fenólicos (KARACABEYLI; DOUGLAS, 2013). No caso dos painéis de CLT, pode ser feita a colagem das faces e bordas (BRANDNER et al., 2016). Assim que o adesivo é aplicado, o conjunto é prensado por meio de prensas hidráulicas ou a vácuo e ar comprimido. Em particular, a pressão de ligação e a quantidade aplicada de adesivo devem ser ajustadas de acordo com a espécie de madeira empregada (BRANDNER, 2013).

Na quinta etapa, os painéis são cortados e usinados com precisão para configuração dos elementos estruturais devidamente customizados de acordo com o projeto. Essa etapa inclui a execução de aberturas de esquadrias, canaletas para passagem de eletrodutos e outros possíveis detalhes arquitetônicos (OLIVEIRA, 2018). Na sexta etapa, os painéis de CLT são numerados e classificadas conforme requisitos da obra a que se destinam. Posteriormente, os elementos são estocados e embalados para o transporte.

2.3 SISTEMA CONSTRUTIVO

As edificações executadas com painéis de CLT se caracterizam pelo alto grau de precisão e padronização das peças, bem como, pela velocidade de montagem e baixa geração de resíduos na obra. A tecnologia possui baixa relação resistência/peso somada a possibilidade de construções de múltiplos pavimentos e bom isolamento térmico e acústico (MALLO; ESPINOZA, 2015).

Os painéis de CLT chegam ao canteiro de obras já com os cortes de vãos de janelas e portas e em alguns casos, com canaletas para passagem de eletroduto. As peças são içadas por guindastes para a instalação de acordo com o projeto e a ligação de uma peça a outra é feita por meio de conectores, como parafusos e cantoneiras (AMORIM; MANTILLA; CARRASCO, 2017). As conexões têm como função manter a integridade da estrutura e garantir a resistência, rigidez e estabilidade (KARACABEYLI; DOUGLAS, 2013).

Após a instalação dos painéis, é possível realizar a aplicação de materiais de revestimento nas fachadas de edifícios em CLT. Entretanto, o revestimento deve ser cuidadosamente escolhido para evitar degradação precoce da madeira, tendo em vista suas características higroscópicas (COSTA, 2013). Dentre os revestimentos pode-se utilizar cerâmica, argamassa e vidro.

Figura 7– (a) Edifícios com revestimento de argamassa (b) Edifícios com revestimento cerâmico



Fonte: Costa (2013).

O CLT possui a versatilidade de ser aplicado em conjunto com outros materiais como aço e concreto, os chamados sistemas híbridos (OLIVEIRA, 2018). Nestes casos, frequentemente, ocorre a utilização de concreto para as fundações, a qual é aconselhável para evitar o contato da madeira com o solo, a fim de evitar a umidade ascendente.

3 MODELAGEM NUMÉRICA

Considerando-se a complexidade dos modelos matemáticos que representam as estruturas, dificilmente é possível obter soluções analíticas. O desenvolvimento de computadores cada vez mais eficientes viabilizou o emprego da modelagem numérica para representar o comportamento de um problema de forma mais precisa (JUSTO, 2010).

Dessa forma, a modelagem numérica apresenta-se como uma ferramenta vantajosa nos dias de hoje pela sua aproximação da realidade somada a agilidade no processo. Análises numéricas por meio de simulações computacionais são essenciais para garantir a otimização e a confiabilidade estrutural, pois são desenvolvidas com o objetivo de fornecer subsídios para a melhor compreensão da estrutura, em termos de geometria, propriedades dos materiais, carregamentos e verificação de possíveis falhas (CASTRO et al., 2019).

Dentre as técnicas de modelagem numérica aplicadas em análise estrutural, destacam-se: método das diferenças finitas (MDF), método dos elementos de contorno (MEC) e método dos elementos finitos (MEF) (VÉRAS, 2018). O MEF é considerado o método mais difundido atualmente e, considerando sua natureza repetitiva, para a sua aplicação é necessário o emprego de softwares disponíveis no mercado, como SAP2000, ANSYS e ABAQUS. A maioria destes foi melhorada com base no MEF para aplicação em alguma área específica, como infraestrutura de transporte, obras industriais, movimento de terra, geração de energia e atividade sísmica. Portanto, é necessário verificar o material e os fins de utilização estrutural antes de se definir o programa mais adequado (CALIL NETO et al., 2017).

3.1 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)

O MEF pode ser definido como um modelo matemático que tem como princípio a discretização do meio contínuo em um número finito e razoável de elementos, os subdomínios, que preservam as propriedades originais, e permitem encontrar uma solução aproximada (ALVES FILHO, 2018). Os subdomínios são considerados elementos interconectados chamados nós ou pontos nodais. Os nós são localizados nos limites de cada elemento e conectam um elemento a outro adjacente (RAO, 2018).

Neste contexto, uma função que obedeça às condições para todo o domínio, é representada por funções estabelecidas em cada elemento (arestas e pontos nodais), e conduz a uma solução aproximada que reduza a um erro mínimo (MONTANARO; PALLISTER, 2016).

De acordo com Azevedo (2003), na engenharia estrutural, o MEF permite a determinação do estado de tensão e de deformação de um sólido de geometria arbitrária sujeito a esforços externos. Além disso, é possível realizar uma série de análises e alterações na estrutura, com o objetivo de se encontrar a melhor solução estrutural e econômica dentro das normas vigentes.

3.2 ETAPAS BÁSICAS DO MEF

De acordo com Tankut, Tankut e Zor (2014), a aplicação do MEF pode ser dividida em etapas básicas, as quais são: pré-processamento, solução e pós-processamento.

A etapa de pré-processamento inclui criar e discretizar o domínio da solução em elementos finitos. Nessa fase, uma função contínua é assumida para representar o comportamento físico de um elemento. Posteriormente, as equações são desenvolvidas para cada elemento (MONTANARO; PALLISTER, 2016). Assim, reunindo as equações dos elementos, a matriz de rigidez global é construída. A partir daí, aplicam-se condições de contorno, e definem-se propriedades dos materiais e carregamentos (RAO, 2018).

Na etapa denominada solução, obtém-se a resolução para um conjunto de equações algébricas lineares ou não lineares, simultaneamente, de forma a obter resultados nodais, como deslocamentos e tensões (MADENCI; GUVEN, 2015).

Um software de implementação do MEF requer a inserção de informações como (TANKUT; TANKUT; ZOR, 2014):

1. Localizações espaciais de pontos nodais (geometria);
2. Elementos que conectam os pontos nodais;
3. Propriedades de massa;
4. Condições de contorno;
5. Carregamentos aplicados;
6. Opções de análise

A geometria do elemento é definida pela colocação dos pontos nodais geométricos. Com o desenvolvimento de softwares, o MEF pode ser aplicada para a análise de estruturas de geometria complexa, constituídas por múltiplos materiais e sujeitas a qualquer tipo de carregamento (AZEVEDO, 2003).

4 MODELOS NUMÉRICOS EM MEF PARA ESTUDOS EM CLT

Tendo em vista, a popularidade alcançada pela CLT nos últimos anos, em particular na Europa e na América do Norte, alguns estudos utilizando análise numérica foram desenvolvidos sobre o assunto. Entretanto, ainda não existe um consenso sobre o comportamento estrutural desse tipo de painel, que pode ser usado como parede e piso. Entre outras questões, as características ortotrópicas do CLT ainda geram inconsonância no desenvolvimento dos modelos numéricos (MARTINEZ-MARTINEZ et al., 2018).

O comportamento mecânico das vigas CLT é considerado complexo devido à direção ortogonal das fibras e à anisotropia da madeira. Propriedades mecânicas, como resistência e rigidez são diferentes

de acordo com as direções analisadas (longitudinal, radial e transversal). As propriedades ortotrópicas de resistência das peças de madeira têm grande influência na capacidade de carga dos painéis de CLT, notadamente quando se considera a distribuição das fibras de madeira devido a nós que ocorrem aleatoriamente (LI et al., 2019). Portanto, para projetar elementos de CLT, as propriedades mecânicas devem ser compreendidas. A seguir são apresentados alguns trabalhos científicos que utilizam modelos numéricos em MEF para o estudo do comportamento estrutural de painéis de CLT.

Na pesquisa desenvolvida por Chen e Lan (2013), avaliou-se o desempenho de sistemas CLT baseados em formato de caixa, para aplicação como vigas caixão. Esses sistemas apresentam peso estrutural reduzido sem perda significativa de resistência ou rigidez, em algumas situações de carregamento, como flexão fora do plano. Neste contexto, o objetivo principal deste estudo é desenvolver e verificar modelos tridimensionais utilizando o MEF, que podem ser usados para analisar o desempenho à flexão de sistemas CLT em formato de caixa sob carregamento fora do plano.

Antes da montagem dos painéis, o módulo de elasticidade (MOE) das peças de madeira foi obtido por meio do ensaio de vibração transversal. Para a pesquisa, foram feitos 4 tipos de vigas com variações de propriedades do material, número de camadas e direção da fibra em camada individual. Para cada tipo de modelo de viga foram feitas 10 réplicas. As vigas de CLT foram coladas com o adesivo fenol-resorcinol-formaldeído (PRF) e os corpos de prova foram testados utilizando o ensaio de flexão estática em 4 pontos.

O modelo numérico, desenvolvido no software ANSYS, foi discretizado como bloco estrutural tridimensional, definido por 8 nós com 3 graus de liberdade cada. Para a inserção do MOE no ANSYS, os pesquisadores consideraram o fator de 0,95 como a influência do método de teste dinâmico para ajustar os resultados obtidos para vibração transversal em comparação aos valores obtidos com o emprego de testes estáticos. De acordo com os resultados encontrados, Chen e Lan (2013) afirmam que o modelo numérico apresentado pode ser aplicado para o cálculo de deformação de carga de painéis de CLT com outras propriedades.

Edifícios híbridos construídos com painéis de CLT associados a estruturas metálicas foram avaliados quando sujeitos à abalos sísmicos. Schneider et al. (2015) utilizaram o MEF na análise numérica de conexões de elementos de aço e CLT. Inicialmente, os autores fizeram testes em protótipos de forma a prever situações hipotéticas. Nos testes, o tempo, o deslocamento e o carregamento foram monitorados. Os resultados dos testes experimentais foram usados para gerar os modelos numéricos em elementos finitos no *software* OpenSeens.

O OpenSeens é um programa de código aberto desenvolvido para aplicações em simulações de desempenho de sistemas estruturais e geotécnicos sujeitos a terremotos. O programa apresenta recursos

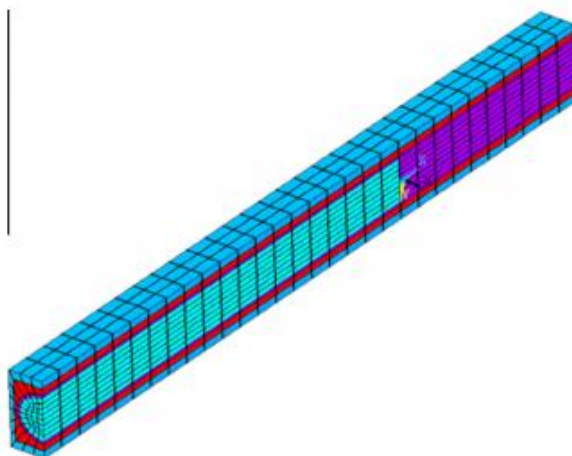
avançados para a modelagem e análise não linear de sistemas usando uma ampla variedade de modelos de materiais, elementos e algoritmos (OPENSEENS, 2020).

De acordo com Schneider et al. (2015), o modelo numérico desenvolvido apresenta uma boa correlação com os testes realizados em laboratório e, portanto, pode ser empregado na avaliação de estruturas mistas de CLT e aço. Entretanto, o modelo apresenta algumas limitações no que diz respeito a carregamentos cíclicos subsequentes. A pesquisa mostrou que a influência dos ciclos subsequentes pode ser significativa dependendo do método de avaliação dos resultados. O método empregado obteve boa correlação entre teste e modelo, mas pouca influência dos ciclos subsequentes no desempenho geral das conexões.

O comportamento mecânico de painéis de CLT foi investigado com o MEF numa abordagem complexa denominada estrutura de multi-escala (FLORES et al., 2015). O procedimento de multi-escala considera a madeira em escala menor (ou ultraestrutural – na ordem dos nanômetros), intermediária (ou celular - na ordem dos micrômetros) e escala maior (ou estrutural – na ordem de metros). Os modelos numéricos foram desenvolvidos no software ANSYS e a modelagem em nível ultraestrutural foi elaborada com uma malha que consiste em 4495 nós e 3960 elementos hexaédricos (Figura 8). Nessa escala, cada elemento finito tem como objetivo descrever o comportamento mecânica da microfibrila. As propriedades inseridas no modelo são referentes à espécie *Pinus Radiata*.

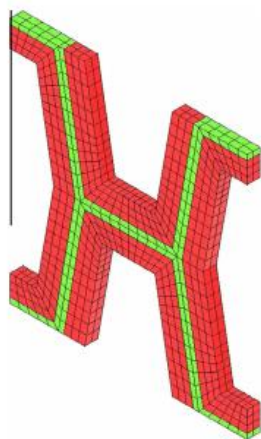
Posteriormente, Flores et al. (2015) desenvolveram uma malha de elementos finitos para modelar a célula da madeira, que consiste em 1917 nós e 1088 elementos (Figura 9). A repetição periódica do modelo de célula foi utilizada para formar o material em escala estrutural, neste caso, o painel de CLT. O painel foi discretizado em 379.093 nós e 345.600 elementos (Figura 10).

Figura 8- Malha de elementos finitos típica da microfibrila na menor escala considerada no estudo



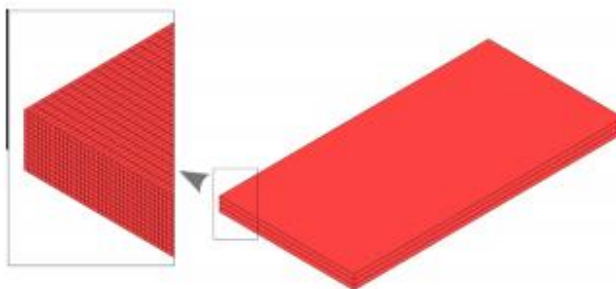
Fonte: Flores et al. (2015).

Figura 9 - Malha de elementos finitos típica da célula de madeira na escala intermediária



Fonte: Flores et al. (2015).

Figura 10 - Modelo computacional do painel CLT (em grande escala) composto por três camadas diferentes. O detalhe à esquerda mostra um refinamento típico da malha de elementos finitos



Fonte: Flores et al. (2015).

Para a caracterização do material foram feitos ensaios de flexão em vigas de madeira serrada e ensaios em placas CLT sujeitas a esforços de flexão, cisalhamento no plano e compressão. O estudo utilizou 162 vigas de madeira para obter o MOE pelo ensaio de flexão em 3 pontos. Nessa fase, a densidade das peças foi medida em vários pontos para a obtenção de uma densidade média representativa da madeira utilizada.

Para validação do modelo em escala múltipla, os autores compararam as previsões numéricas com os resultados experimentais para o MOE e a densidade das vigas de madeira serrada. De acordo com Flores et al. (2015), houve uma boa concordância entre os valores numéricos e experimentais. Após esta etapa, simulações do teste de flexão em painéis de CLT foram feitas para a comparação com os resultados experimentais. Dessa forma, comparou-se os deslocamentos experimentais com os numéricos.

Observou-se que as curvas experimentais apresentaram maior rigidez do que os resultados numéricos. Para pequenos níveis de deslocamentos, as previsões numéricas tendem a apresentar uma melhor concordância com a resposta experimental. Isso pode ser atribuído ao efeito de enrijecimento geométrico observado nas amostras experimentais, o que no modelo linear não foi possível determinar.

Simulações também foram feitas para os ensaios de cisalhamento e compressão e, a comparação entre os valores numéricos e experimentais apresentou boa concordância.

Os pesquisadores afirmam que a estratégia de modelagem utilizando o MEF em multi-escala em consonância com ensaios em laboratório pode desempenhar um importante papel na análise estrutural de painéis de CLT. O método de multi-escala também foi utilizado por Bitá et al. (2018) para investigar o comportamento estrutural de um edifício de CLT de doze andares submetido à remoção repentina de paredes de suporte internas e externas do pavimento térreo. Para o estudo do edifício nos níveis estrutural (global), componente (macro) e conexão (micro), utilizou-se o MEF por meio do software ANSYS.

Paredes e pisos executados em CLT foram desenvolvidos como elementos de casca de superfície em duas dimensões, com camadas diferentes para representar a configuração do painel e considerando o material ortotrópico. O micromodelo foi elaborado com o objetivo de verificar o comportamento da conexão e quantificar a rigidez rotacional do detalhamento. As conexões foram modeladas em 3 dimensões para avaliar a contribuição do número e diâmetro dos parafusos, seu comprimento de embutimento, bem como as dimensões dos suportes. O macro modelo foi construído em 2 dimensões usando a mesma suposição do modelo global.

Uma análise dinâmica não linear foi realizada em nível global para verificar o comportamento da estrutura sob as cargas extremas aplicadas. O estudo demonstra que os carregamentos aplicados e as deformações necessárias para desenvolver mecanismos de resistência são muito grandes para serem fornecidas pelo elemento proposto, se uma parede interna do piso térreo for removida.

Um modelo numérico empregando o MEF foi desenvolvido para verificar as propriedades dos painéis CLT fabricados no Uruguai, utilizando as espécies *Pinus taeda* e *Pinus elliotii* (BAÑO; GODOY; VEGA, 2016). Para a comparação, painéis de CLT foram fabricados em laboratório, os quais foram colados com adesivo isocianato. As bordas foram coladas com adesivo não estrutural. Destes painéis, foram retirados 4 corpos de prova que foram ensaiados a flexão em 4 pontos, até a ruptura.

Os resultados de MOE e MOR foram inseridos como dados de entrada para o modelo numérico, desenvolvido no *software* COMSOL *Multiphysics*. O adesivo foi modelado como um elemento individual entre camadas e os contatos entre as bordas das placas foram considerados livres. De acordo com os autores, quando comparados aos resultados experimentais, os valores numéricos apresentaram uma boa concordância. Além disso, os modelos desenvolvidos podem ser aplicados a outras configurações de camadas e espessuras de painéis de CLT.

O MEF foi utilizado no estudo sobre transferência de cargas próximas aos vãos existentes em painéis de CLT que funcionam como paredes (PAI; LAM; HAUKAAS, 2017). O *software* ANSYS foi utilizado para o desenvolvimento de dois modelos. O modelo A foi empregado para determinar o

comportamento de força-deformação e o modelo B foi usado para o estudo da torção na superfície colada entre os laminados dos painéis de CLT sob a ação de uma carga no plano. Os elementos utilizados na modelagem, como painéis, parafusos e cantoneiras, foram escolhidos na biblioteca do *software*.

No modelo A, o primeiro elemento considerado é o painel de CLT, que sofre deformação principalmente no plano sob a ação de uma carga lateral. O painel é composto por laminados alinhados ortogonalmente, que apresentam comportamento ortotrópico. Os conectores são modelados como elementos unidirecionais de comprimento zero com capacidade não linear. Outro componente a ser considerado para modelagem é o contato entre a parede e o piso. O contato pode ser modelado por meio de molas rígidas, que atuam somente quando submetidas a cargas de compressão. Para simular este comportamento, as molas de contato são modeladas como molas lineares somente de compressão, comprimento zero e com alta rigidez.

No modelo B, os elementos da viga também são considerados como um material ortotrópico. As superfícies coladas entre as pranchas são consideradas rígidas por natureza e são modeladas usando rigidez tridimensional de comprimento zero. Os autores afirmam que há uma boa concordância entre o modelo de elementos finitos e o modelo analítico. Entretanto, a modelagem de conectores precisa ser aprimorada e necessita de novos estudos.

No estudo do comportamento vibracional de estruturas executadas com painéis de CLT, Paolini et al. (2017) utilizaram elementos finitos hexaédricos. Para o desenvolvimento do modelo, três tipos de elementos caracterizados por diferentes comportamentos lineares do material foram considerados. Primeiramente, considerou-se as camadas dos elementos CLT e depois as conexões, sendo estas, entre os elementos CLT e entre parede e laje. Cada camada dos elementos CLT é representada por uma única camada de elementos finitos com material ortotrópico.

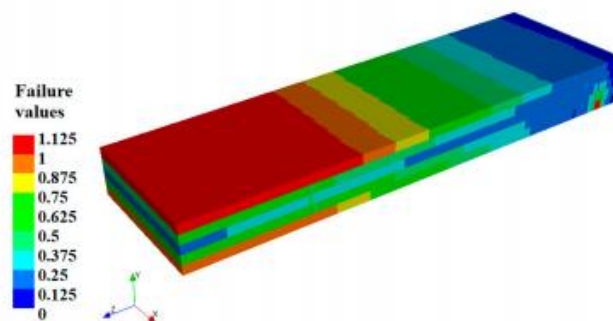
As conexões entre os elementos CLT são consideradas como elementos finitos que são dispostos em toda a espessura dos componentes. Estes elementos finitos são considerados ortotrópicos e a densidade é assumida igual à dos elementos CLT. Para as conexões entre parede e laje, consideram-se dois tipos representativos de elementos, um com um elastômero entre os componentes de CLT e o outro sem. Nestes casos, as conexões são consideradas como materiais isotrópicos.

As simulações numéricas foram comparadas às medições realizadas com o objetivo de validar o modelo e identificar valores de parâmetros adequados para representar as conexões. Observou-se que houve uma boa concordância entre simulações e medições, o que indica que as propriedades definidas para os materiais, a geometria e as condições de suporte da estrutura são adequadas. De acordo com os autores, a modelagem em MEF apresentada é adequada para prever o comportamento de vibração das estruturas de CLT estudadas.

O trabalho de Martinez-Martinez et al. (2018) utiliza o MEF para analisar o comportamento estrutural de vigas de CLT submetidas a esforços de flexão fora do plano. A modelagem numérica é desenvolvida no ANSYS e a viga é modelada como um material compósito composto por 5 camadas. O modelo foi representado com elementos sólidos de 8 nós, uma vez que cada uma das camadas era considerada um elemento espesso, em 3D. As propriedades mecânicas inseridas para representar a viga foram retiradas da literatura existente.

Para a simulação, supôs-se que as camadas estão perfeitamente unidas e as propriedades do material de cada camada são constantes ao longo da espessura. O regime não linear, considerando grandes deslocamentos, foi usado para simular o comportamento das vigas CLT (Figura 11). Os resultados numéricos foram comparados aos resultados dos ensaios realizados em laboratório. De acordo com Martinez-Martinez et al. (2018), o modelo em MEF apresentou resultados em concordância com os dados experimentais. Portanto, a modelagem é adequada para o estudo de critérios de ruptura para cada camada da viga de CLT.

Figura 11 - Distribuição de ruptura de uma viga de CLT de 5 camadas



Fonte: Martinez-Martinez et al., 2018.

O estudo desenvolvido por Li et al. (2020) analisou o comportamento a flexão de painéis de CLT fora do plano. Resultados experimentais foram comparados ao modelo numérico baseado no MEF. Os ensaios realizados em laboratório foram feitos com painéis de CLT executados com a espécie *Pinus Radiata*. Cada camada foi modelada individualmente com atribuição de propriedades do material usando coordenadas locais para contabilizar as variações na direção da grã.

A modelagem numérica foi feita no software ABAQUS, incluindo estágio elástico até atingir a ruptura. Os componentes da madeira foram modelados usando um bloco linear de 8 nós, e as vigas foram simuladas como blocos usando um elemento quadrático. A partir da simulação numérica, curvas força versus deflexão foram obtidas e comparadas aos resultados experimentais. Embora as curvas obtidas pelo MEF tenham sido ligeiramente subestimadas (4% em média), mostram uma concordância muito boa com as curvas testadas para carregamento máximo, bem como para rigidez inicial (LI et al.,

2020). Portanto, a modelagem desenvolvida pode descrever o comportamento dos painéis de CLT e pode ser aplicado em outros estudos sobre o assunto.

De acordo com Berg et al. (2019), painéis de CLT podem ser simulados com métodos numéricos unidimensionais e bidimensionais (2D) devido a rapidez e praticidade na obtenção de resultados. No entanto, painéis não colados nas bordas devem, preferencialmente, ser simulados em 3 dimensões (3D). As simplificações adotadas em modelos 2D produzem resultados que podem diferir significativamente dos cálculos 3D. O estudo tem como objetivo usar o MEF para modelar e comparar o deslocamento dos painéis CLT sob carregamento fora do plano com diferentes relações largura-altura das placas. E ao aplicar uma carga fora do plano, obter a deformação do painel para modelos 2D e 3D.

Quatro modelos de simulação diferentes foram desenvolvidos no *software* ABAQUS, dois modelos 2D e dois 3D. Os modelos eram simplesmente apoiados em duas e quatro bordas opostas. Além disso, considerou-se painéis com 3 e 5 camadas, orientadas, $0^\circ - 90^\circ - 0^\circ$ e $0^\circ - 90^\circ - 0^\circ - 90^\circ$, respectivamente. Em todos os casos, o material foi considerado ortotrópico e o regime, elástico.

Para a modelagem em 3D, foi aplicada uma condição de contato rígida e não deformável para as superfícies de contato coladas entre as camadas. A colagem de borda não foi considerada na modelagem do painel. Entretanto, duas variações foram adotadas, sem contato entre as bordas laterais das placas e com contato entre as bordas laterais. Já o modelo 2D não levou em consideração o efeito de painéis sem borda. Foi empregada geometria não linear e matriz assimétrica.

De acordo com os resultados obtidos, o uso de modelos numéricos 2D pode levar a resultados incorretos se a rigidez dos modelos não for ajustada para levar em consideração a largura da placa. Os resultados das simulações em 3D comprovaram que estes modelos podem ser usados para o estudo do comportamento de painéis de CLT sem colagem de borda.

5 CONCLUSÕES

Os painéis de CLT são uma tecnologia nova que vêm sendo utilizada em países europeus e na América do Norte, na construção de edifícios de 5 a 10 andares. O processo de fabricação é padronizado e a rapidez na montagem, o que garante produtividade e racionalização da construção civil. Além disso, este tipo de método construtivo possui aspectos ambientais consideráveis, já que utiliza madeira de reflorestamento de menor valor agregado. O processo de fabricação e instalação apresenta baixa geração de resíduos.

O material possui alta relação resistência-peso da madeira, permitindo que estruturas mais leves sejam construídas. Essa característica garante economia na preparação do local e nos custos de fundação. Tendo em vista a orientação alternada da grã, a estrutura laminar e a capacidade de suportar

cargas dentro e fora do plano, os painéis de CLT podem ser utilizados como elementos de paredes e lajes.

Para projetar tais elementos, é necessário o estudo dos painéis e de suas conexões. Embora existam métodos analíticos, a modelagem numérica pode ter um papel importante na previsão do comportamento estrutural dos painéis de CLT. Neste contexto, a aplicação de análise numérica por meio do MEF é um grande aliado.

As pesquisas que utilizam a modelagem em MEF para a verificação do comportamento mecânico de painéis de CLT indicam que há uma boa aproximação entre a análise numérica e os resultados experimentais. Os estudos mostram que a modelagem em multi-escala pode apresentar resultados bastante precisos tendo em vista seu nível de detalhamento, inclusive em estágio ultracelular. Deve-se considerar ainda, a possibilidade de utilização de modelos numéricos em 3 dimensões, os quais, segundo os estudos podem representar a estrutura com maior precisão.

De forma geral, a inserção de propriedades da madeira de acordo com a espécie a ser empregada no painel, a definição dos elementos, como lâminas e conectores, a correta utilização da biblioteca dos *softwares* e a discretização eficiente da malha podem garantir que a análise numérica represente o comportamento real da estrutura. Além disso, a validação dos modelos numéricos quando comparados aos estudos experimentais permitem que esses sejam empregados em outras análises com a possibilidade de alteração dos dados de entrada.

Dessa forma, é possível afirmar que a aplicação da modelagem numérica utilizando o MEF apresenta-se como uma ferramenta eficiente e capaz de prever o comportamento estrutural de elementos em CLT, sujeitos a esforços dentro e fora do plano.

REFERÊNCIAS

- Alves filho, a. Elementos finitos: a base da tecnologia cae. 6. Ed. São paulo: érica, 2018.
- Amorim, s. T. A.; mantilla, j. N. R.; carrasco, e. V. M. Análise dos métodos analíticos de dimensionamento de lajes de madeira lamelada colada cruzada. In: congresso latinoamericano de estruturas de madeira, 2, 2017, buenos aires, anales ... Buenos aires: universidade nacional noroeste, 2017. P. 1-7.
- Azevedo, a. F. M. Método dos elementos finitos. Portugal: faculdade de engenharia da universidade do porto, 2003. 258 p.
- Baño, vanesa; godoy, daniel; vega, abel. Experimental and numerical evaluation of cross-laminated timber (clt) panels produced with pine timber from thinnings in uruguay. In: world conference on timber engineering, wien, austria. 2016. P. 8.
- Berg, sven et al. Finite element analysis of bending stiffness for cross-laminated timber with varying board width. Wood material science & engineering, v. 14, n. 6, p. 392-403, 2019.
- Bitá, h. M.; currie, n.; tannert, t. Disproportionate collapse analysis of mid-rise cross-laminated timber buildings. Structure and infrastructure engineering, v. 14, n. 11, p. 1547-1560, 2018.
- Brandner, r. Et al. Production and technology of cross laminated timber (clt): a state-of-the-art report. In: focus solid timber solutions-european conference on cross laminated timber (clt). University of bath, 2013. P. 3-36.
- Brandner, r. Et al. Cross laminated timber (clt): overview and development. European journal of wood and wood products, v. 74, n. 3, p. 331-351, 2016.
- Calil neto, c.; molina, j. C.; calil junior, c; rocco lahr, f. A. Modelagem numérica do comportamento de ligações com parafusos autoatarraxantes em x em corpos de prova de mlc com madeiras do tipo eucalipto urograndis. Matéria (rio de janeiro), v. 22, n. 1, 2017. [Http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620170001.0121](http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620170001.0121).
- Carreira, m. R.; dias, a. A. Visual grading of softwoods: analysis of application of the north american method to pinus sp. Species planted in brazil. Scientia forestalis, n. 67, p. 78-87, 2005.
- Castro, e. C.; souza, f. T.; sarmanho, a. M. C. Análise numérica de ligação parafusada semirrígida em perfis formados a frio. For science, v. 7, n. 2, 2019. [Https://doi.org/10.29069/forscience.2019v7n2.e652](https://doi.org/10.29069/forscience.2019v7n2.e652).
- Chiromito, e.m.s.; et al. Propriedades mecânicas de painéis produzidos com lascas de madeira de três diferentes comprimentos. Scientia forestalis, v.44, n.109. 2016.
- Costa, a. A. P. Construção de edifícios com cross laminated timber (clt). 2013. 109 p. Dissertação (mestrado em engenharia civil) – faculdade de engenharia, universidade do porto, porto, 2013.
- Crosslam. Residência valinhos. 2020 disponível em: <http://www.crosslam.com.br/home/?q=content/resid%c3%aaancia-valinhos>. Acesso em: 16 out. 2020.

Ecker, t. W. P.; miotto, j. L.; turmina, g. Painéis de madeira lamelada colada cruzada para lajes: avaliação experimental mecânica sob diferentes níveis de consumo de adesivo. *Ciência & engenharia*, v. 26, n. 1, p. 17-25, 2017.

Flores, ei saavedra et al. Analysis of cross-laminated timber by computational homogenisation and experimental validation. *Composite structures*, v. 121, p. 386-394, 2015.

Guindos, p.; polocoser, t. Numerical calculations of the influence of the slope of grain on the effect of knots. *Europe journal wood and wood products*, v. 73, p.

Karacabeyli, e.; douglas, b. *Clt handbook: cross-laminated timber*. Us edition, 2013. Isbn 978-0-86488-553-1

Justo, r. A. E. G. Comparação do desempenho e de funcionamento de programas comerciais (ansys e sap2000) focado à análise sísmica. 2001. 85f. Dissertação (mestrado em engenharia civil) – universidade nova de lisboa/ faculdade de ciências e tecnologia, lisboa, 2001.

Kandler, georg et al. Stochastic engineering framework for timber structural elements and its application to glued laminated timber beams. *Construction and building materials*, v. 190, p. 573-592, 2018.

Klh uk. Norwich open academy. Portfolio: education. Disponível em: <http://www.klhuk.com/portfolio/education/open-academy,-norwich.aspx>. Acesso em: 15 out. 2020.

Kunz, m.; silva, c. C. A.; silva, j. L. Estruturas em madeira: uso do sistema gridshell para cobertura de picadeiro para centro de terapias alternativas. Seminário internacional de construções sustentáveis imed, porto alegre, 2016.

Li, h. Et al. Cross-laminated timber (clt) in china: a state-of-the-art. *Journal of bioresources and bioproducts*, v. 4, n. 1, p. 22-31, 2019.

Li, m. Et al. Bending strength predictions of cross-laminated timber plates subjected to concentrated loading using 3d finite-element-based limit analysis approaches. *Composite structures*, v. 220, p. 912-925, 2019.

Li, x. Et al. Experimental and numerical study on bending properties of heterogeneous lamella layups in cross laminated timber using australian radiata pine. *Construction and building materials*, v. 247, p. 118525, 2020.

Liao, y. Et al. Feasibility of manufacturing cross-laminated timber using fast-grown small diameter eucalyptus lumbers. *Construction and building materials*, v. 132, p. 508-515, 2017.

Madenci, e.; guven, i. *The finite element method and applications in engineering using ansys®*. Springer, 2015.

Mallo, m. F. L.; espinoza, o. Awareness, perceptions and willingness to adopt cross-laminated timber by the architecture community in the united states. *Journal of cleaner production*, v. 94, p. 198-210, 2015.

Martínez-martínez, juan enrique et al. Finite element analysis of composite laminated timber (clt). In: multidisciplinary digital publishing institute proceedings. 2018. P. 1454.

Miller, s. A.; horvath, a.; monteiro, p. J. M. Readily implementable techniques can cut annual co2 emissions from the production of concrete by over 20%. *Environmental research letters*, v. 11, n. 7, p. 074029, 2016.

Montanaro, a. Pallister, s. Quantum algorithms and the finite element method. *Physics subject headings*, v. 93, n. 3, 2016. <https://doi.org/10.1103/physreva.93.032324>.

Oliveira, g. L. Cross laminated timber (clt) no brasil: processo construtivo e desempenho. *Recomendações para o processo do projeto arquitetônico*. 2018. Tese de doutorado. Universidade de são paulo.

Oliveira, j. T. S.; paes, j. B.; vidaurre, g. B. Resistência biológica da madeira de espécies de eucalipto ao ataque de cupim de madeira seca. *Scientia forestalis*, v. 45, n. 113, p. 145-150, 2017.

Opensees. Opensees copyright @ 1999 the regents of the university of california. Disponível em: <https://opensees.berkeley.edu/index.php>. Acesso em: 23 out. 2020.

Pai, s. G. S.; lam, f.; haukaas, t. Force transfer around openings in cross-laminated timber shear walls. *Journal of structural engineering*, v. 143, n. 4, p. 04016215, 2017.

Paolini, alexander et al. A high-order finite element model for vibration analysis of cross-laminated timber assemblies. *Building acoustics*, v. 24, n. 3, p. 135-158, 2017.

Panels & furniture. Taiwan unveils first clt buildings. 2016. Disponível em: <https://www.panelsfurnitureasia.com/en/news-archive/taiwan-unveils-first-clt-building/70>. Acesso em: 16 out. 2020.

Pereira, m. C. M. Metodologia para estudo da caracterização estrutural de painéis de madeira lamelada colada cruzada. 2014. Tese de doutorado. Universidade de são paulo.

Pereira, m. C. M.; calil junior, c. Strength and stiffness of cross laminated timber (clt) panels produced with pinus and eucalyptus: experimental and analytical comparisons. *Matéria (rio de janeiro)*, v. 24, n. 4, 2019.

Ramage, michael h. Et al. The wood from the trees: the use of timber in construction. *Renewable and sustainable energy reviews*, v. 68, p. 333-359, 2017.

Rao, s. S. The finite element method in engineering. 6th ed. New jersey: john wiley & sons, 2018. 759p.

Schneider, j. Et al. Assessment and comparison of experimental and numerical model studies of cross-laminated timber mechanical connections under cyclic loading. *Construction and building materials*, v. 77, p. 197-212, 2015.

Stark, n. M.; cai, z.; carll, c. Wood-based composite materials: panel products, glued-laminated timber, structural composite lumber, and wood-nonwood composite materials. In: *wood handbook: wood as an engineering material*. Madison: u. S. Department of agriculture, forest service, forest products laboratory, 2010. Chapter. 11, p. 11.1-11.28. (fpl-gtr-190).

Sun, x.; he, m.; li, z. Novel engineered wood and bamboo composites for structural applications: state-of-art of manufacturing technology and mechanical performance evaluation. *Construction and building materials*, v. 249, p. 118751, 2020.

Tankut, n.; tankut, a. N.; zor, m. Finite element analysis of wood materials, *drvna industrija: znanstveni časopis za pitanja drvne tehnologije*, v. 65, n. 2, p. 159-171, 2014.

Uzel, m. Et al. Experimental investigation of flexural behavior of glulam beams reinforced with different bonding surface materials. *Construction and building materials*, v. 158, p. 149-163, 2018.

Véras, I. C. L. Modelos de elementos finitos e técnica de homogeneização aplicados à análise confiabilística de domínios bidimensionais reforçados. 2018. 70f. Dissertação (mestrado em engenharia civil) – universidade federal de alagoas, maceió, 2018.

Yeh, borjen et al. The cross-laminated timber standard in north america. *World*, v. 15, n. 19, p. 31-40, 2012.

Zangiácomo, a. L.; balanco, g. G.; crhistoforo, a. L.; lahr, f. A. R. Glued laminated timber produced with tropical brazilian wood species. *Journal of applied science and technology*, v. 23, p. 1-12, 2017.