

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS GUARAPUAVA
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA CIVIL**

Thayná Brena Alves Fausto

**ANÁLISE NUMÉRICA DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE
MADEIRA-LAMINADA-COLADA**

Guarapuava
Julho 2019

THAYNÁ BRENA ALVES FAUSTO

**ANÁLISE NUMÉRICA DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE
MADEIRA-LAMINADA-COLADA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação de Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná, Campus Guarapuava,
como parte dos requisitos para obtenção do título de
Engenheiro Civil.

Orientador: Edson Florentino de Souza
Coorientador: Carlos Francisco Pecapedra de Souza

Guarapuava
Julho 2019

THAYNÁ BRENA ALVES FAUSTO

**ANÁLISE NUMÉRICA DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE
MADEIRA-LAMINADA-COLADA**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo/a Professor/a Responsável pela disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2 da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Guarapuava, julho, 2019

BANCA EXAMINADORA

Prof. Edson Florentino de Souza (UTFPR)
Msc. pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

Prof. Carlos Francisco Pecapedra de Souza (UTFPR)
Msc. pela Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dyorgge Alves Silva (UTFPR)
Msc. pela Universidade de Brasília

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me permitir chegar até aqui, por me dar forças para enfrentar todas as dificuldades e por estar comigo em todas as etapas da minha vida.

A toda a minha família, que sempre esteve comigo e me apoiou durante todos os meus estudos, me incentivando e mostrando que era necessário seguir adiante.

Agradeço em especial a minha mãe Regiane, por sempre me apoiar em todas as minhas decisões e se dedicar todos os dias pela nossa família, mostrando que nós somos fortes e capazes de enfrentar todas as dificuldades, onde me deu auxílio em tempo integral e esteve disposta a me ajudar em qualquer circunstância. Serei eternamente grata.

A minha irmã Sophia que esteve presente me dando todo o incentivo, assim como a minha tia Ana Marcia e meus tios João Mario, Yago e Clayton. Ao meu avô Nosor que sempre conversou comigo com toda a alegria e orgulho por eu ter escolhido esse curso e minha avó Lourdes que sempre se mostrou carinhosa e preocupada comigo.

Agradeço em especial ao professor e orientador Edson Florentino, pela orientação, amizade e ensinamentos dados ao longo do curso e durante este trabalho. Ao professor Carlos Pecapedra por sempre estar presente e disposto a ajudar.

A todos os meus amigos que de alguma forma ajudaram e me incentivaram nessa trajetória acadêmica e contribuíram com o meu crescimento profissional e pessoal, me dando forças e apoio nos dias difíceis.

E a todos aqueles que, de alguma maneira contribuíram com o desenvolvimento deste trabalho.

Happiness is only real when shared.

Christopher McCandless

RESUMO

Com a busca por novas tecnologias, desenvolvimentos sustentáveis e limitações impostas pela madeira serrada, surgiu a MLC – Madeira Laminada Colada. Essa técnica permite a confecção de estruturas de grande porte, elevados comprimentos e elementos curvos a partir de madeira de reflorestamento. Devido ao seu controle produtivo, as peças de madeira são selecionadas para remoção de defeitos provenientes da madeira natural e classificadas, para que as peças de melhor qualidade fiquem dispostas nas regiões de maior solicitação da estrutura. Mesmo com a grande disponibilidade de madeira no Brasil, essa técnica não é muito difundida. Sendo assim, com o objetivo de estimular o uso e conhecimento da MLC, foram feitas análises numéricas no SAP2000, onde verificou-se o comportamento de vigas com comprimentos variando de 5m à 20m, analisando as tensões de cisalhamento, tensões normais e flecha atuante nas estruturas, bem como a resposta de um arco de 20m de comprimento em comparação com uma viga modelada com as mesmas dimensões. Os resultados encontrados mostraram que em vigas de grandes comprimentos as tensões de cisalhamento tendem a diminuir muito pouco mesmo com o aumento da altura da peça, já as tensões normais e flecha tem comportamento uniforme. Os arcos modelados tiveram respostas satisfatórias em relação as tensões normais e flecha, em contrapartida possuem baixa resistência ao cisalhamento em comparação com a viga.

Palavras-chave: Madeira Laminada Colada. Modelagem Numérica. Estruturas.

ABSTRACT

With the search for new technologies, sustainable developments and limitations imposed by the lumber, Glued Laminated Timber emerged. This technique allows the construction of large structures, high lengths and curved elements from reforestation wood. Due to their productive control, the pieces of wood are selected for the removal of defects from the natural wood and classified, so that the pieces of higher quality are arranged in the regions of greater demand of the structure. Even with the large availability of wood in Brazil, this technique is not widespread. Thus, in order to stimulate the use and knowledge of glued laminated wood, numerical analyzes were performed in SAP2000, where the behavior of beams with lengths varying from 5m to 20m was verified, analyzing the shear stresses, normal stresses and acting arrow in the structures, as well as the response of an arc of 20m length in comparison with a beam of the same dimensions. The results showed that in shear of great length the shear stresses tend to decrease very little even with the increase of the height of the piece, since the normal stresses and arrow have a uniform behavior. The shaped arches had satisfactory responses in relation to the normal and arrow stresses, in contrast they have low shear strength compared to the beam.

Palavras-chave: Glued Laminated Timber. Numerical modeling. Structures.

LISTA DE SÍMBOLOS

E_x – Módulo de elasticidade na direção longitudinal;

E_y – Módulo de elasticidade na direção radial;

E_z – Módulo de elasticidade na direção tangencial;

$E_{c0,ef}$ – Módulo de elasticidade a compressão paralela as fibras;

$E_{c0,m}$ – Valor médio do módulo de elasticidade na compressão paralela as fibras;

G_{xy} – Módulo de cisalhamento no plano xy;

G_{yz} – Módulo de cisalhamento no plano yz;

G_{xz} – Módulo de cisalhamento no plano xz;

$f_{c0,k}$ – Resistência a compressão paralela as fibras;

$f_{v,k}$ – Resistência ao cisalhamento;

$\rho_{aparente}$ – Densidade aparente;

$f_{c0,d}$ – Resistência a compressão paralela as fibras de cálculo;

$f_{v,d}$ – Resistência ao cisalhamento de cálculo;

ν_{xy} – Coeficiente de Poisson no plano xy;

ν_{yz} – Coeficiente de Poisson no plano yz;

ν_{xz} – Coeficiente de Poisson no plano xz;

γ_{wc} – Coeficiente de ponderação para estados limites últimos decorrentes de tensões de compressão paralela às fibras;

γ_{wv} – Coeficiente de ponderação para estados limites últimos decorrentes de tensões de cisalhamento paralelo às fibras;

k_{mod} – Coeficiente parcial de modificação.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	12
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO.....	12
1.2.1	Objetivo principal.....	12
1.2.2	Objetivos Secundários.....	12
2	A MADEIRA.....	14
2.1	GENERALIDADES.....	15
2.2	PROPRIEDADES FÍSICAS.....	17
2.3	PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	20
2.3.1	AVALIAÇÃO MECÂNICA.....	20
2.3.2	FLEXÃO.....	23
3	MADEIRA LAMINADA COLADA.....	25
3.1	HISTÓRICO.....	26
3.2	ASPECTOS GERAIS.....	27
3.3	PROCESSO DE FABRICAÇÃO.....	29
3.4	SELEÇÃO DA ESPÉCIE DE MADEIRA.....	31
3.5	EMENDAS E ADESIVOS.....	32
3.6	ESTUDOS RELACIONADOS.....	35
4	MODELAGEM NUMÉRICA.....	38
4.1	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	38
4.2	S.A.P.2000 – STRUCTURAL ANALYSIS PROGRAM.....	39
5	METODOLOGIA.....	40
5.1	CARACTERÍSTICAS DA MODELAGEM.....	40
5.2	MODELAGEM DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS.....	41
6	DISCUSSÕES E RESULTADOS.....	47
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	66
7.1	CONCLUSÃO.....	66
7.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	67
8	REFERÊNCIAS.....	69

1 INTRODUÇÃO

O setor da construção civil no Brasil desempenhou forte crescimento nos últimos 10 anos, apresentando uma importante participação econômica no desenvolvimento do país. Setores com segmentos em produtos cerâmicos, concreto, cimento, fibrocimento, gessos e estruturas metálicas foram os que tiveram maior participação no PIB brasileiro em comparação com elementos de madeira (BORGES, 2008; GOMES, 2018).

A madeira é um dos materiais mais antigos utilizados na construção civil, desde o início das civilizações o homem utiliza este material para a construção de moradias e armamentos. Registros históricos comprovam que os egípcios já produziam madeira laminada/serrada a cerca de 3 mil anos atrás (SANTOS, 2014).

Em países desenvolvidos da América do Norte e Europa, a madeira é utilizada em larga escala em diversas aplicações, onde centros de pesquisas realizam importantes estudos para caracterizar, regulamentar e auxiliar no uso da madeira como material estrutural (FIORELLI, 2005; GOMES, 2018). Nacionalmente, apesar de não ser utilizada amplamente quando comparada às estruturas de concreto ou aço, a madeira destaca-se por ser um produto de fonte renovável e de grande versatilidade (GOMES, 2018; SANTOS, 2014).

Dentre as vantagens da madeira, pode-se destacar ainda a sua excelente relação resistência/peso, bom isolamento térmico, baixo consumo energético no processamento, alta resistência mecânica e longa vida útil quando feita as devidas técnicas de tratamento (PFEIL e PFEIL, 2015).

Aspectos como a crescente preocupação com os impactos ambientais, redução da disponibilidade de madeiras nativas e os avanços tecnológicos, fizeram com que ocorressem grandes melhorias na implementação de produtos estruturais derivados da madeira, principalmente pela possibilidade de utilização de madeira de reflorestamento (CALIL *et al.*, 2014).

Desta forma, a idealização da sustentabilidade e a busca por construções e hábitos sustentáveis geraram a necessidade da racionalização dos materiais e recursos naturais no setor da construção civil. Tais fatores impulsionaram a utilização da madeira na indústria das estruturas.

No Brasil, pela grande disponibilidade de madeira de reflorestamento, o sistema construtivo de madeira laminada colada (MLC) apresenta uma alternativa de grande potencial na construção de estruturas de grande porte (GOMES, 2018; MARTINS, 2016).

A técnica de laminar peças de madeira teve origem na Alemanha, no final do século XIX e desde então, vem sendo utilizada em diversos tipos de estruturas de pontes, residências e coberturas, pois permite a construção de grandes peças a partir de madeira de reflorestamento (ZANGIÁCOMO, 2003).

Devido ao seu controle na produção, a MLC possibilita a remoção de defeitos provenientes da madeira natural, onde as lâminas de melhor qualidade são dispostas nos trechos de maior solicitação estrutural. Dessa forma, a peça apresenta maior resistência mecânica evitando patologias na estrutura (GOMES, 2018; FIORELLI, 2005).

Em face às limitações arquitetônicas impostas pelos sistemas convencionais em madeira, este material permite diferenciados elementos estruturais, tais como elementos curvos como mostrado na Figura 1, e também possibilidade de suportar grandes vãos (NEGRELI e MOLINA, 2015).

Figura 1 - Estrutura em MLC no Shopping Iguatemi em Fortaleza



(fonte: CARPINTERIA, 2015)

A madeira-laminada-colada possui grande difusão nos países desenvolvidos e no Brasil, apesar da disponibilidade de matéria-bruta, ainda não existe uma inserção significativa deste produto no mercado. Apenas nas últimas décadas a produção científica nacional sobre a MLC começa a trazer contribuições para o desenvolvimento e inserção dessa técnica construtiva (GOMES, 2018).

Mediante o exposto, o presente estudo analisou numericamente, através do método dos elementos finitos, o comportamento de elementos estruturais de MLC quanto as tensões e flecha; bem como a resposta de sistemas estruturais compostos por estes elementos onde os resultados obtidos mostraram o potencial desta técnica construtiva como material estrutural.

1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O tema trabalhado neste estudo limitou-se a análises numéricas em madeira do tipo laminada e colada. Os elementos estruturais estudados foram vigas biapoiadas com variação de altura e vigas em arco, sendo que ambos os casos as estruturas variaram em seu comprimento. As análises numéricas foram desenvolvidas no software SAP2000.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O presente trabalho tem em seu escopo os objetivos principal e secundários apresentados a seguir.

1.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do trabalho foi analisar numericamente o comportamento estrutural da madeira laminada colada solicitada por um carregamento distribuído em estruturas de diferentes comprimentos, através de simulações executadas no software SAP2000.

1.2.2 Objetivos Secundários

Os objetivos secundários deste trabalho foram:

- Simular um carregamento distribuído de 10 kN/m em elementos estruturais de MLC;
- Avaliar a distribuição de tensões nas regiões de maior solicitação;

- Avaliar as propriedades mecânicas de compressão, tração e cisalhamento das lâminas e da linha de cola em função seção transversal e classe de resistência da madeira;
- Avaliar a flecha atuante nas estruturas de MLC em função seção transversal e classe de resistência da madeira;
- Identificar as seções transversais que atendem aos valores limites estabelecidos pela ABNT 7190 (1997).

2 A MADEIRA

Pela sua grande disponibilidade na natureza, facilidade manuseio e excelente resistência, a madeira vem sendo utilizada em diversos setores da construção civil. No Brasil, a madeira é utilizada para diversas finalidades, como a construção de residências, depósitos, pontes, passarelas, igrejas e indústrias móveis, como canteiros de obra (Figura 2). Destacando-se especialmente pelo emprego em ambiente altamente corrosivos, como indústrias químicas e construções a beira mar (PFEIL e PFEIL, 2015; GESUALDO, 2003).

Figura 2 - Estruturas em madeira. (a) Residência unifamiliar – Santo Antônio do Pinhal/SP¹; (b) Capela – Tatuí/SP²; (c) Residência unifamiliar – Campos do Jordão/SP³; (d) Ateliê Acaia – São Paulo/SP⁴.



(a)



(b)



(c)



(d)

(fonte¹: KON, 2015; fonte²: KON, 2006; fonte³: FIALDINI, 2002; fonte⁴: VIÉGAS, 2002)

A utilização da madeira na indústria da construção torna-se cada vez mais uma iniciativa sustentável, uma vez que novas tecnologias permitem a utilização integral deste material. Em comparação com os demais materiais construtivos como concreto armado e aço, a energia gasta para processamento e os resíduos gerados nas construções em madeira são inferiores, onde até

mesmo os resíduos provenientes da construção podem ser utilizados em outros setores (MARQUES, 2008; SANTOS, 2014).

Em contrapartida, a madeira apresenta deterioração por ataque de fungos e insetos, flamabilidade, radiação ultravioleta e degradação por ácidos e bases fortes. Devido à absorção ou perda de umidade, a madeira apresenta variações dimensionais que afetam consideravelmente a sua resistência (MARTINS, 2016).

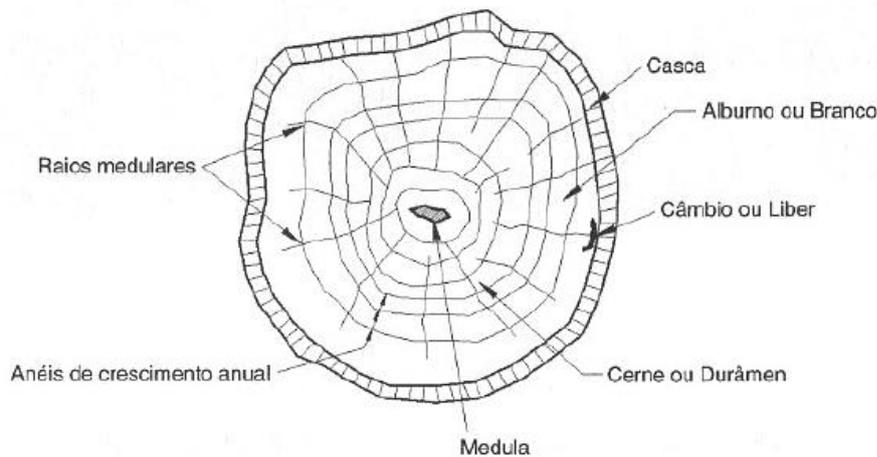
Por ser um material natural, apresenta ainda inúmeros defeitos, como nós e fendas que interferem em suas propriedades. Entretanto, esses fatores podem ser facilmente contornados através de um eficiente controle produtivo, bem como o uso preservantes industriais e acabamentos superficiais no produto (PFEIL e PFEIL, 2015; MARTINS, 2016).

Apesar das tecnologias e vantagens do material, no Brasil o emprego da madeira na construção de estruturas ainda não ocorre de forma satisfatória, uma vez que o desconhecimento por parte da sociedade e à falta de projetos específicos em madeira influência diretamente na sua baixa procura quando comparada a estruturas de concreto. Além disso, muitas estruturas em madeira ainda são construídas sem projetos adequados, fator no qual compromete o seu funcionamento, gerando estruturas que apresentam flechas excessivas, empenamentos e instabilidade (GESUALDO, 2003).

2.1 GENERALIDADES

A madeira é um material heterogêneo de tecido vegetal com características definidas pela fisiologia da árvore, sendo constituída de raiz, tronco e copa. Madeiras de construção são obtidas através dos troncos das árvores e crescem pela adição de camadas em volta da medula conforme a Figura 3 (CARVALHO et al., 2009; CORREIA, 2009).

Figura 3 – Seção transversal de um tronco



(fonte: PFEIL e PFEIL, 2015)

Constituída por duas camadas, a casca tem a função de proteger a árvore, a camada mais externa da casca tem espessura irregular e é formada por células mortas; a camada interna, é uma fina película formada por células vivas que conduzem alimento para as folhas. O alburno tem a função de conduzir seiva das raízes para as folhas e a sua espessura varia conforme a espécie da árvore (PFEIL e PFEIL, 2015; CORREIA, 2009).

A madeira utilizada para a construção preferencialmente é retirada do cerne, possuindo uma coloração mais escura, essa camada tem a função de sustentar o tronco. Dessa forma, o cerne apresenta maior densidade, estanqueidade, resistência a solicitações e a ataques biológicos (PFEIL e PFEIL, 2015; CORREIA, 2009)

A parte central do tronco denomina-se medula, com espessura reduzida, esta camada é constituída por tecido um tecido macio sem resistência mecânica e durabilidade. (CORREIA, 2009)

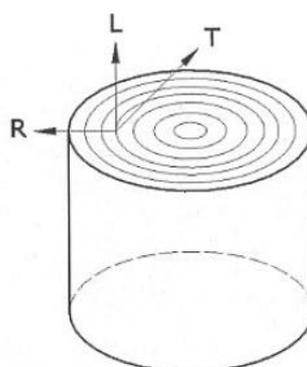
As madeiras podem ser classificadas em duas categorias, sendo elas: madeiras duras e madeiras macias. As madeiras duras tem crescimento lento e possuem melhor qualidade, esse material é proveniente de árvores frondosas como peroba, ipê, aroeira e carvalho. Madeiras derivadas de arvores coníferas como pinheiro-do-paraná, pinheiro-bravo e pinheirinho tem crescimento rápido, e se classificam como madeiras macias (CARVALHO *et al.*, 2009; PFEIL e PFEIL, 2015).

2.2 PROPRIEDADES FÍSICAS

A madeira é material natural não homogêneo que possui grande variabilidade e complexidade na sua estrutura, durante o período de crescimento a madeira adquire características intrínsecas uma das outras devido a fatores naturais como: espécie, temperatura climática, defeitos e teor de água presente em sua estrutura. Dessa forma, para melhor aproveitamento deste material, é necessário conhecer as suas propriedades e variações (CORREIA, 2009; GESUALDO, 2003).

Enquadra-se como uma das propriedades físicas da madeira a anisotropia, possuindo propriedades distintas em relação aos diversos planos ou direções celulares, este material apresenta três principais direções: longitudinal, radial e tangencial conforme a Figura 4. As direções radial e tangencial não apresentam relevância significativa para o dimensionamento estrutural, onde na maioria dos casos basta se atentar as propriedades nas direções longitudinal e perpendicular a essas fibras (PFEIL e PFEIL, 2015; GESUALDO, 2003).

Figura 4 - Anisotropia da madeira. Indica-se as direções longitudinal (L), radial (R) e tangencial (T).



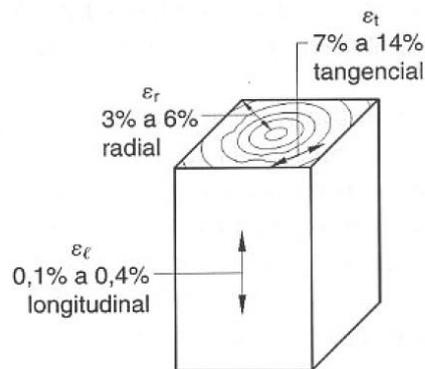
(fonte: PFEIL e PFEIL, 2015)

A umidade também é uma propriedade física de suma importância na madeira, onde a determinação do teor de umidade e conhecimento da sua variação tem importante papel para o dimensionamento e desempenho estrutural, uma vez que a madeira é um material altamente absorvente. A madeira incha e retrai-se com a variação da umidade no ambiente, o que afeta a geometria das peças em serviço e resistência mecânica dos elementos estruturais (SCREMIM, 2013).

Já a densidade é a propriedade física que mais relaciona-se com a resistência mecânica da madeira, uma vez que madeiras mais densas são em geral mais resistentes. Pode-se ainda citar que o teor de umidade presente nas peças tem grande influência sobre a densidade, sendo que a densidade é uma medida de peso por unidade de volume. Para o cálculo estrutural a densidade é calculada considerando o volume aparente, de modo que não é quantificado o volume dos poros, sendo assim, o teor de água influencia no peso e no volume da peça (CORREIA, 2009; JUNIOR, 2006).

A capacidade física da madeira de alterar dimensões quando o seu teor de umidade se modifica denomina-se retração. Devido a sua anisotropia, a madeira não apresenta a mesma proporção de retração segundo as direções longitudinal, radial e tangencial. As retrações nas direções tangenciais são as mais significativas, onde para uma redução de umidade de 30% a 0% a retração tangencial varia em média de 5% a 10%. A retração na direção radial é aproximadamente a metade da direção tangencial. As variações segundo a direção longitudinal são menos expressivas, com valores de 0,1% a 0,3% para secagem de 30% a 0%, como mostra a Figura 5 (PFEIL e PFEIL, 2015; JUNIOR, 2006).

Figura 5 - Vista isométrica da madeira mostrando as três direções principais de retração



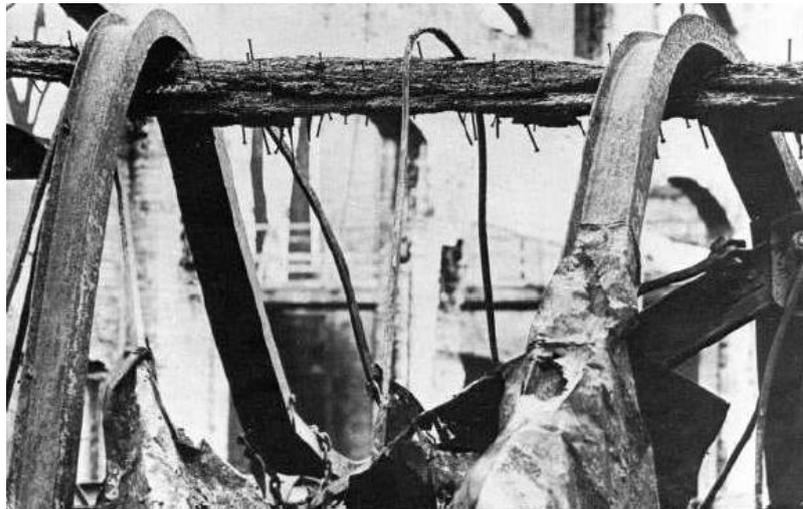
(fonte: PFEIL e PFEIL, 2015)

A variação dimensional provocada pela modificação do teor de umidade, gera tensões internas nas diferentes direções da madeira, o que durante o processo de secagem provoca ocorrência de defeitos como empenos, rachaduras e fendas. De modo que, defeitos como fendas influenciam consideravelmente a resistência mecânica de peças estruturais (CRUZ, 2001).

Em relação a deterioração da madeira, este material está sujeito a ataques por diversas origens, dentre elas as que mais se destacam são: ataques biológicos e ação do fogo. A durabilidade das peças estruturais no que se refere a ataques biológicos como fungos, cupins, moluscos e crustáceos marinhos varia de espécie, camada do tronco de onde foi extraída a madeira e condições ambientais. Devido a esses fatores, é de grande importância que sejam realizados tratamentos químicos nas peças estruturais de madeira, assim facilitando a sua durabilidade (PFEIL e PFEIL, 2015; CORREIA, 2009).

A madeira quando exposta ao fogo apresenta melhor desempenho do que estruturas como aço e concreto armado. A Figura 6, mostra uma viga de madeira submetida a um incêndio, onde sofreu redução da seção transversal, mas manteve a capacidade de suportar o seu peso próprio e das vigas de aço, que entraram em colapso (CORREIA, 2009).

Figura 6 - Viga de madeira submetida a um incêndio



(fonte: CORREIA, 2009)

Mesmo sendo um material inflamável, tanto a madeira quando o carvão proveniente da combustão são isolantes térmicos e retardam o fluxo de calor para o interior da peça, diminuindo a velocidade de degradação (MARTINS, 2016). Dessa forma, a madeira pode ser responsável pela propagação do fogo, mas suportará elevadas temperaturas por um maior período de tempo (GESUALDO, 2003).

2.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Para o dimensionamento estrutural é necessário uma escolha eficaz da espécie e do corte da madeira a ser empregada de acordo com as suas aptidões naturais. A concentração e o arranjo do tecido celular da madeira são elementos que definem as propriedades mecânicas, bem como a resistência deste material. Dessa forma, torna-se indispensável o estudo do seu comportamento mecânico para avaliação da capacidade resistente (CORREIA, 2009).

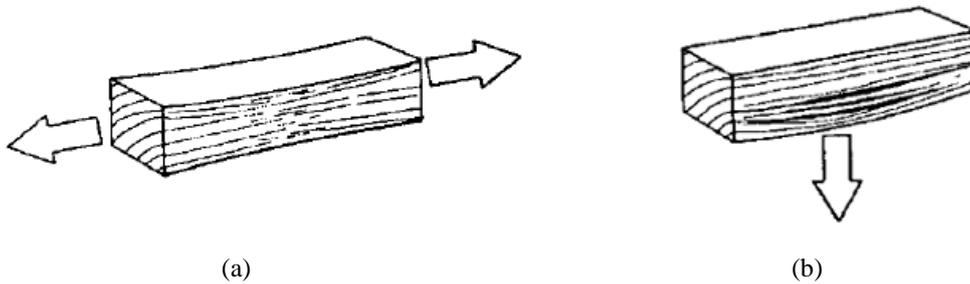
A estrutura celular da madeira caracteriza-se por um conjunto denso de fibras dispostas longitudinalmente e implantadas numa matriz, sendo que cada fibra contribui de forma própria para a resistência mecânica. Sendo assim, a madeira não possui uma resistência global em todas as suas direções, de modo que o seu comportamento é analisado em face ao tipo de solicitação, grandeza, duração e direção. Vale ressaltar que a direção é o fator mais determinante, pois observam-se grandes diferenças de valores de resistência no sentido perpendicular e paralelo as fibras (BORGES, 2013).

2.3.1 AVALIAÇÃO MECÂNICA

Segundo Borges (2013), a avaliação mecânica da madeira é verificada em duas direções principais, sendo dispostas no sentido paralelo (axial) e perpendicular (normal) as fibras, onde são analisadas as resistências quanto a tração, compressão, flexão, fendilhamento e cisalhamento. A dureza, resistência a fadiga e resistência a cargas de longa duração (fluência) também se enquadram como propriedades mecânicas da madeira.

A madeira quando solicitada a esforços de tração no sentido axial (Figura 7a) gera uma aproximação entre as fibras, contribuindo para o aumento da coesão e aderência da peça, o que torna a resistência bastante elevada. Todavia a resistência a tração no sentido perpendicular as fibras (Figura 7b) é reduzida, sendo que esse esforço ocorre em alguns casos em ligações e em vigas curvas de MLC. A resistência a tração neste sentido é 25 a 50 vezes menor do que na direção axial, isso deve-se ao escasso número de fibras que a madeira possui na direção perpendicular (CORREIA, 2009; PFEIL e PFEIL, 2015).

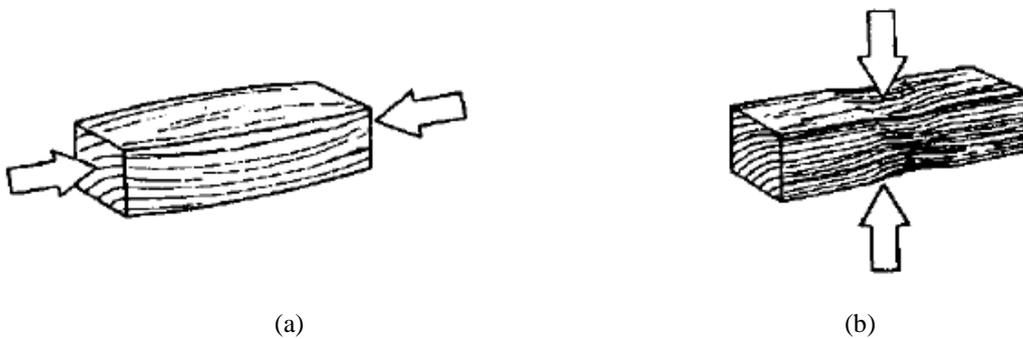
Figura 7 – Peças estruturais tracionadas. (a) Elemento submetido a tração paralela as fibras; (b) Elemento submetido a tração perpendicular as fibras



(fonte: CALIL, 1998)

Júnior (2006) afirma que a resistência a compressão axial é menor quando comparada a tração, de modo que a solicitação de compressão neste sentido também provoca a separação das fibras longitudinais (Figura 8a) ou flambagem. Já a resistência a compressão perpendicular as fibras (Figura 8b) refere-se ao esmagamento, que por sua vez estende-se como sendo a massa volumétrica do material.

Figura 8 – Peças estruturais comprimidas. (a) Elemento submetido a compressão paralela as fibras; (b) Elemento submetido a compressão perpendicular as fibras

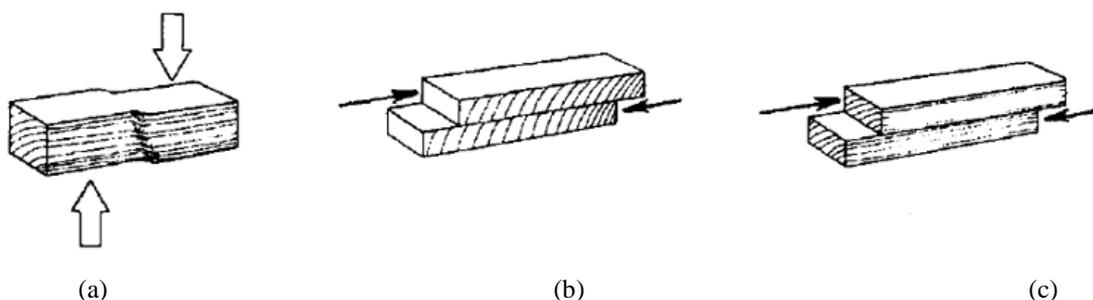


(fonte: CALIL, 1998)

O cisalhamento em peças de madeira podem se comportar de três maneiras distintas. O cisalhamento no sentido vertical deformam as células de madeira no sentido perpendicular ao eixo longitudinal (Figura 9a). O cisalhamento perpendicular faz com que as células rolem uma sobre as outras no sentido perpendicular ao eixo longitudinal (Figura 9b). Por sua vez, o cisalhamento horizontal é o mais crítico e leva a ruptura, pois a estrutura celular da peça tende a se separar e deslizar longitudinalmente (Figura 9c). (CALIL; 1998)

No cisalhamento, a resistência é determinada pelo deslizamento ocorrido entre as fibras paralelas seção de corte na ruptura, dado que esta situação retrata o comportamento estrutural mais desfavorável madeira (CORREIA, 2009; PFEIL e PFEIL, 2015).

Figura 9 – Peças estruturais submetida a cisalhamento. (a) Cisalhamento vertical; (b) Cisalhamento perpendicular; (c) Cisalhamento horizontal



(fonte: CALIL, 1998)

O fendilhamento, propriedade muito característica de materiais fibrosos, expressa a capacidade da madeira de resistir quanto ao descolamento entre as fibras. Sendo causado em geral por esforços de tração perpendicular as fibras (CORREIA, 2009).

A ABNT (1997), aborda os esforços de tração paralela as fibras, tração axial as fibras e compressão axial as fibras como sendo os esforços resistentes das peças estruturais de madeira obtidos através de ensaios destrutivos, onde são analisados o diagrama de tensão deformação linear até a ruptura e obtidos os valores característicos para espécies de madeira definidas.

A dureza é a resistência do material quanto a penetração, risco e desgaste. O conhecimento dessa propriedade permite determinar a trabalhabilidade da madeira, podendo assim definir a espécie mais apropriada para uma peça que precisará de entalhes. De modo geral a dureza no sentido axial é maior que a dureza no sentido radial e tangencial (KLOCK, 2000).

Júnior (2006) cita que a resistência relacionada a capacidade de um elemento estrutural suportar cargas alternadas de compressão e tração, deformando-se sem atingir a ruptura é definida como fadiga. Entretanto Macêdo e Calil (2007) afirmam que apesar da madeira ser um material de vasta aplicação estrutural, as informações sobre esta propriedade são limitadas quando comparadas a outros materiais como metais e compósitos.

Já a fluência acontece quando elementos estruturais de madeira estão sujeitos a esforços de longa duração ou grandes magnitudes sem atingir a ruptura, esse fenômeno provoca danos internos na peça estrutural, reduzindo assim a sua capacidade de carga. Diferentemente do módulo de elasticidade, que diz respeito a capacidade do material voltar a sua forma original ao ser removido um esforço (CRUZ, 2001; KLOCK; 2000).

Pode-se dizer que a umidade também pode provocar a fluência na madeira, uma vez que esse fator gera deformações na estrutura e assim diminui a sua resistência (CRUZ, 2001).

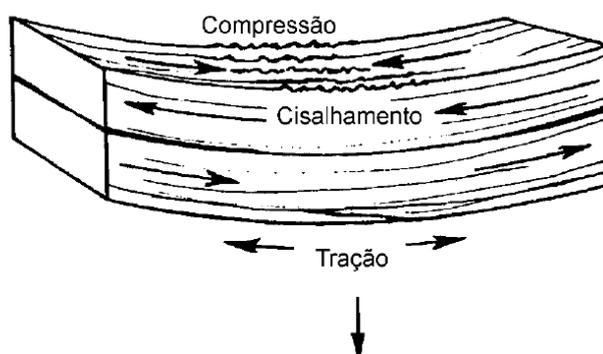
2.3.2 FLEXÃO

A madeira é um material que possui excelente resistência a flexão. Muitos elementos estruturais como terças, caibros e ripas de telhados, tabuleiros de pontes e vigas são submetidas a flexão ao longo da sua vida útil. De modo que avaliar a resistência quanto a esse esforço torna-se indispensável (GESUALDO, 2003).

Em muitos casos, uma peça estrutural pode ser submetida a flexão em duas direções perpendiculares, sendo chamada de flexão oblíqua, isso é visto muitas vezes em madeiramento de telhados. Vigas são geralmente solicitadas a flexão simples (GESUALDO, 2003).

Na flexão simples (Figura 10), as fibras são solicitadas à tração e compressão paralela as fibras e ao cisalhamento horizontal, mas de modo geral madeira possui elevada resistência quanto a esse esforço, atingindo valores próximos a resistência a tração paralela as fibras (JUNIOR, 2006).

Figura 10 – Tensões devido a flexão na madeira



(fonte: CALIL, 1998)

Quando uma peça de madeira é solicitada a flexão, ela pode eventualmente romper por tração. Esse fato pode ser explicado pela formação de pequenas falhas na área de compressão, sendo seguidas de um enrugamento visível nesta mesma região. A partir desse evento, a área de compressão é expandida, conseqüentemente a área de tração diminui e deixa de resistir, ocasionando o rompimento da peça (CALIL, 1998).

O módulo de elasticidade quanto a flexão constitui-se como um parâmetro para se medir a flexibilidade ou rigidez de um material. Sendo assim, conhecê-lo torna-se de suma importância, uma vez que é possível correlacionar o módulo de elasticidade com a tensão aplicada no elemento solicitado (CORREIA, 2009).

3 MADEIRA LAMINADA COLADA

A preocupação com os impactos ambientais, sustentabilidade e a busca por elementos estruturais de qualidade, agregados aos avanços tecnológicos na área de adesivos e manufatura, fizeram com que ocorressem grandes melhorias nos produtos derivados de madeira, principalmente pela possibilidade de utilização de madeira de reflorestamento (CALIL, 2011).

Dito isso, dentre as soluções alternativas envolvidas a madeira maciça, destaca-se a MLC. Este material pode ser empregue nas mais variadas formas estruturais, podendo suportar grandes vãos devido a sua precisão durante a fabricação (CALIL *et al.*, 2014; NEGRELI e MOLINA, 2015). Além disso, a alta plasticidade das lâminas permite estruturas que apresentem curvas e torções (GOMES, 2018).

A Figura 11 mostra um espaço de convivência em um condomínio em Iporanga – SP. Executado em MLC, a estrutura apresenta vigas curvas com um vão de 15 m de comprimento apoiada sobre pilares em V.

Figura 11 – Espaço de convivência – Iporanga/SP.



(fonte: ITA CONSTRUTORA, 2011)

A seleção da espécie de madeira a ser empregada na estrutura, espessura das lâminas, tipo de adesivos, tratamentos feitos na madeira, tipo de ligações e emendas podem afetar

expressivamente as propriedades mecânicas para qual a estrutura foi projetada. Devem ser analisados ainda, as condições climáticas que a estrutura estará submetida. Devido a todos esses fatores, torna-se imprescindível um estudo aprofundado das variáveis agregadas aos elementos estruturais de MLC (CALIL *et al.*, 2014; CALIL, 2010).

3.1 HISTÓRICO

A técnica de laminar peças de madeira surgiu final do século XIX, na Alemanha, quando Otto Hetzer teve a primeira patente desta técnica. Devido a disponibilidade de peças de madeira de pequenas dimensões na região e a restrição do uso do aço imposta pela Segunda Guerra Mundial, Hetzer teve a ideia de obter peças estruturais mais avantajadas a partir de peças de madeira de pequenas dimensões, surgindo assim, a MLC (SANTOS, 2014; ZANGIÁCOMO, 2003).

O projeto de patente exposto por Hetzer, tratava-se de uma estrutura em pórtico de MLC, onde apresentava pilares verticais com transição para bordas curvas e vigas inclinadas. Entretanto, as Estruturas Hetzer, como era chamada a princípio pelos europeus, destinava-se principalmente a sistemas estruturais em ambientes internos devido as limitações dos adesivos, que não eram resistentes a água (MARTINS, 2016; TELES, 2009).

Devido a rigorosas manutenções, algumas estruturas projetadas por Heltzer ainda permanecem em serviço. Construída em 1911 na Suíça, a cúpula da cobertura da torre ainda permanece em serviço, fazendo parte atualmente da Universidade de Zurique, como mostra a Figura 12 (ZANGIÁCOMO, 2003)

Figura 12 – Estrutura da cúpula feita em MLC.



(fonte: ZANGIÁCOMO, 2003)

A primeira aplicação da MLC na América, ocorreu nos Estados Unidos em 1934, na construção de laboratórios em Wisconsin. Em 1939 a MLC começou a ser implantada na construção de ginásios, igrejas, pontes e residências. (SANTOS, 2014; TELES, 2009).

De modo que, com os avanços tecnológicos e com o desenvolvimento dos adesivos a prova d'água, a MLC começou a ser utilizada em larga escala nas mais variadas aplicações em vários países do mundo (FIORELLI, 2005).

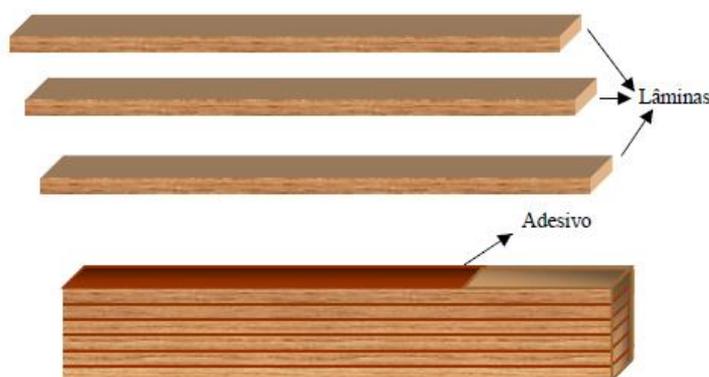
3.2 ASPECTOS GERAIS

O termo madeira laminada colada na área das estruturas, refere-se a elementos produzidos a partir da colagem de lâminas de madeira com dimensões reduzidas, quando comparadas as dimensões da peça final projetada. De modo que as lâminas são coladas uma sobre as outras com as fibras paralelas ao eixo longitudinal do elemento estrutural até se atingir a altura e largura da peça desejada (GOMES, 2018; MARTINS, 2016).

As lâminas que não possuem comprimento compatível com a dimensão da peça estrutural, são emendadas na longitudinal até atingirem comprimentos suficiente, as lâminas podem ainda ser arqueadas pra se obter uma peça curva. O que torna os elementos de MLC um avanço no setor das estruturas, pois devido as suas emendas as dimensões das peças são limitadas somente ao processo de produção e sistemas de transporte (FIORELLI, 2005; MIOTTO, 2009).

A Figura 13 ilustra a disposição das lâminas em uma peça de MLC e o adesivo para colagem das faces de madeira.

Figura 13 – Disposição da lâminas em uma peça de MLC



(fonte: ZANGIÁCOMO, 2013)

Na produção de peças de MLC as lâminas são selecionadas de acordo com o tipo de solicitação que a estrutura estará sujeita, de modo que as lâminas de melhor qualidade fiquem dispostas nas regiões de maior solicitação. No caso de peças sujeitas a flexão, as lâminas mais superiores e inferiores terão resistências maiores do que as lâminas intermediárias (MIOTTO, 2009; CÓRCOVA *et al.*, 2016).

Dentre as vantagens do emprego da MLC na construção civil, cita-se a possibilidade de remover defeitos provenientes da madeira natural sem prejudicar a dimensão final da peça. Os defeitos como nós e rachaduras são removidos e o restante da peça é montada através de emendas longitudinais (FIORELLI, 2005).

Martins (2016) aponta a uniformidade da umidade no interior das peças como um dos principais benefícios da MLC. Sabe-se que a velocidade de secagem da madeira depende diretamente da espessura da peça, neste caso como a peça estrutural é formada por lâminas de espessura reduzida, a peça final acaba apresentando uma uniformidade em toda a sua seção. Sendo assim, devido ao controle durante a secagem e na produção, os defeitos de distorções e fissuras na peça são reduzidos, influenciando diretamente na capacidade resistente e na rigidez.

Entretanto, o processo de produção da MLC resulta em um custo final elevado quando comparado com a produção de peças em madeira maciça. De modo que os custos com o

processo de fabricação da MLC envolvem a seleção das peças de madeira, equipamentos, adesivos e mão de obra especializada (FIORELLI, 2005).

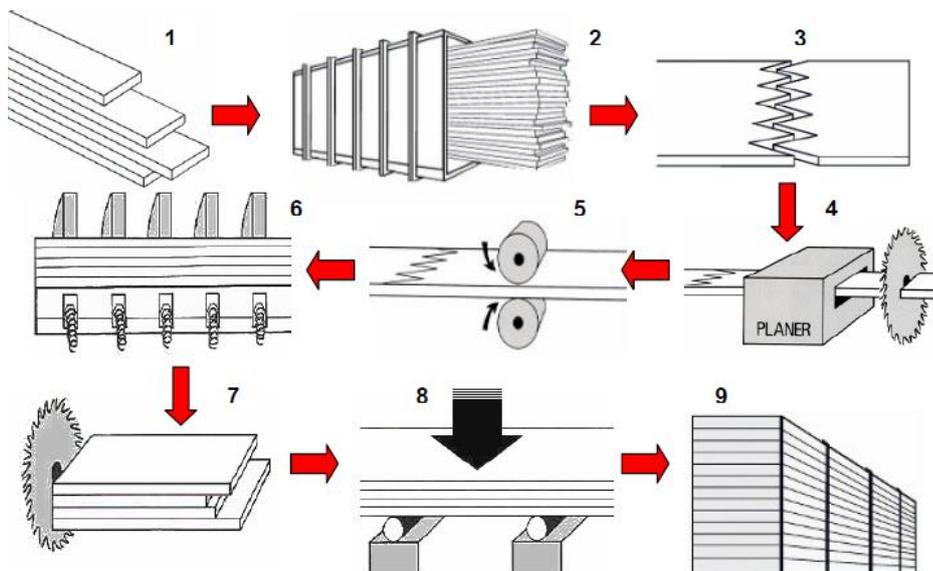
3.3 PROCESSO DE FABRICAÇÃO

O processo de fabricação da MLC tem um rigoroso controle, afim de melhorar o desempenho das propriedades físicas e mecânicas dos elementos estruturais a serem projetados. Toda a produção das peças de MLC ocorrem dentro da indústria, de modo que a madeira bruta passa por controlados processos até a obtenção do produto final (GOMES, 2018; TELES, 2009).

Miotto (2009) resume que o processo de fabricação da MLC se dividem em 4 etapas, sendo elas: (1) secagem e classificação das lâminas, (2) execução das emendas, (3) colagem das lâminas e (4) acabamentos. Enquanto que Teles (2009) exemplifica que existem 9 detalhadas etapas de fabricação, sendo elas: (1) separação e classificação das lâminas, (2) secagem e acondicionamento, (3) união das emendas, (4) dimensionamento das lâminas, (5) aplicação do adesivo, (6) prensagem, (7) dimensionamento da viga, (8) teste de resistência e linha de cola, (9) aplainamento e acabamento da viga.

A Figura 14, mostra o processo de fabricação da MLC exemplificado por Teles (2009).

Figura 14 – Etapas de fabricação da MLC



(fonte: TELES, 2009)

Na etapa de separação e classificação das lâminas, a madeira passa por uma inspeção visual e mecânica que tem por objetivo determinar as características das lâminas. A classificação visual consiste na inspeção das quatro faces das lâminas, afim de identificar e avaliar a localização e natureza dos nós e defeitos presentes na superfície. A classificação mecânica consiste na realização de ensaios não destrutivos, tendo como objetivo determinar o módulo de elasticidade. Dessa forma, são separadas as peças com as mesmas características e módulo de elasticidade, onde são agrupadas em lotes e sub-lotes, para serem aplicadas conforme o elemento solicitante (FIORELLI, 2005; GOMES, 2018).

A determinação da densidade e classificação das lâminas também é um fator muito importante para o desempenho dos elementos a serem projetados. Fiorelli (2005) afirma que a densidade das lâminas devem ser entre 0,40 e 0,75g/cm³, para que apresente uma boa penetração do adesivo. Outro fator a ser analisado é o coeficiente de retração, o autor cita que para um desempenho ainda maior, este valor precisa ser pequeno.

A etapa de secagem deve ser atentamente controlada, pois a umidade das lâminas influencia significativamente no processo de colagem e qualidade das peças finais. O teor de umidade ideal das lâminas precisa permear entre 7 a 14%, podendo variar conforme o adesivo utilizado. Deve-se controlar também a diferença entre a umidade das lâminas que serão dispostas umas sobre as outras, para que não ocorra contração e inchamento em função das tensões internas geradas (TELES, 2009).

Para que se obtenha elevados comprimentos de peças estruturais, as laminas de madeira que não possuem o comprimento desejado são unidas através de emendas. Emendas do tipo dentada, com dentes de aproximadamente 28 mm são as mais utilizadas (GOMES, 2018; MIOTTO, 2009).

Durante o processo de união das emendas é preciso um rigoroso controle de qualidade em todas as etapas, pois as emendas devem alcançar no mínimo 75% da resistência de uma peça de madeira sem defeitos. Posteriormente as laminas são cortadas conforme o comprimento do elemento estrutural desejado (GOMES, 2018; MIOTTO, 2009).

Em seguida, as laminas devem passar pelo processo de aplainamento, afim de se obter uma superfície limpa e regularizada para aplicação do adesivo. Após a aplicação do adesivo, as laminas são dispostas uma sobre as outras até que se atinja a altura da peça. Em sequência, a

peça é prensada por meio de abraçadeiras até a secagem total do adesivo. Vale ressaltar, que o tempo de cura de cada adesivo varia conforme as suas propriedades, sendo assim, é necessário consultar o fabricante (FIORELLI, 2005; MIOTTO, 2009).

A pressão a ser exercida nas peças confeccionadas está diretamente ligada com a densidade das laminas, de modo que esses fatores influenciam na taxa de penetração do adesivo na madeira. Para madeiras que possuem densidade igual ou inferior a $0,5 \text{ g/cm}^3$ deve-se utilizar uma pressão de $0,7 \text{ N/mm}^2$, já em madeiras com densidade superior a $0,5 \text{ g/cm}^3$ deve-se aplicar uma pressão de $1,2 \text{ N/mm}^2$ (TELES, 2009).

Segundo a ABNT (1997), para o emprego de peças estruturais de MLC, devem ser realizados ensaios de cisalhamento na lâmina de cola, tração à lamina de cola e resistência das emendas dentadas e biselada, para verificação da sua eficiência.

Na etapa final do processo, a peça de MLC passa novamente pelo aplainamento para remover o excesso de adesivo e irregularidades na superfície. Na sequência, são feitos os furos necessários para ligações entre os elementos, cortes e acabamentos finais conforme especificados em projeto (MIOTTO, 2009).

3.4 SELEÇÃO DA ESPÉCIE DE MADEIRA

No Brasil, apesar da grande variedade de espécies de madeira disponíveis, apenas algumas são selecionadas e comercializadas para fins estruturais, resultando em uma exploração inadequada e esgotamento de reservas existentes (TELES, 2009).

Muitas espécies de madeira podem ser utilizadas para confecção de peças de MLC, desde de que a madeira escolhida possua as propriedades físicas e mecânicas adequadas e a superfície da lâmina tenha capacidade de aceitar a as características da cola (MIOTTO, 2009).

No âmbito sustentável, uma das principais vantagens dos elementos estruturais de MLC é a possibilidade de utilização de madeira de reflorestamento para a confecção de peças, onde as empresas e pesquisadores relacionados a esse assunto pretendem incentivar o uso de madeira de reflorestamento, e conseqüentemente uma exploração consciente das reservas naturais (MIOTTO, 2009).

Em relação a seleção das espécies para a confecção dos elementos de MLC, muitos pesquisadores acabam optando pela utilização de uma espécie de madeira disponível na sua região. Em seu estudo Zangiácomo (2003) propôs analisar quatro espécies nativas de densidades distintas para o uso em MLC, sendo elas a Envira Branca (*Xylopia sp*), Cambará (*Moquinia polymorpha*), Castanheira (*Bertholetia excelsa*) e Cedrinho (*Erisma sp*), de modo que a espécie que obteve maior desempenho foi o Cedrinho.

Miotto (2009) em seu estudo sobre vigas mistas de concreto e MLC reforçadas com fibra de vidro, optou por utilizar uma espécie híbrida de *Eucaliptus grandis* e *Eucalptus urophylla*. Neste estudo, o autor cogitou na possibilidade de utilização da espécie *Eucaliptus grandis* somente, devido a disponibilidade na região e pela relativa facilidade de processamento, mas o autor afirma que essa espécie apresentava problemas de empenamento, portanto optou-se por utilizar um híbrido da mesma.

Negreli e Molina (2015), no estudo experimental de elementos estruturais de MLC na flexão, utilizaram laminas de espécie *Pinus sp*. Por sua vez, Gomes (2018) analisando também esses elementos a flexão, optou por utilizar duas espécies de madeira de reflorestamento, sendo elas o Pinus C30 e Eucalipto C40.

Já a empresa ITA CONSTRUTURA (2014) que trabalha com soluções alternativas em MLC, afirma em seu website que as suas peças estruturais são confeccionadas a partir de madeira de reflorestamento da espécie eucalipto.

3.5 EMENDAS E ADESIVOS

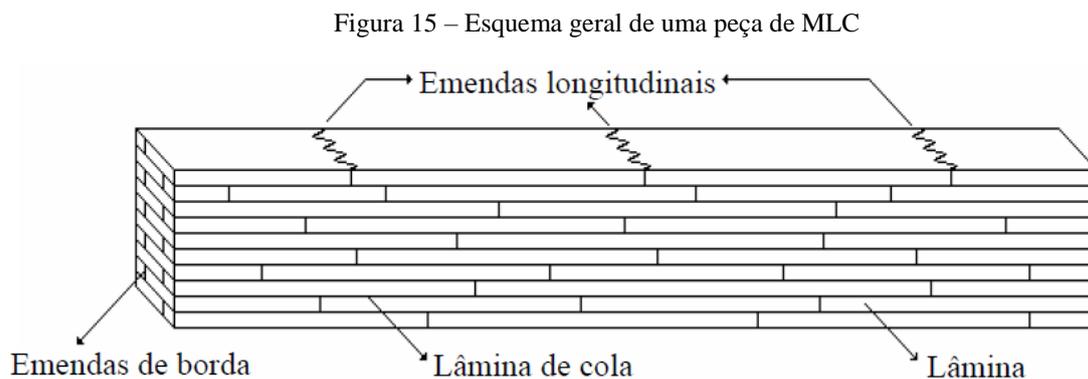
Na produção de elementos estruturais de MLC é de suma importância o conhecimento dos parâmetros que influenciam nas características de resistência e rigidez das peças a serem projetadas, tais como o comportamento das emendas e da linha de cola (CALIL *et al.*, 2014; CALIL, 2010).

Características da madeira e do processo de fabricação podem afetar consideravelmente a resistência das emendas. Fatores como a espécie da madeira, densidade, nós, defeitos e rugosidade quanto a aceitação da cola na superfície, bem como as condições de usinagem, montagem, pressão e geometria das emendas, são fatores que se não forem bem controlados

podem comprometer a eficiência da emenda e consequentemente o desempenho da peça final (MACEDO, 2000).

Para obtenção de peças com elevados comprimentos, é preciso que as lâminas de madeira sejam emendadas na longitudinal, essas emendas podem ser coladas face a face, aumentando a sua altura, e borda a borda, variando a largura da peça. Devido às limitações impostas pelo comprimento natural das lâminas, é recorrente que uma mesma peça possua várias emendas longitudinais ao longo do seu comprimento (MACEDO e CALIL, 2007).

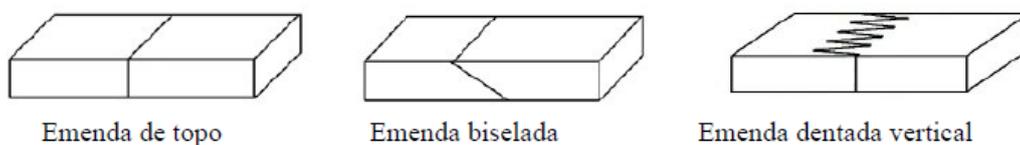
A Figura 15 exemplifica a distribuição das laminas e das emendas em uma peça extensa de MLC, mostrando a localização das emendas de borda e emendas longitudinais.



(fonte: MACEDO e CALIL, 2007)

Se tratando da união longitudinal, as emendas dentadas são as mais utilizadas para junção das lâminas, por possuir características satisfatórias quando a tração e praticidade na produção. Outros tipos de emendas são as de topo e a biselada/chanfro, sendo assim a Figura 16, mostra os tipos de emendas mais comuns (TELES, 2009).

Figura 16 – Tipos de emendas mais comuns



(fonte: TELES, 2009)

Segundo Teles (2009) as emendas de topo por não possuir nenhuma inclinação, são as mais fáceis de executar, mas em alguns casos não atendem quanto ao desempenho esperado. As emendas biseladas, surgiram para fornecer a resistência que as emendas de topo não atendiam, porém esse tipo de emendas conseguem superar a resistência das emendas de topo quando há uma baixa inclinação, sendo de ordem 1/10 aproximadamente. Pfeil e Pfeil (2015) afirmam que a eficiência da emenda depende diretamente da inclinação do corte, onde emendas com inclinação 1/12 e 1/10 possuem maior resistência.

A ABNT (1997) recomenda que para garantir a qualidade das emendas das lâminas de MLC, as peças devem ser formadas por lâminas de no máximo 30mm de espessura, sendo que a madeira deve ser colada com adesivos a prova d'água. Recomenda-se também as emendas de lâminas adjacentes, de espessura t , devem ser afastadas uma das outras a uma distância pelo menos igual a $25t$ ou a altura h da viga.

Por sua vez, Szucs *et al.* (2006) afirma que para um bom desempenho estrutural as laminas devem atender alguns espaçamentos, como:

- As lâminas que se encontram na quarta parte externa da altura transversal, devem ser espaçadas em no mínimo 20 vezes a altura da lâmina;
- Na metade central da peça as laminas devem ser espaçadas em no mínimo 12 vezes a espessura da lâmina;
- Em um comprimento de 305mm, o número de emendas não deve ser superior a razão do número de laminas por quatro.

A escolha do tipo de cola a ser utilizada em estruturas de MLC depende muito das condições ambientais que a estrutura se encontra. Para utilização em ambientes internos e livre de variação de umidade costuma-se empregar cola de caseína, já para elementos sujeitos a variação de umidade como em ambientes externos, aplica-se colas sintéticas, a base de fenol-formaldeído ou resorcinol-formaldeído. De modo geral, colas sintéticas são as mais utilizadas (PFEIL e PFEIL, 2015).

Conhecer o comportamento da cola a ser utilizada na madeira também é muito importante, uma vez que algumas espécies de madeira contém oleosidade em sua estrutura, o que pode prejudicar a adesão entre a cola e a madeira (MIOTTO, 2009)

3.6 ESTUDOS RELACIONADOS

No Brasil, estudos sobre a MLC estão sendo constantemente aprimorados dentro das limitações e recursos disponíveis. Centros de pesquisas tem desenvolvido testes numéricos e experimentais de modelo reduzido para analisar o comportamento deste material, buscando verificar as características da espécie e cola a serem utilizadas, bem como validar e avaliar a qualidade e resistência do elemento madeira-cola-madeira.

Santos (2014) em seu estudo sobre a avaliação estrutural de vigas de MLC, realizou ensaios em madeiras de espécie *Pinus eliottii* e *Liptus*. As vigas de MLC foram confeccionadas a partir de 4 laminas com seção transversal de 7,5x3cm, prensadas com adesivo a base de emulsão de polímero isocianato (EPI). As laminas foram selecionadas visualmente e classificadas mecanicamente através ensaios de tração, compressão, cisalhamento da madeira e da linha de cola, também foram encontradas as características elásticas e de resistência das vigas nos ensaios de flexão. Os resultados obtidos pelo autor estão expressos na Tabela 1:

Tabela 1 – Resultados obtidos nos ensaios realizados por Santos (2014)

	<i>Pinus</i>	<i>Lyptus</i>
Compressão (MPa)	26,11	49,83
Cisalhamento (MPa)	7,3	6,8
Módulo de elasticidade (GPa)	9,45	17,75

(fonte: ADAPTADO DE SANTOS, 2014)

Santos (2014) ainda cita que em relação a tração, verificou-se que a madeira da espécie *Pinus* apresentou resistência semelhante a emenda de cola, enquanto que a *Lyptus* obteve resistência superior.

Por sua vez, Negreli e Molina (2015) em seu artigo sobre elementos estruturais de MLC na flexão, propuseram avaliar experimentalmente e numericamente as peças estruturais de *Pinus sp*, para verificar a distribuição de tensões nas regiões de maior solicitação do material. As laminas confeccionadas tinham secção transversal de 1x5cm e foram classificadas visualmente. Antes das laminas serem coladas foram feitos ensaios não destrutivos em cada uma delas, afim de se obter módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, valores os quais estão expressos na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores do módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson em cada lâmina

	Lâmina 1	Lâmina 2	Lâmina 3	Lâmina 4	Lâmina 5
Módulo de elasticidade (kN/cm ²)	920	713	975	573	620
Poisson	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24

(fonte: NEGRELI e MOLINA, 2015)

Para colagem das laminas o adesivo utilizado foi o Poliuretano bicomponente (Imperveg – Poliuretano vegetal), que foi aplicado somente em uma das faces da madeira. Posteriormente a viga de 5x5x115 foi ensaiada afim de se obter as propriedades mecânicas.

Na modelagem numérica computacional Negreli e Molina (2015) utilizaram o software ANSYS, agregando o método dos elementos finitos, a simulação foi feita com uma peça de seção transversal de 5x5, onde a mesma foi composta por 5 lâminas de 1cm. Na partição das peças de madeira, utilizou-se o elemento tridimensional solid45, que é uma estrutura definida por oito nós com três graus de liberdade em cada nó, sendo definidos em x, y e z. Através dos resultados obtidos o estudo possibilitou a identificar as regiões com maior sollicitação em função do carregamento.

Molina (2008) em seus estudos experimentais considerou a madeira com um comportamento ortotrópico, já que se as modelagens feitas com considerações anisotrópicas não foram satisfatórias. De modo que o modelo construtivo adotado pelo autor simula um comportamento elastoplástico, através de curvas bi-lineares que dependem das direções principais da madeira.

Sabe-se ainda que, Molina (2008) neste mesmo estudo obteve as propriedades elásticas da madeira através de ensaios experimentais e análises desenvolvidas por Ballarin e Nogueira (2003), tendo como base também a ABNT (1997).

As relações admitidas pelos autores citados referente as propriedades elásticas da madeira são:

- $E_x = E_{c0,ef}$ = Módulo de elasticidade na direção longitudinal (ao longo da peça).

No que tange o módulo de elasticidade nas direções tangencial (E_z) e radial (E_y), os testes experimentais admitiram que elas possuem aproximadamente o mesmo valor, de modo que as relações são simplificadas em $E_z = E_y$.

Relacionando as três direções da peça, admite-se ainda que módulo de elasticidade da madeira na direção longitudinal é 10x superior as demais direções, resumindo as relações mencionadas em:

- $E_z = E_y = E_x/10$.

No que se refere ao módulo de cisalhamento (G) pode-se considerar que:

- $G_{xy} = G_{yz} = G_{xz} = E_x/20$.

Beer (2011) mostra que o módulo de elasticidade e o módulo de cisalhamento podem ser relacionadas em uma expressão (Equação 1) através do coeficiente de Poisson (ν), que por sua vez relaciona a deformação transversal e a deformação longitudinal de uma peça.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \text{Equação 1}$$

Molina (2008) através de seus testes experimentais afirma que o coeficiente de Poisson no plano xz de uma peça de madeira é aproximadamente 0,23. Sendo assim, com as relações mencionadas acima referente ao módulo de elasticidade, módulo de cisalhamento, juntamente com a Equação 1, obtém-se que o coeficiente de Poisson nos planos xy e yz são iguais, possuindo um valor de 0,0013.

4 MODELAGEM NUMÉRICA

Com o avanço tecnológico, muitas áreas da engenharia optaram por utilizar programas computacionais para obter e monitorar dados no desenvolvimento de projetos, seja na parte de orçamento, gerenciamento de obras ou cálculo estrutural (CARVALHO; FILHO; JUNIOR, 2000).

Os programas estruturais começaram a ser introduzidos no cotidiano dos projetistas não somente pela facilidade de agilizar os procedimentos de cálculo, mas também pela possibilidade de aprimorar e refinar os cálculos que estavam sendo executados (CARVALHO; FILHO; JUNIOR, 2000).

Programas como SISTRUT e TQS permitiram procedimentos de cálculo em que a estrutura fosse decomposta em elementos menos complexos, para que cada uma fosse resolvida isoladamente, mas ainda considerando a interferência de uma sobre as outras. Outros programas surgiram em universidades, como o SAP, o qual possibilita analisar a estrutura em sua totalidade, por meio do Método dos Elementos Finitos (CARVALHO; FILHO; JUNIOR, 2000).

4.1 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

No final do século XVIII, o matemático Gauss Legendre propôs utilizar funções de aproximação para solução de problemas, dando início ao conceito do Método dos Elementos Finitos (MEF). A partir disto, muitos outros matemáticos começaram a desenvolver teorias e técnicas baseados no conceito de Gauss, entretanto havia muita dificuldade em resolvê-las, devido às limitações tecnológicas da época. Sendo assim, somente com o avanço da computação, no ano de 1950, esse método começou a se desenvolver (LOTTI *et al.*, 2006).

Lotti *et al.* (2006) define o MEF como um método matemático capaz de dividir um meio contínuo em elementos que mantenham as mesmas propriedades do elemento original. Por sua vez, Azevedo (2003) cita que na área das estruturas o MEF possibilita que o projetista faça uma série de análises e modificações na estrutura, com o objetivo de se encontrar a melhor solução estrutural e econômica dentro das normas vigentes.

No âmbito da análise estrutural, é necessário que se estabeleça os parâmetros de classificação geométrica, modelo do material e ações aplicadas na estrutura. Os tipos de estudos que podem ser feitos em elementos estruturais são do tipo dinâmico ou estático; linear ou não linear (AZEVEDO, 2003).

Na análise dinâmica considera-se as forças de inércia associada as acelerações em cada elemento, quando essa força é suficientemente lenta, torna-se desprezível, enquadra-se na análise estática. Na análise linear, considera-se que os deslocamentos provocados por ações externas são muito pequenos em comparação com a dimensão dos elementos estruturas, se essa hipótese não for válida, esse elemento enquadra-se como não linear (AZEVEDO, 2003).

Em uma análise estrutural a geometria dos elementos podem se enquadrar como reticulados, laminares e sólidos. As estruturas reticuladas são aquelas constituídas por barras com seção transversal pequena quando comparada ao comprimento do eixo, tais como as treliças. Quando os eixos da estrutura se desenvolvem em uma superfície, onde a espessura da lâmina é muito pequena quando comparada as demais dimensões, como paredes, lajes ou cascas, tem-se uma estrutura laminar. Já os sólidos são classificados como as estruturas que não se enquadram nos demais grupos (AZEVEDO, 2003).

4.2 S.A.P.2000 – STRUCTURAL ANALYSIS PROGRAM

O software SAP2000 é um programa que permite fazer uma análise estática e dinâmica, linear e não linear de estruturas tridimensionais por meio de uma interface gráfica de fácil aplicação utilizando o MEF. A estrutura estudada é dividida em elementos onde são realizadas as análises, de modo que a precisão dos resultados são varia conforme o refinamento da malha, ou seja, quanto maior o número de divisões, maior será a aproximação do resultado (VELOZA, 2009).

5 METODOLOGIA

A metodologia do trabalho consistiu na execução de análises numéricas computacionais de elementos estruturais de madeira laminada através do software SAP2000. O modelo físico computacional utilizado foi validado através de resultados experimentais apresentados pela literatura.

5.1 CARACTERISTICAS DA MODELAGEM

Através de resultados experimentais da literatura, foram validados os parâmetros de modelagem computacional adotados para a simulação do elemento composto madeira laminada colada. O modelo adotado para as análises, foi aquele em que as conectividades cola-madeira, e acoplamentos entre madeira-cola-madeira obtiveram o comportamento físico de melhor ajuste aos registros experimentais, de modo que os parâmetros de entrada no programa estão apresentados nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Dados de entrada do programa

Propriedades		C20	C25	C30
$f_{co,k}$	kN/cm ²	2,00	2,50	3,00
$f_{v,k}$	kN/cm ²	0,40	0,50	0,60
$E_{c0,m}$	kN/cm ²	350,00	850,00	1450,00
ρ aparente	kN/m ³	5,00	5,50	6,00
$f_{co,d}$	kN/cm ²	0,69	0,86	1,03
$f_{v,d}$	kN/cm ²	0,107	0,133	0,160
$E_{c0,ef} = E_x$	kN/cm ²	168,00	408,00	696,00
$E_{c90,ef} = E_y = E_z = E_x/10$	kN/cm ²	16,80	40,80	69,60
ν_{xz}	-	0,23	0,23	0,23
$\nu_{xy} = \nu_{yz}$	-	0,0013	0,0013	0,0013
$G = G_{xy} = G_{yz} = G_{xz}$	-	8,40	20,40	34,80

(fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2019)

Tabela 4– Dados de entrada do programa

k_{mod1}	0,6
k_{mod2}	1,0
k_{mod3}	0,8
k_{mod}	0,48
γ_{wc}	1,4
γ_{wv}	1,8

(fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2019)

A partir deste modelo consistente o sistema construtivo MLC foi avaliado pela modelagem dos elementos estruturais discorridos a seguir.

5.2 MODELAGEM DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS

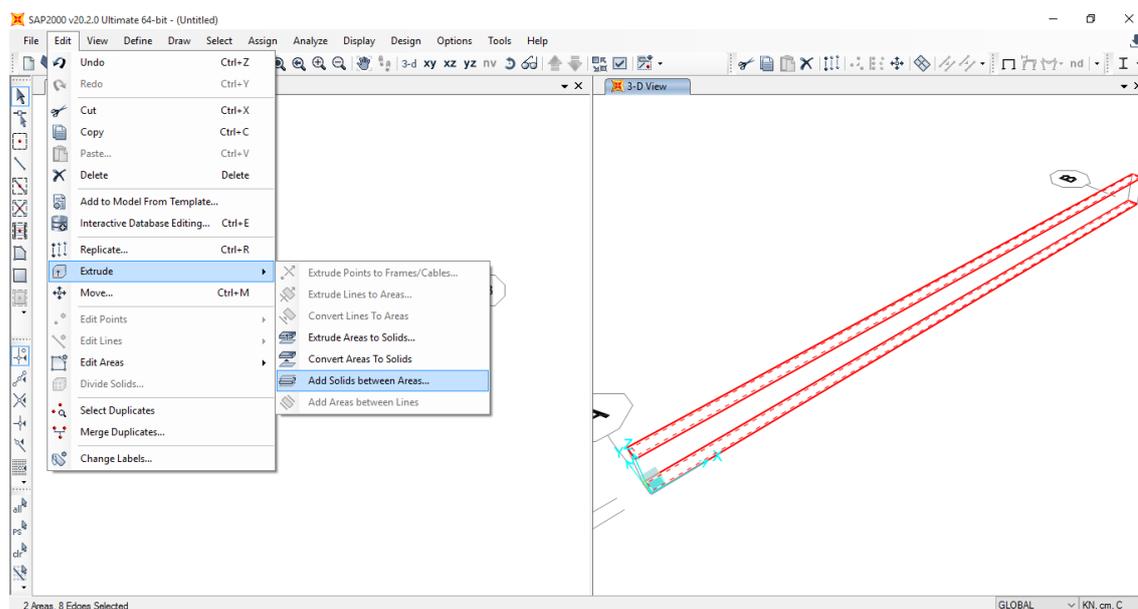
Estabelecidas as características da modelagem, foram analisadas vigas estruturais com vãos de 5, 10, 15 e 20m, ambas variando a altura e base dos elementos, sendo alterados também as classes de resistência da madeira.

As propriedades mecânicas da MLC foram inseridas como um novo material no software SAP2000, conforme os parâmetros discorridos anteriormente nas Tabelas 3 e 4, onde estes valores são referentes a madeira conífera com classe de resistência C20, C25 ou C30, conforme desejado para comparação.

Primeiramente foi feita uma máscara com as dimensões da peça final, para que a estrutura fosse modelada com as dimensões já pré-estabelecidas, onde o eixo x, y e z correspondem ao comprimento, largura e altura da peça respectivamente.

Na máscara de dimensões foram inseridas duas superfícies como sendo o topo e a base da peça, onde aplicou-se a função extrudar para o modelo se tornar um elemento sólido, conforme a Figura 17.

Figura 17 – Superfícies da peça

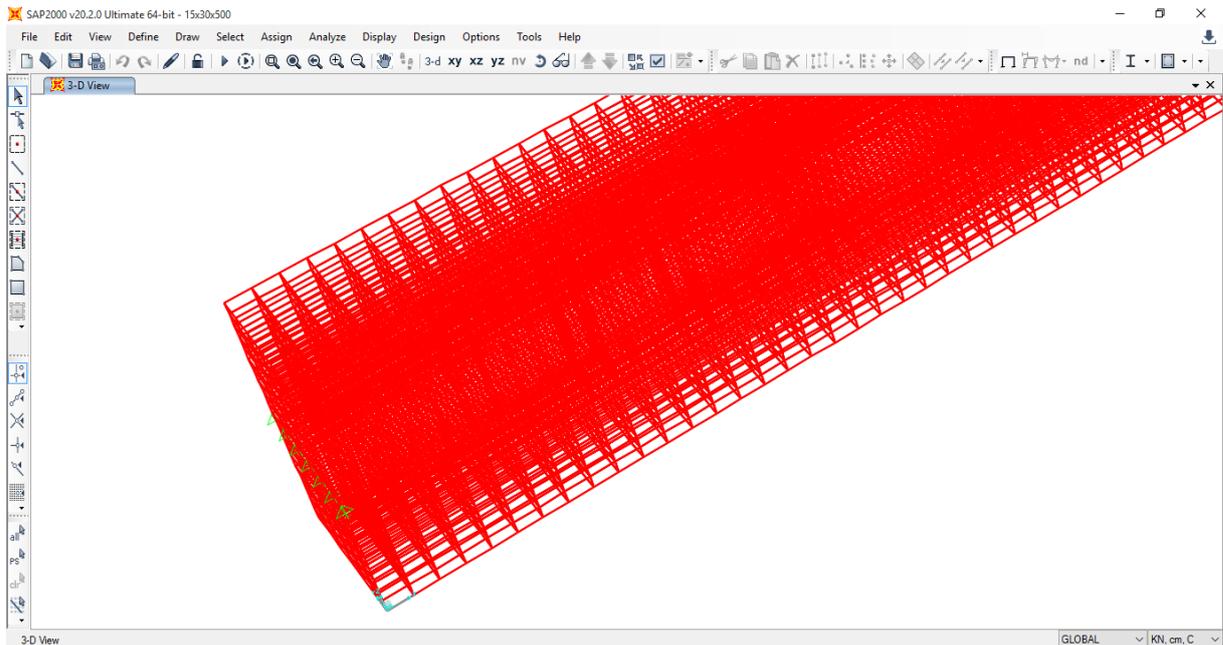


(fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2019)

O sólido gerado entre as duas superfícies foi dividido em elementos finitos, onde as divisões em x foram fixadas com uma malha de 2,5cm para as estruturas de $L=5m$, 5cm para vigas de $L=10m$ e uma malha de 10cm para as demais estruturas. No eixo y , fixou-se 6 divisões para qualquer largura desejada, já no eixo z adotou-se uma malha de 1,5cm, o que condiz com a espessura das laminas em estudos experimentais e assim para melhor discretização do modelo.

Foram colocados apoios de segunda ordem na viga em $h/2$, evitando assim translação nos eixos x , y e z , conforme a Figura 18.

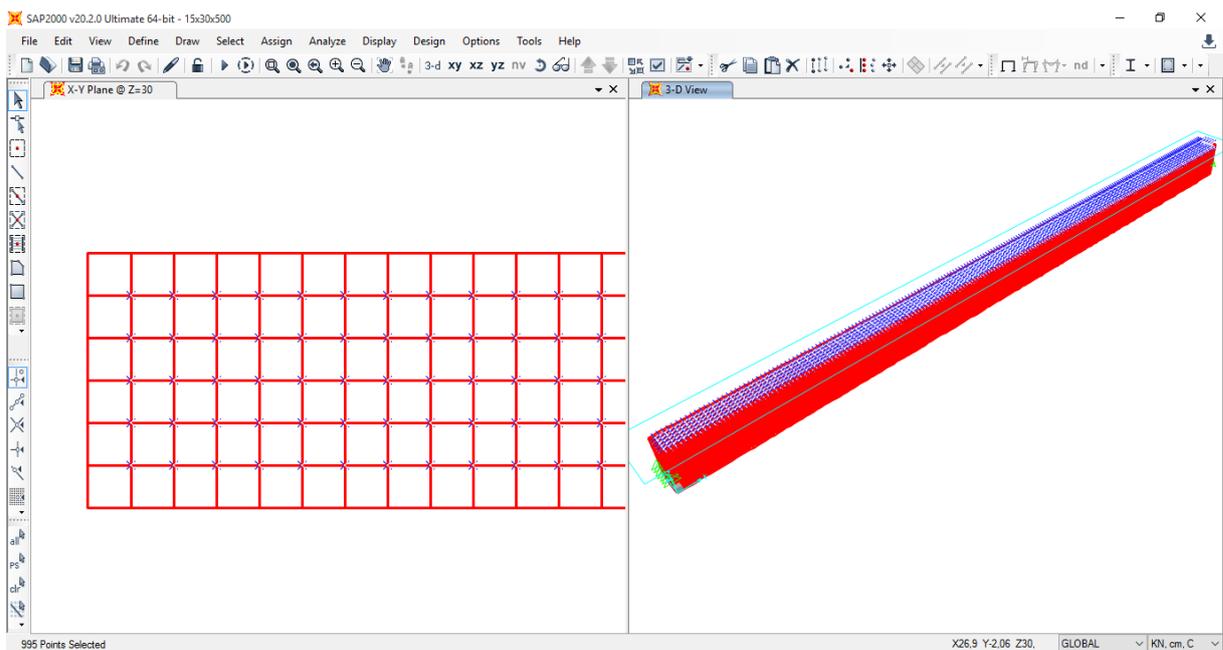
Figura 18 – Apoios de segunda ordem



(fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2019)

A viga modelada foi submetida a uma carga uniformemente distribuída de 10kN/m, onde a mesma foi inserida no modelo como cargas pontuais nos nós centrais no topo da peça, conforme a Figura 19.

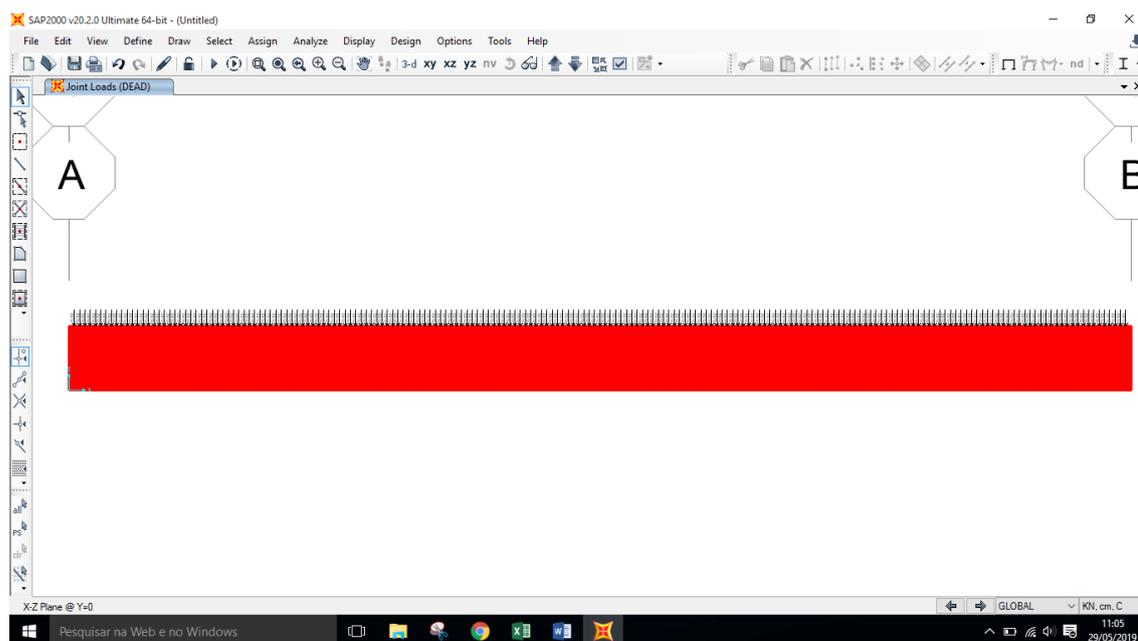
Figura 19 – Pontos de aplicação das cargas pontuais



(fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2019)

Os valores aplicados nos nós selecionados dependiam diretamente da área de influência de cada ponto, após calculado foram inseridas cargas de -0,005 kN, -0,01 kN e -0,02 kN no eixo z para as malhas de 2,5cm, 5cm e 10cm respectivamente. A Figura 20, ilustra as cargas pontuais na viga.

Figura 20 – Cargas pontuais aplicadas na viga de MLC



(fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2019)

Após isso foi inserida a classe de resistência da madeira no sólido conforme as propriedades já pré-estabelecidas anteriormente como um novo material no software.

A Tabela 5 mostra as dimensões vigas modeladas, vale ressaltar que as mesmas foram feitas com o mesmo processo, alterando-se as dimensões, malhas e classes de resistência. Visto que, as peças foram analisadas para C20, C25 e C30.

Tabela 5 – Resumo das dimensões de vigas modeladas

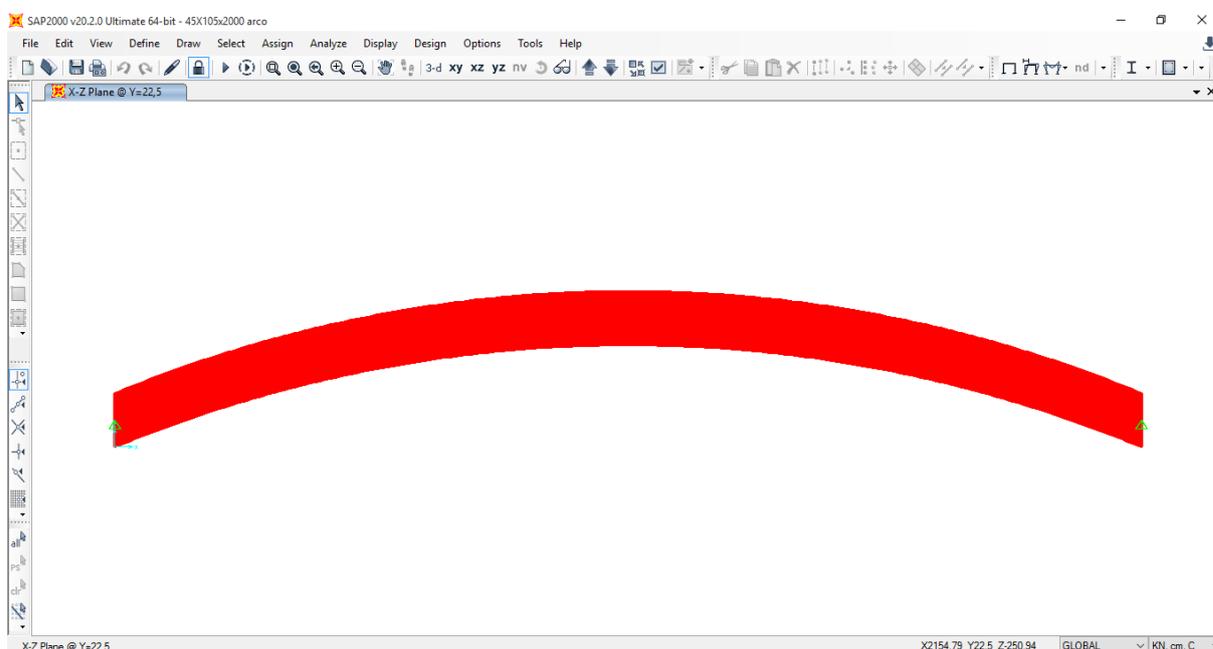
b x L (cm)	15 x 500	30 x 1000	35 x 1500	45 x 2000
h (cm)	30	30	60	105
	45	45	75	120
	60	60	90	135
	75	75	105	150
	-	90	120	165
	-	105	135	180
	-	-	-	195

(fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2019)

Cita-se ainda que foram modeladas algumas vigas testes não mencionadas na Tabela 5, alterando-se a base e malha para análise do comportamento da estrutura, com o intuito de se encontrar as dimensões que melhor se adequaram ao desejado. Após a modelagem das vigas os dados foram analisados conforme os objetivos especificados.

Com base nos resultados obtidos referente as vigas de $L=20\text{m}$, modelou-se um arco com $b=45\text{cm}$, $h=105\text{cm}$ e $L=20\text{m}$, possuindo uma flecha de 200cm conforme a Figura 21.

Figura 21 – Viga em arco



(fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2019)

A estrutura em arco foi modelada da mesma forma que as demais, possuindo algumas alterações durante a modelagem por ser uma viga curva. A malha utilizada foi de 10cm em x, 6 divisões em y e malha de 1,5cm para o eixo z o que condiz com a espessura das laminas em estudos experimentais, da mesma forma que as vigas já modeladas. A estrutura em arco foi analisada nas classes de resistência C20, C25 e C30.

6 DISCUSSÕES E RESULTADOS

Através das modelagens analisou-se o comportamento das estruturas de MLC solicitada a um carregamento de 10 kN/m, com variação das classes de resistência da madeira e dimensões da peça.

Nas análises os principais parâmetros que puderam ser relacionados foram a tensão de cisalhamento (τ_{\max}), tensões normais (σ_{\max}) e flecha máxima (u_{\lim}) atuante sobre as estruturas de MLC, de modo que os valores encontrados foram comparados com a resistência ao cisalhamento, compressão e flecha máxima impostas pela ABNT 7190 (1997).

Os valores encontrados foram tabelados e inseridos em gráficos para melhor compreensão e comparação do comportamento das estruturas, onde foi feita a razão entre o valor atuante encontrado na modelagem pelo valor máximo de resistência e flecha, assim verificando quais dimensões atendem quanto a esses parâmetros.

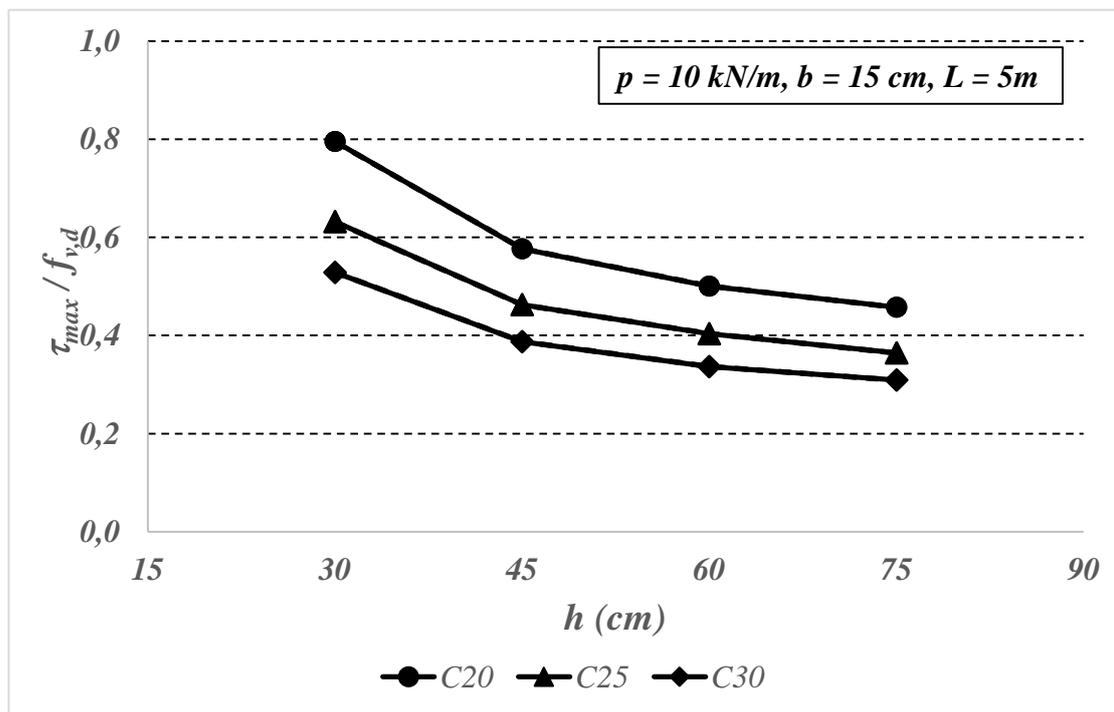
Sendo assim, os valores maiores que 1 nos gráficos indicam que a estrutura não suportou a carga solicitada, sendo indicado com marcadores vazios e linhas pontilhadas.

Foram modeladas vigas biapoiadas de 5, 10, 15 e 20m de comprimento. As análises iniciaram-se com as vigas de 5m de comprimento, sendo que foram separados em gráficos o seu comportamento quanto as tensões de cisalhamento, tensões normais e flecha.

Segundo a ABNT 7190 (1997) a resistência ao cisalhamento paralelo as fibras de cálculo ($f_{v0,d}$) é de 0,107 kN/cm², 0,133 kN/cm² e 0,160 kN/cm² para as classes de resistência C20, C25, e C30 respectivamente.

O Gráfico 1 exemplifica como a estrutura reagiu quanto ao cisalhamento à uma solicitação de 10 kN/m com distintas alturas e nas diferentes classes de resistência.

Gráfico 1 – Verificação quanto as tensões de cisalhamento para L=5m



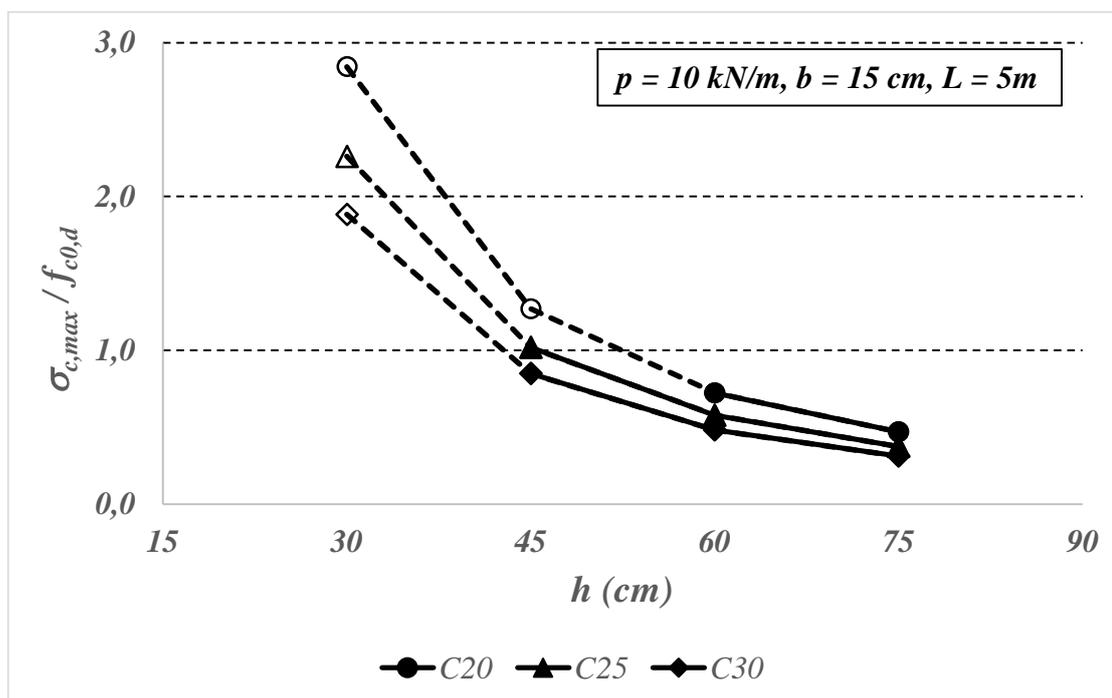
(fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2019)

A partir da análise do Gráfico 1 pode ser observado que todas as vigas com altura variando de 30cm a 75cm foram verificadas nas três classes de resistência. O comportamento da estrutura se mostrou uniforme, uma vez que a classe C30 obteve melhor resultado, possuindo uma folga maior quanto a verificação.

Como a madeira possui maior resistência quanto a tração do que a compressão, então foram analisadas as tensões normais de compressão na peça como sendo a mais crítica. O Gráfico 2 expressa como a estrutura se manteve quanto as tensões normais.

Vale ressaltar que a resistência a compressão paralela as fibras de cálculo ($f_{c0,d}$) é de 0,69 kN/cm², 0,89 kN/cm² e 1,03 kN/cm² para as classes de resistência C20, C25, e C30 respectivamente.

Gráfico 2 – Verificação quanto as tensões normais para L=5m



(fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2019)

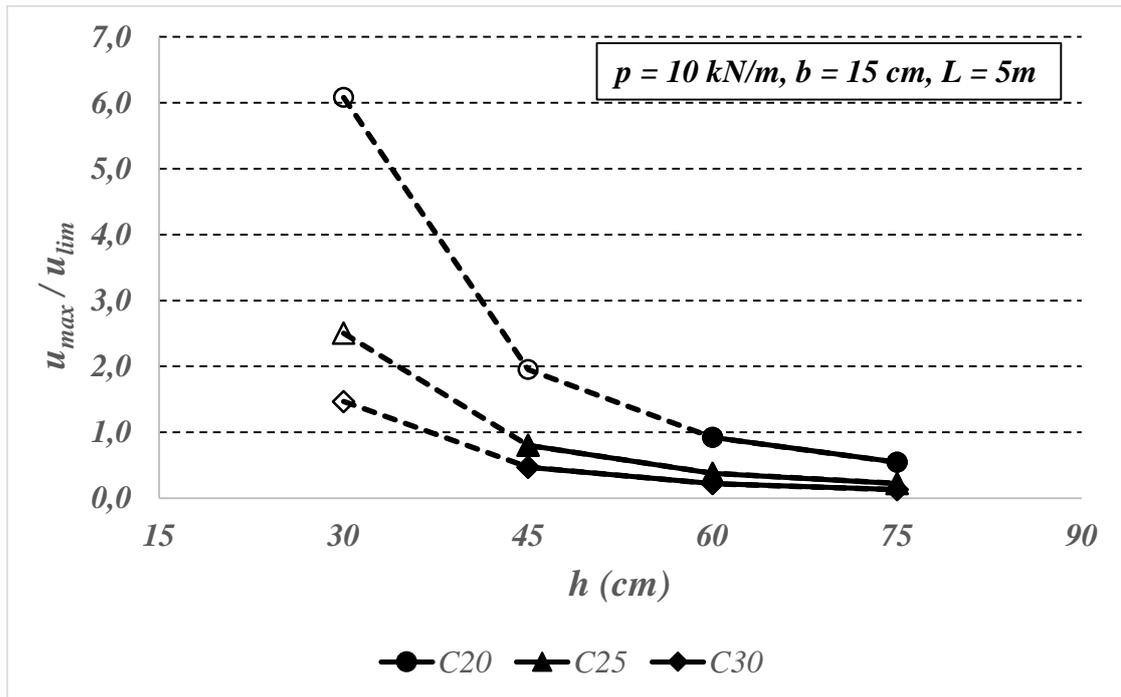
Tratando-se das tensões normais notou-se que as peças de seção transversal 15x30 não verificaram para nenhuma classe de resistência. As estruturas C20, obtiveram resultados satisfatórios para alturas maiores que 60cm, solicitando assim de peças mais robustas para verificação.

As peças com classes de resistência C25 e C30 mostraram-se parecidas, uma vez que as estruturas com alturas de 30cm não verificaram para ambos os casos, já alturas acima de 45cm verificaram com uma pequena folga para a C30 e no limite para a C25.

Peças com h=75cm tenderam a valores próximos quanto as verificações referente as tensões normais em todas as classes de resistência, mostrando que mesmo com a variação de altura as tensões tendem a se normalizar.

No que se refere a flecha na estrutura, utilizou-se o valor máximo de L/200, de modo que para as vigas com L=5m o $u_{lim} = 2,5\text{cm}$, as verificações quanto a flecha estão exemplificadas no Gráfico 3.

Gráfico 3 – Verificação quanto as flechas para L=5m



(fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2019)

Os valores quanto as flechas se mostraram satisfatórios para as classes de resistência C25 e C30, de modo que ambas se comportaram de maneira similar para distintas alturas. As seções com $h=30\text{cm}$ não verificaram em nenhuma classe de resistência, uma vez que a diminuição da seção transversal aumenta a flexão na peça e conseqüentemente a flecha atuante.

A curva C20 teve um pico em $h=30\text{cm}$, onde a flecha atuante foi aproximadamente 6 vezes maior que a limite, já em $h=45\text{cm}$ a curva começou a se normalizar com uma flecha 2 vezes maior e assim diminuindo conforme aumentava-se a altura. Enquanto que C25 e C30 possuíram uma uniformidade em sua curva, sem bruscas inclinações.

Os dados analisados no Gráfico 3, mostraram que uma viga com as mesmas dimensões podem ter flechas muito maiores dependendo da classe de resistência. Em $h=75\text{cm}$, as flechas foram parecidas em C20, C25 e C30, sugerindo que com alturas cada vez maiores a estrutura tende a se comportar da mesma forma, mesmo alterando a classe de resistência da madeira.

Uma estrutura em serviço precisa atender tanto quanto as tensões de cisalhamento, tensões normais e flecha, o que não ocorreu em todas as vigas com $L=5\text{m}$. Com isso, pode-se fazer uma análise geral das estruturas conforme a Tabela 6:

Tabela 6 – Geral de verificações para L=5m

Classe de resistência	C20		
h	$\tau_{\max} / f_{v,d}$	$\sigma_{c,\max} / f_{c0,d}$	u_{\max} / u_{\lim}
cm	-	-	-
30	0,8	2,8	6,1
45	0,6	1,3	2,0
60*	0,5	0,7	0,9
75*	0,5	0,5	0,5
Classe de resistência	C25		
h	$\tau_{\max} / f_{v,d}$	$\sigma_{c,\max} / f_{c0,d}$	u_{\max} / u_{\lim}
cm	-	-	-
30	0,6	2,3	2,5
45*	0,5	1,0	0,8
60*	0,4	0,6	0,4
75*	0,4	0,4	0,2
Classe de resistência	C30		
h	$\tau_{\max} / f_{v,d}$	$\sigma_{c,\max} / f_{c0,d}$	u_{\max} / u_{\lim}
cm	-	-	-
30	0,5	1,9	1,5
45*	0,4	0,8	0,5
60*	0,3	0,5	0,2
75*	0,3	0,3	0,1
* Dimensões que verificaram nos três parâmetros			

(fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2019)

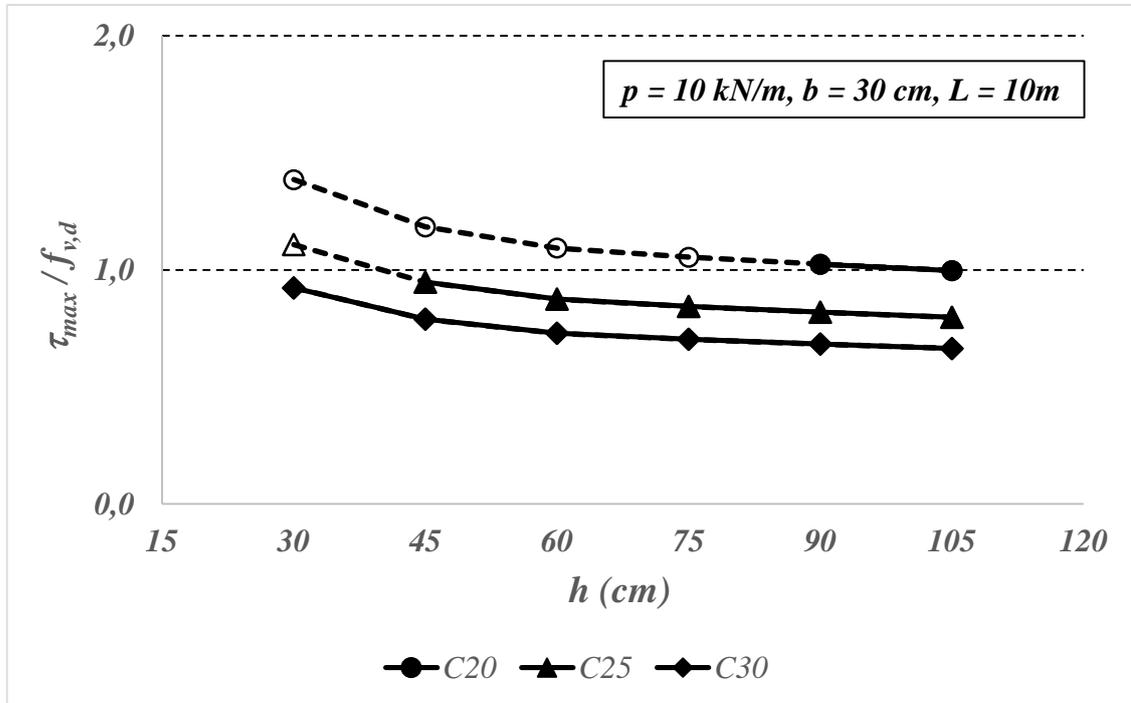
Referente a classe de resistência C20, as peças com $h \geq 60\text{cm}$ verificaram nos três parâmetros, ou seja, somente essas dimensões são aceitas quanto as resistências e flecha. Já as peças executadas com C25 e C30 verificaram para $h \geq 45\text{cm}$. Logo é necessário analisar se é viável aumentar a dimensão da peça ou a classe de resistência para que a estrutura atenda a todos os parâmetros.

No que diz respeito as vigas de 10m, as análises se deram da mesma forma, verificando as tensões quanto ao cisalhamento, tensões normais e a flecha, de modo que os valores quanto a $f_{v0,d}$ e $f_{c0,d}$ são os mesmos, onde alterou-se somente u_{\lim} que neste caso é de 5cm.

Vale ressaltar que as estruturas com L=10m foram modeladas com b=30cm, pois valores menores que este resultaram em vigas muito altas e que não verificavam, sendo assim, houve a necessidade de aumentar a base da peça.

O Gráfico 4 mostra como as vigas de $L=10\text{m}$ se comportaram quanto ao cisalhamento com uma carga atuante de 10kN/m .

Gráfico 4 – Verificação quanto as tensões de cisalhamento para $L=10\text{m}$



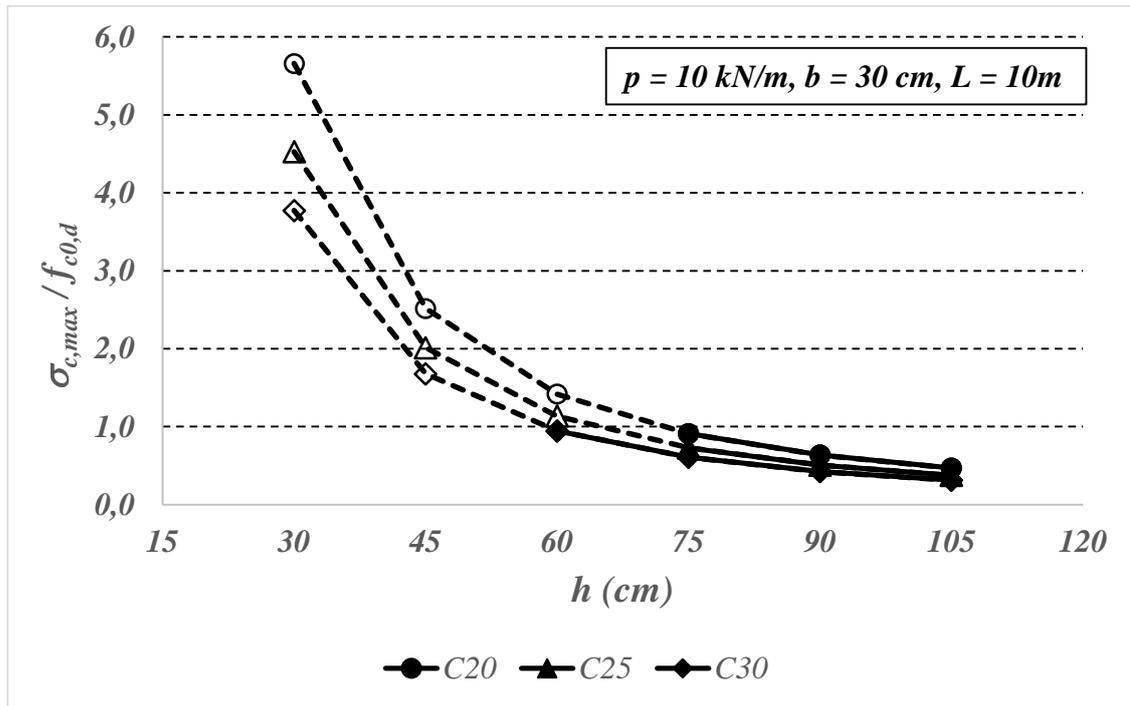
(fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2019)

Neste caso foram analisadas vigas com alturas variando de 30 a 105cm, com um intervalo de 15cm entre elas. A classe C20 verificou no limite para $h \geq 90\text{cm}$, onde percebeu-se que $h=90\text{cm}$ e $h=105\text{cm}$ tiveram valores quanto as verificações de tensões de cisalhamento muito parecidas, mesmo aumentando a altura em 15cm.

Referente a C25, a seção transversal 30x30cm não verificou, já a curva de classe C30 atendeu quanto as tensões de cisalhamento para todas as seções modeladas. As curvas C20, C25 e C30, tiveram leves inclinações, onde em $h \geq 90\text{cm}$ as tensões começaram a tender a um mesmo valor em suas respectivas classes de resistência, de modo que mesmo com o aumento da altura a variação e diminuição das tensões é quase inexistente.

As verificações quanto tensões normais estão expostas no Gráfico 5.

Gráfico 5 – Verificação quanto as tensões normais para L=10m



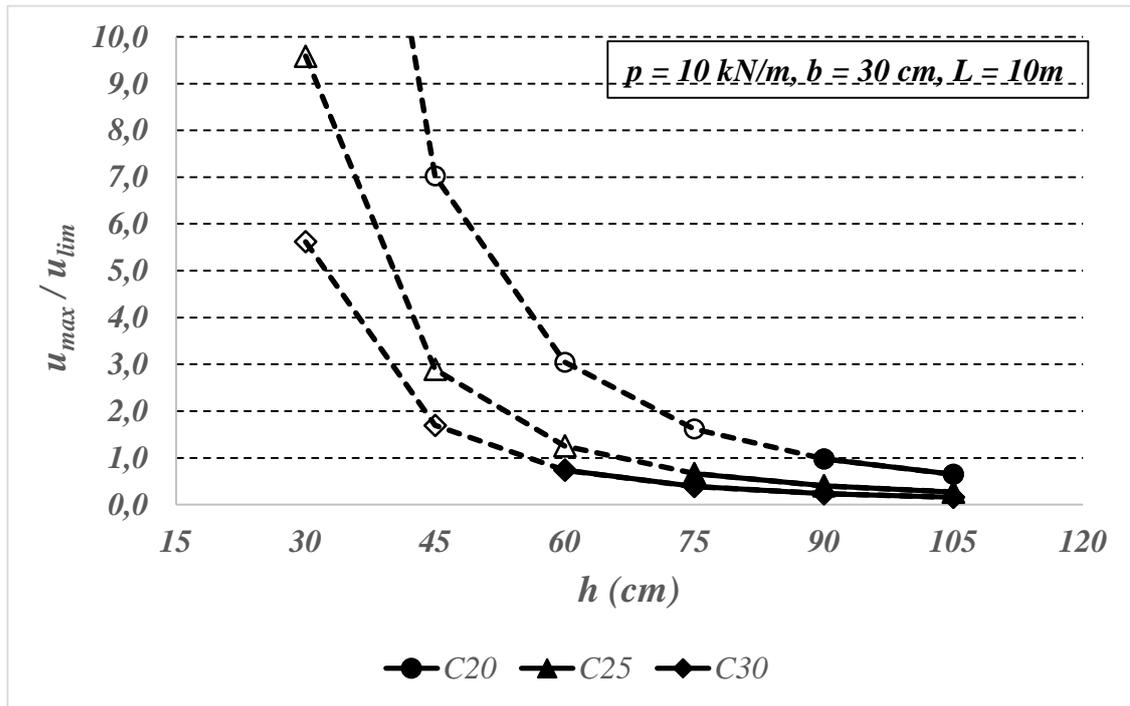
(fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2019)

Para L=10m as curvas se deram de maneira similar em todas as classes de resistência, onde as estruturas com $h \leq 45 \text{ cm}$ não verificaram em todos os casos. Analisando peças com $h = 60 \text{ cm}$, notou-se que a resistência quando as tensões normais foi aceita somente para a classe C30. Já as estruturas com $h \geq 75 \text{ cm}$ as classes C20, C25 e C30 foram atendidas.

De maneira geral o Gráfico 5 acabou se comportando como os demais, onde as curvas começaram a tender a um valor comum, mesmo aumentando a altura.

As verificações quanto as flechas nas estruturas modeladas estão exemplificadas no Gráfico 6.

Gráfico 6 – Verificação quanto as flechas para L=10m



(fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2019)

Os valores quanto as flechas mostraram-se satisfatórios para a classe de resistência C30, uma vez que uma viga com 10m de vão e um carregamento 10 kN/m é um grande esforço e sobre a estrutura. As seções com h=30cm não verificaram em nenhuma classe de resistência de mesmo modo que as vigas com L=5m.

A curva C20 obteve as maiores flechas comparada com as demais classes de resistência, onde teve um pico em h=30cm, em que a flecha atuante foi aproximadamente 23 vezes maior que a limite, extrapolando do gráfico. Já curva a C25 resultou um valor quanto a flecha aproximadamente 10 vezes maior que a limite em h=30, onde a flecha começou a verificar em $h \geq 75$ cm.

Ao analisar o Gráfico 6 foi visto que a flecha de uma viga de classe C25 com h=75cm possui aproximadamente o mesmo valor que a flecha em C30 com h=60cm, de modo que o projetista deve analisar a viabilidade, ou seja, se a melhor opção é alterar a classe de resistência ou a altura da peça.

Estruturas com $h \geq 90$ cm atenderam quanto as três classes de resistência, onde as flechas de C25 e C30 obtiveram valores próximos.

A Tabela 7 mostra a situação geral das estruturas que atenderam quanto as tensões de cisalhamento, tensões normais e flecha, para as vigas com L=10m.

Tabela 7 – Geral de verificações para L=10m

Classe de resistência	C20		
h	$\tau_{\max} / f_{v,d}$	$\sigma_{c,\max} / f_{c0,d}$	u_{\max} / u_{\lim}
cm	-	-	-
30	1,4	5,7	23,3
45	1,2	2,5	7,0
60	1,1	1,4	3,0
75	1,1	0,9	1,6
90*	1,0	0,6	1,0
105*	1,0	0,5	0,6
Classe de resistência	C25		
h	$\tau_{\max} / f_{v,d}$	$\sigma_{c,\max} / f_{c0,d}$	u_{\max} / u_{\lim}
cm	-	-	-
30	1,1	4,5	9,6
45	0,9	2,0	2,9
60	0,9	1,1	1,3
75*	0,8	0,7	0,7
90*	0,8	0,5	0,4
105*	0,8	0,4	0,3
Classe de resistência	C30		
h	$\tau_{\max} / f_{v,d}$	$\sigma_{c,\max} / f_{c0,d}$	u_{\max} / u_{\lim}
cm	-	-	-
30	0,9	3,8	5,6
45	0,8	1,7	1,7
60*	0,7	0,9	0,7
75*	0,7	0,6	0,4
90*	0,7	0,4	0,2
105*	0,7	0,3	0,2
* Dimensões que verificaram nos três parâmetros			

(fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2019)

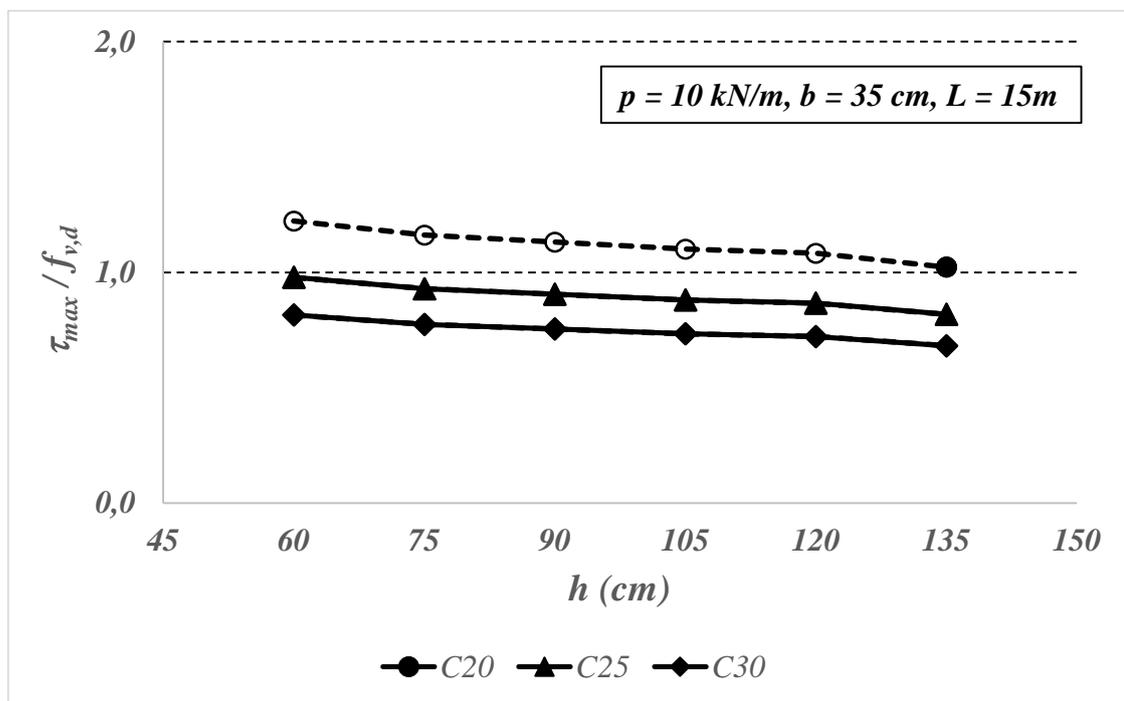
Para a classe de resistência C20, as peças com $h \geq 90$ cm verificaram nos três parâmetros, ou seja, somente essas dimensões são aceitas quanto as resistências e flecha. Já as peças executadas com C25 verificaram para $h \geq 75$ cm e C30 verificou para $h \geq 60$ cm. Logo é necessário analisar se é viável aumentar a dimensão da peça ou a classe de resistência e para que a estrutura atenda a todos os parâmetros.

As vigas de 15m, foram analisadas da mesma forma, verificando as tensões quanto ao cisalhamento, tensões normais e a flecha, de modo que os valores quanto a $f_{v0,d}$ e $f_{c0,d}$ são os mesmos, alterando-se somente u_{lim} que é igual a 7,5cm.

As estruturas com $L=15m$ foram modeladas com $b=35cm$, pois valores menores que este resultaram em vigas muito altas e que não verificavam.

O Gráfico 7 expressa o comportamento das vigas de $L=15m$ quanto ao cisalhamento.

Gráfico 7 – Verificação quanto as tensões de cisalhamento para $L=15m$



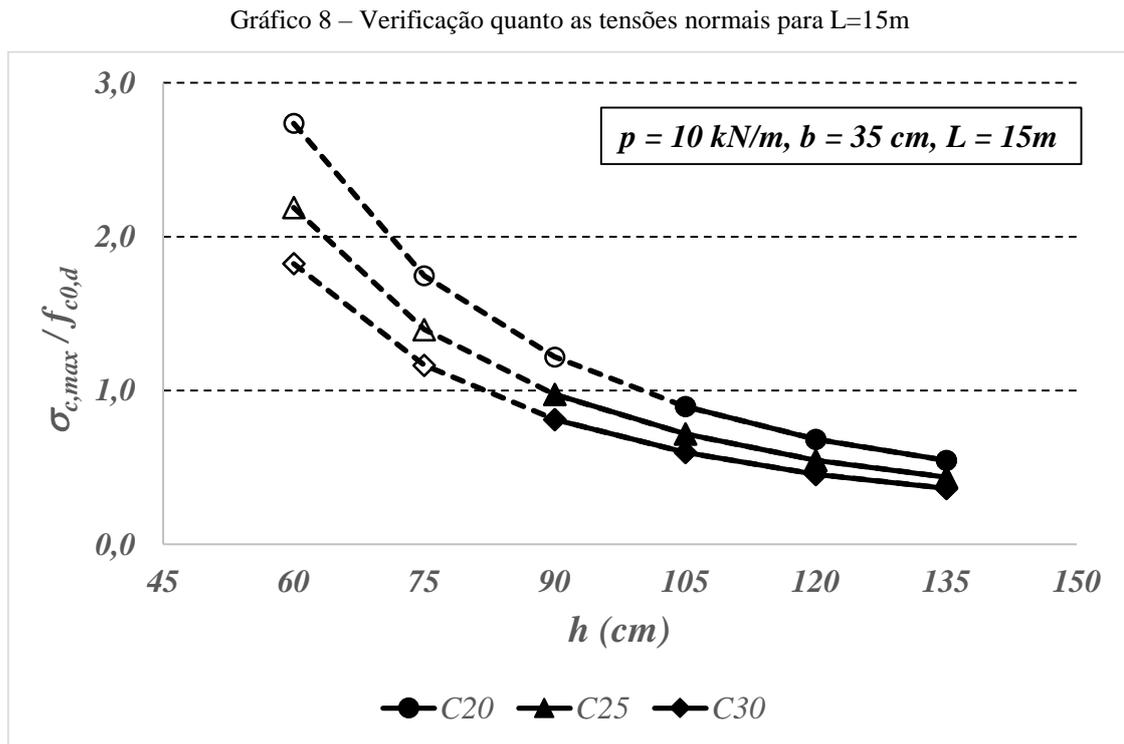
(fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2019)

Para estruturas com $L=15m$ foram modeladas vigas com alturas variando de 60cm a 135cm, com um intervalo de 15cm entre elas, uma vez que foi necessário aumentar as alturas para que no mínimo um modelo atendesse a menor classe de resistência para melhores comparações.

Conforme o Gráfico 7 a classe de resistência C20 só verificou para a altura de $h=135cm$, no limite. As classes C25 e C30 atenderam em todas as dimensões de vigas modeladas, uma vez que as mesmas tiveram comportamento semelhante, onde a estrutura C25 com $h=60cm$ também ficou no limite da verificação.

As curvas C20, C25 e C30 tiveram leves inclinações, de modo que em vigas com grandes comprimentos as tensões começaram a tender a um mesmo valor em sua respectiva classe de resistência, onde mesmo com o aumento da altura a variação e diminuição das tensões são quase inexistentes.

As verificações quanto tensões normais para $L=15m$ estão expostas no Gráfico 8.

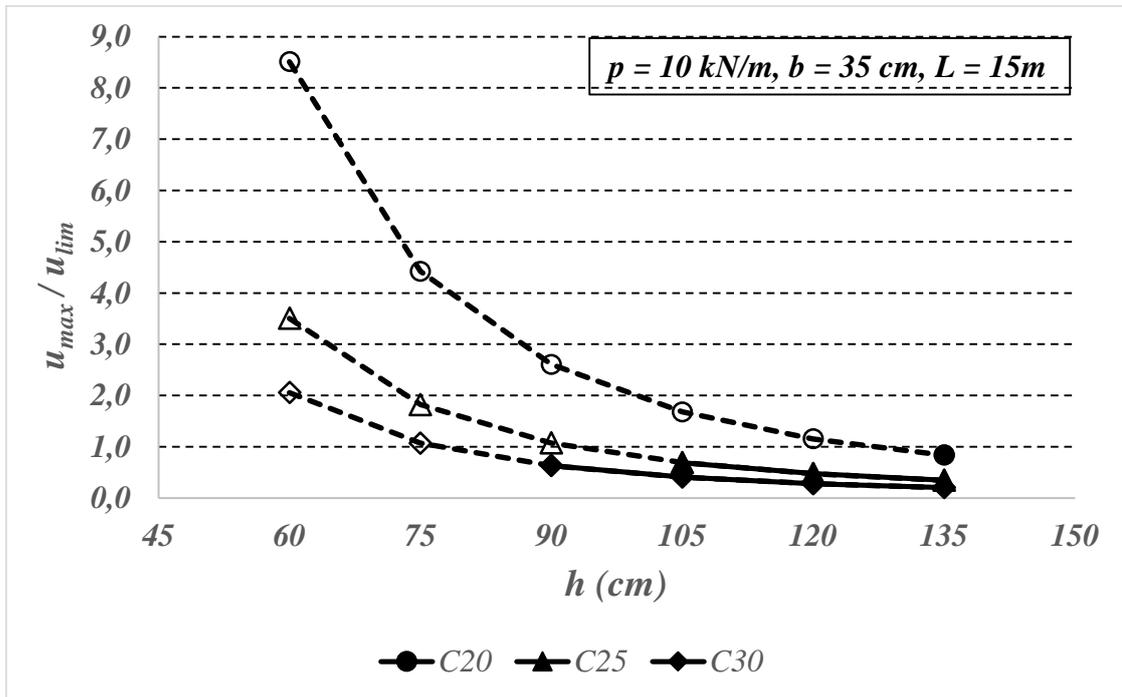


(fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2019)

Em $L=15m$ as curvas se deram de maneira similar para todas as classes de resistência, onde $h \leq 75cm$ não verificou em nenhum caso. Analisando $h=90cm$, a resistência quando as tensões normais não verificou somente para a classe C20, já as estruturas com $h \geq 105cm$ as classes C20, C25 e C30 são atendidas.

De maneira geral o Gráfico 8 mostrou que as curvas começaram a tender a um valor comum, mesmo aumentando a altura, como é o caso de $h=135cm$, onde $\sigma_{c,max} / f_{c0,d}$ não tiveram muita discrepância entre as classes de resistência, ao contrário de $h=60cm$, onde a diferença entre as razões é mais evidente.

Gráfico 9 – Verificação quanto as flechas para L=15m



(fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2019)

Os valores quanto as flechas mostraram-se satisfatórias para a classe de resistência C30, sendo que a menor dimensão teve uma flecha somente 2 vezes maior que a limite para uma viga com L=15m. As seções com $h \leq 75\text{cm}$ não verificaram em nenhuma das classes de resistência.

A curva C20 foi a que obteve as maiores flechas comparada com as demais classes de resistência, onde teve um pico em $h=60\text{cm}$, em que a flecha atuante foi aproximadamente 9 vezes maior que a limite. Já a curva C25 resultou em uma flecha aproximadamente 4 vezes maior que a limite em $h=60\text{cm}$, onde a flecha começou a verificar em $h \geq 105\text{cm}$.

Estruturas com $h \geq 135\text{cm}$ atenderam quanto as três classes de resistência, onde as flechas referente a C25 e C30 obtiveram valores próximos, já as curvas C25 e C30 possuíram comportamentos semelhantes.

A Tabela 8 mostra a situação geral das estruturas que atenderam quanto as tensões de cisalhamento, tensões normais e flecha, para as vigas com L=15m.

Tabela 8 – Geral de verificações para L=15m

Classe de resistência	C20		
h	$\tau_{\max} / f_{v,d}$	$\sigma_{c,\max} / f_{c0,d}$	u_{\max} / u_{\lim}
cm	-	-	-
60	1,2	2,7	8,5
75	1,2	1,7	4,4
90	1,1	1,2	2,6
105	1,1	0,9	1,7
120	1,1	0,7	1,2
135*	1,0	0,5	0,8
Classe de resistência	C25		
h	$\tau_{\max} / f_{v,d}$	$\sigma_{c,\max} / f_{c0,d}$	u_{\max} / u_{\lim}
cm	-	-	-
60	1,0	2,2	3,5
75	0,9	1,4	1,8
90	0,9	1,0	1,1
105*	0,9	0,7	0,7
120*	0,9	0,5	0,5
135*	0,8	0,4	0,3
Classe de resistência	C30		
h	$\tau_{\max} / f_{v,d}$	$\sigma_{c,\max} / f_{c0,d}$	u_{\max} / u_{\lim}
cm	-	-	-
60	0,8	1,8	2,1
75	0,8	1,2	1,1
90*	0,8	0,8	0,6
105*	0,7	0,6	0,4
120*	0,7	0,5	0,3
135*	0,7	0,4	0,2

* Dimensões que verificaram nos três parâmetros

(fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2019)

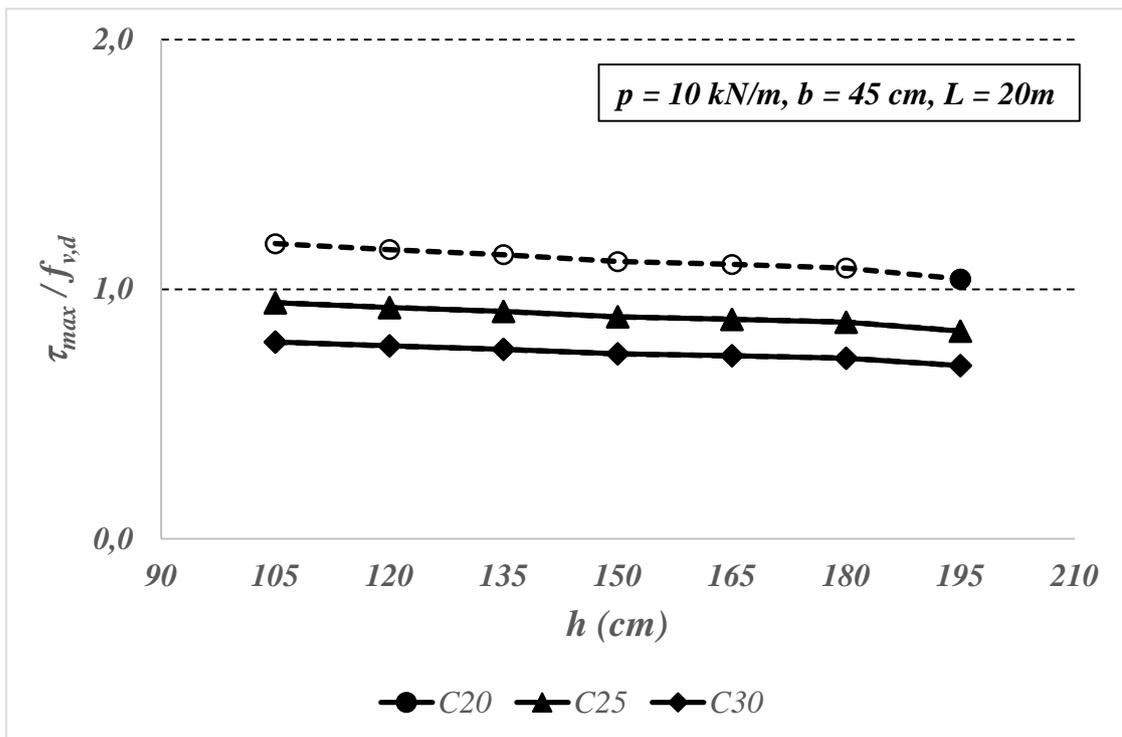
Referente a classe de resistência C20, as peças com $h = 135\text{cm}$ verificaram nos três parâmetros, ou seja, somente essa altura ou acima desta serão aceitas quanto as resistências e flecha. Já as peças executadas com C25 verificaram para $h \geq 105\text{cm}$ e C30 verificou para $h \geq 90\text{cm}$. Logo é necessário analisar se é viável aumentar a dimensão da peça ou a classe de resistência e para que a estrutura atenda a todos os parâmetros.

As vigas de 20m de comprimento, foram analisadas da mesma forma, verificando as tensões quanto ao cisalhamento, tensões normais e a flecha, de modo que os valores quanto a $f_{v0,d}$ e $f_{c0,d}$ são os mesmos, alterando-se somente u_{\lim} que é igual a 10cm.

As estruturas de $L=20\text{m}$ foram modeladas com $b=45\text{cm}$, pois valores menores que este resultaram em vigas muito altas e que não verificavam.

O Gráfico 10 expressa o comportamento das vigas de $L=20\text{m}$ quanto ao cisalhamento.

Gráfico 10 – Verificação quanto as tensões de cisalhamento para $L=20\text{m}$



(fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2019)

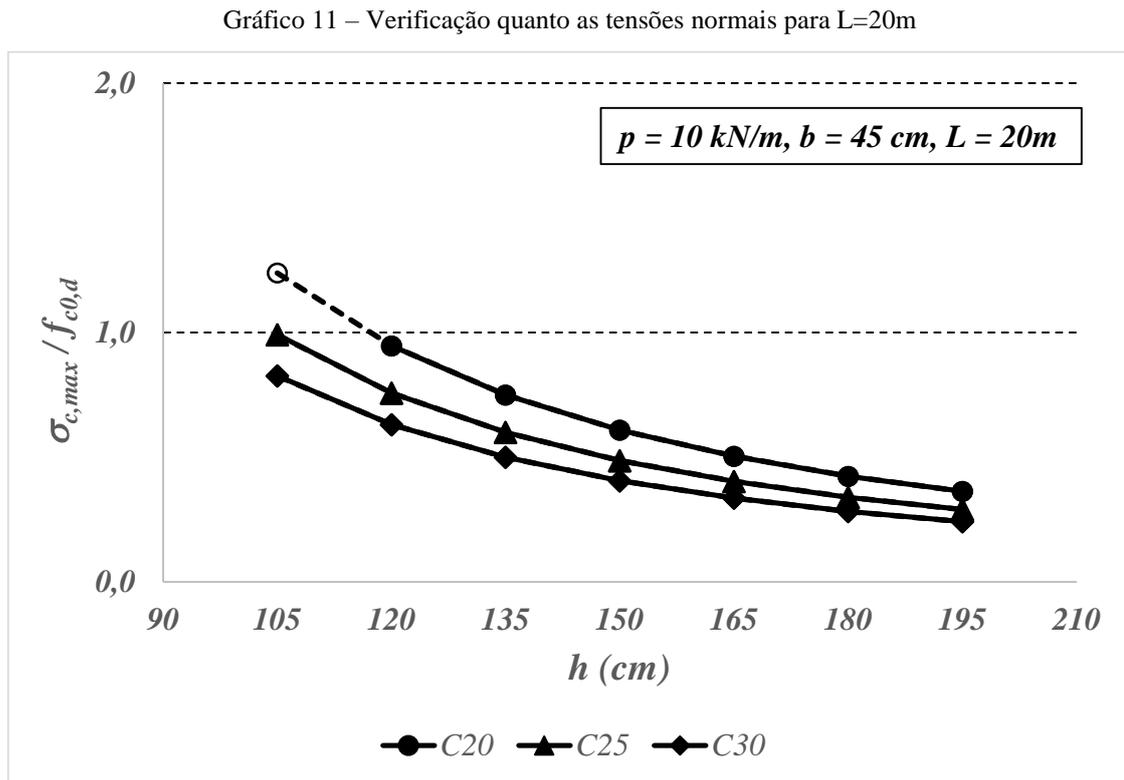
Neste caso foram analisadas vigas com alturas variando de 105cm a 195cm, com um intervalo de 15cm entre elas, como as vigas analisadas tem um vão livre de 20m, as alturas estabelecidas para os demais comprimentos não atendiam em nenhuma classe de resistência, por isso viu-se a necessidade de aumentar o h.

Ao analisar a classe de resistência C20, verificou-se que somente a estrutura com $h=195\text{cm}$ foi atendida. As classes C25 e C30 atenderam em todas as dimensões de vigas modeladas, uma vez que as mesmas tiveram comportamento semelhante.

As curvas C20, C25 e C30, tiveram leves inclinações, se aproximando de retas, logo notou-se que nas vigas com grandes comprimentos as tensões começaram a tender a um mesmo valor em suas respectivas classes de resistência, de modo que mesmo com o aumento da altura a variação e diminuição das tensões é quase inexistente.

O comportamento linear é visto de maneira mais explícita na classe de resistência C30, uma vez que as tensões para $h=105\text{cm}$ e $h=195\text{cm}$ são muito próximas, sendo assim essas duas vigas mesmo tendo uma grande variação de altura suportam aproximadamente as mesmas tensões de cisalhamento.

As verificações quanto tensões normais para $L=20\text{m}$ estão expostas no Gráfico 11.

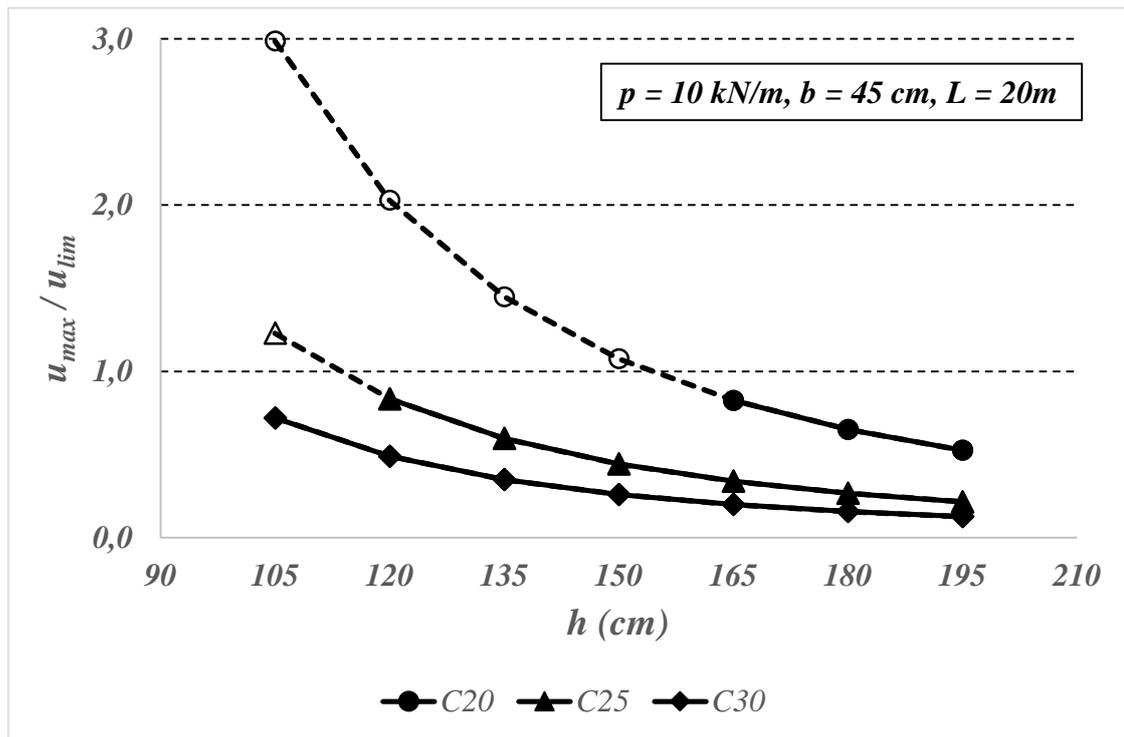


(fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2019)

As tensões normais em estruturas de $L=20\text{m}$ as curvas comportaram-se de maneira similar para todas as classes de resistência, onde em $h=105\text{cm}$ a resistência quando as tensões normais não verificaram somente para a classe C20. Já os modelos com $h \geq 120\text{cm}$ todas as classes foram atendidas.

De maneira geral o Gráfico 11 mostra que as curvas começam a tender a um valor comum quanto as verificações feitas e tensões normais encontradas nas suas respectivas classes de resistência, mesmo aumentando a altura.

Gráfico 12 – Verificação quanto as flechas para L=20m



(fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2019)

Analisando o Gráfico 12, a curva C20 foi a que obteve as maiores flechas comparada com as demais classes de resistência, com um valor 3 vezes maior que o limite em $h=105\text{cm}$. Já a curva C25 em $h=105\text{cm}$ ficou próxima da verificação, onde alturas maiores que esta verificaram quanto a flecha.

Estruturas com $h \geq 165\text{cm}$ atenderam quanto as três classes de resistência, onde as flechas de C25 e C30 obtiveram valores próximos. Analisou-se também que as curvas C25 e C30 possuem comportamentos semelhantes ao longo de todas as alturas.

A Tabela 9 mostra a situação geral das estruturas que atenderam quanto as tensões de cisalhamento, tensões normais e flecha, para as vigas com $L=20\text{m}$.

Tabela 9 – Geral de verificações para L=20m

Classe de resistência	C20		
h	$\tau_{max} / f_{v,d}$	$\sigma_{c,max} / f_{c0,d}$	u_{max} / u_{lim}
cm	-	-	-
105	1,2	1,2	3,0
120	1,2	0,9	2,0
135	1,1	0,7	1,4
150	1,1	0,6	1,1
165	1,1	0,5	0,8
180	1,1	0,4	0,7
195*	1,0	0,4	0,5
Classe de resistência	C25		
h	$\tau_{max} / f_{v,d}$	$\sigma_{c,max} / f_{c0,d}$	u_{max} / u_{lim}
cm	-	-	-
105	0,9	1,0	1,2
120*	0,9	0,8	0,8
135*	0,9	0,6	0,6
150*	0,9	0,5	0,4
165*	0,9	0,4	0,3
180*	0,9	0,3	0,3
195*	0,8	0,3	0,2
Classe de resistência	C30		
h	$\tau_{max} / f_{v,d}$	$\sigma_{c,max} / f_{c0,d}$	u_{max} / u_{lim}
cm	-	-	-
105*	0,8	0,8	0,7
120*	0,8	0,6	0,5
135*	0,8	0,5	0,3
150*	0,7	0,4	0,3
165*	0,7	0,3	0,2
180*	0,7	0,3	0,2
195*	0,7	0,2	0,1

* Dimensões que verificaram nos três parâmetros

(fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2019)

Analisando a Tabela 9, para a classe de resistência C20, as peças com h = 195cm verificaram nos três parâmetros. Já as peças executadas com C25 verificaram para h ≥ 120cm e C30 verificou para todas as dimensões modeladas. Logo é necessário analisar e avaliar se é viável aumentar a dimensão da peça ou a classe de resistência e para que a estrutura atenda a todos os parâmetros.

Para as análises estruturais foi modelada somente um arco biapoiado, possuindo dimensões de 45x105x2000cm e f=200cm, de modo que as comparações foram feitas entre o arco e a viga modelada com a mesma seção transversal, assim podendo analisar o comportamento das duas estruturas e como a curvatura da viga influencia na distribuição de tensões e flecha.

As estruturas foram analisadas comparando as vigas e os arcos separadamente nas três classes de resistência, uma vez que as tensões de cisalhamento e tensões normais não variaram conforme as classes de resistência para cada uma das estruturas. A Tabela 10, mostra os resultados encontrados sob uma carga de 10 kN/m.

Tabela 10 – Comparações entre a viga e arco

		Atuante			Verificação		
		τ_{\max}	$\sigma_{c,\max}$	U_{\max}	τ_{\max}	$\sigma_{c,\max}$	U_{\max}
		kN/cm ²	kN/cm ²	cm	-	-	-
C20	Viga	0,13	0,85	29,86	1,2	1,2	3,0
	Arco	0,44	1,04E-06	3,12	4,1	0,0	0,3
C25	Viga	0,13	0,85	12,30	0,9	1,0	1,2
	Arco	0,44	1,04E-06	1,29	3,3	0,0	0,1
C30	Viga	0,13	0,85	7,21	0,8	0,8	0,7
	Arco	0,44	1,04E-06	0,75	2,7	0,0	0,1

(fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2019)

Em relação as tensões de cisalhamento, observou-se que as vigas obtiveram um melhor desempenho em comparação aos arcos, de modo que o seu valor foi cerca de quatro vezes menor nas regiões de apoio, referente as três classes de resistência. Fato no qual é explicado devido a distribuição de forças no arco, pois em vigas curvas as tensões cisalhantes sofrem um acréscimo devido as tensões normais que são inclinadas, aumentando assim o valor do cisalhamento e diminuindo as tensões normais.

Segundo a ABNT 7190 (1997) a resistência ao cisalhamento paralelo as fibras de cálculo ($f_{v0,d}$) é de 0,107 kN/cm², 0,133 kN/cm² e 0,160 kN/cm² para as classes de resistência C20, C25, e C30 respectivamente. Referente a este parâmetro, somente as vigas de C25 e C30 atenderam, o arco, por sua vez não resistiu em nenhum dos casos.

As tensões normais nos arcos foram muito pequenas ($1,04 \times 10^{-6}$ kN/cm²) em comparação as vigas, que resultaram em um valor de 0,85 kN/cm², referente as três classes de resistência. Na estrutura em arco as tensões agem de forma inclinada e quando decomposta, parcela do seu

valor é convertido em tensão cisalhante e o restante age como tensão normal. Neste parâmetro, os arcos atenderam quanto as três classes de resistência, já as vigas atenderam somente para C25 e C30.

Através das modelagens foi encontrada que a flechas atuantes nas vigas e nos arcos analisados foram de 29,86cm e 3,12cm respectivamente para a classe de resistência C20, 12,30cm e 1,29cm para as estruturas C25 e 7,21cm e 0,75cm para a classe de resistência C30.

Ao analisar as flechas atuantes nas estruturas, referente as três classes de resistência, percebeu-se que os valores nos arcos foram dez vezes menores do que nas vigas, mostrando que flecha diminui significativamente ao inserir uma curvatura na peça. Neste parâmetro, os arcos atenderam quanto as três classes de resistência, já a viga atendeu somente para C30.

De modo geral o arco possuiu um desempenho satisfatório e muito superior a viga quanto as tensões normais e flecha, onde houve uma diferença considerável entre os valores encontrados e nas verificações. Referente as tensões de cisalhamento a viga mostrou-se superior nas verificações, uma vez que o arco não atendeu em nenhuma classe de resistência.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 CONCLUSÃO

Os modelos numéricos propostos neste trabalho foram capazes de avaliar o comportamento da MLC solicitada a uma carga de 10kN/m, em diferentes estruturas, com variação de dimensões e classes de resistência para uma madeira conífera.

As vigas de L=5m foram modeladas com b=15cm e h variando de 30cm a 75cm, com um intervalo de 15cm. As estruturas deste comprimento mostraram-se satisfatórias quanto aos parâmetros resistência e flecha, conforme aumentava-se a altura da peça.

A classe de resistência C20 foi a que necessitou de alturas maiores para verificarem quanto as tensões de cisalhamento, tensões normais e flecha, onde somente as peças com $h \geq 60\text{cm}$ verificaram nos três parâmetros, as estruturas executadas em C25 e C30 tiveram comportamento muito semelhante para este comprimento, onde as seções com $h \geq 45\text{cm}$ verificaram.

As estruturas com um vão livre de 10m de comprimento necessitaram de uma base de 30cm para atenderem aos parâmetros analisados, neste caso foram modeladas vigas com h variando de 30cm a 105cm, possuindo um intervalo de 15cm entre elas também.

No entanto, para vigas deste comprimento as classes de resistência da madeira mostram-se mais distintas uma das outras, onde para C20 as seções com $h \geq 90\text{cm}$ verificaram, por sua vez C25 verificou com $h \geq 75\text{cm}$ e C30 para seções com $h \geq 60\text{cm}$, mostrando que estruturas com classes de resistência maiores diminuem consideravelmente a altura da peça.

Estruturas com L=15m foram modeladas com b=35cm, pois bases menores que esta resultavam em peças muito altas e que não atendiam quanto as tensões de cisalhamento, logo foi necessário aumentar a base da viga. Neste caso, as alturas variaram de 60cm a 135cm, onde observou-se que para a classe de resistência C20 somente viga com h=135cm verificou quanto aos três parâmetros analisados, já C25 verificou com $h \geq 105\text{cm}$ e C30 para seções com $h \geq 90\text{cm}$.

As vigas com L=20m foram modelada com b=45cm devido aos mesmos fatores mostrados na viga de L=15m. Estruturas deste comprimento tiveram um comportamento interessante quando as tensões de cisalhamento, de modo que as curvas C20, C25 e C30 tiveram leves inclinações,

mostrando que em vigas de maior comprimento as tensões cisalhantes tendem a se normalizar mesmo com o aumento da altura da peça, necessitando assim aumentar a base.

As verificações quanto as vigas com $L=20\text{m}$ mostraram-se satisfatórias para C30, onde foram verificadas nos três parâmetros para todas as alturas analisadas, sendo elas de 105cm a 195cm. Estruturas modeladas com classe de resistência C20 verificaram somente para $h = 195\text{cm}$, já C25 atendeu com $h \geq 120\text{cm}$.

Mediante o exposto, viu-se que vigas com grandes comprimentos precisam de uma análise mais detalhada quando as tensões de cisalhamento, uma vez que mesmo com a aumento da altura da peça, as tensões tendem a se normalizar, logo é necessário aumentar a classe de resistência ou a base para que a estrutura atenda quanto a este parâmetro.

Em relação as estruturas com $L \leq 10\text{m}$, notou-se que as classes de resistência da madeira não são tão significativas quanto as verificações, uma vez que há pouca variação de altura entre as classes para que as estruturas atendam quanto aos três parâmetros.

Em todo o caso é necessário analisar e avaliar se é viável aumentar a dimensão da peça ou a classe de resistência e para que a estrutura atenda a todos os parâmetros.

Diante as condições vistas nas vigas e nos arcos notou-se que os arcos possuem um desempenho superior as vigas no que diz respeito as tensões normais e as flechas, em contrapartida possuem baixa resistência quanto ao cisalhamento.

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Avaliação econômica das seções transversais que atendam aos parâmetros de tensões de cisalhamento, tensões normais e flecha.

Estudo sobre a viabilidade de aumentar a seção transversal ou as classes de resistência nas estruturas modeladas neste trabalho.

Estudo do comportamento de estruturas com madeira do tipo dicotiledônea e comparação com as coníferas já avaliadas neste trabalho.

Estudo da eficiência da linha de cola em relação ao cisalhamento para estruturas de grandes comprimentos, podendo assim ser feita a análise da resistência.

Avaliar a influência da curvatura em arcos e estudar o comportamento das tensões de cisalhamento nessas estruturas, variando a altura da flecha para possíveis comparações.

8 REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro. 1997.
- AZEVEDO, Álvaro FM. **Método dos elementos finitos**. Apostila. Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto. Portugal, ed. 1. 2003.
- BALLARIN, Adriano Wagner; NOGUEIRA, Marcelo. **Caracterização elástica da madeira de Eucalyptus citriodora**. Cerne, v. 9, n. 1, 2003.
- BEER, Ferdinand Pierre et al. **Mecânica dos materiais**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.
- BORGES, Carlos Alberto de Moraes. **O conceito de desempenho de edificações e a sua importância para o setor da construção civil no Brasil**. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo. 263p. 2008.
- BORGES, Paula. **Caraterização das propriedades físicas e mecânicas da madeira de carvalho e de castanho do Nordeste Transmontano**. Dissertação (Mestrado) – Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior de Tecnologia e Gestão. 111p. 2013.
- CALIL, Carlito Júnior et al. **SET 406 – Estruturas de Madeira: Apostila para a disciplina de Estruturas de Madeira. Notas de aula** – Departamento de Engenharia de Estruturas. São Carlos. 107 p. 1998.
- CALIL, Carlito Neto et al. **Avaliação da resistência ao cisalhamento e a delaminação em madeira laminada colada**. Ciência Florestal, Santa Maria. v. 24, n. 4, p. 989-996, 2014.
- CALIL, Carlito Neto. **A Madeira Laminada Colada**. Revista da Madeira, Caxias do Sul, 5 p. Artigo técnico. 2010. Disponível em: < http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1473&subject=MLC&title=A%20madeira >. Acesso em: 30 out. 2018.
- CALIL, Carlito Neto. **Madeira laminada colada (MLC): controle de qualidade em combinações espécie-adesivo-tratamento preservativo**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo. São Carlos. 125 p. 2011.

- CARPINTERIA. **Estrutura em MLC no Shopping Iguatemi em Fortaleza.** 2015. Fotografia. Disponível em: < <https://carpinteria.com.br/#> >. Acesso em: 15 out. 2018.
- CARVALHO, Roberto Chust; FILHO, Jasson Figueiredo; JUNIOR, Sydney Furlan. **A utilização de programas computacionais da área de estruturas no ensino de engenharia civil.** In: XVII Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia. 2000.
- CARVALHO, Walter *et al.* **Uma visão sobre a estrutura, composição e biodegradação da madeira.** Química Nova, v. 32, n. 8, p. 1-5, 2009.
- CÓRDOVA, Franciele et al. Análise dos métodos analítico e experimental de vigas em madeira laminada colada de Schizolobium Parahyba Var. Amazonicum tratadas quimicamente. In: XV Encontro Brasileiro em Madeira e em Estruturas em Madeira. **Anais...** Curitiba. 2016.
- CORREIA, Emanuel André Soares. **Análise e dimensionamento de estruturas de madeira.** Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade de Porto. 163p. 2009.
- CRUZ, Helena. **Patologia, avaliação e conservação de estruturas de madeira.** II Curso livre internacional de património. Portugal. 2001.
- FIALDINI, Romulo. **ITA Construtora: Residência unifamiliar – Campos do Jordão/SP.** 2002. Fotografia. Disponível em: < <http://www.itaconstrutora.com.br/portfolio/residencia-em-campos-do-jordao/#jp-carousel-2880> >. Acesso em: 10 nov. 2018
- FIORELLI, Juliano. **Estudo teórico e experimental de vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibra de vidro.** Tese (Doutorado) – Área Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo. 108p. 2005.
- GESUALDO, Francisco A. Romero. **Estruturas de madeira – Notas de Aula.** Universidade de Federal de Uberlândia. 106p. 2003.
- GOMES, Nádia Barros. **Análise de elementos estruturais de MLC na flexão com base na versão de revisão da norma ABNT NBR 7190: 2013.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá. 148p. 2018.

- ITA CONSTRUTURA. **Espaço de convivência – Iporanga/SP**. 2011. Fotografia. Disponível em: < <http://www.itaconstrutora.com.br/portfolio/centro-de-eventos-iporanga/#jp-carousel-994> >. Acesso em: 10 nov. 2018.
- ITA CONSTRUTURA. **MLC da ITA**. 2014. Disponível em: < <http://www.itaconstrutora.com.br/> >. Acesso em: 2 nov. 2018.
- JÚNIOR, Jerónimo Araújo Botelho. **Avaliação não destrutiva da capacidade resistente de estruturas de madeira de edifícios antigos**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade de Porto. 208p. 2006.
- KLOCK, Umberto. **Qualidade da madeira juvenil de Pinus maximinoi HE Moore**. Tese (Doutorado) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 321 p. 2000.
- KON, Nelson. **ITA Construtora: Capela – Tatuí/SP**. 2006. Fotografia. Disponível em: < http://www.itaconstrutora.com.br/wp-content/uploads/2006/09/RRN_img_10.jpg >. Acesso em: 10 nov. 2018.
- KON, Nelson. **ITA Construtora: Residência unifamiliar – Santo Antônio do Pinhal/SP**. 2015. Fotografia. Disponível em: < <http://www.itaconstrutora.com.br/portfolio/residencia-cm/#jp-carousel-3386> >. Acesso em: 10 nov. 2018.
- LOTTI, Raquel Silva. et al. **Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos**. R Dental Press Ortodon Ortop Facial, v. 11, n. 2, p. 35-43, 2006.
- MACÊDO, Alcebíades Negrão. **Fadiga em emendas dentadas em madeira laminada colada (MLC)**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 219 p. 2000.
- MACÊDO, Alcebíades Negrão; CALIL, Carlito Neto. **Fadiga em emendas dentadas em madeira laminada colada**. Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos. v. 9, n. 37, p. 95-126. 2007.
- MARQUES, Luís Eduardo Menezes Marinho. **O papel da madeira na sustentabilidade da construção**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade de Porto. 111p. 2008.

MARTINS, Gisele Cristina Antunes. **Análise numérica e experimental de vigas de madeira laminada colada em situação de incêndio**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação e Área de concentração em Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 199p. 2016.

MIOTTO, José Luiz. **Estruturas mistas de madeira-concreto: avaliação das vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibras de vidro**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo. São Carlos. 357 p. 2009.

MOLINA, Júlio Cesar. **Análise do comportamento dinâmico da ligação formada por barras de aço coladas para tabuleiros mistos de madeira e concreto para pontes**. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo. 270 p. 2008.

NEGRELI, Murilo; MOLINA, Júlio César. Estudo numérico – experimental de elementos estruturais de madeira laminada colada na flexão. In: XV Encontro Brasileiro em Madeira e em Estruturas em Madeira. **Anais...** Curitiba. 2015.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de madeira: dimensionamento segundo a norma brasileira NBR 7190/97 e critérios das normas norte-americana NDS e europeia EURODODE 5**. 6.ed. Rio de Janeiro, RJ. LTC. 2015.

SANTOS, Lorenzo Lube dos. **Avaliação estrutural de vigas de madeira laminada colada**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Espírito Santo. 120p. 2014.

SCREMIM, Cristofer Bernardi. **Avaliação sobre a diferença de propriedades mecânicas do cerne e do alburno de mesmas espécies de madeira**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba. 97p. 2013.

SZÜCS, Carlos Alberto et al. **Estruturas de madeira**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

TELES, Ricardo Faustino. **Propriedades tecnológicas de vigas de madeira laminada colada produzidas com louro-vermelho:(*sextonia rubra*)**. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Florestal da Faculdade Tecnológica, Universidade de Brasília. Brasília. 118 p. 2009.

VELOZA, Lucas Tunis Martins. **Análise Dinâmica de Estruturas, utilizando o software SAP2000**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 188 p. 2009.

VIÉGAS, Bebete. **ITA Construtora: Ateliê Acaia – São Paulo/SP**. 2002. Fotografia.
Disponível em: < <http://www.itaconstrutora.com.br/portfolio/atelie-acaia/#jp-carousel-2888> >.
Acesso em: 10 nov. 2018.

ZANGIÁCOMO, André Luiz. **Emprego de espécies tropicais alternativas na produção de elementos estruturais de madeira laminada colada**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 103p. 2003.