



Dimensionamento de uma área de lazer utilizando CLT

Dimensioning of a lounge area using CLT

Amanda Pereira Silva¹, Lauren Karoline de Sousa Gonçalves²

¹Graduanda na Faculdade de Engenharia Civil – FECIV, Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Minas Gerais, Brasil – amandaps@ufu.br

²Professora na Faculdade de Engenharia Civil – FECIV, Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Minas Gerais, Brasil – laurenkaroline@ufu.br

Resumo: Apesar de estar em baixa utilização nesse momento da história, em que o concreto armado possui protagonismo nas estruturas, principalmente de grandes dimensões, a madeira representa um material sustentável com boas características estruturais. O presente trabalho apresenta a revisão dos conceitos associados à madeira laminada colada cruzada (Cross Laminated Timber), conceitua a madeira engenheirada para melhor compreensão da técnica e dimensiona a estrutura de uma área externa residencial, feita em CLT e madeira serrada, fazendo com que o processo de dimensionamento seja mais bem interpretado, visto que não há norma brasileira para estruturas em CLT. Para este dimensionamento foram seguidos o exemplo presente na literatura utilizando o método Gama. Para o dimensionamento em madeira serrada foi utilizada a ABNT NBR 7190:1997.

Palavras-chave: Madeira laminada colada cruzada; madeira engenheirada; estruturas; sustentabilidade.

Abstract: Despite being in low use at this moment in history, when reinforced concrete has a leading role in structures, especially in large ones, wood represents a sustainable material with good structural characteristics. The present work introduces a review of the concepts associated with cross-glued laminated wood (Cross Laminated Timber),

conceptualizes the engineered wood for a better understanding of the technique and do the dimensioning of the structure of an external residential area, made of CLT and sawn wood, making the design process better interpreted, since there is no brazilian norm for CLT structures. For this dimensioning, the example present in the literature was followed using the Gamma method. For the dimensioning in sawn wood, ABNT NBR 7190:1997 was followed.

Keywords: *Cross laminated timber; engineered wood; structures; sustainability.*

1. INTRODUÇÃO

O uso da madeira como material de construção civil ocorre desde o período neolítico. No entanto, ao longo da história é possível notar que houve um declínio da sua utilização, principalmente com a ascensão do concreto armado. Além desta questão, no Brasil, o seu uso reduzido também está relacionado à ideia que a madeira possui características “ruins” relacionadas a qualidade, durabilidade e resistência às situações de incêndio (COSTA, 2013). Entretanto, esse conceito prévio pode ser invalidado com o conhecimento das propriedades físicas e mecânicas das madeiras, e aplicando-se os critérios da norma de desempenho ABNT NBR 15.575 para estudo do material.

O contexto atual com relação à geração de resíduos sólidos faz com que os profissionais da área da construção civil necessitem repensar os aspectos construtivos utilizados. Isto porque o setor da construção, alinhado ao déficit habitacional e ao alto crescimento demográfico, o qual ainda é grande nas cidades brasileiras, é um dos setores que mais gera resíduos sólidos (GRADIN; COSTA, 2009).

De acordo com Lotufo (2018), a madeira se encaixa em uma solução de sistema construtivo renovável, pois é plantada e, ao longo do crescimento da árvore, ela estoca o carbono da atmosfera. Além disso, os processos de fabricação para obter os materiais aço e concreto armado são responsáveis por uma grande emissão de carbono liberado na atmosfera, o que não acontece para obter a matéria-prima madeira.

Considerando a demanda por materiais sustentáveis e a necessidade de melhorar as propriedades físicas, como a umidade e a resistência ao ataque de insetos, e retirar as irregularidades próprias do material quando se encontra na forma de árvores, obteve-se o material conhecido como madeira engenheirada a partir do processo industrial. Recebem esta denominação a madeira laminada cruzada (CLT) e madeira laminada colada (MLC) (CTE, 2020).

A madeira laminada cruzada, também conhecida como *Cross Laminated Timber*, pode originar painéis utilizados como lajes, pisos ou paredes de vedação com finalidade estrutural ou não. As peças são fabricadas em número ímpar, geralmente de 3 a 7 unidades de lâminas de madeira, devidamente tratada e coladas umas às outras em sentidos perpendiculares (KARACEBEYLI; DOUGLAS, 2013), porém podem ser utilizadas mais camadas. A mesma conta com um apelo visual relevante e é desenvolvida de maneira industrializada, utilizando prensas e cola. Vale destacar que o desenvolvimento da CLT teve seu início na década de 1990 na Europa. O material constitui uma grande inovação tecnológica de acordo com a definição de Sabatinni (1989).

Existe ainda a madeira laminada colada, a MLC, constituída por lâminas coladas de maneira linear com as fibras dispostas paralelamente no sentido longitudinal. Este tipo de material possui melhor desempenho para pilares e vigas devido a direção em que a madeira é colada, favorecendo o desempenho estrutural. Uma vantagem em utilizar sistemas construtivos de CLT ou MLC é que estes permitem uma redução considerável do tempo de construção se comparado com sistemas estruturais em concreto armado com vedação em alvenaria (BRUNA, 2002).

Destaca-se que é crescente o número de estruturas de grandes vãos e de múltiplos pavimentos construídos no mundo nas últimas décadas utilizando CLT como elementos estruturais. As Figuras 1 e 2 ilustram construções executadas utilizando o CLT e MLC em vigas e pilares. No entanto, observa-se que no Brasil estes materiais ainda são pouco utilizados como elementos estruturais de edifícios, pontes e até mesmo de edificações unifamiliares.

Figura 1 – Edificação da Crosslam com vigas e pilares em CLT e MLC



Fonte: CROSSLAM (2020)

Figura 2 – Edifício em CLT localizado em Washington



Fonte: CROSSLAM (2020)

Considerando os pontos mencionados, este trabalho tem por objetivo dimensionar a estrutura considerando os componentes estruturais em CLT, para painéis (parede e laje), e madeira maciça, para vigas e pilares, considerando as recomendações da norma ANBT NBR 7190:1997, o ANEXO B da norma europeia EN EUROCODE 5 (1995) e a descrição do Método Gama por Sousa (2020).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A madeira, seu uso e a possibilidade de melhor aproveitamento

Segundo Shigue (2018) é possível notar uma tendência mundial em ampliar o uso da madeira para fins estruturais, especialmente para edifícios altos. Atrelada a essa tendência, existe o interesse das empresas brasileiras que estão investindo em madeira engenheirada. O Brasil é um país de área continental que possui uma parcela florestal equivalente a mais de 54% do território total (MMA, 2012). Porém as áreas plantadas que são destinadas à exploração dos recursos representam 1,5% da área florestal total, o que não é um número alto, mas atende a quase toda a madeira utilizada no Brasil (IBÁ, 2016). O potencial para aumentar a produção de madeira com finalidade de material de construção é altíssimo, o que faria com que todo o material utilizado no país fosse de produção própria.

O uso da madeira no setor da construção no Brasil se dá principalmente para a construção de fôrmas de escoramento, em elementos para acabamentos, móveis e esquadrias (SHIGUE, 2018). Observa-se que a madeira não tem sido aplicada como

elemento estrutural em edifícios altos no Brasil, o que também chama a atenção para um potencial de melhor aproveitamento do material.

A madeira é classificada segundo sua anatomia, sendo as utilizadas para fins estruturais conhecidas com coníferas e dicotiledôneas. As coníferas, também chamada de *softwood* ou madeira mole, geralmente são madeiras provenientes de clima frio, enquanto que as dicotiledôneas, conhecidas como *hardwood* ou madeira dura, são as provenientes de locais de clima quente. Consequentemente a densidade das duas varia, coníferas possuem menor peso específico. Dois exemplos importantes de coníferas são o Pinho do Paraná e o Pinus, e entre as dicotiledôneas estão os Ipês, Peroba Rosa, Imbuia, Cedro, Mogno, Angico, Jatobá, os Eucaliptos, entre outros. É importante ressaltar que a madeira é um material anisotrópico por possuir diferentes propriedades com relação aos planos analisados (GESUALDO, 2003).

Algumas características das espécies são necessárias para o conhecimento estrutural das mesmas, como as propriedades físicas (umidade, densidade, retratibilidade e resistência ao fogo), resistência à compressão paralela e normal às fibras, resistência à tração paralela às fibras e ao cisalhamento, módulo de elasticidade, sollicitação inclinada e embutimento (GESUALDO, 2003).

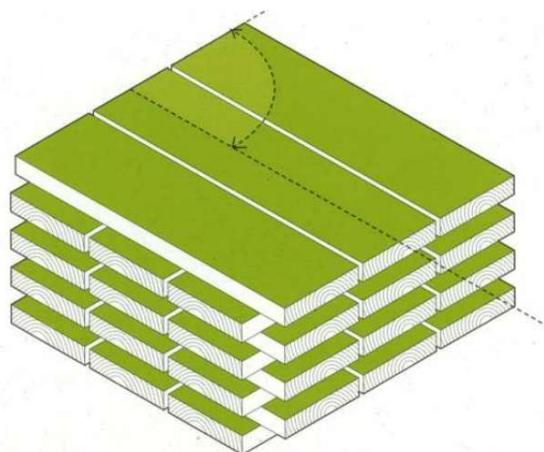
2.2. Madeira engenheirada

De acordo com Guss (1995), o ato de cortar e serrar a madeira para obtenção de uma peça estrutural a torna engenheirada. No caso da CLT, a denominação madeira engenheirada é proveniente das modificações das propriedades mecânicas oriundas do processo de fabricação que gera um produto com rigidez alta, baixo peso próprio e elevada capacidade de carga (LOPES; CARMO; SERRA, 2021).

Ao iniciar um projeto com elementos de CLT o primeiro passo é o projeto arquitetônico, logo após é preciso entender de que maneira será melhor para a montagem da estrutura, o que se entende pela modelagem das peças. Além disso, é necessário pensar em questões como o transporte e as máquinas que também serão usadas para a construção, associadas às características dos painéis em projeto, que se tiverem uma dimensão muito grande, podem ser fabricados em menores dimensões e, posteriormente, montados como um só elemento (LOTUFO, 2018).

A CLT é um material de madeira que surgiu da junção de esforços entre a indústria e a universidade. A Figura 3 ilustra como são formados os painéis de madeira laminada colada cruzada que podem ser utilizados em pisos, lajes e paredes. A disposição das lâminas de madeira permite obter um produto maciço com ótima resistência na direção paralela e perpendicular às fibras, além de contar com peças de alta esbelteza, grandes vãos e baixo peso específico. Em geral, os painéis são formados com um número ímpar de chapas coladas entre si, gerando um eixo de simetria central (COSTA, 2013).

Figura 3 – Disposição das lâminas de madeira formando um painel de CLT



Fonte: COSTA (2013)

No processo industrial para a produção do CLT, a madeira precisa ser aprovada a partir de uma análise visual pelo controle de qualidade. Na indústria brasileira geralmente é utilizado o Pinus que, ao passar pelo controle de qualidade, chega à fábrica cortado em forma de lâminas e passa pelo processo de secagem para atingir umidade de $12\pm 2\%$. É possível fazer dois tratamentos para evitar o ataque de insetos, o processo de autoclave e a aplicação manual de inseticida óleo-solúvel com cipermetrina (LOTUFO, 2018). O primeiro processo possui desempenho maior e mais longo para madeiras como o Pinus, porém não é adequado para madeiras de alta densidade como o eucalipto. Além disso, a espécie possui valor mais acessível e conta com boas características relacionadas ao peso e à resistência (SHIGUE, 2018).

Ainda na indústria, após a modelagem dos elementos do projeto inicia-se o processo de fabricação visando economia de maneira otimizada, e é chamado de plano de corte (LOTUFO, 2018). A união dos elementos se dá por meio de *finger joints*, que é uma

ligação cruzada feita na própria madeira ilustrada na Figura 4. Essa junção conta com posterior uniformização da peça final.

Figura 4 –Ligação entre elementos do tipo finger joints



Fonte: LEITZ (2022)

Utilizando o processo de prensagem a vácuo as lâminas são unidas até que a dimensão requerida seja alcançada. A partir deste ponto o adesivo estrutural, monocomponente de poliuretano do tipo Purbond, é aplicado seguido de outra camada de lâminas de madeira orientadas de forma ortogonal uma camada à outra. As lâminas podem ter espessura variando de 19mm a 40mm, o que vai ser definido conforme a espessura do painel final (LOTUFO, 2018).

Após coladas, as peças são cortadas e usinadas através de máquinas computadorizadas. O processo de fresagem pode ser controlado através de *softwares* que irão enviar o comando à máquina, o que permite controlar o processo e configurar uma etapa de extrema importância (KOLAREVIC, 2003).

Por fim, é executado o processo de acabamento com a limpeza e, para elementos que ficarão expostos sem revestimento, o lixamento conforme necessário. Para elementos que não receberam tratamento em autoclave, é necessário reaplicar inseticida, principalmente nas partes que foram posteriormente cortadas (LOTUFO, 2018). Em alguns casos pode ser aplicado *Stain* para acabamento, proteção e realce da cor e desenho da madeira, este também tem ação como selador, pois penetra a madeira, não ficando apenas na superfície.

2.3. Edifício residencial em CLT

O edifício residencial Stadthaus foi construído em CLT em 2012 em Londres (Figura 5). O edifício é constituído por 29 apartamentos em uma área de 289m². O projeto obteve sucesso de vendas e alinhou a necessidade da construção de habitações junto à dinâmica

de geração de carbono neutro. Apenas no pavimento térreo foi utilizado material de maior densidade, a base de cimento, garantindo maior durabilidade (COSTA, 2013).

Este edifício foi escolhido para ser abordado como um exemplo de construção em CLT por possuir um estudo sobre a emissão de carbono para sua construção. Segundo Costa (2013), ao substituir o sistema de concreto armado por madeira, o mesmo contou com uma economia de 310 toneladas de carbono.

Figura 5 – Edifício Stadthaus em Londres



Fonte: PET CIVIL UEM (2014)

Edifícios de múltiplos pavimentos em madeira geralmente necessitam de um núcleo central resistente ou ancoragem estrutural. No caso do Stadthaus, o núcleo ficou na caixa de escadas e de elevador. O arranjo em favo de mel proporcionou um excelente desempenho acústico de apartamento para apartamento e piso para piso, além do material contar altos índices de desempenho térmico. Os painéis em CLT permitiram que os esforços tivessem boa distribuição da fachada para as paredes para os painéis do pavimento (COSTA, 2013). A Figura 6 mostra como é a estrutura do edifício.

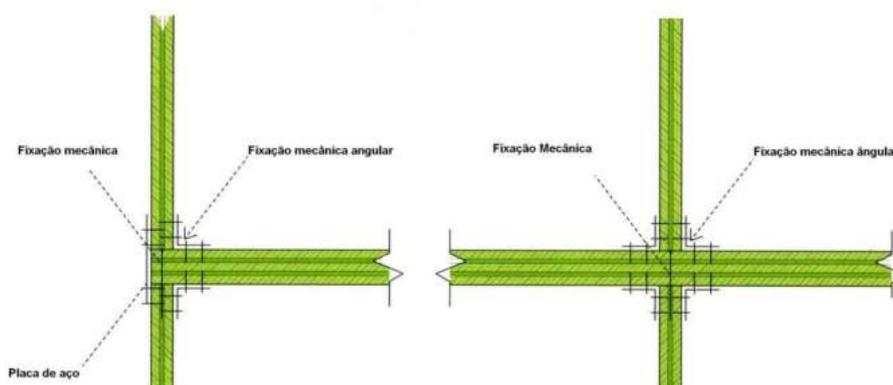
Figura 6 – Vista interior do Edifício Stadthaus



Fonte: PET CIVIL UEM (2014)

As ligações entre painéis foram realizadas utilizando um modelo prateleira com fixações distribuídas ao longo dos painéis em forma de placa e parafusos. Essas permitem que sistema tenha expansão em decorrência da variação térmica que ocorre na Inglaterra (COSTA, 2013). A Figura 7 mostra como se deu essa ligação e suas posições de fixações mecânicas.

Figura 7 – Ligações mecânicas em aço entre elementos de CLT



Fonte: COSTA (2013)

2.4. Projetar em madeira

A norma que rege o projeto de estruturas de madeira no Brasil é a ABNT NBR 7190:2022 (partes 1 a 7). No entanto, esta norma foi atualizada no final do último mês e como o trabalho estava em fase final de desenvolvimento não foi possível consultar a norma na sua nova versão. Neste sentido, foi utilizada a ABNT NBR 7190:1997 que estava em vigor durante a maior parte do desenvolvimento deste trabalho.

A norma ABNT NBR 7190:1997 recomenda como deve ser dimensionado os elementos e suas ligações. Segundo Gesualdo (2003), existem algumas características físicas e mecânicas para as estruturas desse material que devem ser levadas em consideração. Dentre elas estão as seções e dimensões mínimas das peças, as propriedades físicas (umidade, densidade, retratibilidade e resistência ao fogo), compressão paralela e normal às fibras, cisalhamento, tração paralela às fibras, módulo de elasticidade, sollicitação inclinada e embutimento.

No dimensionamento de estruturas de madeira é considerado o estado limite último (ELU), em que é calculado a capacidade da estrutura em atender os requisitos de segurança, e de serviço, em que são verificados os requisitos relativos ao conforto,

aparência e durabilidade da estrutura. Associados aos estados limites estão as ações que atuarão na estrutura, sendo essas permanentes, variáveis e acidentais.

No tópico de metodologia, descrito a seguir, serão apresentados alguns dos parâmetros indicados na norma ABNT NBR 7190:1997 e as recomendações a serem seguidas para o dimensionamento das peças de madeira.

3. DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS

Este trabalho descreve os critérios sobre o projeto em madeira laminada colada cruzada junto à formulação utilizada para dimensionar uma estrutura em CLT, para laje e parede, e madeira maciça, para vigas e pilares.

No projeto da estrutura dimensionada é utilizado o *software* Autodesk AutoCAD para desenho do projeto arquitetônico e o Revit para visualizar a estrutura tridimensional. Este último utiliza a metodologia BIM (Modelagem de Informação da Construção) para modelagem e possibilita a visão tridimensional do projeto para uma melhor visualização e compatibilização das informações.

Para a estrutura desenvolvida nesse artigo são levados em consideração o passo a passo convencional para o dimensionamento de estruturas, o qual consiste em fazer o projeto arquitetônico, lançar os elementos estruturais pré dimensionados e realizar a verificação da estrutura final dos estados limites último e de serviço.

3.1.1. Ações

Para avaliar as ações, é necessário que as seções perpendiculares sejam consideradas. Os pesos atuantes provenientes dos elementos da estrutura são calculados de acordo com seus pesos específicos, assim tem-se a carga permanente atuante na laje. A combinação de esforços, na equação 1, foi realizada de acordo com a ABNT NBR 7190:1997 para o conceito de estado limite último e os esforços acidentais determinados de acordo com a ABNT NBR 6120:1980. Para a laje foi considerado uma carga acidental de 0,5kN/m, já para a parede foi considerado um esforço acidental vertical de 1,5kN para edifícios residenciais.

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{G1} * F_{Gi,k} + \gamma_Q * \left[F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{0j} F_{Qj,k} \right] \quad (1)$$

Em que F_d é o esforço solicitante para cálculo, γ_{G1} é o coeficiente de ponderação das ações permanentes, $F_{Gi,k}$ é o valor das ações permanentes, γ_Q é o coeficiente das ações acidentais, $F_{Q1,k}$ é o valor ação variável considerada como ação principal para determinada combinação, ψ_{0j} é o coeficiente de ponderação das ações variáveis e $F_{Qj,k}$ é o valor das ações variáveis consideradas como ação secundária para essa combinação.

Para que as ações sejam avaliadas é necessário que algumas características dos painéis sejam calculadas. O momento de inércia da seção é calculado de acordo com a equação para seções retangulares na equação 2, já o momento de inércia efetivo mostrado em 6, levou em consideração um fator associado ao número de lâminas coladas. O fator descrito em 5, leva em consideração o eixo de inércia. A equação 3 mostra o módulo da seção e 4 mostra o momento estático.

$$I = \frac{b * h^3}{12} \quad (2)$$

$$w_o = \frac{I}{z} \quad (3)$$

$$S = \sum(b * h_i * a_i) \quad (4)$$

$$\gamma_i = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 * E_i * A_i * h_i}{L^2 * Gr * b}} \quad (5)$$

$$I_{0,eff} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{b * h^3}{12} + \gamma_i * b * h * a_i^2 \right) \quad (6)$$

Em que b é a largura da base do elemento, h e h_i são as espessuras individual e conjunta, a_i é a distância entre o centro de gravidade e o centro da camada, E_i é o módulo de elasticidade, A_i é a área da seção transversal do elemento, L é a largura total e Gr é o módulo de elasticidade transversal.

3.1.2. Tensões máximas

Nas equações de 7 a 14 são calculadas as forças, momentos e tensões máximas atuantes na seção transversal, cálculos estes que também serão necessários para a avaliação das solicitações.

O momento máximo, $M_{m\acute{a}x}$, é descrito em 7, em que P é a força atuante na seção e L o comprimento da estrutura analisada. O cortante máximo, $V_{m\acute{a}x}$, é descrito na Eq. (8) e a flecha máxima descrita na Eq. (9). Dessa maneira é possível determinar os outros esforços solicitantes para avaliação da seção. A tensão normal é descrita pela Eq. (10) e a tensão normal média pela Eq. (11), sendo a tensão normal máxima, σ_{max} na Eq. (12), a soma das duas. As tensões de cisalhamento são descritas pelas Eqs. (13) e (14), respectivamente.

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{P * L^2}{8} \quad (7)$$

$$V_{m\acute{a}x} = \frac{P * L}{2} \quad (8)$$

$$w_{m\acute{a}x} = \frac{5}{384} * \frac{P * L^4}{EI} \quad (9)$$

$$\sigma_{4,5} = \frac{M_{m\acute{a}x}}{EI_{0,eff}} * \gamma_{4,5} * E_{4,5} * a_{4,5} * \sigma_{4,5} \quad (10)$$

$$\sigma_{m4,5} = \frac{M_{m\acute{a}x}}{EI_{0,eff}} * \frac{E_{4,5} * h_{4,5}}{2} \quad (11)$$

$$\sigma_{max} = \sigma_{4,5} + \sigma_{m4,5} \quad (12)$$

$$\tau_{1max} = \frac{V_{m\acute{a}x}}{EI_{0,eff}} * \frac{\gamma * E_{4,5} * A_{4,5} * \alpha_{4,5} + 0,5 * E * b * h^2}{b} \quad (13)$$

$$\tau_r = \frac{V_{m\acute{a}x}}{EI_{0,eff}} * \frac{\gamma * E_{4,5} * A_{4,5} * a_{4,5}}{b} \quad (14)$$

O valor de $E_{4,5}$ é o mesmo do módulo de elasticidade definido na Tabela 1 de acordo com a madeira escolhida para esse projeto. Diferente da indicação da ABNT NBR 7190:1997, este módulo não sofre alteração de acordo com o K_{mod} segundo o exemplo de cálculo realizado por Sousa (2020). O valor de $a_{4,5}$ é o mesmo a_i definido na Tabela 2. A área da seção transversal é dita por $A_{4,5}$.

3.1.3. Verificações de segurança – Estado Limite Último

No estado limite último é necessário que a expressão em que o esforço atuante é menor ou igual ao esforço resistente seja satisfeita para que a estrutura não falhe. Para a determinação da resistência do elemento é necessário minorar a resistência de acordo com o valor de classe de duração de carga permanente, $K_{mod1} = 0,6$, $K_{mod} = 1,0$ e $K_{mod} = 1,0$ para, sendo $K_{mod} = 0,6$ e $\gamma_m = 1,25$ que é um coeficiente utilizado para madeira em CLT de acordo com as recomendações europeias. O fator K_{sys} , na equação 4, associa as cargas particionadas e aumenta a resistência de cálculo quando o sistema estrutural é formado por vários elementos unidos, assim como ocorre com os painéis em CLT, de acordo com o Eurocode 5 (SOUSA, 2020). Esse fator auxilia na segurança quanto à distribuição das cargas no elemento com um todo. O número n representa o número de camadas.

$$K_{sys} = \min \left\{ \begin{array}{l} 1 + 0,025 * n \\ 1,1 \end{array} \right. \quad (15)$$

3.1.4. Verificações de tração, compressão, momento e esforço cortante – Estado Limite Último

É necessário que as áreas a serem utilizadas para as estimativas de segurança sejam referentes às solicitadas com relação a direção das fibras. No caso dos painéis em CLT a área referente a direção paralela às fibras faz referência ao número de camadas, sua espessura e seu comprimento ao longo da direção paralela. Neste caso são cinco camadas no caso dos dois painéis dimensionados nesse artigo, e para a direção perpendicular são quatro camadas. Os itens seguintes seguem o critério de segurança do estado limite último em que as solicitações precisam ser menores ou iguais do que a resistência da peça.

A verificação de tração paralela às fibras é representada em 16 e 17, em que a solicitação precisa ser menor ou igual à resistência da seção analisada.

$$\sigma_{t0,d} \leq f_{t0,d} \quad (16)$$

$$\frac{N_{0,d}}{A_{0,net}} \leq K_{mod} * K_{sys} * \frac{f_{t,0k}}{\gamma_m} \quad (17)$$

Em que $\sigma_{t,0,d}$ é o valor de tensão de tração paralela às fibras, $f_{t,0,d}$ é o valor de resistência à tração, $N_{0,d}$ é a força atuante na direção paralela às fibras e $A_{0,net}$ é a área na direção da solicitação.

A verificação de tração perpendicular às fibras é representada em 18 e 19, em que a solicitação precisa ser menor ou igual à resistência da seção analisada.

$$\sigma_{t0,d} \leq f_{t0,d} \quad (18)$$

$$\frac{N_{90,d}}{A_{90,net}} \leq K_{mod} * K_{sys} * \frac{f_{t,0k}}{\gamma_m} \quad (19)$$

Em que $\sigma_{t90,d}$ é o valor de tensão de tração perpendicular às fibras, $f_{t90,d}$ é o valor de resistência à tração, $N_{90,d}$ é a força atuante na direção paralela às fibras e $A_{90,net}$ é a área na direção da solicitação.

A verificação de compressão paralela às fibras é representada em 20 e 21, em que a solicitação precisa ser menor ou igual à resistência da seção analisada.

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \quad (20)$$

$$\frac{N_{0,d}}{A_{0,net}} \leq K_{mod} * \frac{f_{c,0k}}{\gamma_m} \quad (21)$$

Em que $\sigma_{c0,d}$ é o valor de tensão de compressão paralela às fibras, $f_{c0,d}$ é o valor de resistência à compressão, $N_{0,d}$ é a força atuante na direção paralela às fibras e $A_{0,net}$ é a área na direção da solicitação.

A verificação de compressão perpendicular às fibras é representada em 22 e 23, em que a solicitação precisa ser menor ou igual à resistência da seção analisada.

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \quad (22)$$

$$\frac{N_{90,d}}{A_{90,net}} \leq K_{mod} * K_{c90(CL T)} \frac{f_{c,0k}}{\gamma_m} \quad (23)$$

$$K_{c90(CL T)} = \begin{cases} 1,90 & \text{para cargas centrais} \\ 1,40 & \text{para carga excêntricas} \end{cases} \quad (24)$$

Em que $\sigma_{c0,d}$ é o valor de tensão de compressão perpendicular às fibras, $f_{c0,d}$ é o valor de resistência à compressão, $N_{0,d}$ é a força atuante na direção perpendicular às fibras, $A_{0,net}$ é a área na direção da solicitação e $K_{c90(CL T)}$, citado na equação 24, é o fator que leva em consideração a configuração do carregamento, a possibilidade de fusão e o grau de deformação por compressão.

A verificação flexão é representada em 25 e 26, em que a solicitação precisa ser menor ou igual à resistência da seção analisada.

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d} \quad (25)$$

$$\frac{M_d}{W_{0,net}} \leq k_{mod} * \frac{f_{m,k}}{\gamma_m} \quad (26)$$

Em que $\sigma_{m,d}$ é o valor de tensão de flexão em relação aos eixos principais, $f_{m,d}$ é o valor de resistência à flexão do material, M_d é o momento atuante na seção e $W_{0,net}$ é o módulo da seção.

A verificação do esforço cortante é representada em 27 e 28, em que a solicitação precisa ser menor ou igual à resistência da seção analisada.

$$\tau_{v,r,d} \leq f_{v,r,d} \quad (27)$$

$$\frac{V_d * S_{r,net}}{I_{net} * b} \leq K_{mod} * \frac{f_{v,r,k}}{\gamma_m} \quad (28)$$

Em que $\tau_{v,r,d}$ é o valor da tensão de cisalhamento na seção, $f_{v,r,d}$ é o valor de resistência ao cisalhamento do material e V_d é o esforço cortante na seção.

3.2. Dimensionamento do pórtico – vigas e pilares

O vão de 6 metros foi dividido em 3 partes de 2m, sendo a estrutura em madeira maciça formada por 3 vigas apoiadas em 4 pilares. As vigas possuem contraventamentos laterais nas duas extremidades e os pilares foram dimensionados como peças semiesbeltas comprimidas.

A madeira de classe C60 com umidade de 12% possui as propriedades de resistência de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6 – Classe de resistências das dicotiledôneas C60

$f_{c,0k}(MPa)$	$f_{vk}(MPa)$	$E_{c0,m}(MPa)$	$\rho_{aparente}(kg/m^3)$
60	8	24500	1000

Fonte: ABNT NBR 7190:1997.

Em que $f_{c,0k}$ é a resistência característica à compressão paralela às fibras, f_{vk} é a resistência ao cisalhamento, $E_{c0,m}$ é o módulo de elasticidade longitudinal obtido no ensaio de compressão paralela às fibras e $\rho_{aparente}$ é a massa específica aparente.

De acordo com a ABNT NBR 7190:1997, pode-se entender que a relação entre a resistência à compressão e a resistência à tração é de 0,77, então $f_{c,0k} = 77,92 MPa$.

Ainda de acordo com a ABNT NBR 7190:1997, o valor da resistência a serem comparadas às solicitações deve ser de acordo com a equação 29.

$$X_d = K_{mod} * \frac{X_k}{\gamma_m} \quad (29)$$

Em que X_d é a resistência de cálculo requerida, K_{mod} é o coeficiente de modificação em função das propriedades da madeira, X_k é a resistência característica do material e γ_m é o coeficiente de ponderação dos materiais.

É necessário que o módulo de elasticidade seja tomado com o valor efetivo para as verificações de segurança que envolvem a rigidez da madeira, como mostra a equação (30) de acordo com a ABNT NBR 7190:1997.

$$E_{c0,ef} = K_{mod} * E_{c0,m} \quad (30)$$

Para elementos biapoiados, como as vigas, é necessário verificar se a tensão solicitante normal de flexão, para flexão simples, é menor ou igual à resistência normal de cálculo como mostra a equação 31. O mesmo vale para o esforço de tensão de cisalhamento, como a mostrado em 32.

$$\sigma_{Md} \leq f_{c0,d} \quad (31)$$

$$\tau_{vd} \leq f_{v0,d} \quad (32)$$

De acordo com a ABNT NBR 7190:1997 os coeficientes de ponderação de ações permanentes são considerados para ações de pequena variabilidade favoráveis, sendo $\gamma_G = 1,3$ e para ações variáveis e combinação normal, $\gamma_Q = 1,0$.

A estabilidade lateral das vigas é verificada de acordo com a equação 33.

$$\frac{L_1}{b} \leq \frac{E_{c0,ef}}{\beta_M * f_{c0,d}} \quad (33)$$

$$\beta_M = \frac{1}{0,26\pi} * \frac{\beta_E}{\gamma_f} * \frac{\left(\frac{h}{b}\right)^{3/2}}{\left(\frac{h}{b} - 0,63\right)^{1/2}} \quad (34)$$

Em que L_1 é o comprimento da viga e b é a largura. Já em 34, para se obter β_M , o coeficiente de correção da equação, β_E é igual a 4 e γ_f é igual a 1,4.

Para a verificação da flecha máxima, é utilizada a combinação de acordo com o item 5.8.1 da ABNT NBR 7190:1997 contida na equação 35. Essa combinação irá determinar a carga atuante para estimar o deslocamento para elementos bi apoiados sob carregamento uniformemente distribuído.

$$F_{d,uti} = \sum_{i=1}^m F_{G,ik} + \sum_{j=1}^n \psi_{2j} \times F_{Q,jk} \quad (35)$$

Os pilares são peças de esbeltez mediana, pois a equação 36 é satisfeita. O índice de esbeltez é descrito por λ na Eq. (37), em que L_0 é o comprimento da peça e i_{min} , raio de giração mínimo, é dado pela equação 38. A , na Eq. (38), representa a área da seção do pilar analisado e I o momento de inércia para seções retangulares no caso do pilar em questão.

$$40 < \lambda \leq 80 \quad (36)$$

$$\lambda = \frac{L_1}{i_{min}} \quad (37)$$

$$i_{min} = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (38)$$

A estabilidade da peça pode ser verificada de acordo com a equação 39. As equações de 40 a 45 descrevem cada item. A expressão para verificação de segurança do estado limite último considera os esforços normais, momentos fletores e momentos fletores de acordo com uma excentricidade (GESUALDO, 2003).

$$\frac{\sigma_{Nd}}{f_{c,0d}} + \frac{\sigma_{Mdx}}{f_{c,0d}} + \frac{\sigma_{Mdy}}{f_{c,0d}} \leq 1 \quad (39)$$

$$\sigma_{Nd} = \frac{N_d}{A} \quad (40)$$

$$\sigma_{Md} = \frac{M_d}{I} * y \quad (41)$$

$$e_d = e_1 * \left(\frac{F_E}{F_E - N_d} \right) * y \quad (42)$$

$$F_E = \frac{\pi^2 * E_{c0,ef} * I}{L_0^2} \quad (43)$$

$$e_1 = e_i + e_a \quad (44)$$

$$e_i = \frac{M_{1d}}{N_d} \geq \frac{h}{30} \quad (45)$$

Em que σ_{Nd} , σ_{Mdx} e σ_{Mdy} representam as tensões normais em decorrência das forças normais e dos momentos fletores nas direções x e y, respectivamente. N_d é o esforço normal e M_d é o momento fletor. e_d , e_1 , e_a e e_i são valores de excentricidade. F_E é a carga crítica.

4. RESULTADOS

A partir das etapas descritas anteriormente são apresentados os valores do dimensionamento dos dois painéis em CLT, laje e parede, das três vigas e dos quatro pilares.

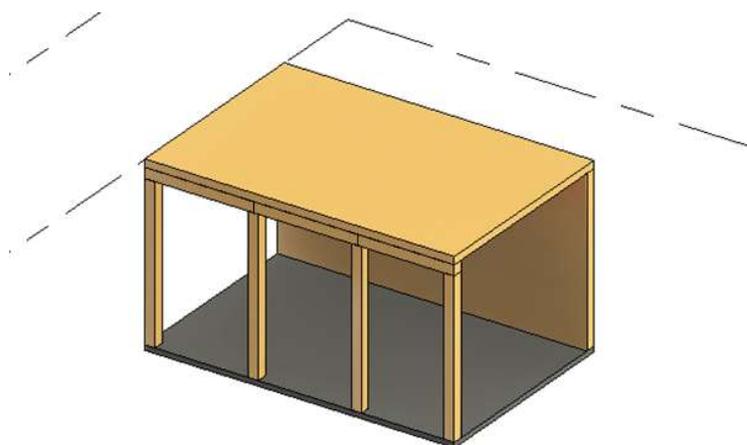
4.1. Descrição do Projeto

O projeto consiste em uma área de lazer de formato retangular feita em local externo a uma residência. A estrutura contém três vigas e quatro pilares de madeira maciça, do tipo dicotiledônea classe C60 e uma laje e uma parede de madeira laminada

colada cruzada. O tipo de madeira a ser utilizada para os painéis desse projeto é o *Pinus Elliot* e, conseqüentemente, suas propriedades físicas e mecânicas serão levadas em consideração. Foi considerada também uma cobertura em vidro para proteção da laje.

A Figura 08 ilustra o projeto a ser dimensionado. Para as ligações entre elementos de madeira é necessário ressaltar a necessidade de adicionar um material selante entre eles para que não haja problemas com intempéries (LOTUFO, 2018).

Figura 08 – Projeto desenhado no Autodesk Revit



Fonte: AUTOR (2022)

Os elementos a serem dimensionados em CLT consistem em dois painéis: uma laje, e uma parede, como mostrado nas Figuras 09 e 10, respectivamente. A Figura 11 mostra a planta baixa do projeto. As Figuras são provenientes do projeto feito no *software* Autodesk AutoCAD.

Ambos os painéis da laje e da parede possuem elementos com 9 lâminas de madeira *Pinus Elliot* pelo grande aparecimento em diversos estados do Brasil (IPT-SP,2022) de 45 mm cada uma e 1m de comprimento como pode ser visto na Figura 12. Os elementos são unidos por ligações dentadas até atingirem o comprimento total dos elementos do projeto. As Figuras 9 e 10 mostram a vista da laje e da parede em CLT com as dimensões.

Figura 09 – Modelo da laje em CLT com dimensões em metros

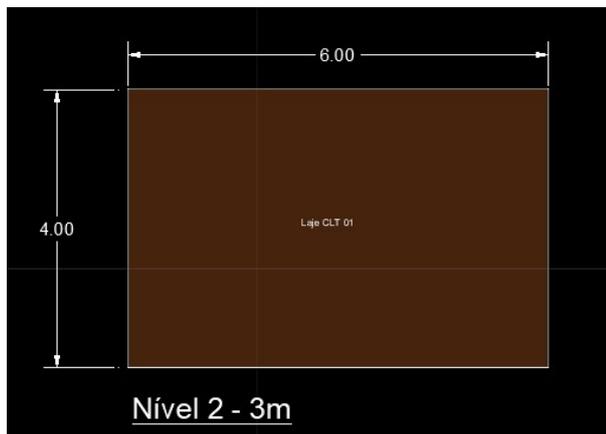
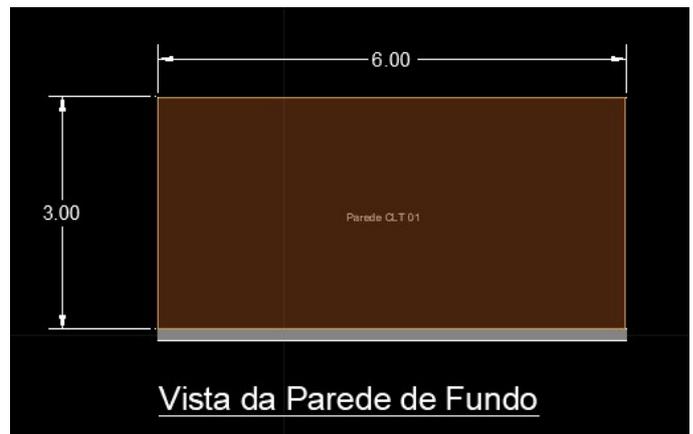
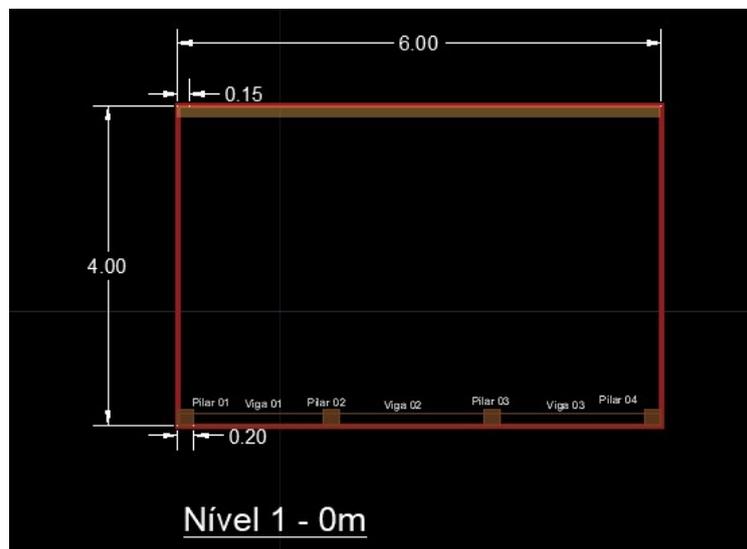


Figura 10 – Modelo da parede em CLT com dimensões em metros



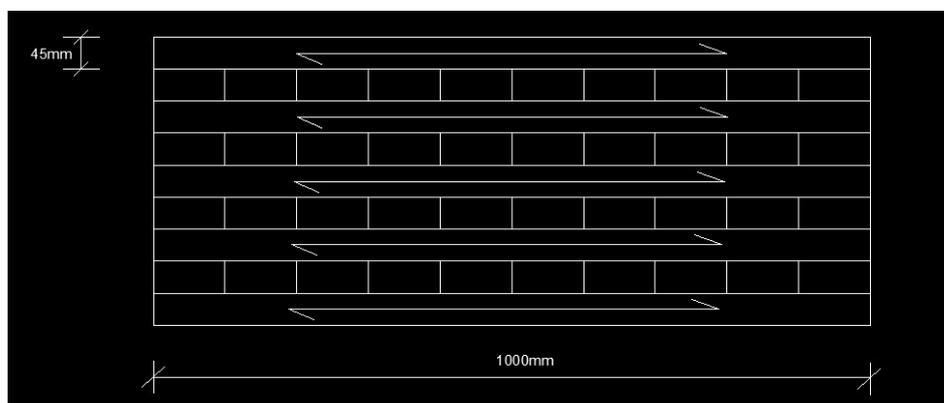
Fonte: AUTOR (2022)

Figura 11 – Vista da planta baixa no nível 0m do projeto com dimensões em metros



Fonte: AUTOR (2022)

Figura 12 – Modelo do elemento em CLT



Fonte: AUTOR (2022)

4.2. Dimensionamento dos Painéis em CLT

O método a ser utilizado para o dimensionamento dos painéis em *Cross Laminated Timber* é o método Gama ou *Mechanically jointed beams theory* em que é considerada a inércia efetiva proveniente da junção de elementos. O método também é um ajuste do anexo B da Eurocode 5 (AMORIM *et al.*, 2017).

As propriedades físicas da espécie de *Pinus* escolhida podem ser vistas na Tabela 1. A Tabela 2 mostra as características dos painéis usadas para dimensionamento. É recomendado que o elemento em CLT não tenha a espessura menor do que 30mm para sua segurança.

Tabela 1 – Propriedades físicas do Pinus-Eliote

Propriedades físicas e mecânicas do Pinus-Eliote	
Densidade aparente a 15% de umidade (kg/m ³)	480
Densidade básica (kg/m ³)	400
Contração Radial	3,4%
Contração Tangencial	6,3%
Contração Volumétrica	10,5%
Resistência à flexão – Madeira a 15% de umidade (MPa)	69,6
Resistência à compressão paralela às fibras – Madeira a 15% de umidade (MPa)	31,5
Módulo de Elasticidade (compressão paralela às fibras) – Madeira a 15% de umidade (MPa)	8846
Resistência ao cisalhamento – Madeira verde (MPa)	5,8
Tração normal às fibras – Madeira verde (MPa)	3,0
Fendilhamento – Madeira verde (MPa)	0,4

Fonte: IPT-BR, 2022.

Tabela 2 – Características dos Elementos

Seção	Comprimento
Espessura das lâminas (Hi)	45mm
Número de lâminas (n)	9
Largura do Elemento (L)	6m
Largura da base (b)	1m

Área da seção de cada lâmina (A_i)	45.000mm ²
Distância entre a camada do centro de gravidade e a camada final (a_i)	180mm
Distância entre o centro de gravidade e o limite da seção transversal (z)	202,5mm
Módulo de deformação ao cisalhamento das camadas intermediárias (G_r)	72N/mm ²

Fonte: AUTOR (2022)

Como o elemento possui 9 lâminas, é preciso associar um fator calculado ao momento de inércia efetivo de acordo com o Teorema de Steiner (SOUSA, 2020). A laje de cobertura recebe uma cobertura em vidro para proteção do material e fica apoiada na parede em CLT em um dos lados e em uma viga de madeira no lado oposto.

4.3. Dimensionamento da Laje e da Parede em CLT

A Tabela 3 mostra as dimensões da laje que serão necessários para determinar as propriedades da seção. A laje está nas vigas frontais e na parede ao fundo.

Tabela 3 – Dimensões da laje

Laje 1	
Comprimento (m)	4,0
Largura (m)	6,0
Espessura:	45mm*9 = 405mm = 0,405m

Fonte: AUTOR (2022)

A parede de fundo recebe o apoio da laje e está apoiada no contrapiso. As características da laje e da parede são similares, sendo os esforços o item de maior diferença entre elas. A Tabela 4 mostra as dimensões da parede.

Tabela 4 – Dimensões da Parede 1

Parede 01	
Altura (m)	3,0
Largura (m)	6,0
Espessura	45mm*9= 405mm = 0,405m

Fonte: AUTOR (2022)

A Tabela 5 mostra os pesos, as cargas permanentes e as variáveis atuantes na estrutura.

Tabela 5 – Pesos e cargas da estrutura

Peso específico aparente (umidade a 15%):	$\rho_{ap,15\%} = 4,707kN/m^3$
Peso próprio da laje:	$P_{pL} = 1,90634kN/m^2$
Peso da cobertura em vidro:	$P_v = 0,00025kN/m^2$
Carga permanente da laje:	$Carga G_L = 1,906kN/m^2$
Carga variável da laje:	$Carga Q_L = 0,405kN/m$
Peso próprio da parede:	$P_{pP} = 1,906kN/m^2$
Carga permanente da parede:	$Carga G_P = 6,67kN/m^2$
Carga variável da parede:	$Carga Q_P = 4,5kN/m$

Fonte: AUTOR (2022)

4.4. Dimensionamento da Laje

O momento de inércia (I), o módulo da seção (w_o), o momento estático (S), o coeficiente de Steiner (γ_i) e o momento de inércia efetivo ($I_{0,eff}$) dos painéis são calculados de acordo com as equações 2, 3, 4, 5 e 6, respectivamente. Os valores obtidos estão mostrados na Tabela 8 considerando os parâmetros de entrada apresentados na mesma tabela.

Tabela 8 – Resultados do cálculo dos parâmetros da seção

Geometria - Dados de entrada	
$b (m)$	1000
$h (mm)$	45
$z (mm)$	202,5
$a_i (mm)$	180
$A_i (mm^2)$	405 000
Propriedades físicas	
$I (mm^4)$	5 535 843 750
$w_{o,ef} (mm^3)$	27 148 637
$S (mm^3)$	20 250 000
γ_i	0,936150
$I_{0,eff} (mm^4)$	5 497 599 055

Fonte: AUTOR (2022)

A combinação de cargas permanentes atuantes na seção (F_d), de acordo com a equação 1 e, de acordo com a ABNT NBR 7190:1997, γ_G é igual a 1,0 para combinações normais de efeitos favoráveis de ações permanentes e γ_Q é igual a 1,4 para efeitos de combinações normais para ações variáveis.

$$F_d = 1,0 \times 7,67 + 1,4 \times 0,405$$

$$F_d = 8,23 \text{ N/mm}$$

O momento fletor máximo ($M_{m\acute{a}x}$), a força cortante máxima ($V_{m\acute{a}x}$), a tensão normal ($\sigma_{4,5}$), a tensão normal média ($\sigma_{m4,5}$), a tensão normal máxima (σ_{max}), a tensão de cisalhamento máxima (τ_{1max}) e a tensão de cisalhamento τ_r dos painéis são calculados de acordo com as equações 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 e 14, respectivamente. Os valores obtidos estão mostrados na Tabela 9 considerando os parâmetros de entrada apresentados na mesma tabela.

Tabela 9 – Resultados do cálculo dos parâmetros da seção

Geometria - Dados de entrada	
P (N/mm)	8,23
L (mm)	6 000
b (mm)	1 000
Tensões máximas	
$M_{m\acute{a}x}$ (kN.m)	37,05
$V_{m\acute{a}x}$ (kN)	24,70
$w_{m\acute{a}x}$ (mm)	2,855
$\sigma_{4,5}$ (MPa)	1,136
$\sigma_{m4,5}$ (MPa)	0,303
σ_{max} (MPa)	1,439
τ_{1max} (MPa)	0,307
τ_r (MPa)	0,270

Fonte: AUTOR (2022)

4.4.1. Verificações de segurança – Estado Limite Último

Neste tópic, serão verificadas as condições de estado limite último e estado limite de serviço para os elementos de CLT como mostrado na metodologia, fazendo uma comparação entre os valores de solicitação ao lado esquerdo do cálculo e valores de resistência com base nos valores da Tabela 1. O valor de 0,6 se refere ao K_{mod} , em que K_{mod1} é 1,0, K_{mod2} é 0,6 para carga permanente e K_{mod3} também é 1,0.

4.4.2. Verificações de tração, compressão, flexão e esforço cortante – ELU

A Tabela 10 mostra os valores de solicitações de tração, compressão, flexão e esforços cortantes junto aos valores de resistência. Para os resultados foram seguidas as equações 16 a 28 de acordo com cada solicitação e resistência respectiva.

Tabela 10 – Valores de solicitações e resistência dos esforços atuantes na laje

Verificações da laje			
Tração paralela às fibras ($\sigma_{t0,d}$)	Valor de resistência ($f_{t0,d}$)	Tração perpendicular às fibras ($\sigma_{t90,d}$)	Valor de resistência ($f_{t90,d}$)
6,10MPa	36,75MPa	7,62MPa	36,75MPa
Compressão paralela às fibras ($\sigma_{c0,d}$)	Valor de resistência ($f_{c0,d}$)	Compressão perpendicular às fibras ($\sigma_{c90,d}$)	Valor de resistência ($f_{c90,d}$)
6,10MPa	15,12MPa	7,62MPa	21,17MPa
Flexão ($\sigma_{m,d}$)	Valor de resistência ($f_{m,d}$)	Tensão de cisalhamento ($\tau_{v,r,d}$)	Valor de resistência ($f_{v,r,d}$)
1,15MPa	1,44MPa	0,91MPa	2,78MPa

Fonte: AUTOR (2022)

Dessa maneira conclui-se que as dimensões adotadas estão em estado de segurança, visto que as solicitações são menores do que a resistência.

4.5. Dimensionamento da Parede

Da mesma maneira que foi realizada a verificação dos critérios de segurança para a laje, os esforços que atuam na parede também serão verificados.

O momento de inércia (I), o módulo da seção (w_o), o momento estático (S), o coeficiente de Steiner (γ_i) e o momento de inércia efetivo ($I_{0,eff}$) dos painéis são calculados de acordo com as equações 2, 3, 4, 5 e 6, respectivamente. Os valores obtidos estão mostrados na Tabela 12 considerando os parâmetros de entrada apresentados na mesma tabela.

Tabela 12 – Resultados do cálculo dos parâmetros da seção

Geometria - Dados de entrada	
b (m)	1000
h (mm)	45
z (mm)	202,5
ai (mm)	180
Propriedades físicas	
I (mm ⁴)	5 535 843 750
$w_{o,ef}$ (mm ³)	27 148 637
S (mm ³)	20 250 000
γ_i	0,936150
$I_{0,eff}$ (mm ⁴)	5 497 599 055

Fonte: AUTOR (2022)

A combinação de cargas (F_d) atuantes na seção de acordo com a equação 1, tendo γ_G igual a 1,0 e γ_Q igual a 1,4. No caso da parede, não há cargas acidentais secundárias.

$$F_d = 1,0 \times 6,67 + 1,4 \times 4,5$$

$$F_d = 12,97N/mm$$

O momento fletor máximo ($M_{máx}$), a força cortante máxima ($V_{máx}$), a tensão normal ($\sigma_{4,5}$), a tensão normal média ($\sigma_{m4,5}$), a tensão normal máxima (σ_{max}), a tensão de cisalhamento máxima (τ_{1max}) e a tensão de cisalhamento τ_r dos painéis são calculados de acordo com as equações 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 e 14, respectivamente. Os valores obtidos estão mostrados na Tabela 13 considerando os parâmetros de entrada apresentados na mesma tabela.

Tabela 13 – Resultados do cálculo dos parâmetros da seção

Geometria - Dados de entrada	
F_d (N/mm)	12,97
L (mm)	6 000
b (mm)	1 000
Tensões máximas	
$M_{m\acute{a}x}$ (kN.m)	58,37
$V_{m\acute{a}x}$ (kN)	38,92
$w_{m\acute{a}x}$ (mm)	4,500
$\sigma_{4,5}$ (MPa)	1,432
$\sigma_{m4,5}$ (MPa)	0,382
σ_{max} (MPa)	1,814
τ_{1max} (MPa)	0,387
τ_r (MPa)	0,336

Fonte: AUTOR (2022)

4.5.1. Verificações de tração, compressão, momento e esforço cortante – ELU e ELS

A Tabela 14 mostra os valores de solicitações de tração, compressão, flexão e esforços cortantes junto aos valores de resistência. Para os resultados foram seguidas as equações 16 a 28 de acordo com cada solicitação e resistência respectiva.

Tabela 14 – Valores de solicitações e resistência dos esforços atuantes na parede

Verificações da parede			
Tração paralela às fibras ($\sigma_{t0,d}$)	Valor de resistência ($f_{t0,d}$)	Tração perpendicular às fibras ($\sigma_{t90,d}$)	Valor de resistência ($f_{t90,d}$)
9,61MPa	36,75MPa	12,01MPa	36,75MPa
Compressão paralela às fibras ($\sigma_{c0,d}$)	Valor de resistência ($f_{c0,d}$)	Compressão perpendicular às fibras ($\sigma_{c90,d}$)	Valor de resistência ($f_{c90,d}$)
9,6MPa	15,12MPa	12,01MPa	21,17MPa

Flexão ($\sigma_{m,d}$)	Valor de resistência ($f_{m,d}$)	Tensão de cisalhamento ($\tau_{v,r,d}$)	Valor de resistência ($f_{v,r,d}$)
1,36MPa	1,44MPa	1,15MPa	2,78MPa

Fonte: AUTOR (2022)

A partir dos resultados obtidos, pode-se considerar que o critério satisfaz a condição de segurança.

4.6. Dimensionamento do pórtico – Vigas e pilares

Para o pórtico frontal são utilizadas as condições de dimensionamento atendendo à norma ABNT NBR 7190:1997. A madeira utilizada para os cálculos será uma dicotiledônea de classe C60. A seção das vigas é de 20cm×40cm e os pilares possuem seção 20×20cm.

Para o pórtico frontal serão verificadas as três vigas, de dois metros cada, e os quatro pilares. As vigas possuem todas a mesma seção, assim como os pilares. Serão considerados os maiores esforços, visto que a viga do meio possui maiores esforços do que as da extremidade, e, conseqüentemente, os pilares também.

As propriedades efetivas da madeira escolhida constam na Tabela 10. Considerando a formulação da equação 29 foram calculadas resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c,0d}$) e a resistência ao cisalhamento ($f_{v,0d}$). E a partir da equação (30) calculou-se o módulo de elasticidade efetivo ($E_{c0,ef}$). Para realizar o cálculo considerou o valor do K_{mod} igual a 0,6. A Tabela 10 mostra os resultados obtidos para madeira serrada classificada como dicotiledônea C60.

Tabela 7 – Cargas atuantes nas vigas

Carga permanente	3,10 kN/m
Carga acidental	0,15 kN/m

Fonte: AUTOR (2022)

Tabela 10 – Resistência de cálculo e módulo de elasticidade efetivo para a madeira serrada

$f_{c,0d}(kN/cm^2)$	$f_{v,0d}(kN/cm^2)$	$E_{c0,ef}(kN/cm^2)$
2,57	0,27	1 470

Fonte: AUTOR (2022)

Tabela 11 – Dimensões das vigas e dos pilares

Vigas		Pilares	
Altura (cm)	40	Altura (cm)	20
Largura (cm)	25	Largura (cm)	20
A (cm ²)	1000	A (cm ²)	400
Ix (cm ⁴)	133 333,33	Ix (cm ⁴)	32 552,08
S (cm ³)	5000,00	S (cm ³)	-
Comprimento L1 (cm)	200	Comprimento L0 (cm)	300

Fonte: AUTOR (2022)

A combinação realizada para o ELU considerou γ_G igual a 1,0, para condição favorável de acordo com o item 5.6.4 da ANBT NBR 7190:1997 e γ_Q igual a 1,4 para combinação normal, também com referência à norma citada. O resultado obtido está apresentado a seguir:

$$F_d = 1,0 \times 3,10 + 1,4 \times 3$$

$$F_d = 7,03kN/m$$

O momento máximo e cortante máximo para a seção foram extraídos do *software* Ftool e podem ser observados nas Figuras 11.1 e 11.2.

$$M_{max} = 250kN.cm$$

$$V_{max} = 820kN$$

Figura 11.1 – Diagrama de momento fletor (kN.m)

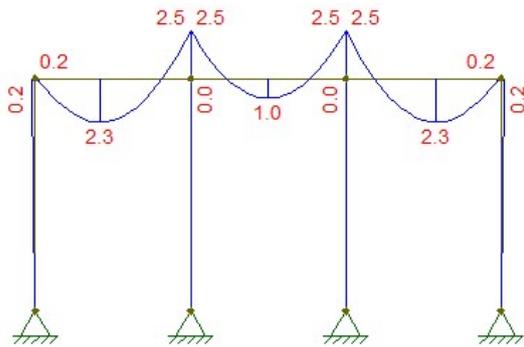
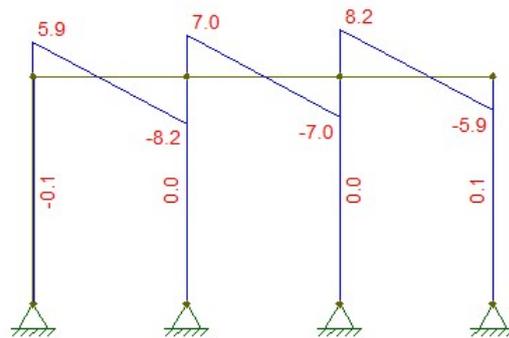


Figura 11.2 – Diagrama de esforços cortantes (kN)



Fonte: AUTOR (2022)

Para elementos biapoiados, como as vigas, é necessário verificar se a tensão solicitante normal de flexão (σ_{Md}), para flexão simples, é menor ou igual à resistência normal de cálculo ($f_{c0,d}$). O mesmo vale para o esforço de tensão de cisalhamento (τ_{vd}).

$$(\sigma_{Md}) = 0,038kN/cm^2 \leq (f_{c0,d}) = 2,57kN/cm^2$$

$$(\tau_{vd}) = 1,23kN/cm^2 \leq (f_{v,0d}) = 2,4MPa$$

Portanto, as vigas estão aptas para o uso mencionado.

A verificação da flecha é mostrada abaixo. O cálculo do deslocamento utilizou a carga atuante $F_{d,uti}$ e foi estimada de acordo com a equação 35.

$$F_{d,uti} = 3,16kN/m$$

$$u_{lim} \leq 1cm$$

$$u_{total} = 0,34cm$$

$$0,34cm \leq 1cm$$

Portanto, a flecha de cada viga atende ao limite.

A estabilidade lateral das vigas é verificada abaixo de acordo com a equação 33.

$$\left(\frac{L_1}{b}\right) = 8 \leq \left(\frac{E_{c0,ef}}{\beta_M * f_{c0,d}}\right) = 76,42$$

$$\beta_M = 7,48$$

A verificação de estabilidade das vigas foi atendida.

Os pilares são peças de esbeltez mediana, pois a equação 36 é satisfeita. O índice de esbeltez é descrito por λ em 37, em que L_0 é o comprimento da peça e i_{min} , raio de giração mínimo, é dado pela equação 38. A letra A representa a área da seção do pilar analisado e I o momento de inércia para seções retangulares no caso do pilar em questão. Dessa maneira, observa-se que o pilar é medianamente esbelto.

$$i_{min} = 5,7735$$

$$\lambda = 51,9615$$

$$40 < \lambda \leq 80$$

Seguindo a expressão de verificação de segurança do estado limite último, em que são considerados os esforços normais, e momentos fletores relacionados com suas respectivas resistências e excentricidades, os pilares são verificados a seguir.

$$e_i = 0,6667cm$$

$$e_1 = 0,6667 + 1,0 = 1,6667cm$$

$$F_E = 5247,51kN$$

$$e_d = 1,92cm$$

$$\sigma_{Nd} = 2,16kN/cm^2$$

$$\sigma_{Md} = 0,52kN/cm^2$$

$$0,44 + 0,20 + 0,20 \leq 1$$

$$0,84 \leq 1$$

Considerando as verificações do ELU para peças medianamente esbeltas, conclui-se que os pilares estão verificados.

5. CONCLUSÕES

O dimensionamento dos painéis em *Cross Laminated Timber* foi atendido de acordo com o exemplo seguido de Sousa (2020) junto ao Anexo B da Eurocode EN 5. Foram encontradas várias situações de similaridade de conceitos em comparação com as normas para dimensionamento estrutural brasileiras, como os conceitos de estado limite último, para que a estrutura não falhe. Encontrou-se dificuldades na compreensão do

método de dimensionamento por não haver referência brasileira e pelas características do material.

Notou-se ainda uma ausência de pesquisas na área de madeiras laminadas cruzadas no Brasil, ainda é necessário entender melhor e obter dados técnicos da CLT. Foi necessário consultar diversos materiais provenientes de estudos internacionais e compará-los para uma melhor compreensão do processo, visto que a ABNT NBR 7190:1997 não possui a descrição do processo de dimensionamento sobre CLT. É interessante que novas pesquisas sejam realizadas e possam avaliar conceitos como a estanqueidade, o comportamento estrutural, o tratamento adequado da madeira, o desempenho térmico e acústico e a ação do calor no material.

Ainda assim, a pesquisa se mostrou muito interessante pelas características físicas e de resistência apresentadas pelos painéis. Como visto no desenvolvimento da metodologia desse trabalho, o *Pinus Elliot* possui um baixo peso específico e permite o tratamento por autoclave, o que dá à edificação um baixo peso próprio, solicitando menos a fundação e os pavimentos inferiores, e melhora a durabilidade e resistência a ataque de insetos. No caso de edifícios altos, haver baixo peso específico é um ponto muito relevante. Para escolher a melhor espécie de madeira para um projeto em CLT é interessante levar em consideração o módulo de elasticidade e a resistência à flexão para melhor aproveitamento da geometria da peça a ser fabricada.

O resultado apresentado quanto à resistência aos esforços determinados na estrutura do projeto desse estigo se mostraram satisfatórios. O vão livre de 6 metros que se mostrou possível é consideravelmente grande para um projeto residencial, apesar da espessura ter ficado relativamente alta. Esse vão foi adotado pelo apelo visual que a amplitude do espaço proporciona.

Inicialmente, para um melhor aproveitamento do material, é necessário que haja mais incentivo e pesquisas em torno de uma norma brasileira que rege a madeira laminada colada cruzada. Dessa forma será possível melhorar a utilização da madeira brasileira, diminuindo o uso temporário da mesma, estimulando o consumo consciente e sustentável desse polímero natural e melhorando o aproveitamento das peças.

A utilização de softwares, mesmo que opções simples como o *Visual Basic for Applications*, pode melhorar a correção de possíveis erros ao longo do processo de dimensionamento de painéis em CLT, além de permitirem que o tempo necessário para projetar uma estrutura em madeira seja menor, sendo dessa forma uma solução para viabilidade do processo. A utilização da metodologia BIM, tendo como exemplo o

programa Revit, permite a melhor compreensão do projeto, além de possibilitar a geração dos quantitativos, o que otimiza o processo. Também é possível pensar em aplicações focadas em desenvolver painéis, o que se torna interessante principalmente para os profissionais de engenharia e, conseqüentemente, para a indústria de fabricação do material, permitindo melhor controle dos processos industriais. Alguns *softwares* para o dimensionamento em CLT já existem fora do Brasil, como o *TimberTech Buildings* (SOUSA, 2020) e representam um estímulo a adoção do uso destes ou adaptação para a norma brasileira.

O estímulo do desenvolvimento de fábricas de CLT e MLC é muito importante para estimular o uso do material, apesar de estarem em aumento no Brasil, ainda contam com uma pequena porcentagem, a qual se concentra principalmente na região sudeste do país. Dessa maneira, é interessante que o país estimule o desenvolvimento dessas fábricas para que as mesmas possam atuar em diversos estados e melhorar a questão logística das edificações, visto que os painéis são desenvolvidos em fábrica. Junto a este ponto é necessário também pensar que o Brasil, tendo dimensões continentais e contando com um clima excelente para o crescimento de árvores devido à grande quantidade de exposição solar, possui grande possibilidade de aumentar a quantidade de florestas com esse objetivo ao longo dos estados, sendo necessário avaliar quais espécies são adequadas para quais regiões.

Por final, é necessário que os profissionais de engenharia e arquitetura, associados às unidades de pesquisa, avaliem a importância de se obter materiais de construção civil que sejam sustentáveis. Essa é uma questão de extrema relevância para as próximas gerações.

REFERÊNCIAS

AMORIM, S. T. A; MANTILLA, J. N. R; CARRASCO, E. V. M. **A madeira laminada cruzada: aspectos tecnológicos, construtivos e de dimensionamento**. Rio de Janeiro, v. 22, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170005.0273>. Acesso em: 03 ago. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 15575**, Edificações habitacionais – Desempenho, Rio de Janeiro, 2013.

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

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

BRUNA, P. J. V. **Arquitetura, Industrialização e Desenvolvimento**. São Paulo: Editora Perspectiva e Editora da Universidade de São Paulo, 2002.

COSTA, A. A. P. **Construção de Edifícios com Cross Laminated Timber (CLT)**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade do Porto, Universidade do Porto - Portugal, 2013. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/68870/2/26141.pdf>. Acesso em: 03 ago. 2022.

CROSSLAM, 2020. Disponível em: <https://www.crosslam.com.br/>. Acesso em: 03 ago. 2022.

CTE. Madeira Engenheirada: você conhece essa nova tecnologia construtiva? Disponível em: <https://cte.com.br/blog/inovacao-tecnologia/madeira-engenheirada-voce-conhece-essa-nova-tecnologia-construtiva/>. Acesso em: 02 ago. 2022.

EN 1995-1-1: **Eurocode 5**, “Design of timber structures. Part 1-1: General Common rules and rules for buildings”, Design, 2004. Disponível em: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1995.1.1.2004.pdf>. Acesso em: 03 ago. 2022.

GESUALDO, F. A. R. **Estruturas de Madeira: Notas de Aula**. Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2003. Disponível em: http://usuarios.upf.br/~zacarias/Notas_de_Aula_Madeiras.pdf. Acesso em: 03 ago. 2002.

GRADIN, A. M. N. COSTA, P. S. N. **Reciclagem dos resíduos sólidos da construção civil**, 2009. Disponível em: http://www.falcoit.com.br/blog/images/easyblog_images/500/RECICLAGEM-DOS-RESDUOS-SLIDOS-DA-CONSTRUO-CIVIL---Gradin--Costa-2009.pdf. Acesso em: 03 ago. 2022.

GUSS, L. M. **Engineered wood products: The future is bright**. Forest Products Journal, v.45, 1995.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. Relatório Anual 2016. 2016. Disponível em: http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2016_.pdf. Acesso em: 03 ago. 2022.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT-SP, 2022. Disponível em: https://www.ipt.br/informacoes_madeiras3.php?madeira=7. Acesso em: 03 ago. 2022.

KARACEBEYLI, E.; DOUGLAS, B. **CLT Handbook - US Edition**. FPIInnovations and Binational Softwood Lumber Council, Port-Claire, Quebec, 2013. Disponível em: https://cdn2.hubspot.net/hubfs/5577290/PDFs/CLT%20Handbook/CLT_USA-Complete-document-Think_Wood.pdf. Acesso em: 03 ago. 2022.

KOLAREVIC, B. **Architecture in digital age: Design and manufacturing**. New York: Spon Pres, 2003.

LOPES, S. C.; CARMO, M. E. R. do; SERRA, S. M. B. **Levantamento de soluções construtivas em madeira industrializada**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GESTÃO E ECONOMIA DA CONSTRUÇÃO, 12., 2021. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2021. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/sibragec/article/view/511>. Acesso em: 4 ago. 2022.

LOTUFO, G. L. **Cross Laminated Timber (CLT) no Brasil: processo construtivo e desempenho**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo 2018. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16132/tde-09012019-144057/en.php>>. Acesso em: 03 ago. 2022.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. Florestas do Brasil em Resumo 2012. Brasília, 2012.

SABATTINI, F. H. **Desenvolvimento de métodos, processos e sistemas construtivos: formulação e aplicação de uma metodologia.** Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1989. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-30082017-091328/pt-br.php>. Acesso em: 03 ago. 2022.

SHIGUE, E. K. **Difusão da Construção em Madeira no Brasil: Agentes, Ações e Produtos.** Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/102/102131/tde-03092018-094051/>. Acesso em: 03 ago. 2022.

SOUSA, I. F. B. G. **Construção de um edifício em madeira (CLT).** Instituto Superior de Engenharia do Porto – ISEP, 2020. Dissertação (Mestrado) Instituto Superior de Engenharia do Porto, Politécnico do Porto, Portugal, 2020. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.22/16820>. Acesso em: 03 ago. 2022.