

PROJETO DE UM MEZANINO EM ESTRUTURA DE MADEIRA SEGUNDO A NBR 7190

DESIGN OF A MEZZANINE IN WOODEN STRUCTURE IN ACCORDANCE WITH NBR 7190

WEIBULL, Jon Karl¹

BASTOS, Cristiane Cruxen Daemon d'Oliveira e²

MARTINS, Fabiano Battemarco da Silva³

Resumo: De fácil extração, fácil manuseio e alto potencial sustentável, a madeira é um dos materiais de construção mais antigos do mundo. No Brasil, por motivos político-econômicos, muita atenção se dispensou a estruturas metálicas e de concreto armado, deixando a madeira, como elemento estrutural, em terceiro plano. Não é simples encontrar artigos técnicos que descrevam projetos de soluções cotidianas completas, dos pilares aos cobrimentos, em estruturas de madeira, enquanto não faltam exemplos do mesmo utilizando estruturas metálicas. O presente artigo técnico apresenta o projeto e o cálculo de um mezanino, com um longo vão livre, utilizando estrutura de madeira. O projeto leva em conta madeiras brasileiras e segue o prescrito pela norma brasileira NBR 7190 da ABNT, tendo como resultado um passo a passo do dimensionamento incluindo método, cálculos e detalhamento de um mezanino.

Palavras-chave: estruturas de madeira; mezanino; dimensionamento.

Abstract: Being easily extractable, easy to handle and with high potential for sustainability, wood is one of the oldest building materials in the world. In Brazil, for various political and economic reasons, much attention was paid to metallic and reinforced concrete structures, leaving wood, as a structural element, in the background. It is not simple to find technical articles that describe projects for complete everyday solutions, from pillars to coverings, in wooden structures, while there are plenty of examples of it using metallic structures. This technical article presents the design and calculation of a mezzanine, with a long span, using a wooden structure. The project takes into account Brazilian wood and follows the prescribed by the Brazilian Standard NBR 7190 from ABNT, resulting in a step-by-step design including the method, calculations and complete details of a mezzanine.

Keywords: wood structure; mezzanine; design.

¹ Graduando em Engenharia Civil; Estruturas; Universidade Santa Úrsula; jweibull@gmail.com.

² Doutora em Engenharia Civil na área de Estruturas pela COPPE UFRJ; Professora da Universidade Santa Úrsula; cristiane.daemon@usu.edu.br.

³ Mestre em Engenharia Agrícola e Ambiental pela UFRRJ; Professor da Universidade Santa Úrsula; fabiano.battemarco@usu.edu.br.

1. INTRODUÇÃO

Segundo Pfeil e Pfeil (2003), “A madeira é, provavelmente, o material de construção mais antigo, dada a sua disponibilidade na natureza e sua relativa facilidade de manuseio”. Ainda assim, existem alguns preconceitos muito comuns que rondam as estruturas de madeira e que muitas vezes fazem com que não seja a primeira escolha para estruturas, mas meramente um elemento ornamental. A madeira sofre hoje com ideias mal concebidas, tais como: “a madeira é frágil e insegura”; “pega fogo facilmente”; “é muito mais cara”; e controversamente, que “é para casas pobres”. O concreto desponta no Brasil como material de larga utilização para estruturas por ser extremamente robusto e por, aparentemente, não exigir muita qualificação da mão de obra. As estruturas metálicas, apesar de exigirem mão de obra mais especializada, conseguem atingir elevada resistência com grande velocidade de execução. Enquanto essas técnicas construtivas passam a falsa ideia de serem eternas, a madeira, por ser suscetível a ataques biológicos, ao fogo e possuírem defeitos naturais da madeira, tais como fendas e nós, passam a falsa ideia de serem frágeis e não duráveis. Nada poderia passar mais longe da verdade, visto que existem exemplos de estruturas de madeira medievais (figura 1) que estão em uso até os dias atuais e que persistirão por muito tempo, enquanto existem também exemplos de estruturas metálicas e de concreto armado que ruíram em menos de 30 anos. Cada técnica construtiva depende de um projeto bem feito, idealmente de acordo com a norma vigente, de uma execução e uma manutenção adequadas e, finalmente, um uso alinhado com a concepção do projeto. Para estruturas de madeira não é diferente, cada qual com suas características específicas.

Por ser um material de fácil manuseio e estética naturalmente agradável, ao contrário do aço e concreto que são brutos e, na maior parte das vezes, dependem de acabamentos, a madeira permite ornamentações e exposição da própria estrutura, fato que foi explorado para criar edificações de alta pompa destinadas à realeza, clero e aristocracia (figura 2). Mesmo nos dias atuais, ainda é utilizada para construir edificações de alto padrão e luxo.

Há muito tempo, na Europa, criou-se produtos industrializados de madeira, que atenuaram os defeitos naturais da madeira. Este fato, em conjunto com a utilização de madeira de reflorestamento como insumo principal, inseriu de vez as estruturas de madeira no rol da construção sustentável, limpa e seca. Essa madeira industrializada, como o Cross Laminated Timber (CLT), ou a Madeira Laminada Colada (MLC), permitiu a construção de elementos estruturais acima da dimensão possível com uso das madeiras serradas. Com isso foi possível vencer vãos maiores, produzir peças em arcos, ter as ligações previamente inseridas durante a fase de fabricação, evitando assim, talhar a madeira e diminuindo o total de trabalho in loco.

Essas novas tecnologias contribuíram para uma diversificação das aplicações para estruturas de madeira (figura 3), permitindo inclusive a construção de pontes modernas com longos vãos, como ilustrado na figura 4.

Figura 1 – À esquerda, o templo de Nanchan, idade real desconhecida, datado de ao menos 782 d.C. À direita, esquemático da estrutura do templo



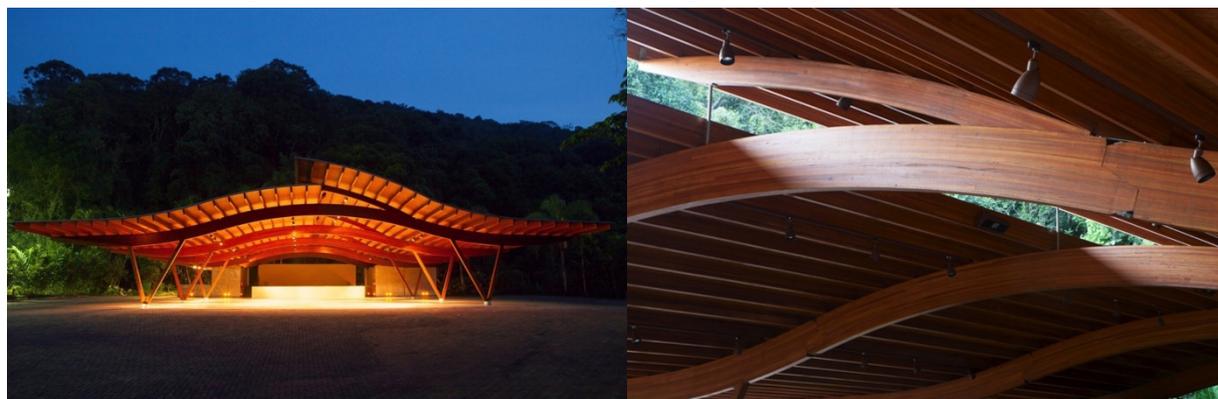
Fonte: China Daily (2020) e Temple Assembly (2020), respectivamente.

Figura 2 –Palácio de Padmanabhapuram e salão interno com pilares de madeira expostos e ornamentados. Datado 1601 d.C.



Fonte: Navrang India (2020).

Figura 3 – Centro de eventos Iporanga com vigas em arco de MLC



Fonte: ITA Construtora (2020).

Figura 4 – Ponte Vihantasalmi, Finlândia



Fonte: Wood Architecture (2020).

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Breve histórico

No Brasil, o preconceito ainda é grande quanto a utilização da madeira como elemento estrutural, o que pode ser evidenciado até mesmo pela dificuldade de se encontrar, em quantidade, material técnico sobre o assunto, sendo a maior parte destinada ao concreto e ao aço. Com um olhar para sustentabilidade, recomenda-se a leitura completa de SHIGUE (2018), com um apanhado histórico bem completo e bem atualizado sobre o setor privado de construção em madeiras.

Este artigo almeja um enfoque técnico e de cálculo e, portanto, para fins de relato histórico e ambientação, segue apenas um breve entendimento de SHIGUE (2018). A madeira já era utilizada como elemento estrutural no Brasil pelos índios, mesmo que de forma rudimentar, muito antes da chegada dos europeus às terras brasileiras. Os portugueses e espanhóis, no entanto, trouxeram para o Brasil seus legados de construção com pedra, barro e adobe, criando uma primeira resistência à utilização da madeira. A madeira foi, e ainda é, um elemento muito mais comum no norte da Europa. O aço e o concreto datam de meados do século XIX e somente foram inseridos no cenário brasileiro no início do século XX, trazendo consigo novas discussões acerca da validade do uso da madeira como material construtivo. Este discurso inflamatório perdurou por várias décadas, não só no Brasil, como no mundo, até que os ecossistemas ao redor do mundo começaram a pedir socorro e a sustentabilidade entrou em pauta. Finalmente em 2005, na conferência mundial sobre construções sustentáveis em Tóquio, Japão, a madeira foi eleita o material do futuro sustentável, retornando ao rol de materiais construtivos viáveis.

Ainda de acordo com SHIGUE (2018), ao longo dos últimos 100 anos, alguns períodos foram marcantes para o setor da construção em madeiras, que notavelmente se desenvolveu com mais força no sul do país.

O Sistema Hauff – O engenheiro Erwin Hauff, natural da Áustria e com formação alemã, empregou cavilhas em suas treliças que, por consequência, conseguiam ultrapassar vãos maiores do que os habituais para a época, sistema que ficou conhecido como “Sistema Hauff”. Viveu o período de ascensão do concreto e do aço no Brasil e, em primeira mão o declínio das estruturas de madeira no país. Deixou como legado suas obras, técnicas e a participação na elaboração da primeira norma brasileira para estruturas em madeira, a NB 11 de 1951, substituída posteriormente pela NBR 7190 (ABNT, 1997).

A Madeira Laminada Colada (MLC) – Com mais de um século de existência, essa tecnologia chegou ao Brasil através do engenheiro, de origem alemã, Fritz Georg Karl Hösch, fundador da empresa Esmara Estruturas de Madeira Ltda. A tecnologia floresceu economicamente nas décadas de 1970 e 1980. Tentou-se a criação de normas específicas para a tecnologia, mas nada disso foi suficiente para impedir que a tecnologia caísse no ostracismo, com redução considerável da demanda.

A tecnologia Wood Frame – Apresentada ao mercado brasileiro no fim da década de 1970, teve seu auge entre as décadas de 1970 e 1980, sendo utilizada primariamente para construção de habitações temporárias para operários de construções remotas, como hidrelétricas por exemplo. Apesar das tentativas de migrar a tecnologia para criação de casas de alto padrão, as grandes empresas atuantes, assim como o que aconteceu com MLC, abandonaram o segmento, fechando as portas ou migrando para outras atividades.

Numa tentativa de revitalizar o sistema Wood Frame, em 2009 foi montada a Comissão Casa Inteligente, uma parceria das empresas do setor, instituições do setor florestal e a Federação das Indústrias do Paraná, resultando na criação de diretrizes para o uso do sistema construtivo. Este ato permitiu a opção de financiamento para essas edificações, criando momento para o setor e aumentando o número de empresas atuantes com este sistema. Em paralelo, se aproveitando deste momento, outras empresas já começam a explorar e ofertar sistemas construtivos diversos em madeira industrializada, tais como os já mencionados CLT e MLC, mas também a tecnologia mais moderna Laminated Veneer Lumber (LVL).

2.2. Embasamento teórico

A norma brasileira atual, NBR 7190 (ABNT, 1997), tornou transparente realizar o cálculo estrutural para madeiras e tecnologias das mais variadas através de coeficientes de

modificação. No entanto, por mais transparente que seja realizar o cálculo estrutural para madeiras, é importante lembrar que cada uma delas tem, na prática, características próprias importantes. As dimensões máximas possíveis diferem para cada tecnologia, por exemplo, não se pode dimensionar uma viga de madeira serrada, inteiriça, com dimensões maiores do que as da árvore de origem. Seja qual for o tipo de madeira a ser utilizada, como exemplos: CLT, MLC, LVL, Wood Frame, serrada, a metodologia de projeto, uma vez definidos os valores representativos de acordo com a seção 6.4 da NBR 7190 (1997), não muda. Estes valores representativos configuram minorações da resistência característica de cada madeira em função de possíveis defeitos, tipologia, tecnologia, curvatura, umidade, duração de carregamento e segurança. O coeficiente de modificação (k_{mod}) é determinado através três variáveis tabeladas por norma na supracitada seção combinadas de acordo com a equação (1) abaixo:

$$k_{mod} = k_{mod,1} \cdot k_{mod,2} \cdot k_{mod,3} \quad (1)$$

Sendo,

$k_{mod,1}$ – Fator dependente da duração do carregamento;

$k_{mod,2}$ – Fator dependente da classe de umidade do ambiente;

$k_{mod,3}$ – Fator dependente do tipo, tecnologia e qualidade da madeira.

Uma vez definidos os coeficientes de modificação, todos os valores de cálculo característicos obtidos através de ensaios normatizados, devem ser minorados de acordo com a equação (2), atenuando assim as imperfeições, fluência e variação do grau de umidade. É importante ressaltar que para peças estruturais retas em CLT, MLC ou LVL, $k_{mod,3}$ assume valor unitário, ou seja, a norma assume não haver minoração por defeitos na madeira, fato que só pode ser assumido para peças maciças de dicotiledôneas com inspeções visual e mecânica normalizadas e rigorosas, e jamais para coníferas maciças.

$$X_d = k_{mod} \frac{X_k}{\gamma_w} \quad (2)$$

Sendo,

k_{mod} – Coeficiente de modificação;

X_k – Propriedade característica obtida a partir de ensaios;

γ_w – Coeficiente de minoração das propriedades da madeira, tabela 2.1.

Tabela 1: Valores para o coeficiente de minoração γ_w

Coeficientes de minoração	Estado Limite Último	Estados Limites de Utilização
Compressão paralela as fibras, γ_{wc}	1,4	1,0
Tração paralela as fibras, γ_{wt}	1,8	1,0
Cisalhamento paralelo as fibras, γ_{wv}	1,8	1,0

Fonte: Adaptado das seções 6.4.5 e 6.4.6 da NBR 7190 (ABNT, 7190).

Para espécies de árvores já utilizadas em larga escala, com valores médios de suas propriedades conhecidos, fornecidos por laboratórios idôneos, a norma permite estimar o valor característico correspondente a partir dos valores médios tabelados utilizando as equações (3) a (5):

$$f_{w,k} = f_{w,m}(1 - 1,645 \delta) \quad (3)$$

$$f_{n,k} = 0,70f_{n,m} \quad (4)$$

$$f_{v,k} = 0,54f_{v,m} \quad (5)$$

Sendo,

$f_{w,k}$ – Resistência característica;

$f_{w,m}$ – Resistência média tabelada por laboratório idôneo;

δ – Coeficiente de variação estatística baseado em ASTM D2555 (ASTM, 1992);

$f_{n,k}$ – Resistência característica paralela às fibras;

$f_{v,k}$ – Resistência característica transversal às fibras.

O dimensionamento de peças estruturais em madeira é normalmente estruturado em três categorias distintas, quais sejam, peças tracionadas, peças fletidas e peças comprimidas. Para o caso de um mezanino de vigas retas e monolíticas, haverá apenas vigas (peças fletidas) e pilares (peças comprimidas). Seguindo a mesma estrutura de cálculo, o dimensionamento será estudado para vigas e pilares separadamente. Começando pelas vigas que devem ser avaliadas para o Estado Limite Último e para o Estado Limite de Serviço, tanto para deformações excessivas quanto para vibrações excessivas. Seguindo para as colunas que devem ser avaliadas para o Estado Limite Último, contra perda de equilíbrio e contra flambagem.

2.2.1. Dimensionamento de vigas no Estado Limite Último - ELU.

As vigas monolíticas e retas, para o caso de um mezanino, podem ser modeladas como elementos expostos a flexão simples. Apesar de madeiras não seguirem a lei linear de tensões (lei de Hooke) até sua ruptura, ainda assim limitam-se as tensões de acordo com a teoria clássica de resistência dos materiais (Pfeil e Pfeil, 2003). Partindo dessa premissa, cabe a tradicional equação de equilíbrio entre os esforços resistentes minorados (R_d) e solicitações majoradas (S_d), equação (6) abaixo. As solicitações são majoradas de acordo com a combinação de ações apropriada ao destino que se dará para a estrutura, seção 5 da NBR 7190 (ABNT, 1997). Já os esforços resistentes são minorados de acordo com a equação (2) já mencionada.

$$S_d \leq R_d \quad (6)$$

Se forem utilizadas vigas retas monolíticas e, assumindo que não haja flambagem lateral, reduz-se em grande parte a dificuldade de cálculo com madeiras. Calculados os esforços solicitantes para cada ação a que se expõe a estrutura, basta que se compare aos valores minorados de compressão, tração e cisalhamento, de forma a respeitar a equação (6) para todas as solicitações.

2.2.2. Dimensionamento de vigas no Estado Limite de Utilização.

Duas avaliações em serviço são de especial importância para o dimensionamento de um mezanino, o Estado Limite de Deformações Excessivas (ELS-Def) e o Estado Limite de Vibrações Excessivas (ELS-V). A NBR 7190 (ABNT, 1997) limita a flecha máxima a uma fração do vão livre efetivo, dependente do tipo de carregamento e qualidade dos materiais, estruturais ou temporários. Para um elemento estrutural com vão de comprimento l , carregamento de longa duração, e em combinação normal de ações, este limite é de $\frac{l}{200}$.

A flecha instantânea (δ) para uma viga prismática retangular e reta pode ser determinada através da equação já conhecida da resistência dos materiais (equação 7). Para a deformação lenta por fluência da madeira, a norma estipula um coeficiente de fluência φ em função da classe de umidade e da classe de carregamento. Desta forma, a flecha total (δ_t) pode ser calculada como na equação (8) e, para o caso específico do mezanino deve respeitar o limite da equação (9):

$$\delta = \frac{5}{384} \frac{ql^4}{E_c I} \quad (7)$$

$$\delta_t = (1 + \varphi)\delta \quad (8)$$

$$\delta_t \leq \frac{l}{200} \quad (9)$$

Sendo,

q – Carregamento sobre a viga;

l – Comprimento da viga;

E_c – Módulo de Elasticidade para compressão paralela às fibras;

I – Momento de Inércia da seção transversal da viga;

φ – Coeficiente de fluência, Tabela 15 da NBR 7190 (ABNT, 1997).

Quando utilizadas peças de madeira industrializadas, é possível aplicar uma contraflecha (δ_{cf}), visto que a peça pode ser produzida em arco previamente especificado. Neste caso, basta descontar diretamente a contraflecha da flecha total. Por norma, o valor máximo para a contraflecha será limitada pela equação (10) abaixo:

$$(\delta_t - \delta_{cf}) \geq \frac{\delta_t}{3} \quad (11)$$

A verificação do Estado Limite de Vibrações Excessivas (ELS-V) deveria ser realizada, a rigor, através de estudo da frequência natural e dos modos de vibração da estrutura. Para o caso de um mezanino onde pessoas irão andar regularmente, a NBR 7190 (ABNT, 1997) determina que tal frequência natural não pode ser inferior a 8,0 Hz (oito Hertz). No entanto, a norma também permite para construções correntes que esta condição esteja satisfeita se, a aplicação de carregamento correspondente a combinação de curta duração, não provoque flecha instantânea superior a 15 (quinze) milímetros, facilitando assim a análise.

2.2.3. Dimensionamento de pilares no Estado Limite Último - ELU.

Uma coluna ou qualquer outra peça de seção simples, monolítica, de madeira sujeita a compressão e flexocompressão, perde o equilíbrio na configuração retilínea uma vez que a tensão de compressão supera uma carga crítica (N_{cr}), também conhecida como carga de Euler, calculada segundo a equação (11). A carga crítica é, por sua vez, inversamente proporcional comprimento de flambagem (l_f), propriedade que depende tanto da altura da coluna, quanto dos tipos de apoio de suas extremidades. Entretanto, segundo Pfeil e Pfeil (2003), devido a natureza deformável das ligações em madeira, geralmente se despreza o efeito favorável de engastamento das extremidades. Desta forma, o comprimento de flambagem será considerado como o próprio comprimento da coluna (Tabela 2).

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l_f^2} \quad (11)$$

Sendo,

E – Módulo de elasticidade para compressão paralela às fibras;

I – Momento de Inércia da seção do pilar;

l_f – Comprimento de flambagem do pilar, dependente do tipo de apoio.

Tabela 2: Comprimento de flambagem (l_f) em função dos apoios

Tipo de apoios	Comprimento de flambagem (l_f)
Engastada e Livre	$l_f = 2l$
Apoios indeslocáveis por flexão	$l_f = l$

Fonte: Adaptado da NBR 7190 (ABNT, 7190).

Para atenuar as consequências dos momentos fletores indesejados, resultantes de excentricidades por defeitos da madeira ou, da flambagem sob efeito da própria compressão, as

peças comprimidas são classificadas segundo sua Esbeltez (λ), calculada segundo as equações (12) e (13). A esbeltez máxima de 140 é definida pela NBR 7190 (ABNT, 1997) como valor, acima do qual, deve-se rever o dimensionamento da peça.

$$\lambda = \frac{l_f}{i} \leq 140 \quad (12)$$

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (13)$$

Sendo,

I – Momento de Inércia na direção de flambagem;

A – Área da seção transversal da peça comprimida.

Para realizar as verificações de limite de compressão e flambagem no ELU, a NBR 7190 (ABNT, 1997) classifica as colunas em três grupos (Tabela 3), em função de sua esbeltez. Conforme o valor da esbeltez aumenta, aumenta também o seu potencial para flambagem e consequentemente a parcela participativa da flexocompressão sobre a coluna.

Tabela 3: Classificação de colunas segundo sua Esbeltez

Tipo de coluna	Limites de Esbeltez (λ)
Coluna curta	$0 < \lambda \leq 40$
Coluna medianamente esbelta	$40 < \lambda \leq 80$
Coluna esbelta	$80 < \lambda \leq 140$

Fonte: Adaptado da NBR 7190 (ABNT, 1997).

Para peças curtas submetidas a compressão simples, pode-se desprezar os efeitos de redução da resistência à compressão em razão do processo de flambagem. Dessa forma, a resistência a compressão (σ_{nd}) no ELU pode ser verificada pela equação (14).

$$\sigma_{nd} = \frac{N_d}{Af_{cd}} \leq 1 \quad (14)$$

Sendo,

N_d – A carga sobre a coluna;

A – A área da seção transversal da coluna;

f_{cd} – A resistência a compressão de projeto da peça estrutural.

Já para peças medianamente esbeltas, a NBR 7190 (ABNT, 1997) determina que, mesmo sujeitas a compressão simples, devem ser verificadas para flexocompressão. Estimam-se imperfeições representadas por uma excentricidade acidental (e_a) com valor mínimo calculado segundo a equação (15). Esta excentricidade será amplificada pela ação do esforço normal de

projeto (N_d) resultando num momento máximo de projeto (equação 16). A equação para verificação de uma coluna medianamente esbelta sujeita a flexão simples no ELU assume a forma da equação (17), conhecida como equação de interação linear.

$$e_a = \frac{l_f}{300} \leq \frac{h}{30} \quad (15)$$

$$M_d = N_d e_a \frac{N_{cr}}{N_{cr} - N_d} \quad (16)$$

$$\frac{N_d}{A f_{cd}} + \frac{M_d}{W f_{cd}} \leq 1 \quad (17)$$

Sendo,

N_d – A carga sobre a coluna;

N_{cr} – Carga crítica ou carga de Euler;

W – O módulo de resistência da seção transversal.

Para colunas esbeltas, a parcela de momento devido a flambagem é ainda mais potencializada através da soma de excentricidades iniciais, deslocamento lateral e fluência da madeira. Não cabe aqui detalhar as verificações para colunas esbeltas que fogem ao escopo deste artigo, recomenda-se as leituras da seção 7.5.5 em NBR 7190 (ABNT, 1997) e, também, coincidentemente a mesma seção 7.5.5 em Pfeil e Pfeil (2003).

2.3. Dimensionamento e resultados.

Como requisitos para o projeto do mezanino, estipulou-se uma altura de 2,20 metros para as colunas, um comprimento frontal de 4,00 metros e uma largura de 2,20 metros. O mezanino será composto por vigas secundárias que sustentarão um piso de tábuas corridas. Duas vigas principais servirão de apoio para as vigas secundárias. Cinco colunas, duas na frente do mezanino, e três na parte posterior do mezanino apoiarão as vigas principais. A viga frontal deverá vencer um vão de 4,00 metros, a viga posterior poderá ser modelada como duas vigas menores com metade do vão frontal. A carga acidental prevista para estrutura residencial do tipo quarto ou área de convivência, de acordo com a NBR 6120 (ABNT, 2019), é de 1,5 kN/m². Os carregamentos restantes serão em função do peso próprio da estrutura.

Para realizar o dimensionamento de forma mais ágil, foi elaborada uma ferramenta de cálculo em planilha eletrônica, possibilitando alterar dimensões e rapidamente verificar as resistências para o ELU e os deslocamentos para o ELS, figuras 5 a 7.

Como material a ser adotado foi escolhida uma madeira industrializada com tecnologia MLC fabricada com Eucalipto da espécie *Eucalyptus Citriodora*, cujos valores médios se

encontram na tabela 4. Todas as vigas puderam ser modeladas como biapoiadas com transferência direta, não oblíqua, entre as peças estruturais. Dessa forma, todas as vigas estarão, por modelagem, sujeitas a flexão simples, assim como todas as colunas estarão sujeitas a compressão simples. Além disso, os esforços solicitantes foram modelados de forma que cada viga dividirá os esforços das cargas segundo sua “região de influência”, que inclui sua própria largura e metade da distância entre cada viga adjacente. As colunas também dividem a carga de cada viga biapoiada, na proporção de um meio para cada coluna, modelada como uma carga pontual aplicada em compressão simples. Um resumo simples das verificações para o ELU pode ser visto abaixo (equações 18, 19 e 20), tendo sido detalhadas nas seções anteriores.

- Flexão no centro da viga:
$$\sigma_d = \frac{M_d y_c}{I} = \frac{q_d l^2 y_c}{8 I} \leq f_{cd} \quad (18)$$

- Cisalhamento na viga:
$$\tau_d = \frac{3 V_d}{2 b h} = \frac{3 q_d l}{4 b h} \leq f_{vd} \quad (19)$$

- Flexocompressão na coluna:
$$\frac{N_d}{A f_{cd}} + \frac{M_d}{W f_{cd}} \leq 1 \quad (20)$$

Sendo,

M_d – Momento de projeto;

V_d – Cortante de projeto;

y_c – Distância até a fibra mais comprimida;

l – Comprimento da viga;

b e h – Dimensões da seção transversal;

A – Área da seção da coluna;

N_d – Esforço normal de projeto;

W – Módulo de resistência da seção transversal;

f_{cd} – Resistência a compressão da madeira;

f_{vd} – Resistência ao cisalhamento da madeira;

Tabela 4 – Dimensionamento para os Estados Limites Último e de Utilização

Valores médios para <i>Eucalyptus Citriodora</i>				
Módulo de Elasticidade	Peso Aparente	Resistência compressão	Resistência tração	Resistência Cortante
18.421 MPa	999 kg/m ³	62 MPa	123 MPa	10,7 MPa

Fonte: Extraído do anexo A.1.1 em Pfeil e Pfeil (2003).

Os resultados obtidos para o dimensionamento seguem resumidos nas tabelas 5 a 12, com o detalhamento em planta nas figuras 5, 6 e 7.

Tabela 5 – Dimensionamento para as vigas secundárias

Dimensionamento para as vigas secundárias					
Largura	Altura	comprimento	Número de vigas	região de influência por viga	
5,0 cm	7,5 cm	220 cm	13	35cm	
Resultados das Análises nos Estados Limites					
Compressão Solicitante	Resistência a compressão	Tensão Cisalhante	Resistência a cisalhamento	Flecha Máxima $\frac{L}{200}$	Flecha Total
12,1 MPa	21,7 MPa	0,41 MPa	2,25 MPa	11 mm	5,6 mm

Fonte: Próprio autor.

Tabela 6 – Dimensionamento para a viga principal

Dimensionamento para a viga principal V1, vão de 4 metros					
Largura	Altura	comprimento	região de influência		
10,0 cm	25,0 cm	400,0 cm	111 cm		
Resultados das Análises nos Estados Limites					
Compressão Solicitante	Resistência a compressão	Tensão Cisalhante	Resistência a cisalhamento	Flecha Máxima $\frac{L}{200}$	Flecha Total
9,32 MPa	21,7 MPa	0,61 MPa	2,25 MPa	19 mm	5,12 mm

Fonte: Próprio autor.

Tabela 7 – Dimensionamento para as vigas principais V2

Dimensionamento para as vigas principais V2 (2 vigas idênticas), vão de 2 metros					
Largura	Altura	comprimento	região de influência		
7,5 cm	10,0 cm	400,0 cm	111 cm		
Resultados das Análises nos Estados Limites					
Compressão Solicitante	Resistência a compressão	Tensão Cisalhante	Resistência a cisalhamento	Flecha Máxima $\frac{L}{200}$	Flecha Total
12,7 MPa	21,7 MPa	0,68 MPa	2,25 MPa	9,25 mm	3,19 mm

Fonte: Próprio autor.

Tabela 8 – Dimensionamento para as colunas principais P1

Dimensionamento para as colunas principais P1 (2 colunas idênticas), altura de 2,2 metros				
Largura	Base	Altura	Esbeltez	Interação linear
10,0 cm	10,0 cm	220,0 cm	Intermediária	$0,07 \leq 1$

Fonte: Próprio autor.

Tabela 9 – Dimensionamento para as colunas principais P2

Dimensionamento para as colunas principais P2 (3 colunas idênticas), altura de 2,2 metros				
Largura	Base	Altura	Esbeltez	Interação linear
10 cm	7,5 cm	220,0 cm	Intermediária	$0,06 \leq 1$

Fonte: Próprio autor.

Tabela 10 – Planilha eletrônica com os requisitos do projeto e o dimensionamento das vigas secundárias

Requisitos de projeto		Madeiras para o projeto		Vigas Secundárias	
Dimensões		Champagne: Dipterys Odorata		Seção Transversal Retangular	
Comprimento:	4,00 m	Ec:	23002,00 MPa	Largura:	5,00 cm
Largura:	2,20 m	Pap:	1090,00 kg/m ³	Altura:	7,50 cm
Altura Mezanino:	2,20 m	fc:	93,20 Mpa	lc:	1,76E-06 m ⁴
Altura Teto:	3,90 m	ft:	133,50 Mpa	yc:	0,04 m
Umidade:	1	fv:	10,70 Mpa	yt:	0,04 m
Coeficiente Kmod		ftn:	2,90 Mpa	C.G. até fibra mais comprimida	
Kmod1:	0,70	Angelim Pedra verdadeiro: Dinizia Excelsa		C.G. até fibra mais tracionada	
Kmod2:	1,00	Ec:	16694,00 MPa	Espaçamento entre Vigas:	0,30 m
Kmod3:	1,00	Pap:	1170,00 kg/m ³	Número de Vigas:	13
Kmod:	0,70	fc:	76,70 Mpa	Área de Influência por viga:	0,35 m
Coeficientes e Combinações		ft:	104,90 Mpa	Peso Próprio PP:	0,04 kN/m
Yg:	1,4	fv:	11,30 Mpa	Carregamento Lage G1:	0,00 kN/m
PH0:	0,4	ftn:	4,80 Mpa	Carregamento Acabamento G2:	0,07 kN/m
PH2:	0,2	Madeira por classe de resistência		Carregamento Forro G3:	0,03 kN/m
PH3:	0,2	Dicotiledônes C40		Solicitações	
PH4:	1	Ec:	19500,00 MPa	Carga Permanente:	0,14 kN/m
PH5:	1	Pap:	950,00 kg/m ³	Carga acidental:	0,53 kN/m
PH6:	1	fc:	57,14 Mpa	Carga total de projeto:	0,93 kN/m
PH7:	1	ft:	74,21 Mpa	Carga total de serviço:	0,33 kN/m
PH8:	1	fv:	11,11 Mpa	Carga total de serviço:	0,42 kN/m
PH9:	1	Madeira Laminada e Colada		Momento de projeto Md:	0,57 kNm
PH10:	1	Eucalyptus Citriodora		Cortante de projeto Vd:	1,03 kN
PH11:	1	Ec:	18421,00 MPa	Dimensionamento	
PH12:	1	Pap:	999,00 kg/m ³	Sigma_d:	12,06 MPa
PH13:	1	fc:	62,00 Mpa	Tal_d:	0,41 MPa
PH14:	1	ft:	123,60 Mpa	FlechaPermitida:	11,00 mm
PH15:	1	fv:	10,70 Mpa	ELS-Def: Flecha Instantânea:	4,43 mm
PH16:	1	ftn:	3,90 Mpa	ELS-Def: Flecha Total:	5,58 mm
PH17:	1	Carregamento		ELS-V: Flecha Instantânea:	3,98 mm
PH18:	1	Placa Wall:		Verificações	
PH19:	1	Acabamento:		Sigma_d < fcd?	OK
PH20:	1	Forro:		Tal_d < fvd?	OK
PH21:	1	Carga Acidental:		Flecha < L/200?	OK
PH22:	1			(1+PHI)*Flecha < L/200?	OK
PH23:	1			Flecha < 15mm?	OK

Fonte: Próprio autor.

Tabela 11 – Planilha eletrônica para o dimensionamento das vigas principais

Viga Principal V1			Vigas Principais 2 x V2 (simétricas)		
Seção Transversal Retangular			Seção Transversal Retangular		
Largura:	10,00 cm		Largura:	7,50 cm	
Altura:	25,00 cm		Altura:	10,00 cm	
Comprimento efetivo L0:	3,80 m		Comprimento efetivo L0:	1,85 m	
lc:	1,30E-04 m ⁴		lc:	6,25E-06 m ⁴	
yc:	0,13 m	C.G. até fibra mais comprimida	yc:	0,05 m	C.G. até fibra mais comprimida
yt:	0,13 m	C.G. até fibra mais tracionada	yt:	0,05 m	C.G. até fibra mais tracionada
Vão Lateral:	2,03 m		Vão Lateral:	2,03 m	
Área de Influência da viga:	1,11 m		Área de Influência da viga:	1,09 m	
Peso Próprio PP:	0,27 kN/m		Peso Próprio PP:	0,08 kN/m	
Carregamentos Vigas Secundárias:	1,71 kN/m		Carregamentos Vigas Secundárias:	0,85 kN/m	
Solicitações			Solicitações		
Carga Permanente:	2,17 kN/m		Carga Permanente:	1,01 kN/m	
Carga acidental:	1,67 kN/m		Carga acidental:	1,63 kN/m	
Carga total de projeto:	5,38 kN/m	Sd: Combinação normal	Carga total de projeto:	3,70 kN/m	Sd: Combinação normal
Carga total de serviço:	2,51 kN/m	Sd: Combinação longa duração	Carga total de serviço:	1,34 kN/m	Sd: Combinação longa duração
Carga total de serviço:	2,67 kN/m	Sd: Combinação curta duração	Carga total de serviço:	1,50 kN/m	Sd: Combinação curta duração
Momento de projeto Md:	9,71 kNm		Momento de projeto Md:	1,58 kNm	
Cortante de projeto Vd:	10,22 kN		Cortante de projeto Vd:	3,42 kN	
Dimensionamento			Dimensionamento		
Sigma_d:	9,32 MPa	Verificações	Sigma_d:	12,66 MPa	Verificações
Tal_d:	0,61 MPa	Sigma_d < fcd? OK	Tal_d:	0,68 MPa	Sigma_d < fcd? OK
FlechaPermitida:	19,00 mm	Tal_d < fvd? OK	FlechaPermitida:	9,25 mm	Tal_d < fvd? OK
Flecha Instantânea:	4,05 mm	Flecha < L/200? OK	Flecha Instantânea:	2,53 mm	Flecha < L/200? OK
Flecha Total:	5,11 mm	(1+PHI)*Flecha < L/200? OK	Flecha Total:	3,19 mm	(1+PHI)*Flecha < L/200? OK
Verificação NBR 7190, dimensão mínima		Seção Transv > 50 cm? OK	Verificação NBR 7190, dimensão mínima		Seção Transv > 50 cm? OK
ELS-V: Flecha Instantânea:	3,72 mm	Flecha < 15mm? OK	ELS-V: Flecha Instantânea:	2,71 mm	Flecha < 15mm? OK

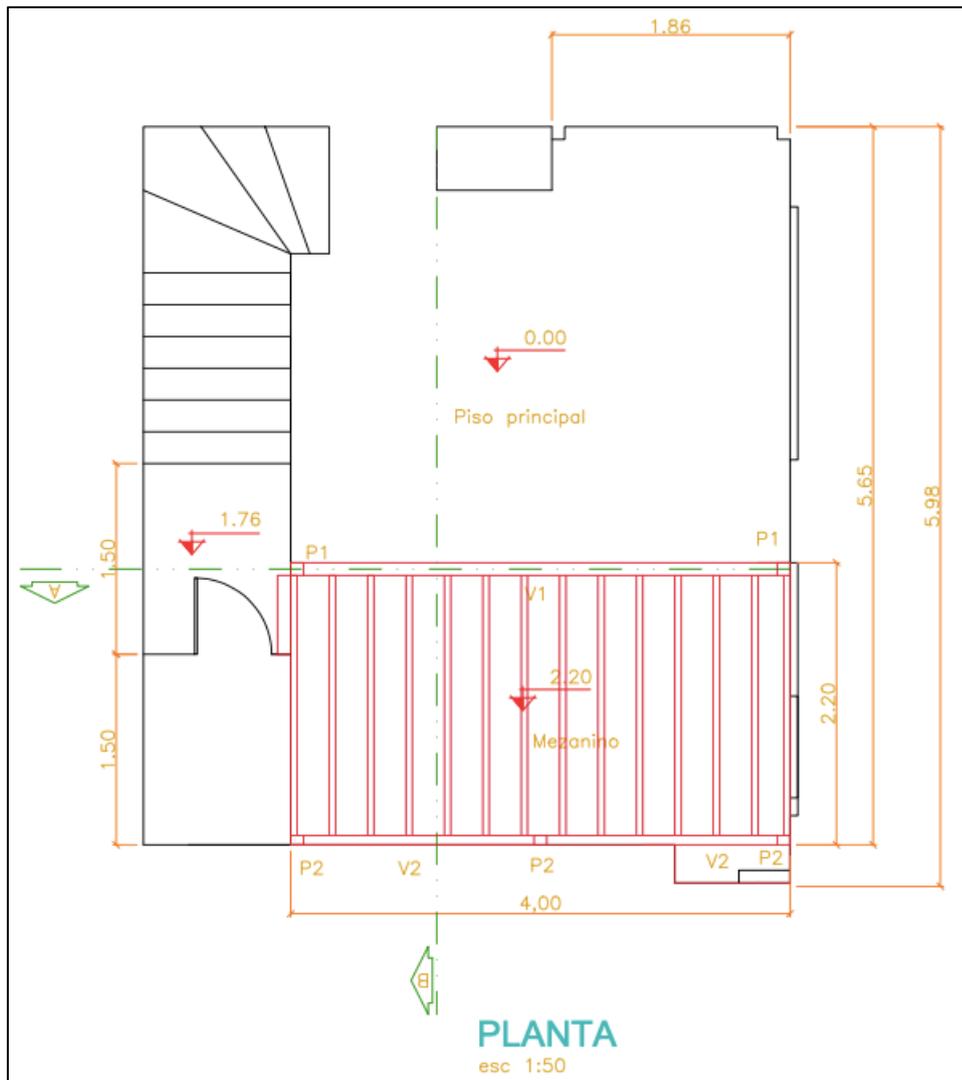
Fonte: Próprio autor.

Tabela 12 – Planilha eletrônica para o dimensionamento das colunas do mezanino

Colunas para a viga Principal (V1) -- 2 x P1 (Idênticos)				Colunas para as vigas Principais (V2 e V3) -- 3 x P2 (Idênticos)			
Seção Transversal Retangular				Seção Transversal Retangular			
Largura:	10,00	cm		Largura:	10,00	cm	
Base:	10,00	cm		Base:	7,50	cm	
Altura Lf:	2,20	m		Altura Lf:	2,20	m	
Ix:	833,33	cm ⁴		Ix:	625,00	cm ⁴	
Wx:	166,67	cm ³		Wx:	125,00	cm ³	
Área:	100,00	cm ²		Área:	75,00	cm ²	
ix:	2,89	cm		ix:	2,89	cm	
Altura Mezanino-Teto:	1,61	m		Altura Mezanino-Teto:	1,61	m	
Altura Piso-Mezanino:	2,20	m		Altura Piso-Mezanino:	2,20	m	
Solicitações				Solicitações			
Carga Permanente:	4,13	kN		Carga Permanente:	2,75	kN	
Carga acidental:	3,17	kN		Carga acidental:	2,11	kN	
Carga total de projeto:	10,22	kN	Para o ELU	Carga total de projeto:	6,81	kN	Para o ELU
Lf/ix:	76,21	-	Esbeltez: Intermediária	Lf/ix:	76,21	-	Esbeltez: Intermediária
ea:	0,733	cm		ea:	0,733	cm	
Carga Crítica Ncr:	219,12	kN		Carga Crítica Ncr:	164,34	kN	
Momento de projeto Md:	7,86	kNcm		Momento de projeto Md:	5,21	kNcm	
Dimensionamento		Verificações		Dimensionamento		Verificações	
Sigma _{d/fcd} :	0,0471	MPa	Sigma _{d/fcd} <= 1? OK	Sigma _d :	0,0419	MPa	Sigma _d <= 1? OK
Parcela Flambagem:	0,0217	MPa	Condicional ao tipo de Esbeltez	Parcela Flambagem:	0,0192	MPa	Condicional ao tipo de Esbeltez
Equação de Interação Linear:	0,0688		Sigma Total/fcd <= 1? OK	Equação de Interação Linear:	0,0611		Sigma Total <= 1? OK
Verificação NBR 7190, dimensão mínima		Seção Transv > 50 cm?	OK	Verificação NBR 7190, dimensão mínima		Seção Transv > 50 cm?	OK

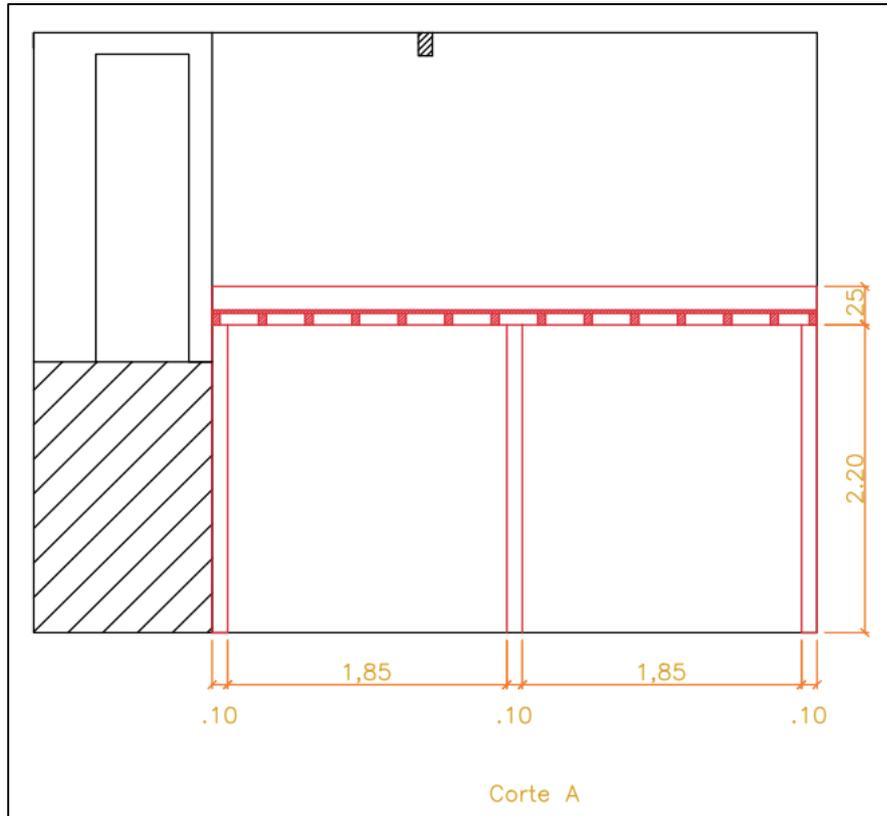
Fonte: Próprio autor.

Figura 5 – Planta baixa, com mezanino em vermelho



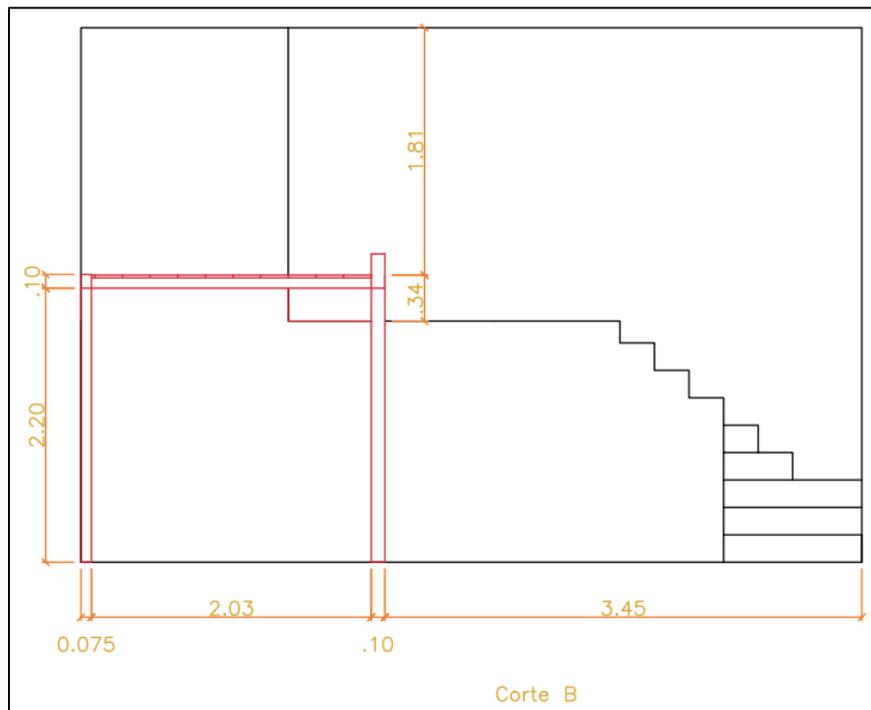
Fonte: Próprio autor.

Figura 6 – Corte A, com mezanino em vermelho



Fonte: Próprio autor.

Figura 7 – Corte B, com mezanino em vermelho



Fonte: Próprio autor.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como pode ser visto, o projeto e os cálculos para estruturas de madeira são de baixa complexidade e puderam ser realizados com uma planilha eletrônica simples em pouco tempo, atendendo a todos os requisitos da norma brasileira, NBR 7190 (ABNT, 1997). Sua execução exige mais qualificação e ferramentas especializadas quando comparada ao concreto armado, e é menos complexa quando comparada a estruturas metálicas. A construção seca e o viés sustentável trazem a madeira de volta à cena das construções modernas, dentro de uma realidade que não pode mais tolerar emissões de gás carbônico e desperdício de água. Não está sendo advogado nenhum tipo de ativismo contra o concreto ou aço, mas meramente que seja dado o devido valor a projetos que podem ser realizados de forma sustentável utilizando madeira sempre que possível, e não por exclusão, como é hoje. Cada tonelada de cimento Portland economizada significa uma redução de aproximadamente meia tonelada de dióxido de carbono que seria, de outro modo, liberado na atmosfera, sem falar em resíduos e economia de água. Da mesma forma, o aço, desde a extração de suas matérias primas até seu tratamento pode, muitas vezes, ser substituído por uma solução similar com madeira, tão robusta quanto.

Os primeiros cálculos estruturais são sempre permeados por dúvidas e insegurança. Espera-se que, com o tempo, mais artigos neste molde, com soluções completas para estruturas de madeira sejam disponibilizados. Deste modo espera-se agregar pontos de partida para aqueles que estejam iniciando a trilha do cálculo estrutural, e que desejem embasamento sólido para seus primeiros projetos. Ao mesmo tempo, espera-se também, desmistificar o uso da madeira como elemento estrutural.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. *D2555-88: Standard test for establishing clear wood strength values*. ASTM, Vol. 04.09 Wood, 1992, USA.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *NBR 6120: Ações para cálculo de estruturas em edifícios*. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira*. Rio de Janeiro, 1997.

BELLEI, Ildony Hélio. *Projeto e cálculo de um mezanino*. Disponível em https://www.abcem.org.br/lib/php/_download.php?now=0&arq=produtos/299_artigo_ed83.pdf, acesso em 31 de outubro de 2020.

CHINA DAILY. *Nanchan Temple*. Disponível em https://www.chinadaily.com.cn/m/shanxi/wutaishan/2015-01/08/content_19271797.htm, acesso em: 10 de novembro de 2020.

ITA CONSTRUTORA. *Centro de eventos Iporanga*. Disponível em <https://www.itaconstrutora.com.br/portfolio/centro-de-eventos-iporanga/>, acesso em: 10 de novembro de 2020.

NAVRANG INDIA. *The oldest and largest wooden building in Asia - Padmanabhapuram Palace, Tamil Nadu*. <http://navrangindia.blogspot.com/2014/12/the-oldestlargest-wooden-building-in.html>, acesso em: 10 de novembro de 2020.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. *Estruturas de madeira: dimensionamento segundo a norma brasileira NBR 7190/97 e critérios das normas norte-americanas NDS e européia EUROCODE 5*. 6º ed., rev., atual. e ampl. 2003.

SHIGUE, Erich Kazuo. *Difusão da construção em madeira no Brasil: agentes, ações e produtos*. 2018. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo.

TEMPLE ASSEMBLY. *Axonometric drawing of Nanchan temple*. <https://learning.hku.hk/ccch9051/group-13/items/show/46>, acesso em: 10 de novembro de 2020.