



ANÁLISE TÉCNICA COMPARATIVA ENTRE OS USOS DE DLT E *DECKING* EM ESTRUTURAS DE MADEIRA

TECHNICAL COMPARATIVE ANALYSIS BETWEEN DLT AND *DECKING* USED FOR TIMBER STRUCTURES

Mocellin, Gabriel ^{(1)*}; Gavassoni, Elvidio ⁽²⁾

⁽¹⁾ Graduando em Engenharia Civil. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, Brasil

⁽²⁾ Prof. Dr. Eng. Civil. Departamento de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, Brasil

* Contato: mocellin.gabriel@gmail.com

CÓDIGO: 4601322

Resumo

A crescente preocupação da sociedade com o meio-ambiente e com o desempenho das edificações atualmente dá ao emprego da madeira o caráter de alternativa sustentável e eficaz, uma vez que a madeira é um dos recursos mais sustentáveis disponíveis ao homem e as novas tecnologias de processamento da madeira permitem a confecção de peças mais resistentes que aço e concreto. Hoje, com o desenvolvimento tecnológico da madeira engenheirada, observa-se crescente vertente arquitetônica que valoriza este material: ano após ano, o número de projetos que utilizam a madeira de forma massiva aumenta. Nesse contexto, o presente artigo tem como objetivo a comparação estrutural de dois sistemas construtivos de pisos de madeira, a citar, o de *decking* e o de *Dowel Laminated Timber*, considerando-os como solução de engenharia para o patamar superior de uma torre de observação. São abordados os critérios de dimensionamento de ambas as soluções, baseando-se na normativas brasileira e norte-americana. São apresentados o dimensionamento da solução em *decking* e o pré-dimensionamento da solução em DLT. Observa-se que é possível conceber estruturas tecnicamente viáveis para ambas as soluções propostas. Enquanto a alternativa em *decking* emprega menos madeira em volume, a estrutura de DLT é mais leve.

Palavras-chave: Madeira Massiva, Torres de Madeira, Análise Estrutural.

Abstract

Society's growing concern about global environment and buildings performance is making timber show up as a sustainable and efficient alternative for structures, since it is one of the most sustainable resources available and its recent manufacturing technologies allows the production of pieces stronger than steel and concrete. Now, after engineered wood's technological development, a growing architectural tendency which enrich timber is observed: year over year, the number of massive timber projects increases. On this context, this work targets the structural comparison of two constructive systems, *decking* and *Dowel Laminated Timber*, considering them as engineering solutions for an observation tower upper-level deck. The design criteria are addressed based on Brazilian and north-American's specifications. *Decking's* details and DLT's pre-sizing are presented. It is concluded that both constructive systems are technically viable for the mentioned normative. Although *decking* design results in a structure that spends less wood in volume, DLT structure is lighter.

Keywords: Massive Timber, Wood Towers, Structural Analysis.



1. INTRODUÇÃO

Pode-se atribuir a escolha da madeira, um dos primeiros materiais usados pelos seres humanos para fim estrutural, como material de construção a uma composição de fatores, dentre eles a relativa facilidade com que se pode extrair a madeira do ambiente e sua boa relação resistência/peso (Pfeil, 2003). Os primeiros registros de edificações construídas com madeira datam de cerca de 4500 a 3000 a.C. e já venciam vãos de até 7 m. (Kuklik, 2008).

Historicamente, a madeira perdeu espaço para a alvenaria a partir do século XVI, quando o desenvolvimento industrial tornou acessíveis o concreto e o tijolo. No século XVIII, se proibiu o uso de madeira como material estrutural em edificações europeias com exceção para pisos, vedação e telhados (Kuklik, 2008). As restrições impostas ao uso da madeira como elemento estrutural podem ser atribuídas à carência de tecnologias que melhorassem a qualidade das madeiras disponíveis uma vez que, por ser um material natural, a madeira está suscetível a defeitos que podem ser provenientes tanto do crescimento do tronco quanto do processamento das peças (Pfeil, 2003). Após o advento de novas tecnologias de construção com madeira como a Madeira Laminada Colada, bem como o aprimoramento das técnicas de cultivo, serragem e desdobramento da madeira (que em conjunto fizeram surgir a terminologia de “madeira engenheirada”), ano após ano o uso da madeira de forma massiva aumenta (Correia, 2009; Dias, 2018; Shigue, 2018). Encontra-se na madeira uma forma de construir edificações de alto desempenho que não comprometam os recursos naturais, com menos perdas e peças de maior qualidade (Pfeil, 2003). Neste cenário, é observada hoje uma vertente arquitetônica que valoriza este material no Brasil, dando protagonismo à madeira no sistema estrutural das edificações (Shigue, 2018).

Embora se observe uma crescente adoção de sistemas de madeira engenheirada na construção civil, no Brasil estruturas convencionais são comumente projetadas com madeira serrada. Para a construção de pisos e lajes de madeira, por exemplo, o sistema de decking é uma das tecnologias mais usadas em pisos externos. Seu dimensionamento é relativamente simples e está previsto na norma brasileira em vigor NBR 7190:1997 - Projeto de estruturas de madeira. Em outros países, todavia, outros sistemas construtivos já são utilizados, como por exemplo a tecnologia de *Dowel Laminated Timber* (DLT, que pode ser traduzido como Madeira Laminada "Cavilhada"), conceito que surgiu na década de 90 na Suíça e conhecido na Europa como *Dübelholz*. O DLT consiste em um sistema de madeira laminada no qual as lâminas são justapostas e conectadas entre si por cavilhas, formando painéis maciços compostos exclusivamente de madeira.

Enquanto solução de *decking* já é utilizada de forma ampla e encontra-se na literatura muitas referências e manuais técnicos a seu respeito, o sistema construtivo de DLT pode ser considerado inovador e recente no Brasil de forma que a literatura brasileira acerca deste ainda é incipiente. Tal fato é corroborado pela ausência da disponibilidade de DLT entre os produtos comercializados no mercado brasileiro em uma extensiva pesquisa realizada por Shigue, 2018. Mundialmente, essa tecnologia já foi empregada em diversas construções, como por exemplo em museus, aeroportos, escritórios, hotéis e edifícios corporativos.

Segundo o escritório de engenharia StructureCraft, dentre as principais características do sistema DLT destacam-se a leveza, o bom comportamento em situação de incêndio, o alto desempenho termo acústico e o apelo estético de uma estrutura feita somente com madeira. Adicionalmente a essas características que são comuns a todas as soluções de madeira massiva, destaca-se o caráter sustentável deste sistema, que otimiza a utilização da madeira proporcionando quase nenhum desperdício de material. Outra vantagem do DLT frente a outros sistemas de madeira engenheirada está no fato de que o maquinário necessário para a sua confecção pode ser considerado simples. Tipicamente, as dimensões de painéis pré-fabricados em DLT variam entre 2,4x6,0m e 3,0x18m, e o transporte dessas placas constitui sua limitação principal.



A leveza é uma característica comum a todas as estruturas de madeira. O estudo comparativo feito por Vara (2015) mostra que uma estrutura em madeira pesa cerca de 20% da estrutura equivalente em concreto armado, no caso de uma residência unifamiliar de aproximadamente 100 m².

Sistemas de madeira massiva, como o DLT, apresentam bom comportamento em situação de incêndio por serem constituídos de peças robustas. Embora a madeira seja um material combustível, o carvão produzido na sua combustão cria uma camada isolante que retarda a penetração das chamas e protege a porção central das seções dos elementos, mantendo suas propriedades mecânicas (Figueroa, M.J.M. e Moraes, P.D. de, 2009) e permitindo que a estrutura apresente tempo de resistência ao fogo suficiente para a evacuação da edificação, por exemplo.

Deste modo, a fim de comparar de forma técnica dois sistemas construtivos usados na construção de pisos e lajes de madeira (sendo um tradicional e muito utilizado, outro inovador e ainda pouco difundido), utiliza-se um estudo de caso em que são propostas as duas alternativas: *decking* e DLT. É utilizado como base o projeto do deck superior de uma torre de observação concebida por alunos da disciplina de Estruturas de Madeira do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Paraná.

A torre é projetada com o objetivo de proporcionar aos visitantes do parque temático Beto Carrero World uma vista panorâmica das suas principais atrações. A concepção arquitetônica da torre segue a ideia de utilizar ao máximo a madeira, otimizando suas propriedades. A estrutura portante da torre é treliçada, com seção quadrada e uniforme ao longo de sua altura, escadas laterais externas e um deck superior coberto.

A solução em *decking* é proposta de forma a atender às disposições da NBR 7190:1997, enquanto a alternativa em DLT atende às considerações da normativa norte-americana para construções de madeira NDS (2018) por ser um código de referência mundial, mais atualizado e já utilizado em estruturas feitas em DLT.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização da laje

A torre utilizada como objeto deste artigo foi concebida para servir como ponto de observação panorâmica do parque temático Beto Carrero World, localizado no litoral do estado de Santa Catarina, no município de Penha. A localização da torre dentro do parque está representada na Figura 1.



Figura 1: Imagem de satélite do parque, localização da torre em amarelo ($26^{\circ}48'02.7''S$ $48^{\circ}36'58.0''O$). Google (2019)

Define-se que o deck superior esteja à 18 m de altura em relação ao terreno, tenha dimensões de 14x14 m e que seja coberto, mas sem vedações laterais. Uma vista da torre e a planta do deck são apresentados na Figura 2.

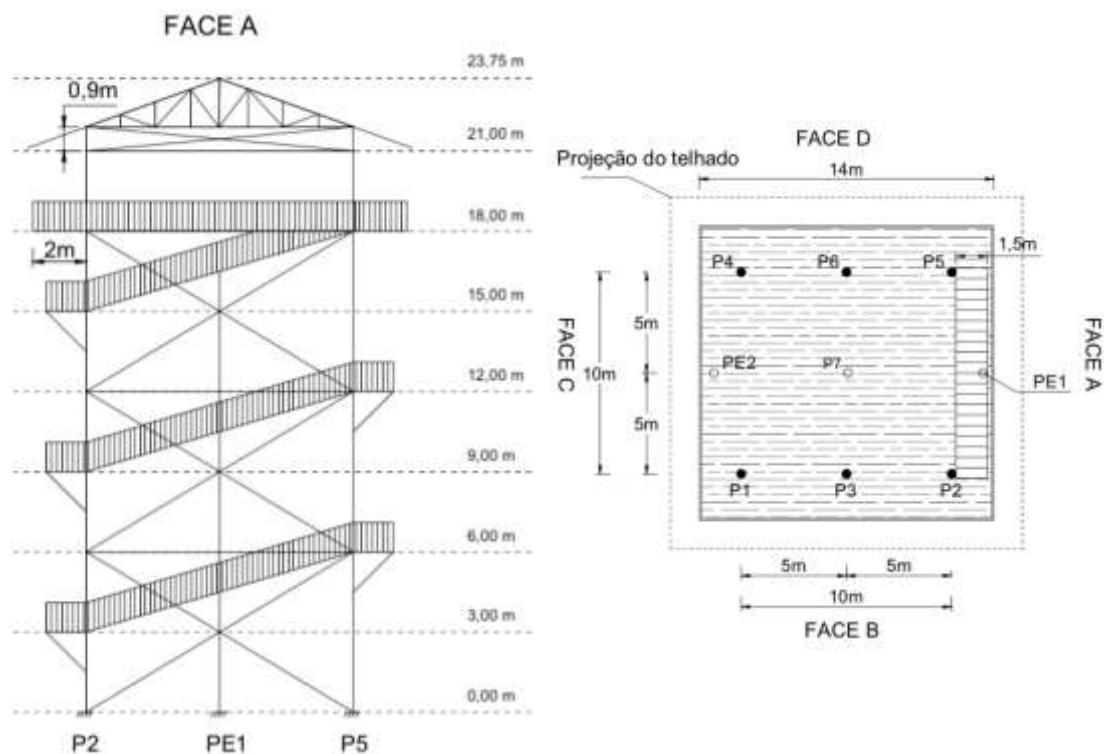


Figura 2: Elevação da torre e planta do deck

2.2. Solicitações características



O dimensionamento das soluções subsequentes considera as combinações normais de carregamentos dispostas na NBR 8681:2003, em que foram consideradas as solicitações características discutidas a seguir.

2.2.1. Peso próprio

Considerado conforme a massa específica de cada espécie de madeira, apresentadas na Tabela 1. Para as combinações de carregamentos, considera-se o peso próprio como carregamento permanente.

Tabela 1: Propriedades¹ das madeiras utilizadas

Espécie de madeira	Nome científico	Massa específica (kg/m ³)	Módulo de elasticidade E ₀ (MPa)	Máxima tensão normal sob flexão f ₀ (MPa)
Ipê	<i>Tabebuia serratifolia</i>	1068,0	18011,0	76,0
Eucalipto Citriodora	<i>Eucalyptus citriodora</i>	999,0	18421,0	62,0
Douglas fir-larch	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	490,0	13100,0	9,31

2.2.1. Uso e ocupação

Considera-se 4 kN/m² (carregamento de arquibancada segundo a NBR 6120:1980) uniformemente distribuídos. A carga acidental de vento não é considerada devido ao fato de que por ser uma estrutura vazada e horizontal não há, a princípio, diferenças de pressão entre as faces inferior e superior do deck; não obstante, a força global do vento sob a torre é resistida pelos elementos de contraventamento.

Para as combinações de carregamentos, considera-se que o carregamento de uso é acidental de média duração.

2.3. Dimensionamento da solução em decking

Em um deck, resumidamente, as cargas solicitantes são transmitidas das régua para os barrotes e destes para as vigas, que por sua vez são apoiadas nos pilares da estrutura. Um desenho esquemático da estrutura de um deck é apresentado na Figura 3.

¹ Para Ipê e Eucalipto, valores da NBR 6170:1997 considerando umidade padrão de 12%. Para Douglas fir-larch, valores do Suplemento da NDS de 2018.

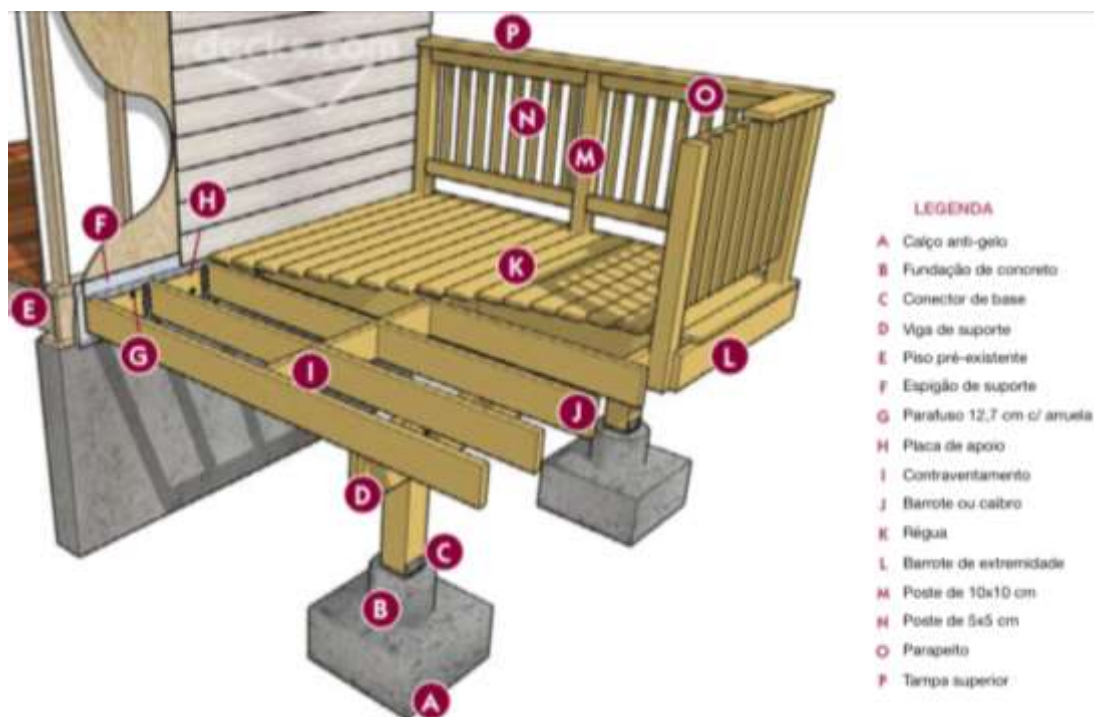


Figura 3: Esquema de um deck de madeira. Adaptado de Decks.com (2008)

Considera-se que todos os elementos do deck estão submetidos a flexão simples. É escolhido dimensionar as peças para atendimento ao Estado Limite Último (ELU) e verificar as deformações frente ao Estado Limite de Serviço (ELS).

2.3.1. Combinações

Em consonância com as disposições da NBR 8681:2003, considera-se os seguintes coeficientes de majoração das cargas para a combinação normal de ações no Estado Limite Último: $\gamma_g = 1,3$ para o peso próprio; $\gamma_q = 1,4$ para o carregamento de ocupação.

2.3.2. Estado Limite Último (ELU)

O dimensionamento para o ELU consiste em verificar a estabilidade das peças frente aos seguintes estados: compressão e tração na flexão simples, cisalhamento, esmagamento da peça em seus apoios e estabilidade lateral.

As equações (1) e (2) representam o estado de tração e compressão na flexão, respectivamente. O equilíbrio da peça frente ao cisalhamento é alcançado satisfazendo-se a equação (3). A equação (4), quando verificada, garante que não haverá esmagamento da peça em seus apoios e a equação (5) determina o máximo comprimento da peça l_1 para o qual se garante a estabilidade lateral.

$$\sigma_{t0,d} = \frac{M_d}{W_t} \leq f_{t0,d}, \quad (1)$$

$$\sigma_{c0,d} = \frac{M_d}{W_c} \leq f_{c0,d}, \quad (2)$$

$$\tau_{90,d} = \frac{Q_d \cdot S}{b \cdot I} \leq f_{90,d}, \quad (3)$$

$$\sigma_{c90,d} = \frac{R_d}{b \cdot c} \leq f_{c90,d}, \quad (4)$$

$$\frac{l_1}{b} < \frac{E_{c,ef}}{\beta_M \cdot f_{cd}}, \quad (5)$$



onde:

- $\sigma_{t0,d}$ e $\sigma_{c0,d}$ são as tensões de tração e compressão máxima paralela às fibras solicitantes de cálculo, respectivamente,
- M_d é o momento fletor solicitante de cálculo,
- W_t é o módulo de resistência à flexão pura,
- $f_{t0,d}$ e $f_{c0,d}$ são as resistências à tração e compressão máxima paralela às fibras, de cálculo, respectivamente,
- $\tau_{90,d}$ é a tensão de cisalhamento perpendicular às fibras solicitante de cálculo,
- Q_d é a força cortante solicitante de cálculo,
- S é o momento estático da seção,
- b é a dimensão da base da seção,
- I é o momento de inércia da seção solicitada,
- R_d é a reação no apoio do elemento analisado,
- l_1 é o vão máximo para que se garanta estabilidade lateral da peça,
- $E_{c,ef}$ é o módulo de elasticidade à compressão efetivo,
- β_M é o coeficiente de correção, que depende da relação h/b .

2.3.1. Estado Limite de Serviço (ELS)

A verificação feita para o ELS consiste em garantir que a deformação da estrutura para as combinações de solicitações características seja inferior aos limites da norma, considerando os carregamentos característicos solicitantes de média e longa duração. As deformações devem considerar o fator de fluência da madeira para a devida classe de umidade e durações dos carregamentos.

A deformação de cálculo da estrutura δ , portanto, é obtida pela equação (6).

$$\delta = \delta_{instantânea} \cdot (1 + \varphi), \quad (6)$$

onde:

- $\delta_{instantânea}$ é a deformação elástica,
- φ é o coeficiente de fluência.

A flecha limite para pisos de acordo com a NBR 7190 é de $l/300 \leq 15$ mm para um vão l entre apoios e $l_b/150 \leq 15$ mm para um vão l_b em balanço.

2.4. Dimensionamento da solução em DLT

O dimensionamento das placas é feito segundo as considerações da normativa norte-americana para construções de madeira NDS (2018) e com base nas disposições apresentadas pelo escritório de engenharia StructureCraft (2019).

Em linhas gerais, o dimensionamento das lâminas que compõem as placas de DLT é feito a partir da definição dos vãos a serem vencido e considerando que as lâminas geralmente têm largura nominal de 5 cm. Dimensiona-se, portanto, a altura das lâminas. É detalhado também o posicionamento das cavilhas, que trabalham principalmente resistindo ao corte. Resistência adicional é conferida à ligação com cavilhas devido ao fato de que estas são inseridas com umidade muito abaixo da umidade da peça de madeira; quando a cavilha entra em equilíbrio com a peça ela incha levemente, o que mobiliza o atrito entre as duas peças (StructureCraft, 2019).

O pré-dimensionamento desta estrutura é feito com a madeira Douglas Fir (*Pseudotsuga menziesii*) de classe estrutural e utilizando-se as tabelas apresentadas no guia *Dowel Laminated Timber Design & Profile Guide*, que relacionam o vão a ser vencido na direção axial das lâminas



com a seção mínima necessária às peças, conforme a espécie de madeira e considerações sobre o carregamento atuante.

3. RESULTADOS

3.1. Detalhamento para a solução em decking

A Tabela 2 apresenta as seções e vãos para os quais os elementos atendem as considerações da NBR 7190:1997. As régua são de Ipê, e os demais elementos são de *Eucalipto Citriodora*.

Para as combinações de carregamentos, considera-se classe 3 de umidade do ambiente, e os seguintes valores de coeficientes de modificação para as propriedades das madeiras: $k_{mod,1} = 0,6$; $k_{mod,2} = 0,8$; e $k_{mod,3} = 0,7$.

Os coeficientes de fluência considerados são $\varphi = 2,0$ para o peso próprio e $\varphi = 1,0$ para o carregamento de ocupação da torre.

Tabela 2: Resumo do dimensionamento para a solução em decking

Elemento	h (cm)	b (cm)	Vão (cm)	l_1 (cm)	$\sigma_{0,d}$ (MPa)	$f_{0,d}$ (MPa)	Flecha (mm)	Flecha adm. (mm)
Régua	2,0	10,0	50	3950	2,8	12,6	0,2	1,7
Barrotes	15,0	5,0	150	242	4,3	10,4	3,0	5,0
Vigas (biapoiadas)	45,0	20,0	500	1188	4,4	10,4	10,6	15,0
Vigas (balanço)	45,0	20,0	200	1188	2,8	10,4	3,1	13,3

3.2. Detalhamento para a solução em DLT

Utiliza-se a tabela de pré-dimensionamento para vão simples com madeira Douglas Fir classe Estrutural (*Single Span Sel Str*), revestimento com placas cimentícias de 5 cm de espessura na face superior das placas de DLT, mostrada na Tabela 3.

Tabela 3: Pré-dimensionamento em DLT. Adaptado de StructureCraft (2019)

Vão (m)	Carga de ocupação (kN/m ²)				
	2,00	2,50	3,50	5,00	7,50
4,27	5x15	5x15	5x15	5x15	5x15
4,57	5x15	5x15	5x15	5x15	5x15
4,88	5x15	5x15	5x15	5x15	5x20
5,18	5x15	5x15	5x15	5x15	5x20
5,49	5x15	5x15	5x15	5x20	5x20
5,79	5x15	5x15	5x20	5x20	5x20
6,10	5x15	5x15	5x20	5x20	5x20

Interpola-se os valores tabelados para obter as seções mínimas necessárias para resistir ao carregamento de ocupação de 4 kN/m² com vão de 5 m. Para estas condições, portanto, lâminas de 5x15 cm atendem às considerações da NDS segundo o guia da StructureCraft, já considerando a aplicação de placas cimentícias na face superior das placas de DLT.



4. DISCUSSÃO

4.1. Comparação das duas soluções

Quando comparadas com uma laje de concreto, ambas as soluções em madeira podem ser consideradas estruturas leves (o peso de concreto armado para a mesma área de laje, adotando uma espessura de 8 cm, seria de aproximadamente 34 toneladas), em consonância com os resultados encontrados por Vara (2015). Comparadas entre si, observa-se que o volume de madeira na solução em DLT é cerca de 30% superior ao deck convencional, enquanto a solução em *decking* é quase 60% mais pesada que a alternativa maciça, embora essa relação seja muito dependente das espécies de madeira escolhidas. A Tabela 4 apresenta de forma resumida o volume e peso para as duas soluções propostas.

Tabela 4: Resumo das soluções em termos de volume e peso

Solução	Volume de madeira (m ³)	Peso (ton)
Decking	22	22
DLT	29	15 ²

Outra análise relevante é a de resistência ao fogo. A NBR 7190:1997 não apresenta diretrizes de projeto quanto a esse tema, porém há considerações a respeito deste assunto na NBR 14432:2001. Caso desconsiderada a diferença nas taxas de carbonização por se tratarem de espécies de madeira diferentes, seria esperado que a solução em DLT apresentasse tempos de resistência ao fogo superiores à solução em *decking* por ter uma superfície específica menor; todavia, a taxa de carbonização é maior quanto menor a massa específica da madeira (Figuroa, M.J.M. e Moraes, P.D. de, 2009, apud Njankouo, Dotreppe e Franssen, 2004), portanto é necessário que se faça o cálculo preciso da resistência ao fogo das duas soluções para que conclusões sejam tiradas.

Quanto à durabilidade, ambas as soluções necessitam de cuidados quanto ao controle da umidade da madeira para garantir o desempenho estrutural previsto: enquanto para a solução em *decking* basta o tratamento superficial dos elementos com impregnante (stain), é preciso revestir a superfície das placas de DLT com placas cimentícias impermeabilizadas.

5. CONCLUSÃO

É possível conceber duas soluções estruturais para a edificação em questão. Pelo conjunto de fatores explicitados, o sistema construtivo em DLT é uma alternativa viável sob o ponto de vista técnico. Outras análises, todavia, não são dispensadas.

É necessário aprofundar o detalhamento das conexões e ligações para se obter projetos básicos satisfatórios. Além disso o dimensionamento do DLT deve ser feito de modo a verificar a tabela de pré-dimensionamento e utilizar também uma espécie de madeira disponível no cenário nacional. Ainda, é preciso que seja elaborado o projeto a nível executivo. As demais partes constituintes da torre também devem ser dimensionadas e detalhadas. Pretende-se elaborar os orçamentos (incluindo mão de obra e não apenas material) de ambas as soluções apresentadas a fim de comparação.

Muitas outras comparações podem ser feitas entre as duas soluções apresentadas. A título de exemplo, poder-se-ia comparar seus desempenhos térmicos, a quantidade de carbono sequestrada, tecnologia construtiva necessária e análises dinâmicas das estruturas.

² Esse valor já considera o revestimento de placas cimentícias.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Wood Council (2017). National Design Specification for Wood Construction 2018 edition. USA.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1988). Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. NBR 6120. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. NBR 8681. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1997). Projeto de estruturas de madeira. NBR 7190. Rio de Janeiro.

Correia, E.A.S. (2009). Análise e Dimensionamento de Estruturas de Madeira. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.

Decks.com. (2008). Plans Guide. Winchester, VA, USA.

Dias, A. (2018). Como a madeira vai se transformar no principal material de construção de edifícios de múltiplos andares. São Paulo, Brasil.

Figueroa, M. J. M. e Moraes, P. D. de (2009). Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. Ambiente Construído, v. 9, n. 4, p. 157-174.

Kuklik, P. (2008). History of timber structures. In Handbook 1 – Timber structures, Leonardo Da Vinci Pilot Projects, Praga, República Checa.

Pfeil, W. e Pfeil, M. (2003). Estruturas de Madeira. Livros Técnicos e Científicos Editora SA, RJ, Brasil.

Shigue, E. K. (2018). Difusão da Construção em Madeira no Brasil: Agentes, ações e produtos. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil.

StructureCraft (2019). DLT Design and Profile Guide v.4 – USA. BC, Canada.

Vara, A. F. F. (2015). Estudo Comparativo Entre Estruturas em Madeira e Estruturas em Betão Armado. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Rural da Universidade de Évora, Évora, Portugal.