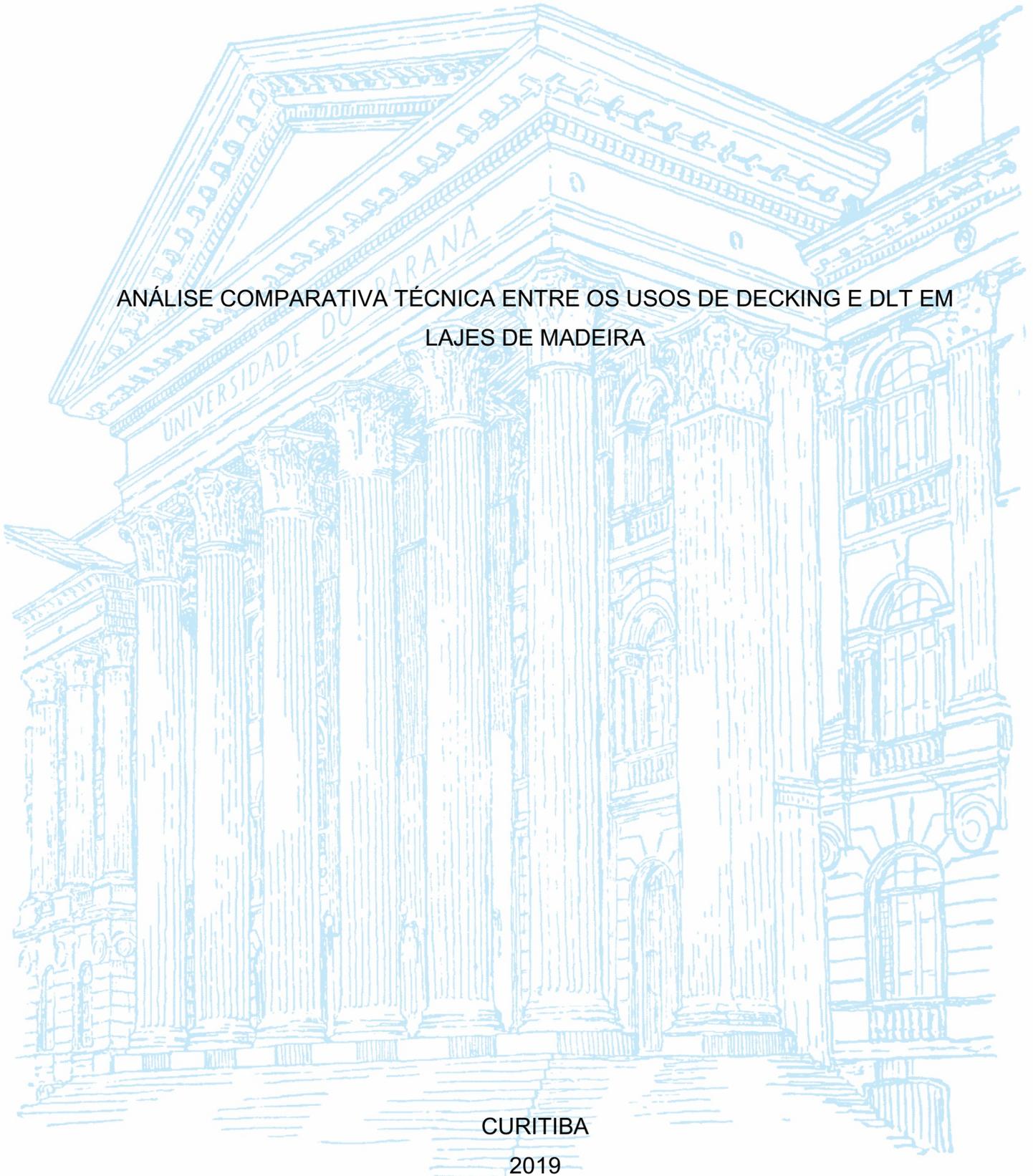


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GABRIEL MOCELLIN NETO

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



CURITIBA

2019

GABRIEL MOCELLIN NETO

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

Trabalho Final de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Elvidio Gavassoni Neto

CURITIBA

2019

“A madeira é o único material estrutural que se planta e cresce.”

Dr. Eng. Vanesa Baño. Uruguai, 2019.

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. As novas tecnologias de processamento da madeira permitem, atualmente, a confecção de peças mais resistentes que aço e concreto. Hoje, com o desenvolvimento tecnológico da madeira engenheirada, observa-se um crescente vertente arquitetônica que valoriza este material: ano após ano, embora de forma ainda pouco expressiva, o número de projetos que utilizam a madeira de forma massiva aumenta. No Brasil, por exemplo, os novos sistemas construtivos em madeira são pouco explorados e não há amparo normativo para seu dimensionamento. Nesse contexto, o presente trabalho 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* (DLT), 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, sendo apresentados os seus projetos básicos. Conclui-se que é possível conceber estruturas tecnicamente viáveis para ambas as soluções propostas. Ao se comparar, no entanto, os sistemas construtivos, observa-se que a alternativa em *decking* emprega menos madeira em volume e em peso, sendo assim mais atrativa do ponto de vista estrutural; em contrapartida, o sistema de DLT apresenta vantagens de característica construtiva, como a redução do número de peças a serem conectadas em obra.

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. Nowadays, 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, but it's still far from being a protagonist. In Brazil, for example, the recently-developed timber constructive systems are not used commonly, and the current normative does not support its design. 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, and its projects are shown. It is concluded that both constructive systems are technically viable for the mentioned normative. When compared, though, one can observe that DLT structure is heavier and uses more timber in volume, therefore being less attractive from a structural view. On the other hand, DLT system advantages are seen in a constructive approach, once it reduces the number of connections to be made on site.

Keywords: Massive Timber. Wood Towers. Structural Analysis.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Primeiras casas de madeira.....	18
FIGURA 2 - Exemplo de deck em casa na Serra da Bocaina – SP.....	23
FIGURA 3 - Esquema de um deck de madeira.....	24
FIGURA 4 - Painel de DLT.	25
FIGURA 5 - Processo de fabricação dos painéis de DLT.....	26
FIGURA 6 - Painéis de DLT sendo posicionados no projeto T3 Atlanta.....	28
FIGURA 7 – Painéis de DLT sendo instalados no Museu de Belas Artes de Houston.	28
FIGURA 8 - Espaçamentos em ligações com pinos.....	35
FIGURA 9 - Pinos em corte simples.....	36
FIGURA 10 - Fluxograma de elaboração dos projetos básicos.....	40
FIGURA 11 - Fluxograma do dimensionamento das peças.....	40
FIGURA 12 - Localização e extensão do parque temático, em destaque.	41
FIGURA 13 - Localização da torre indicada no mapa ($26^{\circ}48'02.7''S$ $48^{\circ}36'58.0''O$).	42
FIGURA 14 - Arquitetura da torre.	43
FIGURA 15 - Variação de forma de torres panorâmicas: seção constante (a) e tronco piramidal (b).....	43
FIGURA 16 - Detalhe arquitetônico, planta do deck com localização preliminar dos pilares.....	44
FIGURA 17 - Exemplos de torres treliçadas de madeira roliça aparente com forma troncopiramidal.....	45
FIGURA 18 - Exemplo de estrutura porticada em madeira.....	46
FIGURA 19 – Esquemas de configurações de contraventamento: em Cruz de Santo André (a) e em K (b).....	48
FIGURA 20 - Diagramas de momentos fletores para estruturas com ligações articuladas (a), semirrígidas (b) e rígidas (c).	49
FIGURA 21 - Comportamento de rigidez e flexibilidade de ligações usadas em estruturas de madeira.....	50
FIGURA 22 - Localização da torre indicada no Mapa Geológico do Estado de Santa Catarina.....	51
FIGURA 23 - Esquema da estrutura global do deck para a solução em decking.	54
FIGURA 24 - Separação dos elementos do <i>deck</i> para o dimensionamento.....	58

FIGURA 25 - Modelo estrutural esquemático das réguas.....	58
FIGURA 26 - Modelo estrutural esquemático dos barrotes.	61
FIGURA 27 - Modelo estrutural esquemático das vigas secundárias.....	64
FIGURA 28 - Modelo estrutural esquemático das vigas primárias.	66
FIGURA 29 - Ligação entre réguas e barrotes.	69
FIGURA 30 - Ligação entre barrotes e vigas secundárias.....	69
FIGURA 31 - Entalhes das vigas secundárias.....	70
FIGURA 32 - Esquema de ligação por entalhe reforçada com parafuso.....	70
FIGURA 33 - Entalhes das vigas primárias.	71
FIGURA 34 - Configuração dos elementos da solução em DLT.....	73
FIGURA 35 - Dimensões e disposição das placas de DLT.	75
FIGURA 36 - Distribuição da carga dos painéis para as vigas secundárias.....	77
FIGURA 37 - Modelo estrutural esquemático da viga VS2.....	78
FIGURA 38 - Posição das vigas primárias na solução em DLT.....	79
FIGURA 39 - Modelo estrutural esquemático das vigas primárias.	80
FIGURA 40 - Esquema da ligação entre os painéis de DLT e as vigas.....	82
FIGURA 41 - Entalhes das vigas secundárias.....	83

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – Comparação entre aço, concreto e madeira.....	19
GRÁFICO 2 – Resumo das soluções em termos de volume e peso.	85

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - Fatores de duração (C_D) e aplicações comuns.....	38
QUADRO 2 - Fator de temperatura (C_t).	39

TABELA 29 - Verificação do esmagamento das vigas primárias pelo apoio das vigas secundárias.	68
TABELA 30 - Quantitativo dos elementos estruturais do <i>deck</i>	72
TABELA 31 - Massas específicas da madeira utilizada na solução em DLT.....	74
TABELA 32 – Valores característicos de peso próprio para demais componentes do DLT.....	74
TABELA 33 - Propriedades de cálculo para a madeira escolhida ($C_D = 1,0$, $C_t = 1,0$, $C_M = 1,0$).....	75
TABELA 34 - Pré-dimensionamento em DLT.	76
TABELA 35 - Ações solicitantes às vigas secundárias da solução em DLT.....	78
TABELA 36 – Verificação das deformações da viga VS2.....	78
TABELA 37 - Verificação da capacidade resistente das vigas secundárias.	79
TABELA 38 – Carregamento característico de peso próprio ($F_{G,k}$) nas vigas primárias.....	80
TABELA 39 – Carregamento característico de ocupação ($F_{Q,k}$) nas vigas primárias.	80
TABELA 40 - Dimensionamento das vigas primárias para o ELS para a solução em DLT.....	81
TABELA 41 - Propriedades da seção para as vigas primárias da solução em DLT.	81
TABELA 42 - Verificação das vigas primárias para o ELU.	81
TABELA 43 - Verificação do esmagamento das vigas primárias pelo apoio das vigas secundárias.	81
TABELA 44 – Verificação do cisalhamento das vigas secundárias com entalhe de 20 cm.....	83
TABELA 45 - Quantitativo dos elementos estruturais do <i>deck</i> para a solução em DLT.....	84
TABELA 46 - Comparativo entre cargas transmitidas aos pilares.	86

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
AWS	- <i>American Wood Council</i>
CBCS	- Conselho Brasileiro de Construção Sustentável
CNC	- <i>Computer Numerical Controlled</i>
DLT	- <i>Dowel-Laminated Timber</i>
NBR	- Norma Brasileira
NDS	- <i>National Design Specification</i>
SINAPI	- Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil

LISTA DE SÍMBOLOS

$A_{\text{influência}}$ – área de influência de um elemento

b – Dimensão da base da seção

C_D – Coeficiente de duração

C_M – Fator de umidade em serviço

C_r – Fator de compartilhamento de carga

C_t – Fator de temperatura

d – Diâmetro efetivo de um pino metálico em ligações

E' – Módulo de elasticidade de cálculo

$E_{c0,ef}$ – Módulo de elasticidade à compressão efetivo, paralelo às fibras

$E_{c0,m}$ – Módulo de elasticidade à compressão médio, paralelo às fibras

F – Valor característico

F' – Propriedade de cálculo

F'_b – Tensão admissível de cálculo para flexão

F'_v – Tensão admissível de cálculo para esforço cortante

F_d – Força solicitante de cálculo

$F_{G,k}$ – Solicitação permanente característica

$F_{Q,k}$ – Solicitação acidental característica

$F_{Q1,k}$ – Solicitação acidental característica principal

$F_{Qj,k}$ – Solicitação acidental característica secundária

$f_{c0,d}$ – Resistência à compressão máxima paralela às fibras, de cálculo

$f_{c90,d}$ – Resistência à compressão máxima perpendicular às fibras, de cálculo

f_{ed} – Resistência de embutimento da madeira, de cálculo

$f_{e0,d}$ – Resistência de embutimento paralela às fibras, de cálculo

$f_{e90,d}$ – Resistência de embutimento perpendicular às fibras, de cálculo

$f_{t0,d}$ – Resistência à tração máxima paralela às fibras, de cálculo

$f_{v0,d}$ – Resistência da madeira ao cisalhamento, de cálculo

f_{yd} – Resistência de escoamento de cálculo do aço

f_{yk} – Resistência de escoamento característica do aço

k_{mod} – Coeficiente de modificação da resistência

g – Gravidade

h – Altura da seção

I – Momento de inércia da seção solicitada

K_{CR} – Coeficiente de fluência segundo a norma americana NDS 2018

L_{viga} – comprimento de uma viga

l_1 – Vão máximo de uma peça para o qual se dispensa análise de flambagem
 M_d – Momento fletor solicitante de cálculo
 q_{viga} – carregamento uniforme de uma determinada viga
 q_{painel} – carregamento uniforme de um determinado painel
 R_d – Resistência de cálculo
 R_k – Resistência característica
 $R_{vd,1}$ – Resistência de cálculo em uma seção de corte de um pino metálico em uma ligação
 S – Momento estático da seção
 S_D – Efeito devido ao peso próprio
 S_L – Efeito devido a carga de ocupação
 S_d – Solicitação de cálculo
 $S_{d,uti}$ – Valor do efeito analisado quando a estrutura é carregada, de cálculo
 S_{im} – Valor limite do efeito analisado fixado por norma
 t – Comprimento de embutimento de um pino metálico na madeira em uma ligação
 V_d – Força cortante solicitante de cálculo

W_t – Módulo de resistência à flexão pura
 β_M – Coeficiente de correção Δ_T – Deflexão total de cálculo
 γ_G – Coeficiente de majoração de cargas permanentes
 γ_Q – Coeficiente de majoração de cargas acidentais
 γ_w – Fator de minoração da resistência
 Δ_{LT} – Deflexão imediata para carga de longa duração
 Δ_{ST} – Deflexão imediata para carga de curta/média duração
 δ_{elast} – Deformação elástica
 δ_{final} – Deformação final
 ρ – Peso específico
 Σ – Somatório de números
 $\sigma_{c0,d}$ – Tensão de compressão máxima paralela às fibras solicitante de cálculo
 $\sigma_{c90,d}$ – Tensão de compressão máxima perpendicular às fibras solicitante de cálculo
 $\sigma_{t0,d}$ – Tensão de tração máxima
 τ_d – Tensão de cisalhamento perpendicular às fibras solicitante de cálculo
 Φ – Coeficiente de fluência
 Ψ – Fator de combinação de ações variáveis paralela às fibras solicitante de cálculo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS.....	16
1.1.1 Objetivo geral.....	16
1.1.2 Objetivos específicos.....	16
1.2 JUSTIFICATIVA.....	16
2 A MADEIRA COMO MATERIAL ESTRUTURAL	18
2.1 SISTEMA DECKING.....	23
2.2 SISTEMA DLT	25
2.3 DIMENSIONAMENTO SEGUNDO A NBR 7190:1997	29
2.3.1 Estado Limite Último (ELU).....	31
2.3.2 Estado Limite de Serviço (ELS).....	33
2.3.3 Ligações	34
2.3.4 Disposições construtivas	37
2.4 DIMENSIONAMENTO SEGUNDO A NDS 2018	37
2.5 METODOLOGIA	39
3 PROJETO CONCEITUAL DA TORRE	41
3.1 LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA E CARACTERIZAÇÃO ARQUITETÔNICA	41
3.2 SOLUÇÕES ESTRUTURAIS.....	44
3.2.1 Sistema estrutural.....	44
3.2.2 Elementos principais.....	46
3.2.3 Espécies de madeira	47
3.2.3.1 Eucalipto Citriodora (<i>Eucalyptus citriodora</i>)	47
3.2.3.2 Pinus elliottii (<i>Pinus elliottii</i> var. <i>elliottii</i>).....	47
3.2.4 Contraventamentos.....	48
3.2.5 Ligações	49
3.2.6 Deck superior.....	50
3.2.7 Fundação.....	51
3.3 PRESCRIÇÕES PARA O PROJETO BÁSICO.....	52
3.4 DISPOSIÇÕES FINAIS.....	53
4 PROJETO BÁSICO DO DECK: SOLUÇÃO EM DECKING	54
4.1 SOLICITAÇÕES CARACTERÍSTICAS.....	54
4.1.1 Peso próprio	55

4.1.2	Uso/ocupação.....	55
4.1.3	Cargas horizontais.....	55
4.2	CONSIDERAÇÕES DE PROJETO	56
4.3	DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS DO <i>DECK</i>	56
4.3.1	Esquema global dos elementos do <i>deck</i>	57
4.3.2	Réguas	58
4.3.3	Barrotes	61
4.3.4	Vigas secundárias	64
4.3.5	Vigas primárias	66
4.3.6	Ligações do <i>deck</i>	68
4.4	QUANTITATIVO DAS PEÇAS DO <i>DECK</i>	71
5	PROJETO BÁSICO DO <i>DECK</i>: SOLUÇÃO EM DLT	73
5.1	SOLICITAÇÕES CARACTERÍSTICAS.....	73
5.1.1	Peso próprio	73
5.1.2	Uso/ocupação.....	74
5.1.3	Carregamento horizontal	74
5.2	DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS DO <i>DECK</i>	74
5.2.1	Placas de DLT	75
5.2.2	Vigas secundárias	76
5.2.3	Vigas primárias	79
5.2.4	Ligações do <i>deck</i>	82
5.3	QUANTITATIVO DAS PEÇAS DO <i>DECK</i> PARA A SOLUÇÃO EM DLT	83
6	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	85
6.1	COMPARAÇÃO ESTRUTURAL	85
6.2	DEMAIS COMPARATIVOS	87
7	CONCLUSÃO.....	89
7.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	91
	REFERÊNCIAS	92
	APÊNDICE 1 – PLANTAS E CORTES DA SOLUÇÃO EM <i>DECKING</i>	95
	APÊNDICE 2 – DETALHES DAS LIGAÇÕES DA SOLUÇÃO EM <i>DECKING</i>	96
	APÊNDICE 3 – VERIFICAÇÃO DAS RÉGUAS (<i>DECKING</i>).....	97
	APÊNDICE 4 – VERIFICAÇÃO DOS BARROTES (<i>DECKING</i>)	99
	APÊNDICE 5 – VERIFICAÇÃO DAS VIGAS SECUNDÁRIAS (<i>DECKING</i>).....	101
	APÊNDICE 6 – VERIFICAÇÃO DAS VIGAS PRIMÁRIAS (<i>DECKING</i>)	103

APÊNDICE 7 – PLANTAS E CORTES DA SOLUÇÃO EM DLT.....	105
APÊNDICE 8 – VERIFICAÇÃO DAS VIGAS SECUNDÁRIAS (DLT)	106
APÊNDICE 9 – VERIFICAÇÃO DAS VIGAS PRIMÁRIAS (DLT).....	107

1 INTRODUÇÃO

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Projetar, em nível básico, o deck de uma torre de observação em estrutura de madeira utilizando uma solução em *decking* e outra em *Dowel-Laminated Timber* e comparar essas soluções estruturalmente em termos de volume e peso de madeira e quanto às cargas transmitidas aos pilares.

1.1.2 Objetivos específicos

Desenvolver o projeto conceitual de uma torre de observação em estrutura de madeira; dimensionar os elementos de um *deck* tradicional (com sistema *decking*); dimensionar os elementos de um sistema em *Dowel-Laminated Timber*.

1.2 JUSTIFICATIVA

Segundo Shigue (2018), as tecnologias aplicadas a estruturas de madeira vêm sendo aprimoradas em ritmo acelerado nas últimas décadas. Para Kuklík (2008), hoje, com os sistemas de “madeira engenheirada”, encontra-se na madeira um material resistente (e ao mesmo tempo flexível), sustentável e com apelo estético único. De acordo com Dias (2018), o desenvolvimento tecnológico para este material pode ser observado em toda a sua cadeia: atualmente, o cultivo de madeira pode ser sustentável de forma a movimentar a economia sem ameaçar o meio-ambiente; a tecnologia empregada no cultivo também possibilita se elevar a qualidade do material produzido, agregando valor a esta matéria prima; as tecnologias de processamento da madeira potencializam o seu aproveitamento, diminuindo o desperdício de material e preservando suas propriedades mecânicas. Segundo Gong (2018), o surgimento de novos materiais também possibilita hoje a preservação das características da madeira ao longo do tempo, aumentando sua vida útil. Ainda, o autor ressalta que o aprofundamento dos conhecimentos acerca do comportamento deste material e o desenvolvimento da engenharia estrutural permitem a modelagem de estruturas com

precisão mesmo com elementos de arquitetura complexos, o que dá mais liberdade aos projetistas.

Todavia, observa-se que esta “nova era” da madeira ainda é pouco difundida no Brasil: grande parte dos escritórios de engenharia que fazem projetos de madeira ainda utilizam os sistemas construtivos considerados “tradicionais”, principalmente o de madeira serrada (Shigue, 2018). Algumas hipóteses que podem explicar este cenário são: no Brasil, há poucos fornecedores que trabalham com novas tecnologias de madeira (principalmente madeira massiva, como o *Dowel-Laminated Timber*), o que eleva seus preços e as torna menos atrativas; e também há, culturalmente, um pensamento popular de que a madeira é um material inferior ao aço e ao concreto, menos durável e resistente, o que leva a subvalorização da madeira como protagonista estrutural (Pfeil; Pfeil, 2003).

Desta forma, se vê necessária a comparação técnica entre as tecnologias tradicionais das construções em madeira e as novas tecnologias que estão sendo aplicadas fora do Brasil, mas que no cenário nacional ainda não são difundidas, uma vez que há ganhos apontados por Smith (2015) e Gong (2019) na utilização de sistemas de madeira engenheirada. Escolhe-se comparar o sistema de *decking* por ser constituído peças simples de madeira serrada e parafusada e o sistema de DLT por ser o mais recentemente desenvolvido quando comparado aos sistemas similares de CLT (*Cross-Laminated Timber*) e NLT (*Nail-Laminated Timber*).

2 A MADEIRA COMO MATERIAL ESTRUTURAL

A madeira foi um dos primeiros materiais usados pelos seres humanos para fim estrutural, juntamente com a rocha. Atribui-se a escolha da madeira como material de construção até o século XIX a uma composição de fatores, como por exemplo a relativa facilidade com que se pode extrair a madeira do ambiente e sua boa relação resistência/peso (Pfeil; Pfeil, 2003). Uma representação das primeiras edificações construídas com madeira é apresentada na FIGURA 1. O emprego da madeira em residências confere a essas um bom isolamento térmico, uma das razões que também justifica o uso milenar da madeira como material construtivo.

FIGURA 1 – Primeiras casas de madeira.



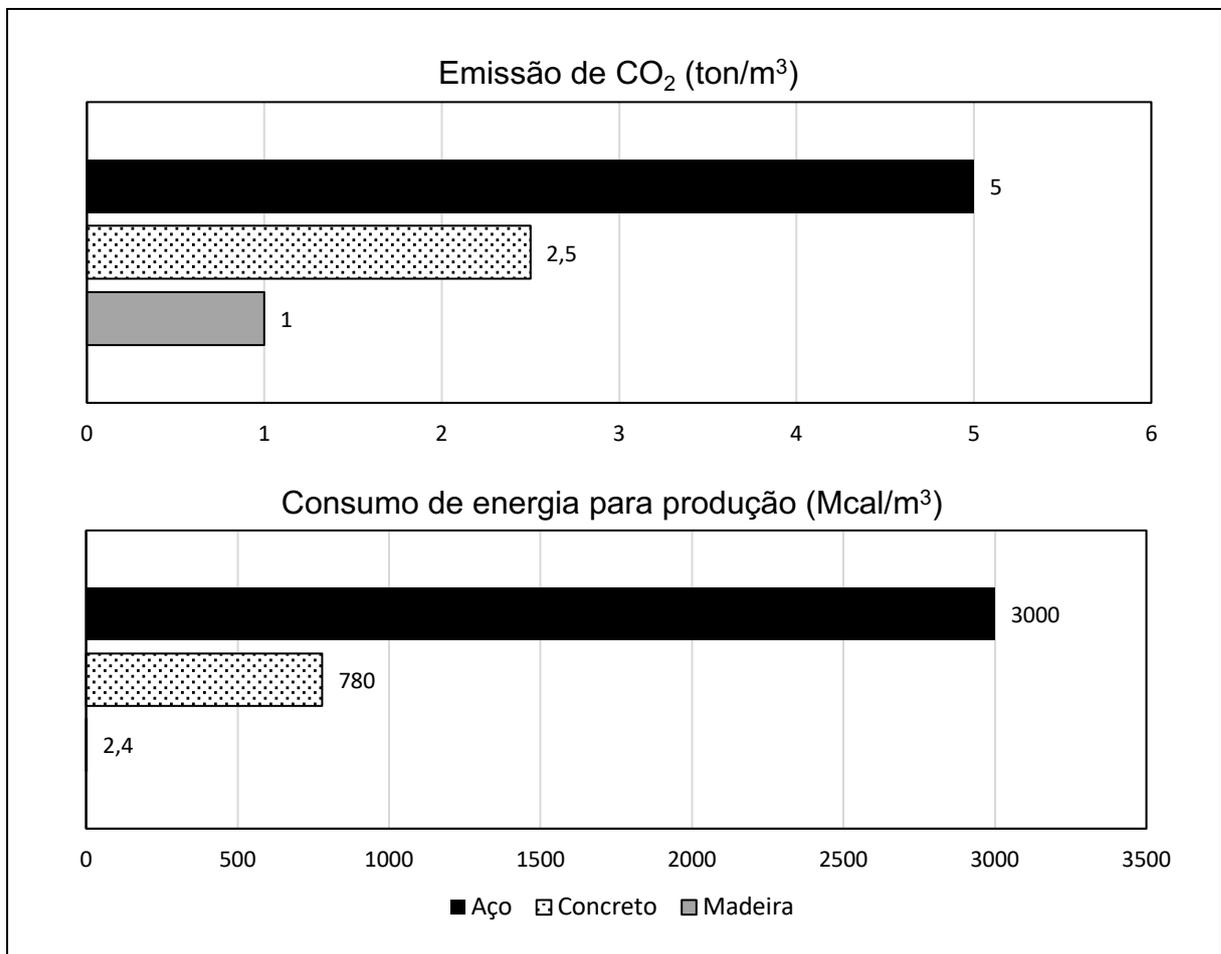
FONTE: Kuklík (2008).

A substituição da madeira pela alvenaria, ocorrida a partir do século XVI, é atribuída por Kuklík (2008) ao desenvolvimento industrial que tornou acessíveis o concreto e o tijolo. Adicionalmente, na Europa no século XVIII restrições foram impostas ao uso da madeira como elemento estrutural, limitando o emprego em revestimentos e telhados apenas. Kuklík (2008) atribui essas restrições à carência de tecnologias que melhorassem a qualidade da madeira disponível.

Segundo Pfeil; Pfeil (2003) e Kuklík (2008), com o uso da madeira se encontra uma forma de construir edificações de alto desempenho que não comprometam os recursos naturais, com menos perdas e peças de maior qualidade uma vez que a madeira é um dos recursos mais sustentáveis disponíveis ao homem e suas novas tecnologias de processamento permitem a confecção de peças mais resistentes que

aço e concreto. A leveza também é uma característica comum a todas as estruturas de madeira. O estudo comparativo feito por Vara (2015), por exemplo, 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. Estudos em termos de consumo de energia para produção e emissão de CO₂ comparando madeira, aço e concreto (tradicionais materiais de construção) também foram conduzidos por LNEC e Piazza et al. (1976 e 2014 citados por NETO, 2019), e seus resultados são mostrados no GRÁFICO 1.

GRÁFICO 1 – Comparação entre aço, concreto e madeira.



FONTE: Piazza et al. (2014); e LNEC (1976) apud Neto (2019).

Naumovski (2019) cita que um conhecimento aprofundado sobre madeira potencializa o seu uso como um material estrutural, de forma que as propriedades mecânicas e físicas sejam exploradas ao máximo. Segundo o autor, é necessário, portanto, se analisar a madeira sob uma ótica macroscópica e microscópica (incluindo suas fibras e células). A boa relação resistência/peso que as madeiras em geral

apresentam é explicada por Naumovski (2019) e Pfeil; Pfeil (2003) como inerente à organização da madeira em fibras, cujo formato é aproximadamente cilíndrico. A orientação destas células no sentido longitudinal do tronco faz com que a madeira seja um material anisotrópico, isto é, com propriedades que variam conforme a direção observada.

Embora se verifique a incidência de três direções principais (radial, tangencial e longitudinal), de forma prática a NBR 7190:1997 classifica as propriedades das madeiras em duas direções principais: paralelamente e perpendicularmente à orientação das fibras, sendo que as madeiras apresentam resistências mecânicas superiores e maior rigidez na direção paralela às fibras.

Adicionalmente, o caráter higroscópico da madeira faz com que suas propriedades físicas e mecânicas variem conforme sua umidade interna, que por sua vez, varia com a umidade relativa do ar em que se encontram os elementos estruturais de madeira. Coutinho (1999) e Pfeil; Pfeil (2003) verificaram que a retração (cujo efeito é a mudança dimensional da peça de madeira) na direção tangencial da madeira é o dobro da direção radial, enquanto na direção longitudinal este efeito é desprezível.

Por ser um material natural, a madeira é suscetível a defeitos que podem ser provenientes tanto do crescimento do tronco quanto do processamento das peças. São exemplos de defeitos naturais da madeira os nós e as gretas (também chamadas de ventas na literatura). Defeitos de processamento incluem o abaulamento, a arqueadura, as quinas mortas (também encontradas como esmoadas na literatura), as fendas e a ocorrência de fibras reversas, que também pode ter origem natural (Pfeil; Pfeil, 2003).

Outros fatores inerentes da composição química e biológica da madeira são o seu caráter combustível e a sua susceptibilidade a decomposição e ataques por agentes bióticos. Estas características desvantajosas para o uso da madeira, porém, podem ser contornadas com tratamentos químicos, manutenções preventivas e projetos com foco em durabilidade, como aponta De Mello Scaliante et al. (2016).

Com o advento de novas tecnologias construtivas em madeira no século XIX, como a Madeira Laminada Colada (MLC), e com o aprimoramento das técnicas de cultivo, serragem e desdobramento da madeira (que, em conjunto, originaram as terminologias de “madeira engenheirada” e “madeira massiva”), a madeira vem ganhando espaço na construção civil. Ano após ano, o número de projetos que

utilizam a madeira de forma massiva aumenta (Correia, 2009 e Dias, 2018 e Shigue, 2018).

Neste cenário, Shigue (2018) observa uma vertente arquitetônica que valoriza este material no Brasil, dando protagonismo à madeira no sistema estrutural das edificações. Gong (2019) ressalta que o uso da madeira hoje (especialmente as madeiras engenheiradas) é reconhecida mundialmente como uma opção “verde”, encorajada por entidades públicas como peça-chave para o desenvolvimento sustentável e para as estratégias de redução das mudanças climáticas. Este conjunto de fatores ao mesmo tempo em que aumenta o valor econômico da madeira (tanto por aumento de demanda quanto por aumento da qualidade), pressiona o mercado da construção civil em direção à sustentabilidade (pela concorrência entre construções de alvenaria, aço e madeira), e este movimento tem potencial de modificar de forma significativa a pegada ambiental da indústria da construção civil.

Para se ter uma noção do impacto ambiental causado por construções de alvenaria e concreto armado (sistema construtivo mais tradicional nos cenários mundial e brasileiro), o Ministério do Meio Ambiente estima que mais de 50% dos resíduos sólidos gerados pelas atividades humanas sejam provenientes das construções. Essa estatística corrobora o número divulgado pela Comissão Europeia em 2014, de que as construções consomem aproximadamente metade dos materiais extraídos da natureza e metade da energia consumida mundialmente. Ainda, é relevante o dado de que no Brasil, em 2012, a indústria de cimento, sozinha, foi responsável por quase 30% das emissões de CO₂ advindas de processos industriais. (BNDES, 2016).

O movimento de valorização da madeira é global e tem crescido de forma exponencial, como apontado por Hairstans et al. (2018), que o atribuem não apenas à necessidade de alternativas mais sustentáveis para o setor da construção civil e aos avanços tecnológicos que foram feitos (como as madeiras engenheiradas) já mencionados, mas também à uma corrente mundial que busca tornar o setor mais automatizado, com sistemas pré-fabricados de construção a seco e apenas montados em obra. Naumovski (2019) levanta também o acordo assinado por diversos países na convenção de Paris 2015 no sentido de reduzir as emissões de carbono como um fator que contribui para o fomento do uso da madeira na indústria da construção, uma vez que segundo o levantamento de Fernandes Gasques et al. (2015) é estimado que para cada tonelada de concreto produzida seja lançada 1 ton de CO₂ na atmosfera

enquanto 1 m³ de madeira sequestra 1 ton de CO₂ (Dias, 2018). Ainda, segundo o Canadian Wood Council (2004), o concreto e o aço respectivamente gastam 12 e 20% mais energia, emitem 15 e 29% mais gases de efeito estufa (GEEs) e produzem 6 e 16% mais resíduos sólidos quando comparados à madeira enquanto materiais estruturais. No Brasil, este movimento se soma ainda à crescente preocupação da sociedade com o meio-ambiente e com o desempenho das edificações apontada pelo CBCS - Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (2014).

No entanto, embora se observe uma adoção crescente de sistemas de madeira na construção civil no Brasil, o que se verifica é a predominância de estruturas construídas com madeira serrada, em geral aplicadas para telhados e estruturas provisórias como formas e cimbramentos, enquanto as novas tecnologias de madeira engenheirada ainda são pouco difundidas e aplicadas (Shigue, 2018). Para a construção de pisos e lajes de madeira, por exemplo, o sistema de *decking* é uma das tecnologias mais usadas em pisos externos, uma vez que seu dimensionamento é relativamente simples e está previsto na norma brasileira em vigor. Em outros países, todavia, outras formas de madeira engenheirada já são utilizados, como por exemplo as tecnologias de *Cross Laminated Timber* (CLT, ou Madeira Laminada Cruzada), *Nail Laminated Timber* (NLT, ou Madeira Laminada Pregada) e *Dowel Laminated Timber* (DLT, que pode ser traduzido como Madeira Laminada Cavilhada). Esses três sistemas construtivos citados são de madeira massiva e trabalham com painéis sólidos de madeira, enquanto o sistema de *decking* pode ser classificado como um sistema tradicional, com vigas e barrotes. De acordo com Smith (2015), construções com madeira massiva demonstram uma redução de 20% na duração do cronograma de execução quando comparadas a sistemas construtivos tradicionais.

Como apontado por Gong (2019), as propriedades físicas e mecânicas de peças de madeira engenheirada (englobadas quando se usa madeira massiva) são melhores e mais previsíveis do que em peças confeccionadas com tecnologias tradicionais (como é o caso da madeira serrada) por questões de controle de fabricação inerentes à própria configuração desses tipos de materiais. Hairstans et al. (2018) ressaltam que os benefícios dos sistemas construtivos em madeira massiva, frente aos sistemas convencionais, são potencializados quando se utilizam madeiras de fonte local. Devido a esses fatores seria teoricamente possível, portanto, projetar estruturas mais eficientes do ponto de vista técnico com sistemas de madeira engenheirada, uma vez que se poderia trabalhar com uma menor variabilidade das

propriedades da madeira, quando comparadas a soluções tradicionais. A utilização ainda incipiente desses materiais no mercado da construção civil brasileira, justificam que o uso desses materiais seja investigado e considerado em estudos de caso como o deste trabalho.

2.1 SISTEMA DECKING

Decks são estruturas de laje usadas comumente em áreas externas de edificações. Mostra-se um exemplo de deck na FIGURA 2 a seguir. É estimado que cerca de 80% das residências dos Estados Unidos tenham áreas externas de vivência que se utilizem de soluções estruturais no sistema decking, tais como decks propriamente ditos, pátios, varandas ou sacadas (US Census, 2005, apud Ganguly, 2009). Ainda, estima-se que só nos Estados Unidos em 1996 havia cerca de 30 milhões de decks residenciais construídos (Truini, 1996, apud Ganguly, 2009).

FIGURA 2 - Exemplo de deck em casa na Serra da Bocaina – SP.

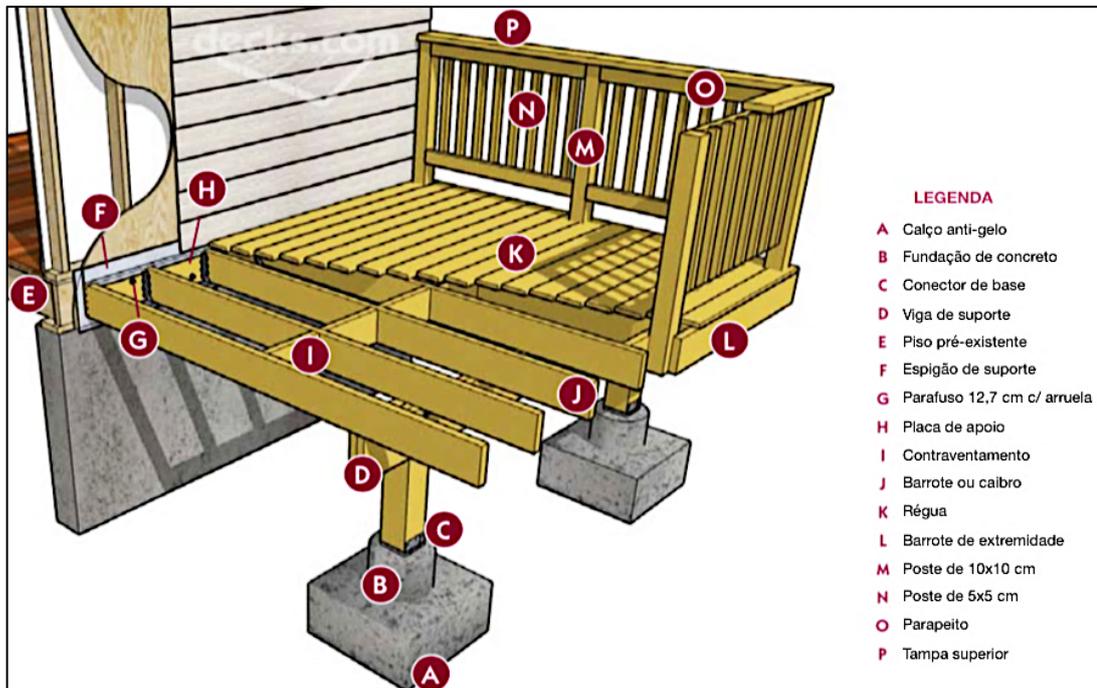


FONTE: Carpinteria (2018).

Um desenho esquemático da estrutura de um deck é apresentado na FIGURA 3. Estruturalmente, decks trabalham como um sistema hierárquico de vigas e pilares, em que as cargas solicitantes são transmitidas de régua (elemento K da FIGURA 3) para barrotes (elemento J da FIGURA 3) e destes para vigas (elemento D da FIGURA 3), que por sua vez são apoiadas nos pilares da estrutura. O dimensionamento dos

elementos que compõem um deck é relativamente simples, uma vez que se pode dimensionar cada elemento isoladamente, em função da hierarquia construtiva e mecânica (rigidez).

FIGURA 3 - Esquema de um deck de madeira.



FONTE: Adaptado de Trex.

Estimativas de custos, quantitativo de materiais e até um dimensionamento simplificado podem ser feitos de forma gratuita no site decks.com, gerenciado pela empresa norte americana Trex (que se auto intitula maior fabricante de decks do mundo). Simulando o orçamento no site decks.com para um deck de 60 m² (com dimensões de 12 m x 5 m), verifica-se que a estimativa de preços, dependendo da madeira escolhida, variam entre 4.300,00 USD (para pinheiro tratado¹) e 10.600,00 USD (para madeira dura exótica²), o que dá um valor por m² variando entre 71,67 e 176,67 USD. Estes valores corroboram os valores médios do metro quadrado de decks levantados por Ganguly (2009), que à época variavam entre 88,27 e 167,92 USD conforme a região do território norte-americano. A título de comparação, o preço de 1 m³ de concreto usinado bombeável gira em torno de 100 USD (Syverson, 2008).

¹ Pressure Treated Pine

² Exotic Hardwood

Como as lajes de concreto armado usualmente tem espessura variando entre 8 e 12 cm, pode-se estimar que o custo de uma laje em concreto varie entre 8,00 e 12,00 USD/m².

Como um elemento arquitetônico, os decks podem ser tratados de forma a assumirem aparência variada, como é apontado por Williams et al. (2010). Os diversos tratamentos possíveis de serem aplicados às madeiras aumentam a sua durabilidade tanto em uso interno quanto externo. Como abordado por Manzello; Suzuki (2014), todavia, o comportamento dos decks frente ao fogo é um aspecto que deve ser considerado em projeto, devendo ser previsto tratamento das peças para se verificar o Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF).

2.2 SISTEMA DLT

O sistema de *Dowel Laminated Timber* – que pode ser traduzido como Madeira Laminada Cavilhada, embora não exista ainda uma tradução consagrada na literatura brasileira – surgiu na década de 90 na Suíça, é conhecido na Europa como *Dübelholz* e consiste em um sistema de madeira laminada no qual as lâminas são justapostas e conectadas entre si por cavilhas, formando painéis contínuos, que estruturalmente podem ser considerados maciços, compostos exclusivamente de madeira. Na FIGURA 4 a seguir é mostrado um exemplo de painel de DLT.

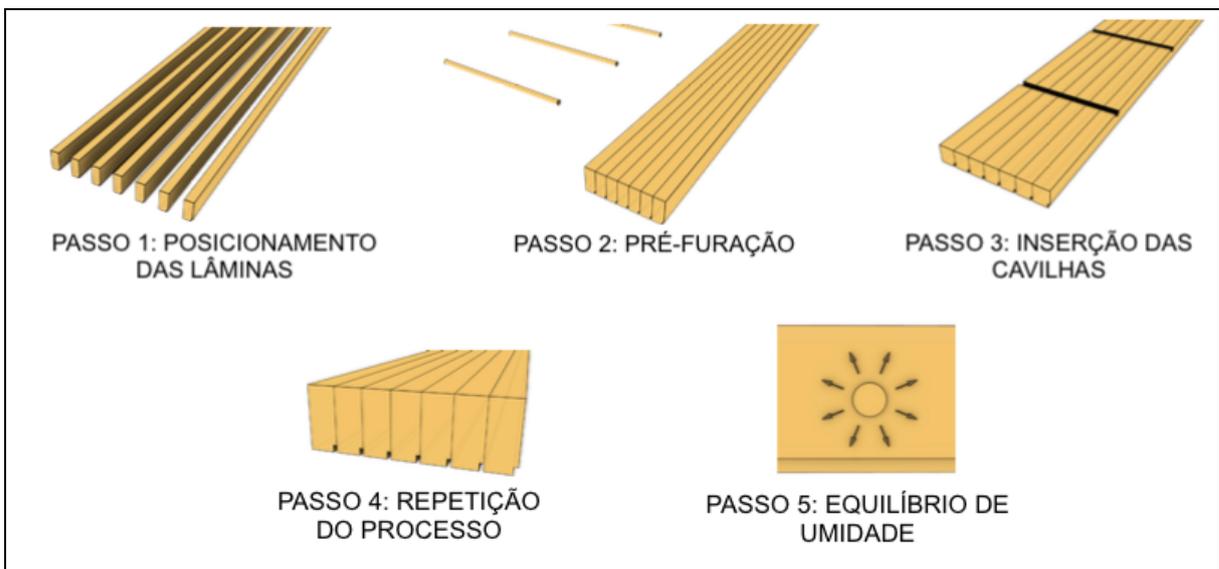
FIGURA 4 - Painel de DLT.



FONTE: StructureCraft (2019a).

Conforme definido por Gong (2019), o sistema de DLT é produzido com madeira resinosa, cujas lâminas têm 38 mm de espessura e altura variável entre 89 e 184 mm. O que diferencia os painéis de DLT e NLT (*Nail-Laminated Timber*, tecnologia precursora do DLT) é o tipo de conector: enquanto no NLT se utiliza pregos metálicos, no DLT são usadas cavilhas de madeira de alta densidade e espécies folhosas. Na FIGURA 5 é ilustrado o processo de fabricação dos painéis de DLT.

FIGURA 5 - Processo de fabricação dos painéis de DLT.



FONTE: Adaptado de StructureCraft (2019a).

Considerando as diferenças entre os sistemas NLT e DLT, Naumovski (2019) classifica o DLT como superior em todos os aspectos. Segundo o autor, o fato de que os painéis de DLT são todos conectados com *finger-joints* cria painéis mais resistentes e rígidos, contrapondo os problemas verificados nas juntas do NLT. Ainda, por ser um sistema feito apenas de madeira (sem elementos metálicos), o processo de produção de DLT pode ser feito com automação total em máquinas CNC (*Computer Numerical Controlled*), barateando seu custo no mercado, questão também discutida por Gong (2019) e StructureCraft (2019a).

O conhecimento do comportamento estrutural das placas de DLT é, hoje, pouco aprofundado, de modo que Gong (2019) e Naumovski (2019) apontam a ausência de referências no cenário mundial em termos de códigos e legislações, exceto por guias publicados por escritórios que já trabalham com esse tipo de

tecnologia, como é o caso do guia Dowel Laminated Timber: Design and Profile Guide do escritório norte-americano StructureCraft.

As cavilhas utilizadas para conectar as lâminas das placas de DLT são dimensionadas de modo a trabalharem, principalmente, ao cisalhamento, como acontece com os elementos de ligação tradicionais de fuste cilíndrico. Adicionalmente, durante a confecção dos painéis de DLT, as cavilhas são introduzidas nas lâminas com umidade inferior (enquanto a umidade das lâminas é de cerca de 19%, a umidade das cavilhas no momento de sua inserção é de cerca de 7%). Isso faz com que as cavilhas inchem ao entrarem em equilíbrio com a umidade das lâminas, de tal modo que seja mobilizada uma força de atrito entre as cavilhas e as lâminas, aumentando a rigidez das ligações e melhorando o desempenho das placas (Gong, 2019, e Naumovski, 2019, e Pereira, 2019, e StructureCraft, 2019).

Ainda, dentre os pontos positivos do uso de cavilhas em ligações de estruturas de madeira apontados por Pereira (2019) está a não utilização de adesivos geradores de Compostos Orgânicos Voláteis (VOCs); a principal desvantagem elencada pelo autor é a necessidade de recobrimento dos painéis com material de isolamento para garantir sua vedação completa, uma vez que a retração tangencial das peças de madeira pode ocasionar o surgimento de frestas entre as lâminas.

Estruturalmente, os painéis de DLT trabalham como lajes maciças. Pereira; Junior (2018), ensaiaram painéis com lâminas de duas espécies de Pinus (*Pinus taeda* e *Pinus Elliottii*) e cavilhas de Pau-roxo (*Peltogyne spp.*, *Leguminosae*), chegando a resultados de rigidez dos painéis de 84 kNm² e 727 kNm² para as direções transversal e longitudinal, respectivamente. Embora a metodologia construtiva adotada pelos autores não seja igual à encontrada nas demais fontes de literatura, pode-se considerar os valores de rigidez como uma referência.

Segundo o escritório de engenharia StructureCraft (2019), 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 reduzindo o desperdício de material. Por conta das dimensões dos painéis pré-fabricados em DLT, que variam entre 2,4 m x 6,0 m e 3,0 m x 18,0 m, o transporte acaba sendo sua maior limitação. A FIGURA 6 e a FIGURA 7 a seguir apresentam o registro da instalação de painéis

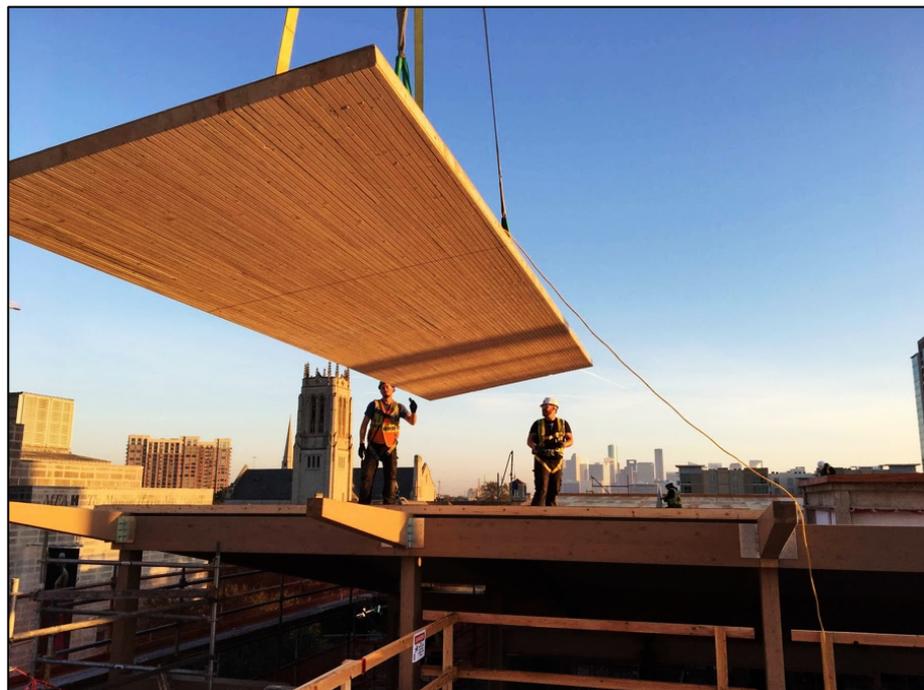
de DLT em um prédio na cidade de Atlanta e no Museu de Belas Artes da cidade de Houston, respectivamente.

FIGURA 6 - Painéis de DLT sendo posicionados no projeto T3 Atlanta.



FONTE: StructureCraft (2019b).

FIGURA 7 – Painéis de DLT sendo instalados no Museu de Belas Artes de Houston.



FONTE: StructureCraft (2017).

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, Figueroa; Moraes (2009) apontam que 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 e permitindo que a estrutura apresente tempo de resistência ao fogo suficiente para a evacuação da edificação, por exemplo.

Ainda que no exterior (principalmente na América do Norte e na Europa) a técnica construtiva de DLT já tenha sido empregada em construções diversas, como em museus (Museu de Belas Artes de Houston, já citado, por exemplo), aeroportos (instalações do Aeroporto de Smithers, no Canadá, por exemplo), hotéis (Hotel Magdalena, na capital do Texas, por exemplo) e edifícios corporativos (empreendimento “111 East Grand”, da cidade de Des Moines, por exemplo), esse sistema 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, como demonstrado por uma extensiva pesquisa realizada por Shigue (2018).

2.3 DIMENSIONAMENTO SEGUNDO A NBR 7190:1997

Neste subcapítulo é feita uma revisão da norma brasileira vigente aplicada para projetos em estruturas de madeira, NBR 7190:1997.

Partindo de uma abordagem generalista, a fim de se atestar as condições de segurança de uma estrutura a equação a seguir deve ser satisfeita:

$$S_d \leq R_d \quad (1)$$

onde:

- S_d é a solicitação de cálculo; e
- R_d é a resistência de cálculo.

De forma genérica, a Equação 1 impõe que as solicitações de cálculo jamais sejam superiores às resistências de cálculo. As solicitações de cálculo são obtidas pela combinação de solicitações características atuantes na estrutura ao longo de sua vida, conforme a sua natureza e duração. A expressão (2),

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{G_i} F_{G_{i,k}} + \gamma_Q \left[F_{Q_{1,k}} + \sum_{j=2}^n \psi_{0_j} F_{Q_{j,k}} \right] \quad (2)$$

descreve a combinação normal de ações para o estado limite último segundo a NBR 6120:2003, onde:

- $F_{G_{i,k}}$ representa o valor característico das ações permanentes;
- $F_{Q_{1,k}}$ é o valor característico da ação variável considerada como ação principal para a combinação considerada;
- $\psi_{0_j} F_{Q_{j,k}}$ são valores reduzidos de combinação das demais ações variáveis;
- Os fatores de combinação (ψ) são definidos na Tabela 2 da NBR 7190:1997;
- Os fatores de majoração γ_G são definidos na Tabela 3 da NBR 7190:1997, enquanto os fatores γ_Q são definidos na Tabela 6 da NBR 7190:1997;
- m é o número de ações permanentes atuantes na estrutura;
- n é o número de ações variáveis atuantes na estrutura (exceto a ação variável principal).

A equação (3),

$$F_{d,uti} = \sum_{i=1}^m F_{G_{i,k}} + \sum_{j=1}^n \psi_{2_j} F_{Q_{j,k}} \quad (3)$$

descreve a combinação de longa duração considerada para o estado limite de serviço.

A resistência de cálculo de um elemento pode ser calculada a partir de uma resistência característica, lançando-se mão de coeficientes de modificação e minoração, conforme a equação

$$R_d = \frac{k_{mod} R_k}{\gamma_w} \quad (4)$$

onde:

- k_{mod} é o produto dos coeficientes $k_{mod,1}$, $k_{mod,2}$ e $k_{mod,3}$, obtidos conforme item 6.4.4 da NBR 7190:1997;
- R_k é a resistência característica;
- γ_w é o fator de minoração, obtido conforme item 6.4.5 da NBR 7190:1997.

Ainda, a rigidez efetiva ($E_{c0,ef}$), por sua vez, é calculada com a equação:

$$E_{c0,ef} = E_{c0,m} \cdot k_{mod,1} \cdot k_{mod,2} \cdot k_{mod,3} \quad (5)$$

2.3.1 Estado Limite Último (ELU)

O dimensionamento para o ELU segundo a NBR 7190:1997 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. Ainda, há considerações específicas para o dimensionamento de ligações.

Garante-se segurança frente à tração e compressão na flexão, respectivamente satisfazendo-se as equações

$$\sigma_{t0,d} = \frac{M_d}{W_t} \leq f_{t0,d} \quad (6)$$

$$\sigma_{c0,d} = \frac{M_d}{W_c} \leq f_{c0,d} \quad (7)$$

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, calculado segundo o item 7.3.3 da NBR 7190:1997;
- $f_{t0,d}$ e $f_{c0,d}$ são as resistências à tração e compressão máxima paralela às fibras, de cálculo, respectivamente.

Para o cálculo dos momentos solicitantes, deve-se considerar o vão teórico entre apoios como sendo o menor valor entre:

- a) a distância entre os eixos dos apoios, ou
- b) a distância entre as faces dos apoios somada à altura da seção transversal da peça no meio do vão (limitando-se ao valor de 10 cm, conforme item 7.3.3 da NBR 7190:1997)

A resistência da peça ao cisalhamento é verificada satisfazendo-se a equação (8).

$$\tau_d \leq f_{v0,d} \quad (8)$$

onde:

- τ_d é a tensão de cisalhamento de projeto perpendicular às fibras solicitante de cálculo no ponto mais solicitado da peça;
- $f_{v0,d}$ é a resistência de projeto da madeira ao cisalhamento, de cálculo.

O cálculo da tensão de cisalhamento perpendicular às fibras pode ser feito pela equação (9), conhecida como fórmula de Jourawski.

$$\tau_d = \frac{V_d \cdot S}{b \cdot I} = \frac{3 \cdot V_d}{2 \cdot b \cdot h} \quad (\text{peças com seção retangular}) \quad (9)$$

onde:

- V_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;
- h é a altura da seção.

Garante-se que não haverá esmagamento da peça em seus apoios verificando a equação (10).

$$\sigma_{c90,d} = \frac{R_d}{b \cdot c} \leq f_{c90,d} \quad (10)$$

onde:

- R_d é a reação no apoio do elemento analisado;
- c é o comprimento da peça sobre o apoio;
- $f_{c90,d}$ é a resistência de cálculo da madeira à compressão no sentido perpendicular às fibras, para o qual a NBR 7190:1997 permite adotar como sendo 25% da resistência à compressão paralela às fibras.

Para determinar o máximo comprimento (l_1) da peça para o qual se garante a estabilidade lateral, a equação

$$\frac{l_1}{b} < \frac{E_{c,ef}}{\beta_M \cdot f_{cd}} \quad (11)$$

é utilizada, onde:

- β_M é o coeficiente de correção, que depende da relação h/b e cujos valores são tabelados conforme TABELA 1.

TABELA 1 - coeficientes de correção β_M .

h/b	β_M
1	6,0
2	8,8
3	12,3
4	15,9
5	19,5
6	23,1
7	26,7
8	30,3
9	34,0
10	37,6
11	41,2
12	44,8
13	48,5
14	52,1
15	55,8
16	59,4
17	63,0
18	66,7
19	70,3
20	74,0

FONTE: ABNT NBR 7190 (1997).

2.3.2 Estado Limite de Serviço (ELS)

A verificação feita para o ELS (também chamado de Estado Limite de Utilização na norma) consiste em garantir a segurança da estrutura frente a:

- a. deformações excessivas que afetem sua utilização ou estética;
- b. danos a elementos não-estruturais em decorrência dessas deformações;

ou

- c. vibrações excessivas.

Para tanto, deve-se garantir que as deformações observadas com a ocorrência das solicitações características sejam inferiores aos limites previstos na norma, conforme exposto na equação

$$S_{d,uti} \leq S_{lim} \quad (12)$$

onde:

- $S_{d,uti}$ é o valor do efeito analisado quando a estrutura é carregada;
- S_{lim} é o valor limite fixado na norma.

Para fim de cálculo, admite-se que a estrutura tenha comportamento elástico-linear. No cálculo das deformações, deve-se considerar o efeito da fluência da madeira. A NBR 7190:1997 prevê que a fluência seja considerada pela multiplicação

da deformação instantânea elástica por um fator de fluência, que depende da classe de umidade e duração dos carregamentos em questão, conforme disposto na TABELA 2.

TABELA 2 - coeficientes de fluência φ .

Classes de carregamento	Classes de umidade	
	(1) e (2)	(3) e (4)
Permanente ou longa duração	0,8	2,0
Média duração	0,3	1,0
Curta duração	0,1	0,5

FONTE: ABNT (1997).

A deformação de cálculo da estrutura (δ) é obtida pela equação

$$\delta_{final} = \delta_{elast}(1 + \varphi) \quad (13)$$

onde:

- δ_{elast} é a deformação elástica;
- φ é o coeficiente de fluência.

Ainda, a NBR 7190:1997 estabelece que a deformação elástica instantânea deva ser calculada considerando-se as combinações de ações de longa duração e levando-se em conta a rigidez efetiva, calculada com a Equação 5 já apresentada.

Para construções denominadas "especiais" (categoria na qual torres são englobadas), a norma brasileira não estabelece deformações limites fixas, apenas mencionando que estas devem ser estabelecidas pelo proprietário da construção ou por outras normativas específicas.

Para construções correntes, a NBR 7190:1997 estabelece no item 9.2.1 que a flecha efetiva não deve superar 1/200 dos vãos nem 1/100 do comprimento dos balanços correspondentes.

2.3.3 Ligações

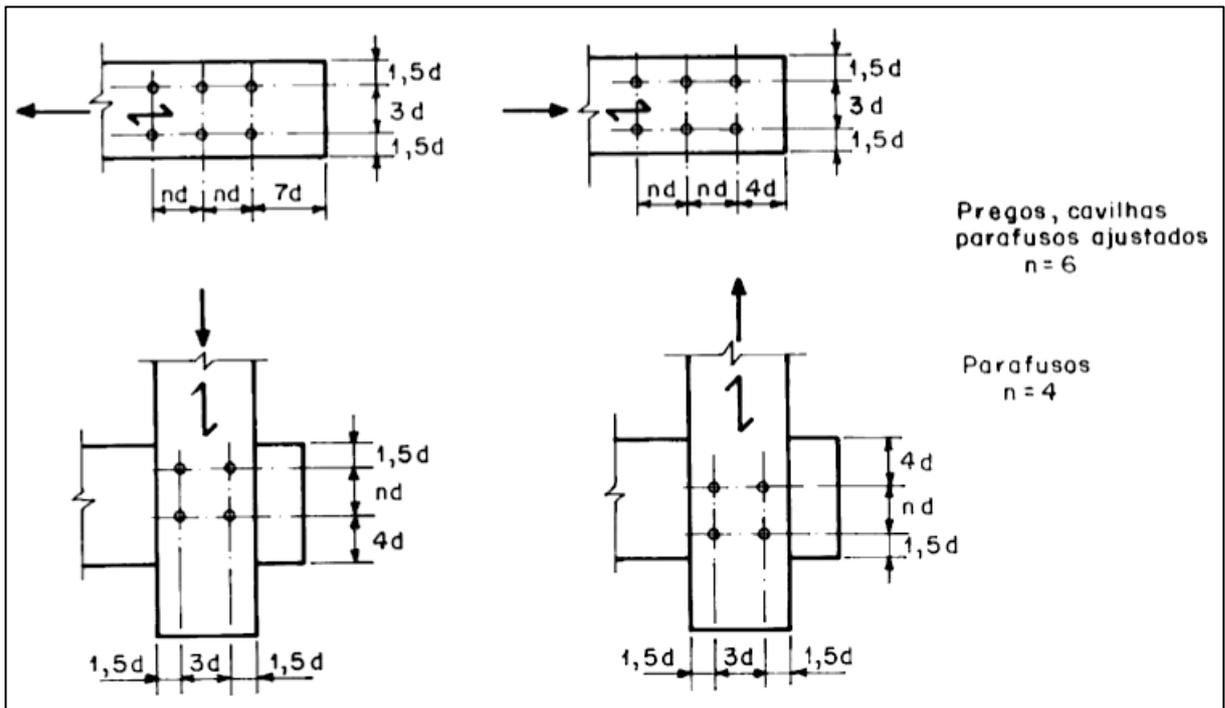
Para as ligações da estrutura, segundo a NBR 7190:1997, deve-se considerar a possibilidade de atingimento do ELU (isto é, $R_d = S_d$) nos seguintes cenários:

- atingimento do limite de resistência da madeira,
- atingimento do limite de resistência da peça estrutural, ou
- atingimento do limite de resistência do elemento de ligação.

A segurança de conectores ou elementos intermediários de aço deve ser verificada em consonância com a NBR 8800:2008. Ainda, a NBR 7190:1997 sugere que se evite ligações excêntricas ao eixo teórico de transmissão das cargas.

Em ligações com pinos, como cavilhas, pregos e parafusos, deve-se respeitar os espaçamentos mínimos dispostos conforme a FIGURA 8.

FIGURA 8 - Espaçamentos em ligações com pinos.



FONTE: ABNT (1997).

A normativa permite, ainda, na falta de determinação experimental específica, que sejam consideradas as seguintes relações entre as resistências de embutimento (f_e) e as resistências à compressão da madeira:

$$f_{e0,d} = f_{c0,d} ; \quad (14)$$

$$f_{e90,d} = 0,25 f_{c0,d} \cdot \alpha_e ; \quad (15)$$

onde:

- α_e é um coeficiente tabelado conforme TABELA 3.

TABELA 3 - Valores de α_e .

Diâmetro do pino (cm)	Coefficiente α_e
$\leq 0,62$	2,50
0,95	1,95
1,25	1,68
1,6	1,52
1,9	1,41
2,2	1,33
2,5	1,27
3,1	1,19
3,8	1,14
4,4	1,10
5,0	1,07
$\geq 7,5$	1,00

FONTE: ABNT (1997).

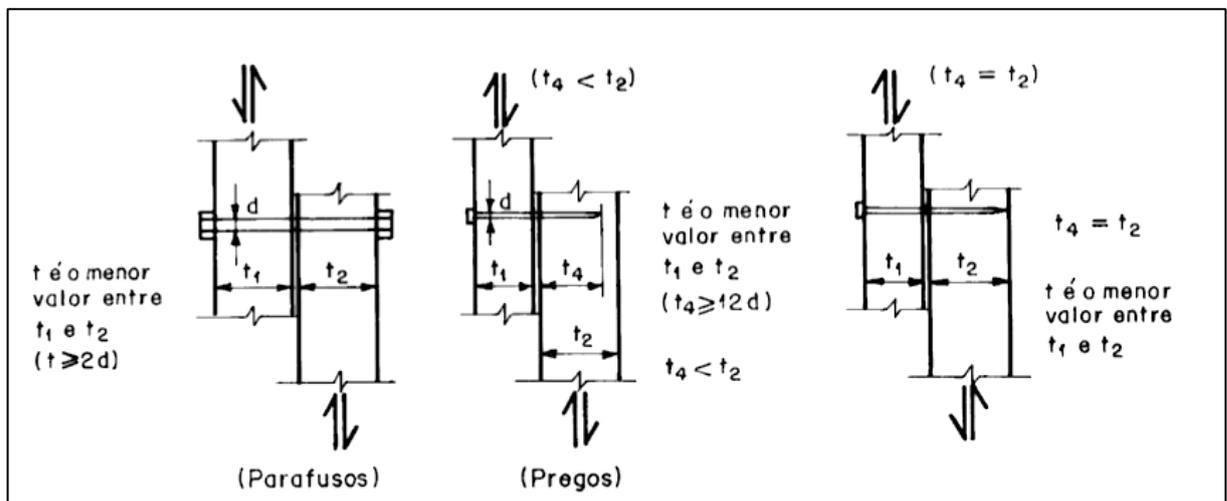
A NBR 7190:1997 recomenda que parafusos estruturais tenham diâmetro igual ou superior a 10 mm, e tenham resistência característica de escoamento f_{yk} de pelo menos 240 MPa.

De forma complementar, a NBR 7190:1997 estabelece:

A resistência de um pino, correspondente a uma dada seção de corte entre duas peças de madeira, é determinada em função das resistências de embutimento f_{wed} das duas madeiras interligadas, da resistência de escoamento f_{yd} do pino metálico, do diâmetro d do pino e de uma espessura convencional t , tomada com a menor das espessuras t_1 e t_2 de penetração do pino em cada um dos elementos ligados.

Essa situação é ilustrada na FIGURA 9.

FIGURA 9 - Pinos em corte simples.



FONTE: ABNT (1997).

A resistência de cálculo de um pino $R_{vd,1}$ em uma única seção de corte é calculada pelas equações:

$$R_{vd,1} = 0,4 \frac{t^2}{\beta} f_{ed} \quad (se \beta \leq \beta_{lim}) \quad (16)$$

$$R_{vd,1} = 0,625 \frac{d^2}{\beta_{lim}} f_{yd} \quad (se \beta > \beta_{lim}) \quad (17)$$

onde:

- t é uma espessura convencional, definida conforme FIGURA 9;
- d é o diâmetro do pino;
- β e β_{lim} são parâmetros adimensionais.

A escolha de qual equação considerar depende do valor encontrado para os parâmetros β e β_{lim} , calculados conforme as equações:

$$\beta = \frac{t}{d} \quad (18)$$

$$\beta_{lim} = 1,25 \sqrt{\frac{f_{yd}}{f_{ed}}} \quad (19)$$

Se $\beta \leq \beta_{lim}$, a resistência da seção de corte fica limitada à resistência de embutimento na madeira; caso contrário, a resistência da seção limita-se à resistência à flexão do pino. A resistência global da ligação é obtida multiplicando-se a resistência de uma única seção de corte pelo número de seções de corte encontradas.

2.3.4 Disposições construtivas

Além de considerações a respeito da durabilidade dos elementos estruturais, a norma estabelece que peças principais isoladas devem ter área de seção transversal superior a 50 cm^2 e não devem ter espessura inferior a 5 cm. Em peças secundárias, esses limites passam a ser 18 cm^2 e 2,5 cm respectivamente.

2.4 DIMENSIONAMENTO SEGUNDO A NDS 2018

Para o dimensionamento de elementos estruturais de madeira, a NDS dispõe de fatores de ajuste para as propriedades mecânicas que introduzem a influência da

umidade, temperatura, dimensões das peças e condições de apoio na análise estrutural. Fatores gerais de majoração e minoração são apresentados no capítulo 2 da NDS, juntamente com valores de referência para projetos estruturais de madeira.

De forma genérica, o dimensionamento de estruturas de madeira previsto pela NDS segue o critério de tensões admissíveis, em que se comparam a resistência de cálculo da peça a determinado esforço e as solicitações de cálculo. Para a determinação das resistências, todavia, utiliza-se a equação:

$$F' = F \cdot (\text{Fatores de ajuste}) \quad (22)$$

onde:

- F' é a propriedade de cálculo (resistência, módulo de elasticidade); e
- F é o valor característico da propriedade calculada.

Para o cálculo das solicitações de projeto, a abordagem da norma ASCE 7-02 para análise de máximas tensões admissíveis é a de verificar as combinações previstas em sua seção 2.4. Para o caso estudado e considerando os efeitos de peso próprio e uso/ocupação, aplica-se a seguinte combinação:

$$S_d = S_D + S_L \quad (23)$$

onde:

- S_d a solicitação de cálculo;
- S_D é o efeito devido à carga de peso próprio (*dead load*);
- S_L é o efeito devido à carga de ocupação (*live load*).

No QUADRO 1 (tabela 2.3.2 da NDS de 2018) a seguir são especificados os coeficientes de duração de carga (C_D), aplicáveis em análise de máximas tensões admissíveis.

QUADRO 1 - Fatores de duração (C_D) e aplicações comuns.

Duração da carga	C_D	Cargas de projeto comuns
Permanente	0,9	Peso próprio
Dez anos	1,0	Ocupação
Dois meses	1,15	Neve
Sete dias	1,25	Carga de construção
Dez minutos	1,6	Vento e terremoto
Instantânea	2,0	Impacto

FONTE: American Wood Council (AWS) (2018a).

No QUADRO 2 (tabela 2.3.3 da NDS) a seguir são relacionados os coeficientes a serem considerados para o efeito da variação de temperatura nas estruturas (C_t).

QUADRO 2 - Fator de temperatura (C_t).

Valores referenciais de projeto	Condições de umidade em serviço	C_t		
		$T \leq 37,8^\circ\text{C}$	$37,8^\circ\text{C} < T \leq 51,7^\circ\text{C}$	$51,7^\circ\text{C} < T \leq 65,6^\circ\text{C}$
F_t, E, E_{min}	Úmido ou Seca	1,0	0,9	0,9
$F_b, F_v, F_c, e F_{c\perp}$	Seca	1,0	0,8	0,7
	Úmida	1,0	0,7	0,5

FONTE: American Wood Council (AWS) (2018a)

As condições de umidade às quais a estrutura estará submetida em serviço são introduzidas no cálculo estrutural por meio do fator C_M , conforme disposto no item 4.3.3 da NDS. Usualmente é adotado $C_M = 1,0$.

Em aplicações de elementos justapostos, como é o caso das lâminas das placas de DLT, a NDS prevê ainda em seu item 4.3.9 que os valores de resistência dos elementos estruturais sejam multiplicados por um fator de compartilhamento de carga (C_r) de 1,15.

O cálculo da deflexão para carregamento de longa duração é similar ao feito com a normativa brasileira NBR 7190:1997. A NDS de 2018 estabelece que a deflexão Δ_T de um elemento seja calculada com a equação

$$\Delta_T = K_{cr}\Delta_{LT} + \Delta_{ST} \quad (24)$$

onde:

- K_{cr} é coeficiente de fluência (igual a 2,0 para painéis estruturais e igual a 1,5 para madeira serrada em condições de umidade padrão);
- Δ_{LT} é a deflexão imediata devida ao carregamento de longa duração;
- Δ_{ST} é a deflexão devida ao carregamento de curta ou média duração.

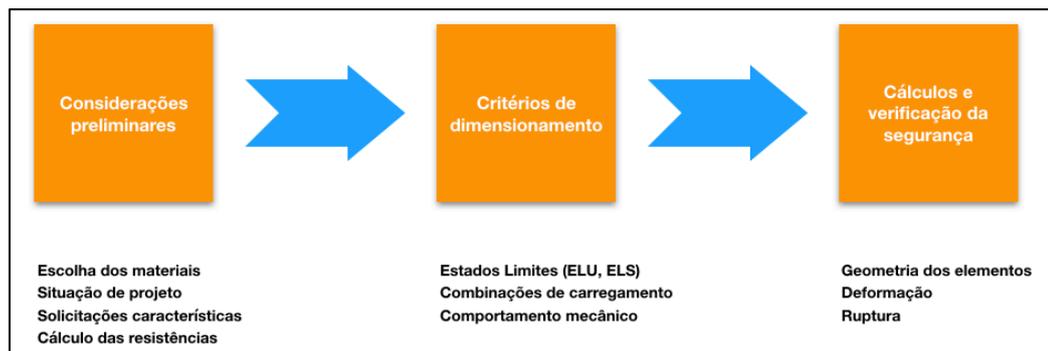
2.5 METODOLOGIA

A fim de comparar 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 *Dowel Laminated Timber* (DLT). A fim de manter uma base comparativa, para as duas soluções propostas é utilizado como base o projeto conceitual 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. As soluções são propostas de forma a atender às disposições da NBR 7190:1997. Essa norma, porém, não fornece subsídios para o dimensionamento dos painéis de DLT. Recorre-se, então, a um guia de dimensionamento feito pelo escritório StructureCraft, o qual segue os padrões norte-americanos da norma NDS 2018.

Para a elaboração dos projetos básicos, é seguido o fluxograma apresentado na FIGURA 10.

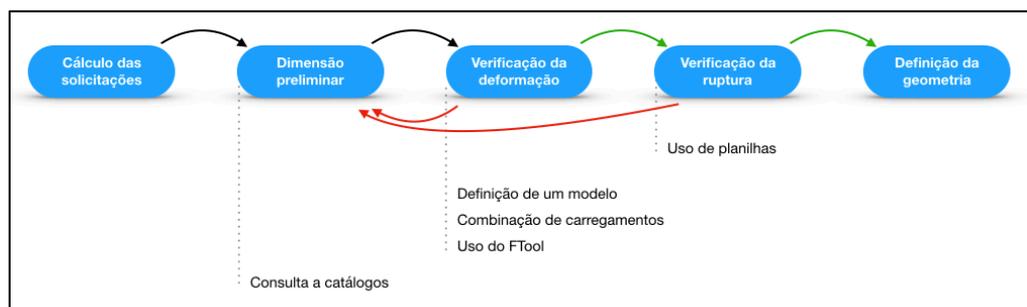
FIGURA 10 - Fluxograma de elaboração dos projetos básicos.



FONTE: O autor (2019).

O dimensionamento é feito primeiro para o Estado Limite de Serviço e depois é verificado o Estado Limite Último, conforme o fluxograma apresentado na FIGURA 11.

FIGURA 11 - Fluxograma do dimensionamento das peças.



FONTE: O autor (2019).

3 PROJETO CONCEITUAL DA TORRE

Tendo em vista padronizar a comparação entre os dois sistemas estruturais de lajes de madeira objetos deste trabalho, elabora-se o projeto conceitual de uma torre de observação que estabelece premissas para ambas as soluções. Estipula-se que a finalidade da torre de observação seja proporcionar uma vista panorâmica do Beto Carrero World, que atualmente é o maior parque temático da América do Sul e oferece mais de 100 atrações a seus visitantes segundo o jornal Gazeta do Povo (2019).

Neste capítulo são abordadas a descrição e caracterização da construção quanto ao seu sistema estrutural e elementos componentes, as soluções sugeridas pelo autor e demais discussões pertinentes, como a escolha da espécie de madeira a ser trabalhada. Ainda, são feitas considerações acerca dos projetos básicos subsequentes.

3.1 LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA E CARACTERIZAÇÃO ARQUITETÔNICA

O parque temático Beto Carrero World está localizado no litoral do estado de Santa Catarina, no município de Penha, e tem área de aproximadamente 14 km² de extensão conforme mostrado na FIGURA 12.

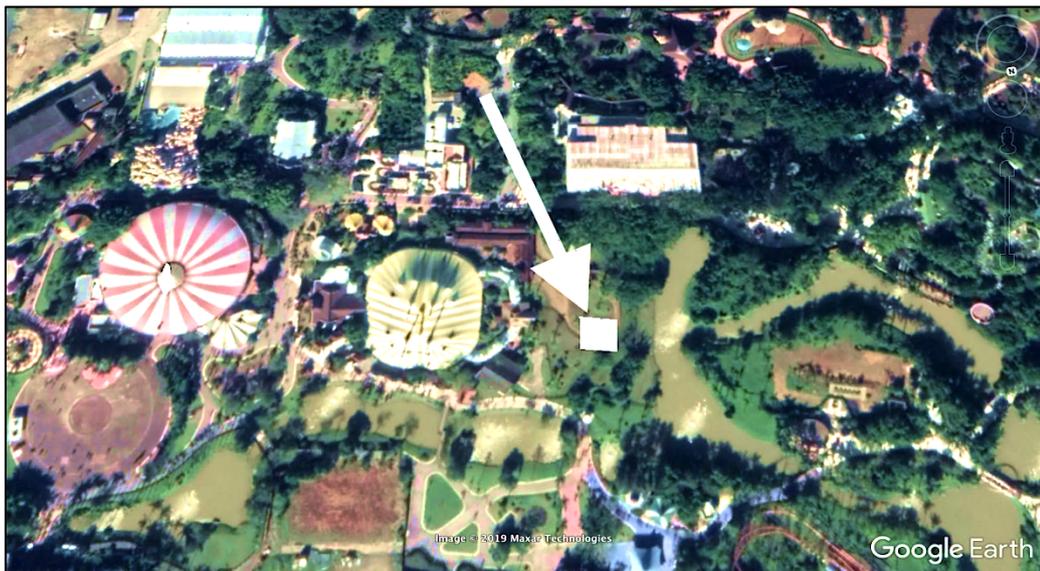
FIGURA 12 - Localização e extensão do parque temático, em destaque.



FONTE: Adaptado de Google Earth (2019).

Dada a finalidade da torre, esta deve ser localizada em área central do parque, de fácil acesso e sem que haja obstruções indesejadas à vista. Em acordo com esses requisitos, o lugar escolhido para o posicionamento da torre se encontra na região central do parque e tem uma área disponível para construção de 200 m², conforme indicado na FIGURA 13 a seguir.

FIGURA 13 - Localização da torre indicada no mapa (26°48'02.7"S 48°36'58.0"O).

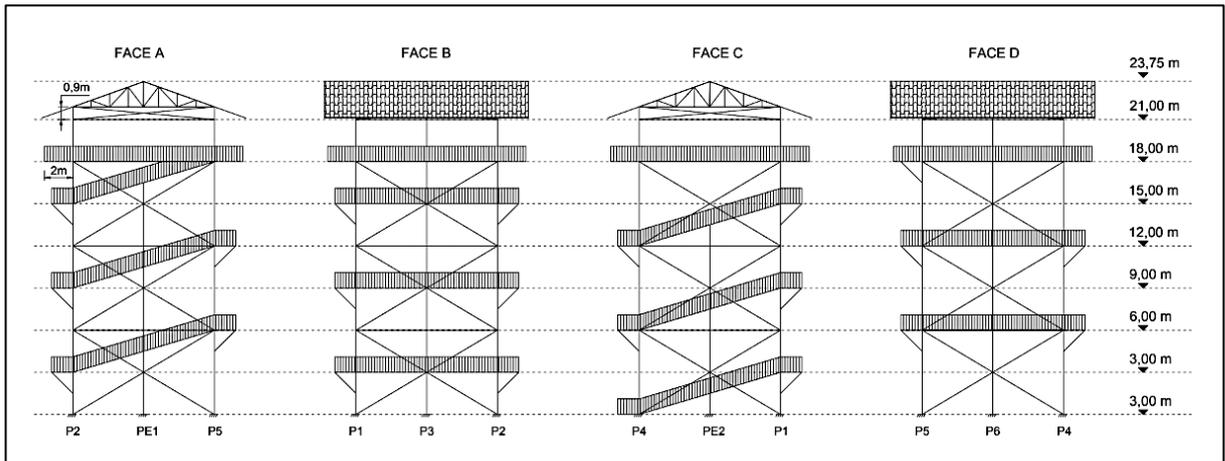


FONTE: Adaptado de Google Earth (2019).

É observado que o local de construção da torre não comporta máquinas e equipamentos construtivos de grandes dimensões. Essa característica pode ser limitante para as dimensões das peças constituintes da estrutura da torre e deverá ser considerada nos projetos básico e executivo.

A concepção arquitetônica utilizada é a de uma estrutura o mais integralmente possível feita de elementos em madeira, à qual os visitantes tenham acesso por uma escada que a envolve externamente, como se mostra na FIGURA 14 a seguir. A escada deve conter patamares intermediários nos quais turistas possam parar para descansar e tirar fotos. O patamar superior (ou deck) deve ser coberto, de modo a abrigar os ocupantes da chuva ou do sol. Não é prevista nenhuma estrutura de vedação lateral em qualquer parte da torre. Define-se que as escadas da torre sejam de madeira maciça na parte externa da estrutura e que a cada 3 m de altura haverá um patamar. Parte do deck superior estará em balanço de 2 m.

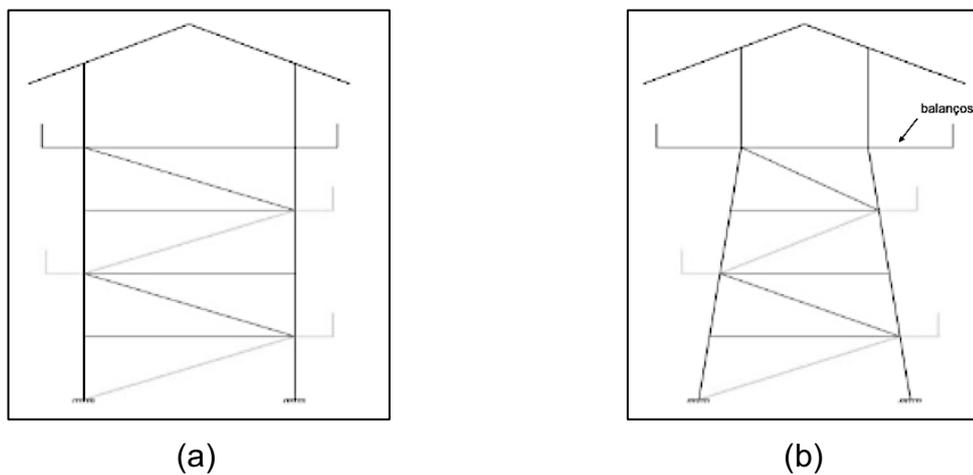
FIGURA 14 - Arquitetura da torre.



FONTE: O autor.

A torre poderá apresentar seção transversal constante ou com tronco piramidal, como indicado na FIGURA 15. A possibilidade de o tronco ser piramidal deve adotada apenas caso a estrutura não atenda os requisitos de estabilidade e de deslocabilidade horizontal com seção transversal constante.

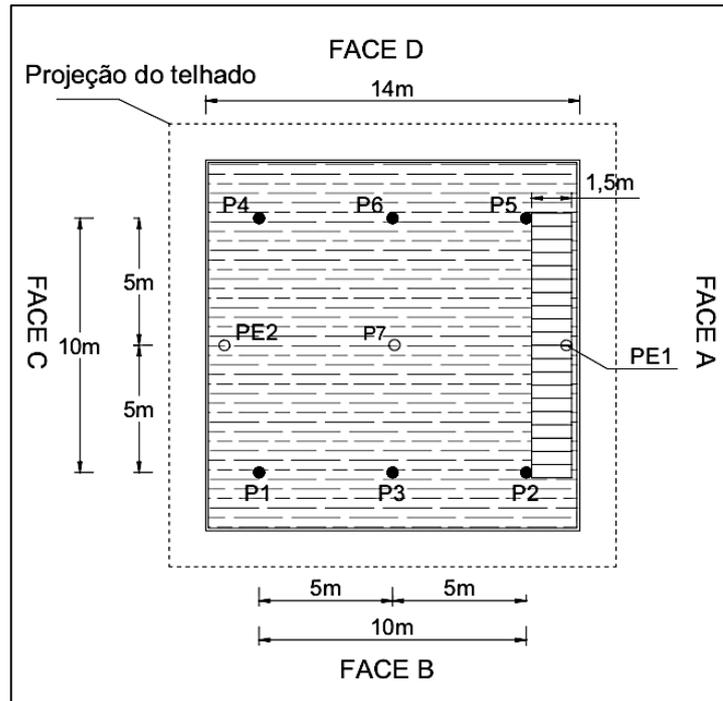
FIGURA 15 - Variação de forma de torres panorâmicas: seção constante (a) e tronco piramidal (b).



FONTE: O autor.

Tendo em vista a segurança e o conforto dos ocupantes, adota-se para a área do deck um valor igual ou maior a 100 m². Para garantir a uniformidade entre os espaços disponíveis para observação da vista em cada direção, indica-se que as dimensões do deck sejam tais como mostrado na FIGURA 16 a seguir.

FIGURA 16 - Detalhe arquitetônico, planta do deck com localização preliminar dos pilares.



FONTE: O autor.

3.2 SOLUÇÕES ESTRUTURAIS

Discute-se, nesta seção, questões pertinentes à estrutura da torre propriamente dita. São abordadas questões como sistema estrutural a ser adotado (para a torre como um todo e para o deck especificamente), características dos elementos estruturais da torre, espécies de madeira a ser utilizadas e discute-se brevemente as soluções de fundação.

3.2.1 Sistema estrutural

Por critério estético, adota-se que a estrutura principal da torre seja em madeira roliça aparente. Com o objetivo de aproveitar melhor as propriedades mecânicas intrínsecas da madeira (resistência principalmente aos esforços axiais), escolhe-se o sistema estrutural em treliça de modo que as peças sejam submetidas a esforços axiais no sentido longitudinal de suas fibras. A FIGURA 17 apresenta exemplos de torres de madeira treliçadas.

Adicionalmente, observa-se vantagem nesse sistema construtivo uma vez que elementos esbeltos oferecem menor resistência à passagem do vento, gerando

esforços internos (devidos à ação do vento) de menor magnitude. Essa característica é bem-vinda, também, porque o local de construção da torre não conta com grandes construções ao redor, acarretando incidência livre de ventos sobre sua estrutura.

FIGURA 17 - Exemplos de torres treliçadas de madeira roliça aparente com forma troncopiramidal.



FONTES: (esq.) Feature Pics; (dir.) Alamy (2017).

Aventa-se, também, a escolha de um sistema estrutural porticado, isto é, composto por lajes, vigas e pilares. Este é um sistema adotado amplamente na construção civil em projetos de várias estruturas, como edifícios, galpões e torres. Para se garantir a hiperestaticidade estrutural em um pórtico, busca-se o engastamento de suas ligações. Esta configuração submete os elementos a momentos fletores e esforços de torção. Para tornar possível este sistema estrutural, pode-se utilizar vigas de Madeira Laminada Colada, lajes maciças de Madeira Laminada Cruzada (ou tecnologias equivalentes, como a de *Dowel-Laminated Timber* ou *Nail-Laminated Timber*) e pilares compostos, por exemplo. A FIGURA 18 apresenta um exemplo de estrutura porticada de madeira.

A hiperestaticidade dos pórticos os torna, de forma geral, mais rígidos, diminuindo a deformação global da estrutura. Os elementos de um pórtico são, em

contrapartida, mais robustos para que tenham geometria favorável à resistência dos esforços de flexão e torção.

FIGURA 18 - Exemplo de estrutura porticada em madeira.



FONTE: BOKA Powell (2019).

3.2.2 Elementos principais

Os elementos principais da torre são peças de madeira roliça aparente, como definido na concepção arquitetônica, que trabalharão tracionados ou comprimidos. Estruturalmente, essa escolha é adequada dado que a natureza dos carregamentos incidentes é dinâmica.

Outras vantagens elencadas são a estética atraente, a facilidade de encontro no mercado, a grande disponibilidade de dimensões, a maior rapidez na disponibilização das peças uma vez que não há processamento da madeira (somente secagem e proteção química) e menor custo devido ao processamento simplificado.

Por sua vez, a secagem inadequada pode provocar fendas que comprometem a resistência da peça. Para evitar esse fenômeno, Pfeil; Pfeil (2003) recomenda a utilização de alcatrão, pintura das extremidades com betume ou algum meio que prorrogue a evaporação. Deve-se observar e evitar ao máximo a incidência de defeitos nas peças, que podem comprometer a segurança da estrutura.

3.2.3 Espécies de madeira

Dentre as opções de madeira a serem escolhidas no projeto básico, são discutidas duas espécies disponíveis na região.

3.2.3.1 Eucalipto Citriodora (*Eucalyptus citriodora*)

Madeira macia nativa da Austrália que é cultivada em 41.550 ha só no estado de Santa Catarina, de acordo com a Sociedade Brasileira de Silvicultura (SBS) (2001), e está presente em todos os estados dos brasileiros. Ainda segundo a SBS, a versatilidade, adaptação a diversas condições climáticas, possibilidade de uso em diversos setores, utilização em reflorestamentos e crescimento rápido tornaram o eucalipto um dos gêneros de madeira mais utilizados do mundo.

Do ponto de vista técnico, segundo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) esse gênero é suscetível a ataques de cupins e de xilófagos marinhos, necessitando tratamento prévio antes de sua utilização estrutural. Peças de eucalipto apresentam características satisfatórias quanto a furação, acabamento e lixamento. Comparado ao pinus, o eucalipto tem maior dureza.

3.2.3.2 Pinus elliottii (*Pinus elliottii* var. *elliottii*)

Também conhecido como pinheiro americano ou simplesmente pinheiro, é uma espécie de madeira macia nativa do hemisfério norte e presente em diversos estados brasileiros, especialmente os da região Sul e Sudeste, sendo cultivado em 318.120 ha no estado de Santa Catarina segundo a Sociedade Brasileira de Silvicultura (SBS) (2001).

Assim como o eucalipto, essa espécie também possui crescimento rápido e características semelhantes de trabalhabilidade. Segundo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), o pinus é propenso ao ataque de insetos e de fungos (causadores de manchas, bolor e apodrecimento), cupins, brocas-de-Madeira e perfuradores marinhos e, desse modo, a proteção de sua superfície também é necessária.

O pinus apresenta resistências mecânicas adequadas para a aplicação estrutural, porém inferiores à resistência do eucalipto, além de apresentar massa específica menor. A madeira do pinus tem mais poros e sofre mais com a absorção

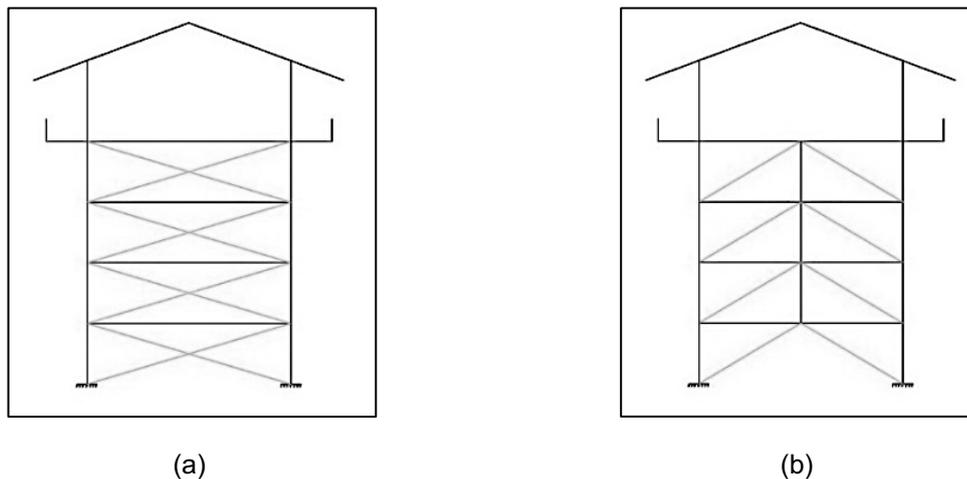
de umidade, o que pode afetar sua resistência. Apesar disto, sua contração radial e tangencial é menor que a do eucalipto.

3.2.4 Contraventamentos

Cabos metálicos, quando usados como elementos de contraventamento, apresentam boa resistência à tração. Entretanto, perdem sua função estrutural caso sejam solicitados à compressão e, em situações de incêndio, dilatam e perdem a capacidade de evitar deslocamentos horizontais. Em contrapartida, elementos em madeira resistem mecanicamente tanto quando tracionados quanto comprimidos e, além disso, apresentam resistência ao fogo por determinado tempo quando considerada a taxa de carbonização. Pelas características consideradas, portanto, sugere-se que os elementos de contraventamento da estrutura sejam de madeira.

Quanto ao arranjo das estruturas de contraventamento, analisa-se as configurações de Cruz de Santo André e em K, mostradas na FIGURA 19.

FIGURA 19 – Esquemas de configurações de contraventamento: em Cruz de Santo André (a) e em K (b).



FONTE: O autor.

Na configuração em K, espera-se momentos fletores de menor intensidade nos elementos horizontais do deck, uma vez que há redução no vão da estrutura. Para os contraventamentos em cruz, é esperado que o deslocamento horizontal global da estrutura seja menor.

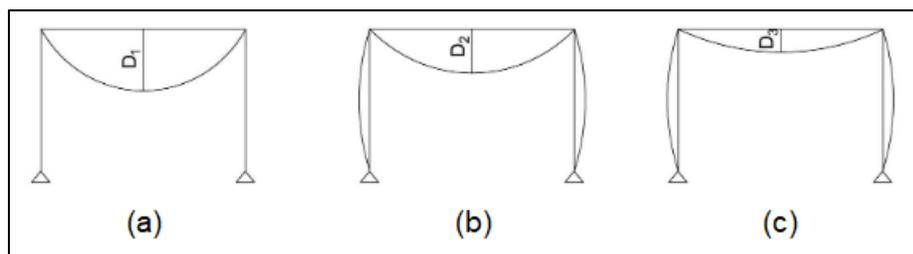
3.2.5 Ligações

Para se escolher corretamente o tipo de ligação mais adequado é necessário conhecer os esforços aos quais a estrutura estará submetida. No caso estudado neste projeto, verifica-se que os elementos da torre estão sujeitos ora à tração, ora à compressão. Analisa-se, assim, a utilização de ligações por encaixe e de ligações metálicas.

As conexões por encaixe constituem o meio mais tradicional em ligações de peças de madeira. Nestas, as peças devem ter as faces transmissoras dos esforços totalmente em contato. Os encaixes são mantidos no lugar com cavilhas, pregos, parafusos ou grampos que não são levados em conta para efeitos de transmissão de esforços. Essas ligações são em geral projetadas para esforços de compressão, pois no caso de peças tracionadas são antieconômicas e pouco usadas.

As conexões metálicas com pregos, parafusos, anéis e chapas denteadas têm como vantagem o fato de resistirem tanto à tração quanto à compressão. As ligações podem ser classificadas em articulada, semirrígida e rígida, modificando os diagramas de momentos fletores dos elementos da estrutura conforme é mostrado na FIGURA 20.

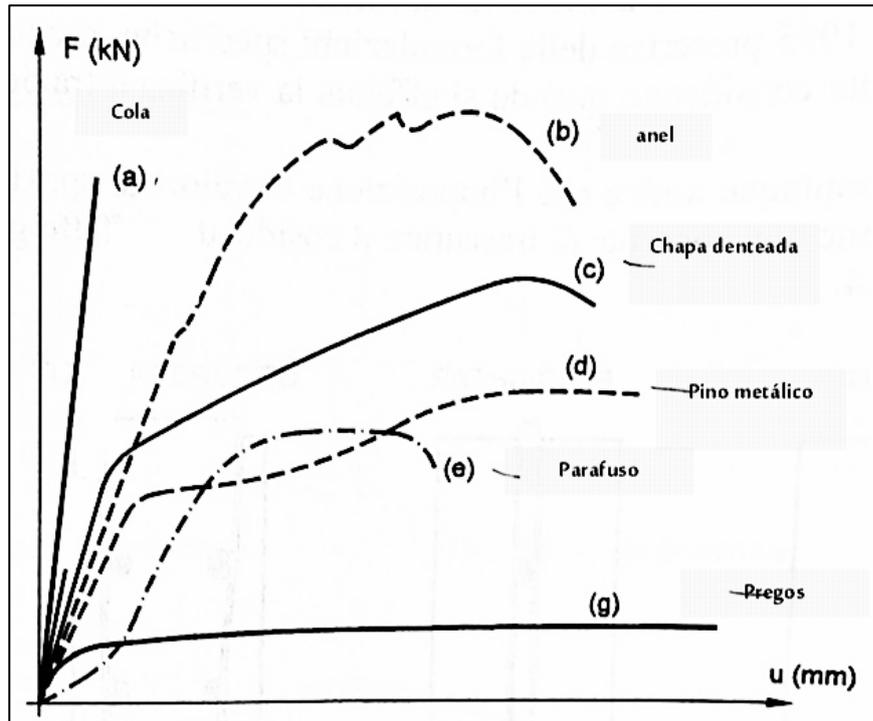
FIGURA 20 - Diagramas de momentos fletores para estruturas com ligações articuladas (a), semirrígidas (b) e rígidas (c).



FONTE: O autor (2019).

Adicionalmente, cada tipo de ligação tem um comportamento único em termos de rigidez e flexibilidade, como mostrado na FIGURA 21.

FIGURA 21 - Comportamento de rigidez e flexibilidade de ligações usadas em estruturas de madeira.



FONTE: Piazza et al. (2014) apud Neto (2019).

É importante conhecer essas duas características para que se faça uma boa escolha de quais ligações utilizar uma vez que se busca, em geral, resistência e ductilidade em estruturas de engenharia. Observa-se que a escolha do tipo de ligação deve considerar a resistência da peça à flexão e os deslocamentos permitidos para o estado limite de serviço.

3.2.6 Deck superior

O sistema estrutural mais tradicional da região de Santa Catarina (bem como do Brasil inteiro) para a construção de lajes de madeira externas é o de *decking*, que utiliza diversos elementos de madeira serrada trabalhando em conjunto. Esse é um sistema já utilizado na região e tem seu dimensionamento previsto na NBR 7190:1997.

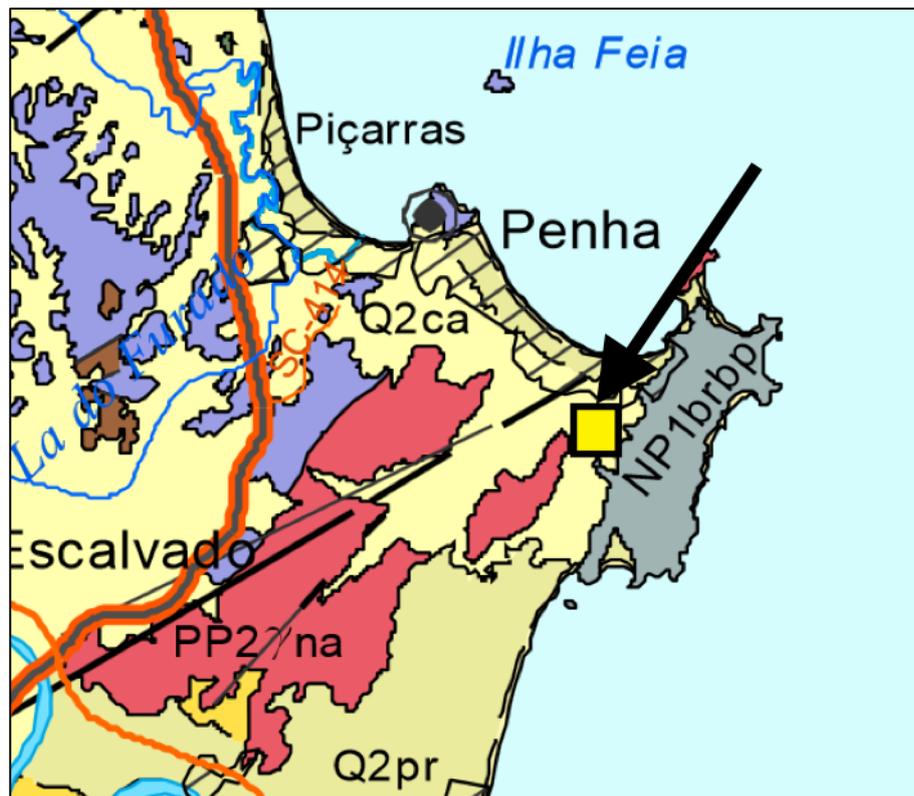
Há outras possibilidades hoje no mercado nacional, como a Madeira Laminada Cruzada (CLT, da sigla em inglês), e no mercado internacional, como a Madeira Laminada Pregada (NLT) e a Madeira Laminada Cavilhada (DLT). Estes últimos três sistemas são considerados de madeira massiva, criando estruturas maciças pré-fabricadas. A viabilidade técnica e econômica destas soluções, todavia,

deve ser analisada com cautela, uma vez que sistemas de madeira massiva ainda são pouco difundidos no Brasil e não há legislação local prevista para esses sistemas.

3.2.7 Fundação

A escolha do tipo de fundação deve se basear no perfil do solo onde a torre será executada e nos carregamentos aos quais estará submetida. Consultando o mapa geológico de Santa Catarina de Wildner et al. (2014), mostrado na FIGURA 22, identifica-se que a área de construção está localizada em uma região “Q2ca” que é composta por um depósito colúvio-aluvionar.

FIGURA 22 - Localização da torre indicada no Mapa Geológico do Estado de Santa Catarina.



FONTE: Adaptado de Wildner et al. (2014).

A fim de se obter informações mais precisas sobre o solo, é necessária investigação geotécnica por meio de Sondagens à Percussão (SPT) e retirada de amostras para ensaios triaxiais. Assim, pode-se determinar curvas de tensão-deformação e a envoltória de resistência ao cisalhamento do solo.

Por estar em uma área à beira de um lago, é provável que o nível do lençol freático da região esteja próximo à superfície. Além disso, devido ao fato de se tratar de uma estrutura sujeita forças de tombamento de grande magnitude (devido a sua altura), não é recomendado utilizar fundações rasas, como sapatas e radier, ou estacas escavadas. Estacas cravadas de concreto pré-moldado ou metálicas com tratamento anticorrosão adequado são opções recomendáveis para a execução da fundação, pois resistem bem aos esforços de tombamento, podem ser feitas a grandes profundidades e seu procedimento de construção não é afetado pelo nível do lençol freático.

3.3 PRESCRIÇÕES PARA O PROJETO BÁSICO

Para a elaboração do projeto básico, identifica-se a necessidade de prescrever que sejam realizadas as análises e os levantamentos descritos abaixo:

- Análise das cargas que atuarão sobre a torre e determinação das solicitações de projeto, conforme estabelecido pela NBR 7190:1997;
- Levantamento topográfico do local de construção, a fim de verificar a necessidade de realização de corte e aterro no terreno;
- Investigação geotécnica constituída por 2 furos, ou mais caso haja a necessidade de furos em pontos específicos, de sondagem (NBR 8036:1983), a fim de possibilitar a determinação da capacidade de suporte do solo;
- Elaboração de um projeto de terraplenagem, necessário à execução das fundações da torre;
- Estudo climatológico do local, para obter as médias de temperatura e umidade relativa e, também, informações acerca da incidência de vento na região;
- Análise da influência do vento na torre, seguindo o disposto na NBR 6123:1988;
- Concepção de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas, uma vez que a torre está localizada em um parque que possui grande afluência de público, seguindo as orientações da NBR 5419:2001;
- Elaboração de um projeto de prevenção e combate a incêndio e pânico, seguindo as normas de segurança contra incêndio do estado de Santa Catarina e a instrução normativa para saídas de emergência do mesmo estado (IN 009/DAT/CBMSC);

- Elaboração de um projeto de drenagem;
- Estudo para a identificar meios de proteção da madeira, visto que a estrutura será aparente e diretamente exposta a intempéries;
- Caracterização dos materiais utilizados na construção, para a definição de parâmetros necessários ao dimensionamento da estrutura, tais como a classe da madeira, por exemplo;
- Concepção de um projeto luminotécnico, visto que o parque conta com funcionamento até às 19:00h;
- Levantamentos quantitativos dos materiais, com a finalidade da elaboração de orçamentos.

3.4 DISPOSIÇÕES FINAIS

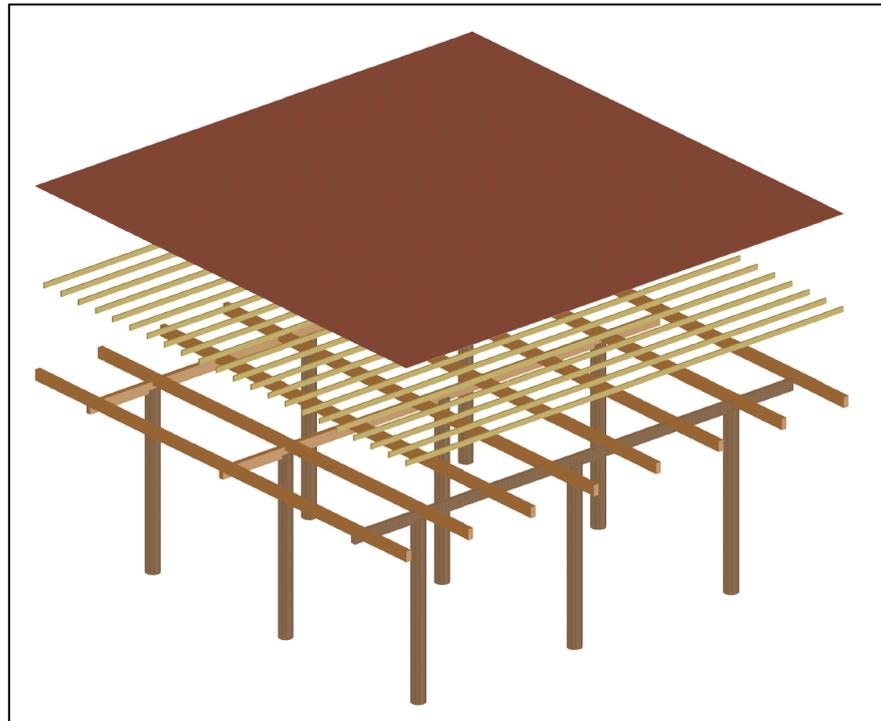
A viabilidade da solução estrutural em madeira discutida neste projeto fica ligada ao atendimento às prescrições e requisitos discutidos neste documento. É possível, teoricamente, ser construída uma torre panorâmica em madeira no parque Beto Carrero World. As escolhas da solução de engenharia para os projetos subsequentes são:

- Sistema estrutural da torre em treliça, com nós rotulados;
- Elementos principais da estrutura em madeira roliça aparente (tratada) de Eucalipto Citriodora;
- Deck superior com área de 196 m² (14 m x 14 m);
- Escadas de acesso com 1,5 m de largura;
- Altura total da torre (medida a partir do topo da fundação) de 23,75 m

4 PROJETO BÁSICO DO DECK: SOLUÇÃO EM *DECKING*

Neste capítulo, são discutidas as solicitações a que o *deck* estará sujeito, além de outras considerações construtivas. É realizado o dimensionamento dos elementos que compõem a estrutura, bem como suas ligações. A estrutura global esquematizada do *deck* é apresentada na FIGURA 23 a seguir, e é composta por régua, barrotes, vigas e pilares. Escolhe-se trabalhar com Ipê e Eucalipto como tipos de madeira. O projeto básico desenvolvido pode ser encontrado nos Apêndices 1 (com plantas e cortes) e 2 (detalhamento das ligações).

FIGURA 23 - Esquema da estrutura global do deck para a solução em *decking*.



FONTE: O autor (2019).

4.1 SOLICITAÇÕES CARACTERÍSTICAS

O dimensionamento subsequente considera as combinações normais de carregamentos dispostas na NBR 8681:2003 (ABNT, 2003), em que são consideradas as solicitações características discutidas a seguir.

4.1.1 Peso próprio

Considera-se o peso próprio conforme o peso específico (ρ) de cada espécie de madeira, apresentados na TABELA 4, em que são utilizados valores da NBR 7190:1997 que constam em seu anexo E, considerando umidade padrão de 12%.

TABELA 4 - Pesos específicos das madeiras utilizadas.

Espécie de madeira	Nome científico	Peso específico (kg/m³)
Ipê	<i>Tabebuia serratifolia</i>	1068,0
Eucalipto Citriodora	<i>Eucalyptus citriodora</i>	999,0

FONTE: ABNT (1997).

Para as combinações de carregamentos, considera-se o peso próprio como carregamento permanente.

4.1.2 Uso/ocupação

Considera-se 4 kN/m² (carregamento de arquibancada segundo a NBR 6120:1980) uniformemente distribuídos sobre a superfície do *deck*. A carga acidental de vento vertical 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.

4.1.3 Cargas horizontais

São consideradas as cargas horizontais de vento e o carregamento mínimo de 1 kN/m no guarda-corpo, conforme especificado no item 5.5.9 da NBR 7190:1997.

Considera-se que os carregamentos horizontais são de curta duração para as combinações de carregamentos.

4.2 CONSIDERAÇÕES DE PROJETO

Adota-se para os elementos do *deck* os tipos de madeira listados na TABELA 5. A escolha das madeiras é feita com base em catálogos de fabricantes disponíveis, a fim de que sejam escolhidas espécies comercialmente comuns na região de instalação da torre.

TABELA 5 - Espécies de madeira para os elementos do *deck*.

Elemento	Espécie de madeira (nome popular)	Nome científico
Régua	Ipê	<i>Tabebuia serratifolia</i>
Barrote	Eucalipto Citriodora	<i>Eucalyptus citriodora</i>
Viga	Eucalipto Citriodora	<i>Eucalyptus citriodora</i>

FONTE: O autor (2019).

As peças são dimensionadas para atendimento ao Estado Limite de Serviço (ELS) e depois é verificada a segurança estrutural frente ao Estado Limite Último (ELU). Escolhe-se essa ordem de verificação dos Estados Limites buscando-se um menor número de iterações, uma vez que o ELS geralmente é o limitante em elementos de madeira submetidos à flexão, como observado nos trabalhos de Correia (2009) e Almeida (2012).

4.3 DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS DO *DECK*

Em consonância com as disposições da NBR 7190:1997, considera-se os seguintes coeficientes de majoração das cargas (γ_g) para a combinação normal de ações no Estado Limite Último, Equação (2): $\gamma_g = 1,3$ para o peso próprio; $\gamma_q = 1,4$ para o carregamento de ocupação.

Para as combinações de ações solicitantes, considera-se classe 3 de umidade do ambiente em consideração à caracterização climatológica do site Weather Spark (2019) para o município de Penha, SC.

São considerados os seguintes valores característicos para as propriedades das madeiras, apresentados na TABELA 6.

TABELA 6 – Valores característicos de resistência e módulo de elasticidade.

Espécie de madeira	f_{c0k} (MPa)	f_{vk} (MPa)	$E_{c0,m}$ (MPa)
Ipê	76,0	13,1	18011
Eucalipto Citriodora	62,0	10,7	18421

FONTE: ABNT (1997).

Considerando classe 3 de umidade, o emprego de madeira serrada para a confecção das peças, carregamento permanente atuante na estrutura e madeira de segunda categoria, utiliza-se os valores de coeficientes de modificação $k_{mod,1} = 0,6$; $k_{mod,2} = 0,8$; e $k_{mod,3} = 0,8$. Utilizando-se as Equações (4) e (5) e para essas condições de projeto, portanto, são consideradas as propriedades para as madeiras escolhidas apresentadas na TABELA 7. São considerados fatores de minoração para compressão (γ_{wc}) e de corte (γ_{wv}) iguais a 1,4 e 1,8 respectivamente, de acordo com a Tabela 12 da NBR 7190:1997.

TABELA 7 - Propriedades de cálculo para as madeiras escolhidas.

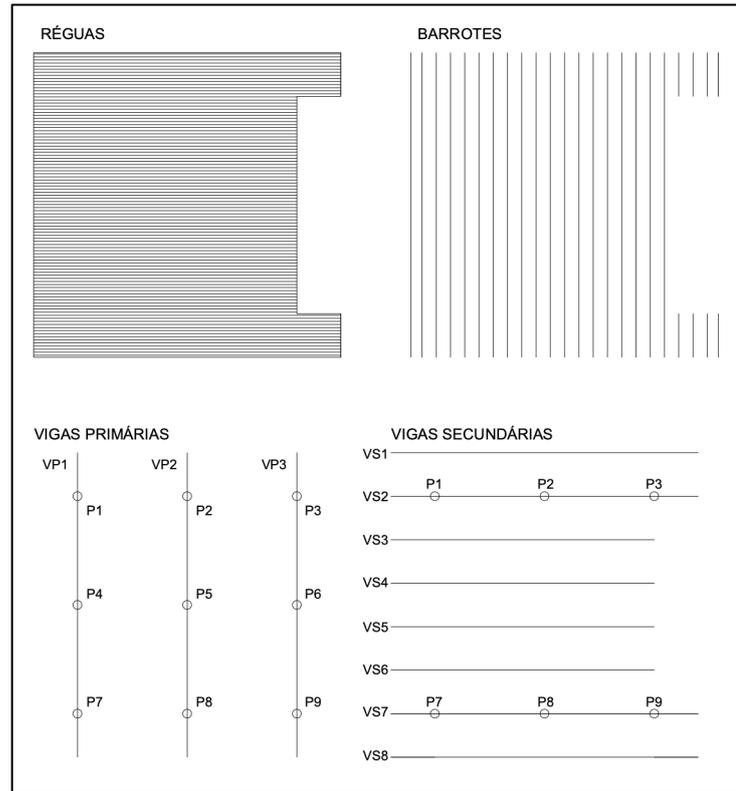
Espécie de madeira	$f_{c0,d} = f_{t0,d}$ (MPa)	$f_{v,d}$ (MPa)	$E_{c0,ef}$ (MPa)
Ipê	20,8457	2,7947	6916
Eucalipto citriodora	17,0057	2,2827	7074

FONTE: O autor (2019).

Para o cálculo das deformações, os coeficientes de fluência considerados são de $\varphi = 2,0$ para o peso próprio e $\varphi = 1,0$ para o carregamento de ocupação da torre, conforme Tabela 15 da NBR 7190:1997.

4.3.1 Esquema global dos elementos do *deck*

O dimensionamento dos elementos do *deck* é feito separadamente conforme apresentado na FIGURA 24 a seguir. Utiliza-se do artifício de separar as vigas em primárias e secundárias e adota-se uma convenção de nomenclatura para as vigas e pilares para tornar o processo de dimensionamento mais claro e organizado. Nos itens a seguir, são detalhados os dimensionamentos de cada elemento.

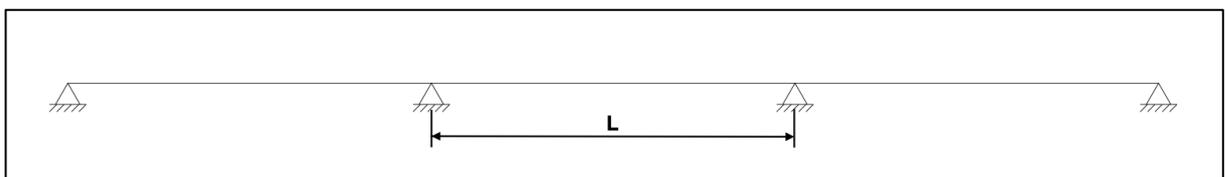
FIGURA 24 - Separação dos elementos do *deck* para o dimensionamento.

FONTE: O autor (2019).

4.3.2 Réguas

Em consultas a catálogos e sites de fornecedores de réguas para *decks*, observa-se que suas dimensões comerciais comuns são 10 cm de largura por 2 cm de altura. Na FIGURA 25 é representado o modelo estrutural adotado para o dimensionamento de uma régua. É adotada sua seção transversal como sendo a comumente comercializada (10 cm x 2 cm). Desta forma, necessita-se calcular o vão máximo admissível entre seus apoios. Estruturalmente, os barrotes são os apoios das réguas, que por sua vez são modeladas como vigas contínuas de três vãos.

FIGURA 25 - Modelo estrutural esquemático das réguas.



FONTE: O autor (2019).

O peso próprio característico $F_{G,k}$ que atua em uma régua pode ser calculado com o auxílio da equação

$$F_{G,k} = \rho \cdot b \cdot h \cdot L \cdot g \quad (20)$$

onde:

- ρ é o peso específico da madeira;
- g é a gravidade, adotada simplificada como 10 m/s^2 .

Substituindo-se os valores de ρ (usando a TABELA 4), $b = 0,10 \text{ m}$, $h = 0,02 \text{ m}$ e adotando L unitário na Equação (20), obtém-se o valor de $F_{G,k} = 21,36 \text{ N/m}$.

O carregamento de ocupação característico $F_{Q,k}$ que atua em uma régua, por sua vez, pode ser calculado multiplicando-se o valor de 4 kN/m^2 (conforme discutido na seção 4.1.2) pela largura de uma régua, obtendo-se o valor de $F_{Q,k} = 0,4 \text{ kN/m}$. A TABELA 8 apresenta o resumo das solicitações consideradas para o dimensionamento das régua.

TABELA 8 - Ações solicitantes às régua.

Ação	Valor característico (kN/m)
$F_{G,k}$ = Peso próprio	0,021
$F_{Q,k}$ = Ocupação	0,400

FONTE: O autor (2019).

Faz-se, então, a combinação das ações para o ELU e ELS utilizando as Equações 2 e 3. As combinações são mostradas na TABELA 9. Entende-se que o pior caso em termos de solicitação das régua seja com a ação simultânea de peso próprio e ocupação.

TABELA 9 - Combinações feitas para o dimensionamento dos elementos do *deck*.

Estado Limite	Combinação
ELS	Normal, média duração: $(1,0 \times F_{G,k}) + (1,0 \times F_{Q,k})$
ELU	Normal: $(1,3 \times F_{G,k}) + (1,4 \times F_{Q,k})$

FONTE: O autor (2019).

O dimensionamento para o ELS consiste em calcular a flecha do elemento para a situação de projeto e compará-la com os limites de deformações estabelecidos pela NBR 7190:1997. Para o cálculo das deformações elásticas instantâneas, utiliza-se o programa Ftool, desenvolvido pela PUC-Rio. Tabela-se, então, as deformações

elásticas provocadas pelos carregamentos separadamente. As deformadas obtidas podem ser encontradas no Apêndice 3. Para o cálculo da deformação final de cálculo, soma-se o produto das deformações elásticas pelos coeficientes de fluência, de acordo com a Equação 12. Busca-se o maior vão teórico L possível para o qual a deformação final (flecha) do elemento seja inferior ao limite da norma. A TABELA 10 apresenta as tentativas de vãos e suas respectivas deformações. As tentativas foram definidas com iterações com 5 cm de intervalo.

TABELA 10 - Dimensionamento das régua para o ELS.

L (cm)	$\delta_{pp,elast}$ (mm)	$\delta_{ocup,elast}$ (mm)	δ_{final} (mm)	δ_{limite} (mm)
65	0,053	1,536	3,2	3,3
70	0,072	2,066	4,3	3,5

FONTE: O autor (2019).

Observa-se que para a tentativa de L = 70 cm a deformação final ultrapassa o limite estabelecido pela norma. Para atender ao ELS, portanto, a distância entre os eixos dos barotes não deve ultrapassar 65 cm.

A verificação para o ELU consiste em calcular os esforços solicitantes e verificar a segurança frente à resistência da madeira e do elemento para o vão teórico L = 65 cm. As propriedades da seção calculadas são mostradas na TABELA 11, e são utilizadas de forma auxiliar para as verificações demonstradas na TABELA 12.

TABELA 11 - Propriedades da seção para as régua.

h (cm)	b (cm)	W_c (cm ³)	h/b	β_M	I_1 (cm)
2,0	10,0	6,7	0,20	1,20	2764

FONTE: O autor (2019).

TABELA 12 - Verificação das régua para o ELU.

L (cm)	M_d (kN.cm)	$\sigma_{c_0,d}$ (MPa)	$f_{c_0,d}$ (MPa)	$\sigma_{c_0,d}/f_{c_0,d}$	V_d (kN)	τ_d (MPa)	$f_{v_0,d}$ (MPa)	$\tau_d/f_{v_0,d}$
65	2,80	4,20	20,85	20,13%	0,24	0,18	2,79	6,37%

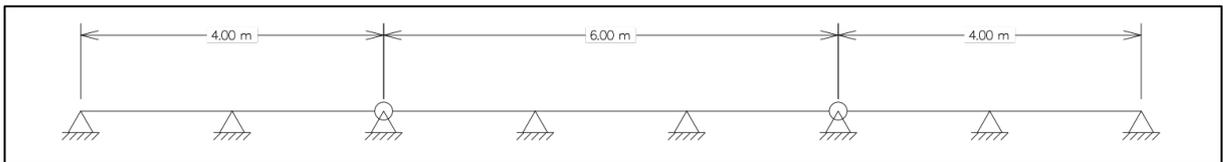
FONTE: O autor (2019).

Para o vão arbitrado de 65 cm, portanto, observa-se que a segurança estrutural das régua é garantida.

4.3.3 Barrotes

Em consultas a catálogos e sites de fornecedores de elementos estruturais para *decks* e telhados, observa-se que dimensões comerciais comuns são 5 cm de largura por 15 cm de altura. Na FIGURA 26 é representado o modelo estrutural adotado para o dimensionamento dos barrotes, no qual sua seção transversal adotada é 5 cm x 15 cm. Dessa forma, necessita-se calcular o vão máximo admissível entre seus apoios. No modelo adotado, as vigas secundárias da estrutura são os apoios dos barrotes, que por sua vez são modelados como vigas contínuas. Devido às limitações na confecção e transporte das peças, modela-se os elementos com algumas rótulas simbolizando, onde aplicadas, a emenda de peças.

FIGURA 26 - Modelo estrutural esquemático dos barrotes.



FONTE: O autor (2019).

Utilizando a mesma metodologia adotada para o cálculo do peso próprio das régua e aplicando-se a Equação 20 na qual são substituídos os valores de ρ (usando a TABELA 4), $b = 0,05$ m, $h = 0,15$ m e adotando L unitário, obtém-se o valor de $F_{G,k} = 74,925$ N/m para o peso próprio dos barrotes.

Para estimar o carregamento sobre um barrote, utiliza-se as maiores reações de apoio características obtidas nos diagramas de dimensionamento das régua, apresentadas no Apêndice 3 (de 0,02 kN para peso próprio das régua e 0,29 kN para o carregamento de ocupação). Como a largura das régua é de 10 cm e há, portanto, 10 régua posicionadas a cada metro de barrote, considera-se simplificada que o carregamento característico sobre um barrote seja de 0,2 kN/m para o peso próprio das régua e de 2,9 kN/m para o carregamento de ocupação.

A TABELA 13 a seguir apresenta o resumo das solicitações consideradas para o dimensionamento dos barrotes.

TABELA 13 - Ações solicitantes aos barrotes.

Ação	Valor característico (kN/m)
$F_{G,k}$ = Peso próprio (régua + barrote)	$0,200 + 0,075 = 0,275$
$F_{Q,k}$ = Ocupação	2,900

FONTE: O autor (2019).

Faz-se, então, a combinação das ações para o ELU e ELS. As combinações são mostradas na TABELA 14. Entende-se que o pior caso em termos de solicitação dos barrotes seja com a ação simultânea de peso próprio e ocupação.

TABELA 14 - Combinações feitas para o dimensionamento dos barrotes.

Estado Limite	Combinação
ELS	Normal, média duração: $(1,0 \times F_{G,k}) + (1,0 \times F_{Q,k})$
ELU	Normal: $(1,3 \times F_{G,k}) + (1,4 \times F_{Q,k})$

FONTE: O autor (2019).

O dimensionamento para o ELS consiste em calcular a flecha do elemento para a situação de projeto e compará-la com os limites de deformações estabelecidos pela NBR 7190:1997, de forma similar ao procedimento feito para o dimensionamento das régua. As deformadas e os diagramas obtidos podem ser encontrados no Apêndice 4. Busca-se o maior vão teórico L possível para o qual a deformação final (flecha) do elemento seja inferior ao limite da norma. A TABELA 15 a seguir apresenta as tentativas de vãos e suas respectivas deformações. As tentativas foram definidas de modo a manter o espaçamento entre apoios constante.

TABELA 15 - Dimensionamento dos barrotes para o ELS.

L (cm)	$\delta_{pp, instant}$ (mm)	$\delta_{ocup, instant}$ (mm)	δ_{final} (mm)	δ_{limite} (mm)
200	0,310	4,618	10	10
233	0,582	8,645	19	12

FONTE: O autor (2019).

No sentido transversal aos barrotes, portanto, as vigas devem ser espaçadas em 2 m medidos a partir de seus eixos.

A verificação para o ELU é feita similarmente à das régua. As propriedades da seção calculadas são mostradas na TABELA 16, e são utilizadas de forma auxiliar para as verificações demonstradas na TABELA 17.

TABELA 16 - Propriedades da seção para os barrotes.

h (cm)	b (cm)	W_c (cm³)	h/b	β_M	I₁ (cm)
15,0	5,0	187,5	3,00	12,30	169

FONTE: O autor (2019).

TABELA 17 - Verificação dos barrotes para o ELU.

M_d (kN.cm)	σ_{c₀,d (MPa)}	f_{c₀,d (MPa)}	σ_{c₀,d / f_{c₀,d}}	V_d (kN)	τ_d (MPa)	f_{v₀,d (MPa)}	τ_d / f_{v₀,d}
223,00	11,89	17,01	69,92%	5,56	1,11	2,28	48,77%

FONTE: O autor (2019).

Para o vão arbitrado de 200 cm, portanto, garante-se a segurança estrutural. Deve-se observar que para como o vão é superior a l_1 seria necessário contraventar a estrutura em pontos intermediários entre apoios para não haver fenômeno de flambagem lateral; as próprias régua que são ligadas aos barrotes, todavia, podem ser consideradas como contraventamento para os barrotes de modo que estruturas de contraventamento adicionais são prescindíveis.

Uma vez obtida a seção dimensionada para os barrotes pelo critério de flexão, verifica-se adicionalmente a ocorrência de esmagamento nos apoios das régua. Observa-se que há dois casos possíveis para apoio das régua nos barrotes, em caso de apoio externo (tipo 1) ou intermediário (tipo 2). Usa-se, então, a Equação 10, em que são substituídos os valores de:

- $R_{d1} = 0,153$ kN, $b = 10$ cm e $c = 2,5$ cm para o apoio tipo 1; e
- $R_{d2} = 0,432$ kN, $b = 10$ cm e $c = 5$ cm para o apoio tipo 2.

A TABELA 18 a seguir contém as verificações feitas para o esmagamento dos barrotes.

TABELA 18 - Verificação do esmagamento dos barrotes pelo apoio das régua.

Tipo de apoio	σ_{c90,d (MPa)}	f_{c90,d (MPa)}	σ_{c90,d / f_{c90,d}}
1	0,006	4,25	0,14%
2	0,009	4,25	0,21%

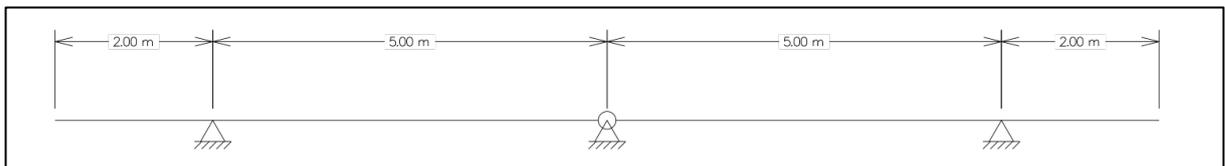
FONTE: O autor (2019).

Verifica-se, portanto, que não haverá esmagamento dos barrotes.

4.3.4 Vigas secundárias

As vigas do *deck* devem ser apoiadas nos pilares previstos no projeto da torre de observação. Estruturalmente, divide-se as vigas em primárias e secundárias, sendo que as vigas secundárias se apoiam nas primárias. Identifica-se, então, a viga mais solicitada e se dimensiona a sua seção transversal, aplicando-a para as demais de forma favorável a segurança e de modo a simplificar o projeto, embora essa decisão possa onerar o custo de materiais. O modelo estrutural proposto para o dimensionamento das vigas secundárias é mostrado na FIGURA 27, e é composto por duas peças de 7 m de comprimento.

FIGURA 27 - Modelo estrutural esquemático das vigas secundárias.



FONTE: O autor (2019).

Para obtenção dos diagramas das vigas secundárias, são utilizadas como cargas as reações de apoio dos barrotes encontradas no Apêndice 4. Modela-se os carregamentos das vigas secundárias (q_{vs}) simplificadaamente como uniformemente distribuídos com a equação a seguir.

$$q_{vs} = \frac{R_{\text{barrote}}}{L} \quad (21)$$

onde:

- L é o espaçamento entre barrotes (65 cm);
- R_{barrote} é a reação de apoio do barrote.

Para a estimativa do peso próprio das vigas, adota-se uma seção transversal inicial de 25 cm x 50 cm. Utilizando a Equação 20, estima-se então um peso próprio característico de aproximadamente 1,5 kN/m. Na TABELA 19 a seguir são

apresentados os carregamentos característicos das vigas secundárias, em que se observa que as vigas VS2 e VS7 são as mais solicitadas.

TABELA 19 - Carregamentos característicos nas vigas secundárias.

Viga	$F_{G,k}$ (kN/m)	$F_{Q,k}$ (kN/m)
VS1 e VS8	$(0,2/0,65) + 1,5 = 1,81$	$(2,2/0,65) = 3,38$
VS2 e VS7	$(0,7/0,65) + 1,5 = 2,58$	$(7,2/0,65) = 11,08$
VS3 e VS6	$(0,4/0,65) + 1,5 = 2,10$	$(5,5/0,65) = 8,46$
VS4 e VS5	$(0,6/0,65) + 1,5 = 2,42$	$(6,4/0,65) = 9,85$

FONTE: O autor (2019).

Modela-se então, com auxílio do software Ftool, a viga VS2 para se obter as deformações elásticas. Na TABELA 20 a seguir são apresentadas duas tentativas de seção e suas verificações frente ao ELS. As deformadas e diagramas obtidos no software podem ser encontradas no Apêndice 5.

TABELA 20 - Dimensionamento das vigas secundárias para o ELS.

Seção (bxh)	$\delta_{pp,inst,v\grave{a}o}$ (mm)	$\delta_{ocup,inst,v\grave{a}o}$ (mm)	$\delta_{final,v\grave{a}o}$ (mm)	$\delta_{lim,v\grave{a}o}$ (mm)	$\delta_{pp,inst,bal}$ (mm)	$\delta_{ocup,inst,bal}$ (mm)	$\delta_{final,bal}$ (mm)	$\delta_{lim,bal}$ (mm)
25x50	0,771	4,893	12,1	25,0	-0,245	5,213	9,7	20,0
20x40	1,727	11,950	29,1	25,0	-0,598	12,730	23,7	20,0

FONTE: O autor (2019).

Observa-se, portanto, que a seção transversal de 25 cm x 50 cm satisfaz os limites de deformação estabelecidos pela NBR 7190:1997.

A verificação para o ELU é feita similarmente à das régua e barrote. As propriedades da seção calculadas são mostradas na TABELA 21, e são utilizadas de forma auxiliar para as verificações demonstradas na TABELA 22.

TABELA 21 - Propriedades da seção para as vigas secundárias.

h (cm)	b (cm)	W_c (cm ³)	h/b	β_M	I_1 (cm)
50,0	25,0	10416,7	2,0	8,80	1181

FONTE: O autor (2019).

TABELA 22 - Verificação das vigas secundárias para o ELU.

M_d (kN.cm)	$\sigma_{c_0,d}$ (MPa)	$f_{c_0,d}$ (MPa)	$\sigma_{c_0,d}/f_{c_0,d}$	V_d (kN)	τ_d (MPa)	$f_{v_0,d}$ (MPa)	$\tau_d/f_{v_0,d}$
4157,00	3,99	17,01	23,46%	42,37	0,51	2,28	22,30%

FONTE: O autor (2019).

Verifica-se que capacidade resistente da madeira não é excedida. Uma vez obtida a seção dimensionada para as vigas secundárias pelo critério de flexão, verifica-se adicionalmente a ocorrência de esmagamento nos apoios dos barrotes.

Usa-se, então, a Equação 10, em que são substituídos os valores de $R_d = 10,99$ kN, $b = 15$ cm e $c = 25$ cm. A TABELA 23 a seguir contém as verificações feitas para o esmagamento das vigas secundárias.

TABELA 23 - Verificação do esmagamento das vigas secundárias pelo apoio dos barrotes.

$\sigma_{c90,d}$ (MPa)	$f_{c90,d}$ (MPa)	$\sigma_{c90,d} / f_{c90,d}$
0,03	4,25	0,71%

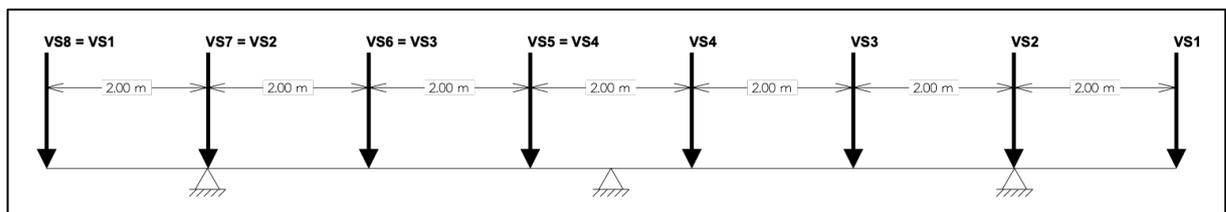
FONTE: O autor (2019).

Verifica-se, portanto, que não haverá esmagamento das vigas secundárias.

4.3.5 Vigas primárias

As vigas primárias são os elementos estruturais do *deck* que transmitem todo o carregamento aos pilares. De forma análoga ao feito para as vigas secundárias, identifica-se a viga mais solicitada e se dimensiona a sua seção transversal, aplicando-a para as demais de forma favorável a segurança e de modo a simplificar o projeto, embora essa decisão possa onerar o custo de materiais. O modelo estrutural proposto para o dimensionamento das vigas primárias é mostrado na FIGURA 28, e é composto por duas peças de 7 m de comprimento.

FIGURA 28 - Modelo estrutural esquemático das vigas primárias.



FONTE: O autor (2019).

Estima-se o carregamento nas vigas primárias com base as reações de apoio das vigas secundárias (encontradas no Apêndice 5). Para a estimativa do peso próprio

das vigas, adota-se uma seção transversal inicial de 25 cm x 50 cm. Utilizando a Equação 20, estima-se então um peso próprio característico de aproximadamente 1,5 kN/m. Na TABELA 24 e na TABELA 25 a seguir são apresentados os carregamentos característicos das vigas primárias, em que se observa que a viga VP1 é a mais solicitada.

TABELA 24 – Carregamento característico de peso próprio ($F_{G,k}$) nas vigas primárias.

Viga	$F_{VS1} = F_{VS8}$ (kN)	$F_{VS2} = F_{VS7}$ (kN)	$F_{VS3} = F_{VS6}$ (kN)	$F_{VS4} = F_{VS5}$ (kN)
VP1	8,8	12,7	10,3	11,8
VP2	7,6	10,8	9,7	11,1
VP3	8,8	12,7	5,3	6,0

FONTE: O autor (2019).

TABELA 25 – Carregamento característico de ocupação ($F_{Q,k}$) nas vigas primárias.

Viga	$F_{VS1} = F_{VS8}$ (kN)	$F_{VS2} = F_{VS7}$ (kN)	$F_{VS3} = F_{VS6}$ (kN)	$F_{VS4} = F_{VS5}$ (kN)
VP1	16,6	54,3	33,9	48,3
VP2	14,2	46,6	31,8	45,3
VP3	16,6	54,3	17,3	24,6

FONTE: O autor (2019).

Modela-se então, com auxílio do software Ftool, a viga VP1 para se obter as deformações elásticas. Na TABELA 26 a seguir são apresentadas três tentativas de seção e suas verificações frente ao ELS. As deformadas e diagramas obtidos no software podem ser encontradas no Apêndice 6.

TABELA 26 - Dimensionamento das vigas primárias para o ELS.

Seção (bxh)	$\delta_{pp,inst,v\grave{a}o}$ (mm)	$\delta_{ocup,inst,v\grave{a}o}$ (mm)	$\delta_{final,v\grave{a}o}$ (mm)	$\delta_{lim,v\grave{a}o}$ (mm)	$\delta_{pp,inst,bal}$ (mm)	$\delta_{ocup,inst,bal}$ (mm)	$\delta_{final,bal}$ (mm)	$\delta_{lim,bal}$ (mm)
25x50	2,732	8,407	25,0	25,0	4,316	8,410	29,8	20,0
25x55	2,053	6,317	18,8	25,0	3,243	6,319	22,4	20,0
25x60	1,581	4,865	14,5	25,0	2,498	4,867	17,2	20,0

FONTE: O autor (2019).

Observa-se que a seção de 25 cm x 60 cm atende ao ELS. Sendo assim, deve-se verificar também o ELU. As propriedades da seção calculadas são mostradas na TABELA 27, e são utilizadas de forma auxiliar para as verificações demonstradas na TABELA 28.

TABELA 27 - Propriedades da seção para as vigas.

h (cm)	b (cm)	W_c (cm³)	h/b	β_M	l₁ (cm)
60,0	25,0	15000,0	2,40	10,20	1019

FONTE: O autor (2019).

TABELA 28 - Verificação das vigas para o ELU.

M_d (kN.cm)	σ_{c₀,d} (MPa)	f_{c₀,d} (MPa)	σ_{c₀,d}/f_{c₀,d}	V_d (kN)	τ_d (MPa)	f_{v₀,d} (MPa)	τ_d/f_{v₀,d}
7996,00	5,33	17,01	31,34%	81,00	0,81	2,28	35,53%

FONTE: O autor (2019).

Verifica-se que capacidade resistente da madeira não é excedida. Como feito com os demais elementos, verifica-se adicionalmente a ocorrência de esmagamento na região de apoios das vigas secundárias.

Usa-se, então, a Equação 10, em que são substituídos os valores de $R_d = 217,79$ kN, $b = 30$ cm e $c = 30$ cm. A TABELA 29 a seguir contém as verificações feitas para o esmagamento das vigas primárias.

TABELA 29 - Verificação do esmagamento das vigas primárias pelo apoio das vigas secundárias.

σ_{c90,d} (MPa)	f_{c90,d} (MPa)	σ_{c90,d}/f_{c90,d}
0,24	4,25	5,6%

FONTE: O autor (2019).

Verifica-se, portanto, que não haverá esmagamento das vigas primárias.

4.3.6 Ligações do *deck*

Estruturalmente, observa-se que no *deck* a transmissão das cargas se dá por apoio direto entre os elementos. Desta forma, as conexões entre os elementos do *deck* desempenham o papel de facilitar e garantir o correto posicionamento dos elementos.

Para as ligações entre as régua e os barrotes, devido ao fato de ser um número elevado de conexões, adota-se o mínimo de conectores exigido pela NBR 7190:1997. Assim, as ligações são projetadas com o uso de dois parafusos EWS 5x50

da empresa Rothoblaas, feitos com aço AISI 410 cuja aplicação pode ser vista na FIGURA 29 a seguir.

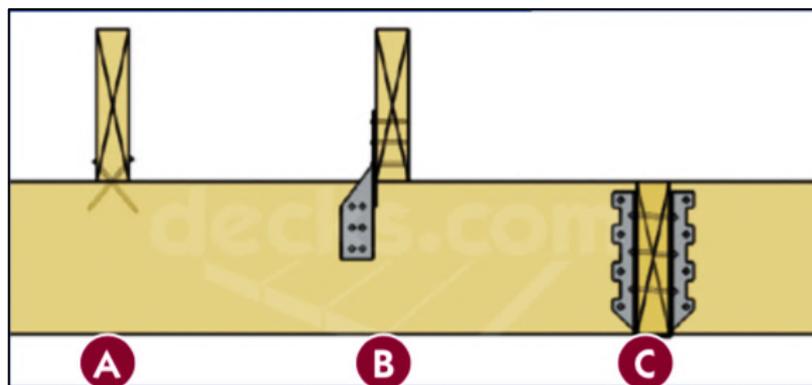
FIGURA 29 - Ligação entre réguas e barrotes.



FONTE: Rothoblaas.

Para as ligações entre os barrotes e as vigas secundárias, encontra-se a mesma característica das ligações entre réguas e barrotes. Para tanto, adota-se o uso de três parafusos HBS Hardwood 6x80 da empresa Rothoblaas posicionados a 45° de lados alternados do barrote, conforme detalhamento A da FIGURA 30 a seguir.

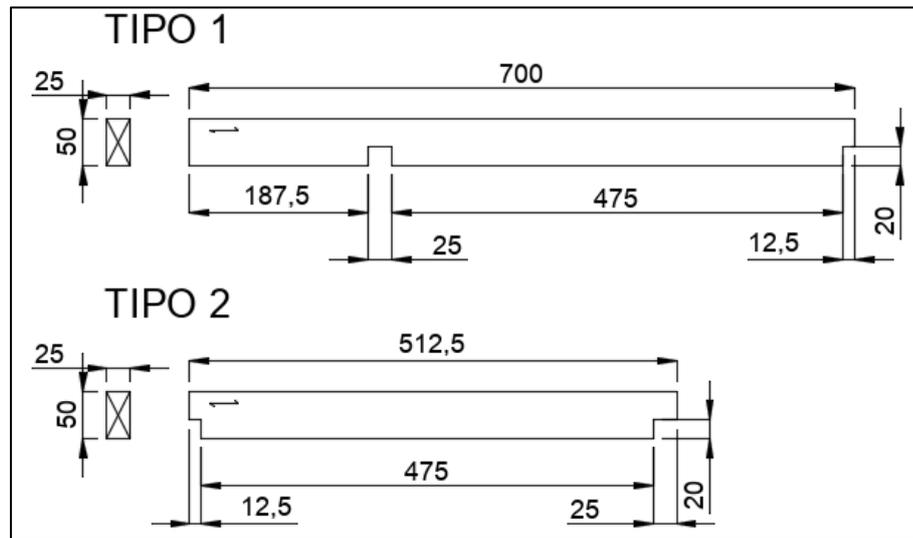
FIGURA 30 - Ligação entre barrotes e vigas secundárias.



FONTE: Trex.

Para as ligações entre as vigas secundárias e primárias, adota-se o uso de entalhes de 20 cm nas vigas secundárias, como demonstrado na FIGURA 31 a seguir.

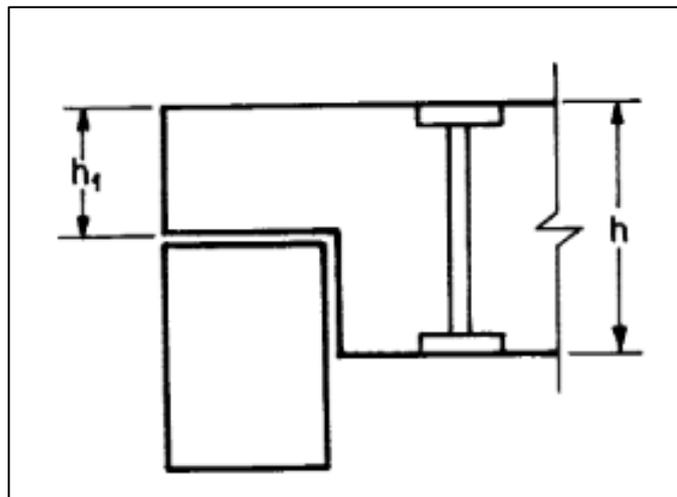
FIGURA 31 - Entalhes das vigas secundárias.



FONTE: O autor (2019).

Seguindo a recomendação do item 7.4.3 da NBR 7190:1997, como a altura de entalhe é superior a $\frac{1}{4}$ da altura total da peça, é previsto o uso de parafusos verticais dimensionados à tração axial para a força cortante transmitida ao apoio, como mostrado esquematicamente na FIGURA 32 a seguir.

FIGURA 32 - Esquema de ligação por entalhe reforçada com parafuso.



FONTE: Adaptado de ABNT (1997).

Dimensiona-se o parafuso, portanto, com o uso da equação (21).

$$\sigma_t = \frac{4 \cdot V_d}{\pi \cdot D_{ef}^2} \leq \frac{f_{y,k}}{\gamma_s} \quad (21)$$

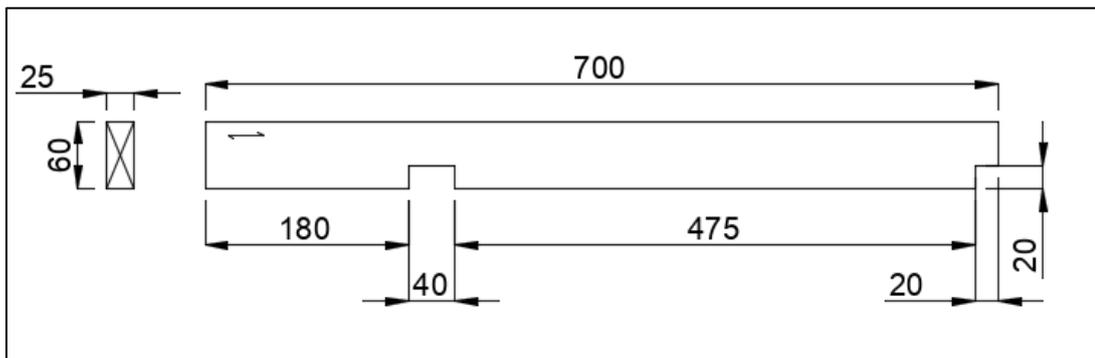
onde:

- V_d é a reação de apoio de cálculo;
- D_{ef} é o diâmetro efetivo do parafuso;
- $f_{y,k}$ é a tensão de escoamento característica do aço (mínimo de 240 MPa segundo a NBR 7190:1997);
- γ_s é o coeficiente de minoração da resistência do aço (igual a 1,1).

O maior valor de reação de apoio encontrado (viga VS2 apoiada na VP1) de cálculo é de 92,53 kN. Para parafusos com $f_{y,k}$ de 240 MPa e utilizando-se a equação 21 obtém-se que o diâmetro efetivo mínimo necessário é de 7,3 mm. Adota-se, portanto, dois parafusos de 10 mm de diâmetro.

Para a ligação entre as vigas primárias e os pilares, também se recorre ao uso de entalhes como demonstrado na FIGURA 33

FIGURA 33 - Entalhes das vigas primárias.



FONTE: O autor (2019).

O maior valor de reação de apoio encontrado (no pilar P7) de cálculo é de 203,80 kN. Para parafusos com $f_{y,k}$ de 240 MPa e utilizando-se a equação 21 obtém-se que o diâmetro efetivo mínimo necessário é de 11 mm. Adota-se, portanto, dois parafusos de 10 mm de diâmetro.

4.4 QUANTITATIVO DAS PEÇAS DO DECK

Na TABELA 30 a seguir é apresentado o levantamento quantitativo dos elementos que compõem o *deck* para a solução em *decking*.

TABELA 30 - Quantitativo dos elementos estruturais do *deck*.

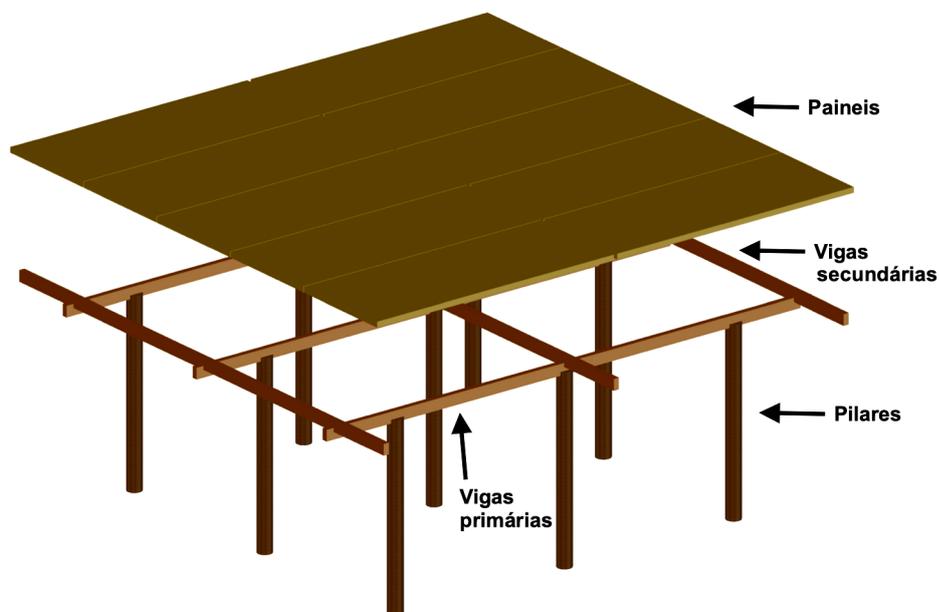
Descrição	Quant.	Volume (m³)	Peso (kg)
Réguas em Ipê (10 cm x 2 cm x 200 cm)	880	3,92	4.187
Barrotes em Eucalipto Citriodora (5 cm x 15 cm x 200 cm)	8	0,12	120
Barrotes em Eucalipto Citriodora (5 cm x 15 cm x 400 cm)	38	1,14	1.139
Barrotes em Eucalipto Citriodora (5 cm x 15 cm x 600 cm)	19	0,86	859
Vigas em Eucalipto Citriodora (25 cm x 50 cm x 500 cm)	4	2,50	2.498
Vigas em Eucalipto Citriodora (25 cm x 50 cm x 700 cm)	12	10,50	10.490
Vigas em Eucalipto Citriodora (25 cm x 60 cm x 700 cm)	6	6,30	6.294
TOTAL	967	25,34	25.587

FONTE: O autor (2019).

5 PROJETO BÁSICO DO DECK: SOLUÇÃO EM DLT

O sistema construtivo em DLT é composto por placas maciças pré-fabricadas apoiadas em vigas. Devido ao fato de a norma brasileira em vigor (NBR 7190:1997) não ser aplicável à tecnologia de painéis de DLT, recorre-se à norma americana *National Design Specification (NDS) for Wood Construction* para o seu dimensionamento. As vigas que apoiam essas placas, porém, são dimensionadas em concordância com a NBR 7190:1997. A configuração estrutural dos elementos é mostrada de forma esquemática na FIGURA 34 a seguir, e o projeto básico pode ser encontrado no Apêndice 7.

FIGURA 34 - Configuração dos elementos da solução em DLT.



FONTE: O autor (2019).

5.1 SOLICITAÇÕES CARACTERÍSTICAS

O dimensionamento das soluções subsequentes considera as combinações de carregamentos característicos discutidos a seguir.

5.1.1 Peso próprio

Considera-se a massa específica espécie de madeira apresentada na TABELA 31, em que é utilizado valor do Suplemento da NDS de 2018.

TABELA 31 - Massas específicas da madeira utilizada na solução em DLT.

Espécie de madeira	Nome científico	Peso específico (kg/m³)
Douglas Fir-Larch	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	490,0

FONTE: American Wood Council (AWS) (2018b)

Ainda, consideram-se os valores característicos para o peso específico e peso próprio dos demais componentes do sistema de DLT apresentados na TABELA 32.

TABELA 32 – Valores característicos de peso próprio para demais componentes do DLT.

Elemento	Peso específico (kg/m³)	Peso próprio (kg/m²)
Placa de concreto com 5 cm de espessura	2.400	120,0

FONTE: Adaptado de ABNT (1980).

5.1.2 Uso/ocupação

Considera-se 4,79 kN/m² (100 psf) uniformemente distribuídos, seguindo as considerações de carregamento para arquibancadas da norma ASCE 7-02.

5.1.3 Carregamento horizontal

São consideradas as cargas horizontais de vento incidente nas pessoas que estiverem ocupando a torre e o carregamento mínimo de 1 kN/m no guarda-corpo, conforme especificado no item 5.5.9 da NBR 7190:1997.

Considera-se que os carregamentos horizontais são de curta duração para as combinações de carregamentos.

5.2 DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS DO DECK

Para as condições do projeto em questão, são consideradas as propriedades para as madeiras escolhidas apresentadas na TABELA 33.

TABELA 33 - Propriedades de cálculo para a madeira escolhida ($C_D = 1,0$, $C_t = 1,0$, $C_M = 1,0$).

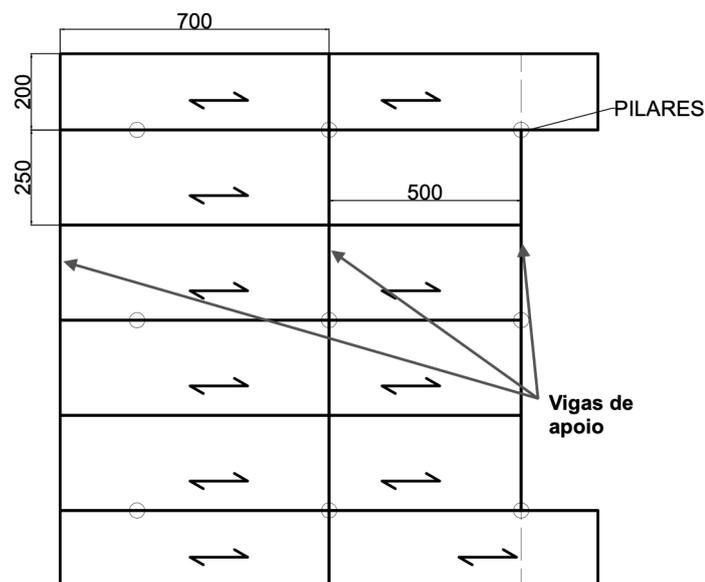
Espécie de madeira	F'_b (MPa)	F'_v (MPa)	E' (MPa)
Douglas Fir Larch	11,0	1,2	11032

FONTE: O autor (2019).

5.2.1 Placas de DLT

Por trabalharem como lajes compostas de lâminas interconectadas por cavilhas, o dimensionamento das placas de DLT deve ser feito com o auxílio de softwares de elementos finitos. Como o conhecimento deste tipo de *software* transpassa o escopo do presente trabalho (uma vez que se objetiva calcular as estruturas manualmente com o conhecimento adquirido ao decorrer da graduação em Engenharia Civil) utiliza-se um método de pré-dimensionamento com 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 configuração do vão, a espécie de madeira e considerações sobre o carregamento atuante. Escolhe-se trabalhar com vãos simples (isto é, com as peças apoiadas em suas extremidades no sentido longitudinal das fibras) de 7 e 5 metros e madeira Douglas Fir de classe estrutural (*Single Span Sel Str*), conforme mostrado na FIGURA 35.

FIGURA 35 - Dimensões e disposição das placas de DLT.



FONTE: O autor (2019).

Nas tabelas de pré-dimensionamento utilizadas é considerado revestimento com placa cimentícia de 5 cm de espessura na face superior das placas de DLT, além da carga de ocupação. A tabela utilizada contendo todas essas considerações é mostrada na TABELA 34.

TABELA 34 - Pré-dimensionamento em DLT.

Vão (m)	Carga de ocupação (kN/m ²)				
	2,00	2,50	3,50	5,00	7,50
3,05	5x10	5x10	5x10	5x10	5x10
3,35	5x10	5x10	5x10	5x10	5x15
3,66	5x10	5x10	5x10	5x15	5x15
3,96	5x10	5x10	5x15	5x15	5x15
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
6,70	5x20	5x20	5x20	5x20	5x25
7,31	5x20	5x20	5x20	5x25	5x25

FONTE: Adaptado de StructureCraft (2019).

Segundo StructureCraft (2019a), os valores tabelados para o pré-dimensionamento dos painéis de DLT já consideram os seguintes fatores: $C_D = 1,15$, $C_M = 1,0$, $C_t = 1,0$ e $C_r = 1,15$. Ainda, o escritório garante que, para as condições tabeladas, são satisfeitos os critérios de vibração da norma AISC DG 11 e deflexão máxima de $L/240$.

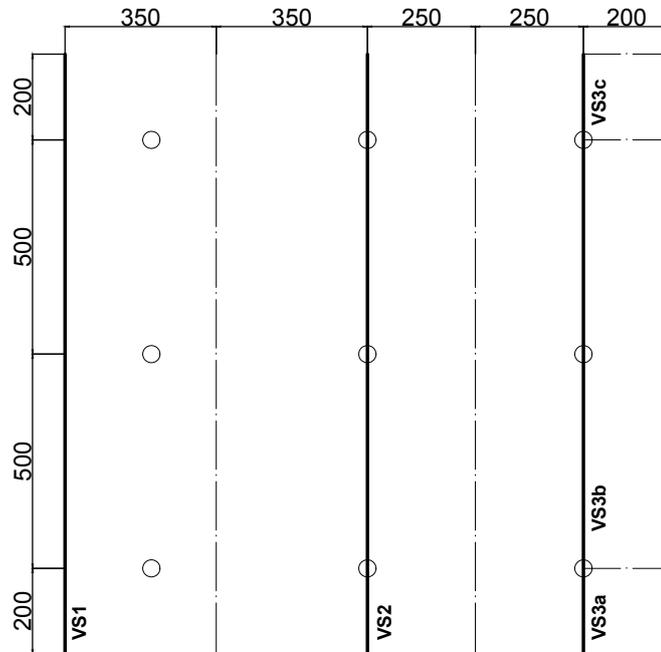
Utiliza-se os valores tabelados para carregamento de ocupação de $5,00 \text{ kN/m}^2$ com vão de $7,31 \text{ m}$. Para estas condições, assume-se que lâminas de $5 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$ colocadas ao alto atendem às considerações da NDS segundo o guia da StructureCraft, já considerando a aplicação de placas cimentícias na face superior das placas de DLT.

5.2.2 Vigas secundárias

Os painéis estruturais de DLT são apoiados nas vigas secundárias, e assume-se que o carregamento resultante seja uniformemente distribuído. Para estimar esse

carregamento, escolhe-se utilizar o artifício de traçar as linhas de influência de cada viga (linhas tracejadas da FIGURA 36 a seguir).

FIGURA 36 - Distribuição da carga dos painéis para as vigas secundárias.



FONTE: O autor (2019).

Determina-se o carregamento em cada uma das vigas secundárias utilizando-se a equação

$$q_{viga} = \frac{q_{painel} \cdot A_{influência}}{L_{viga}} \quad (25)$$

onde:

- q_{viga} é o carregamento da viga, em kN/m;
- q_{painel} é o carregamento no painel, em kN/m²;
- $A_{influência}$ é a área de influência da viga;
- L_{viga} é o comprimento da viga.

Para estimar o peso próprio das vigas, adota-se uma seção transversal inicial de 30 cm x 60 cm e escolhe-se que as vigas sejam de Eucalipto Citriodora (similarmente às vigas da solução em *decking*), resultando em um peso próprio de 1,798 kN/m.

Chega-se, portanto, às cargas características de peso próprio e ocupação para o dimensionamento das vigas secundárias apresentadas na TABELA 35 a seguir.

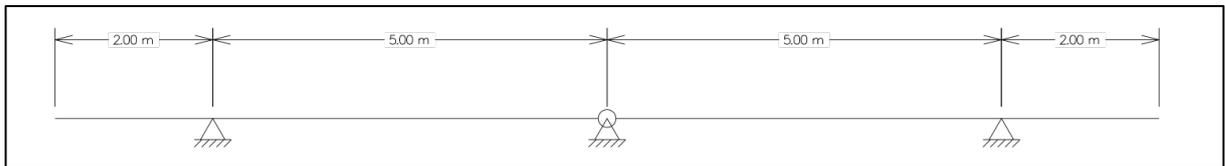
TABELA 35 - Ações solicitantes às vigas secundárias da solução em DLT.

Viga	$F_{G,k}$ (kN/m)	$F_{Q,k}$ (kN/m)
VS1	$1,798+0,849 = 2,647$	16,765
VS2	$1,798+0,849+0,606 = 3,253$	$16,765+11,975 = 28,740$
VS3a = VS3c	$1,798+0,606+0,485 = 2,889$	$11,975+9,580 = 21,555$
VS3b	$1,798+0,606 = 2,404$	11,975

FONTE: O autor (2019).

Observa-se que a viga VS2 recebe maior parcela de carga. Desta forma, escolhe-se dimensionar a viga VS2 e aplicar a mesma seção para as demais, de forma favorável a segurança estrutural. O modelo adotado para a viga secundária VS2 é apresentado na FIGURA 37.

FIGURA 37 - Modelo estrutural esquemático da viga VS2.



FONTE: O autor (2019).

Modela-se então, com auxílio do software Ftool, a viga VS2 para se obter as deformações elásticas. Na TABELA 36 a seguir é apresentada a verificação da seção arbitrada quanto às flechas. As deformadas e diagramas obtidos no software podem ser encontradas no Apêndice 8. Como observado no dimensionamento das vigas na solução em *decking*, para a configuração do modelo escolhido a flecha nos vãos é comumente o fator limitante para o ELS.

TABELA 36 – Verificação das deformações da viga VS2.

Seção (bxh)	$\delta_{pp,inst,v\tilde{a}o}$ (mm)	$\delta_{ocup,inst,v\tilde{a}o}$ (mm)	$\delta_{final,v\tilde{a}o}$ (mm)	$\delta_{lim,v\tilde{a}o}$ (mm)
30x60	0,692	6,121	14,3	25,0

FONTE: O autor (2019).

Observa-se, portanto, que a seção transversal de 30 cm x 60 cm satisfaz os limites de deformação estabelecidos na NBR 7190:1997.

A verificação da capacidade resistente das vigas é apresentada na TABELA 37.

TABELA 37 - Verificação da capacidade resistente das vigas secundárias.

M_d (kN.cm)	$\sigma_{c_0,d}$ (MPa)	$f_{c_0,d}$ (MPa)	$\sigma_{c_0,d}/f_{c_0,d}$	V_d (kN)	τ_d (MPa)	$f_{v_0,d}$ (MPa)	$\tau_d/f_{v_0,d}$
9812,00	5,45	17,01	32,05%	128,84	1,07	2,28	47,09%

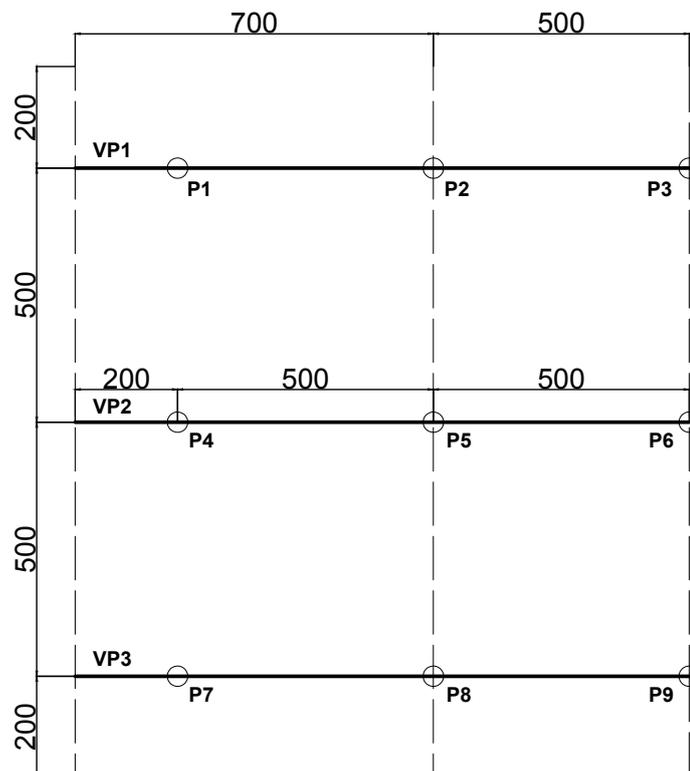
FONTE: O autor (2019).

Verifica-se que capacidade resistente da madeira não é excedida.

5.2.3 Vigas primárias

As vigas secundárias são apoiadas nas vigas primárias, então estima-se o carregamento das vigas primárias com base nas reações de apoio encontradas ao dimensionar as vigas secundárias. A FIGURA 38 apresenta a configuração esquemática das vigas primárias, que se apoiam nos pilares da estrutura.

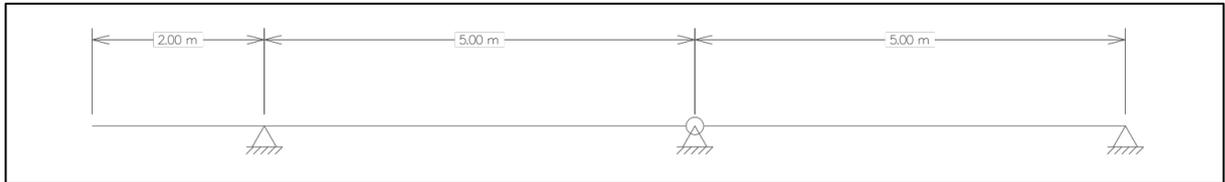
FIGURA 38 - Posição das vigas primárias na solução em DLT.



FONTE: O autor (2019).

O modelo adotado para as vigas primárias é apresentado na FIGURA 39.

FIGURA 39 - Modelo estrutural esquemático das vigas primárias.



FONTE: O autor (2019).

Estima-se o carregamento nas vigas primárias com base as reações de apoio das vigas secundárias (encontradas no Apêndice 8). Para a estimativa do peso próprio das vigas, adota-se uma seção transversal inicial de 30 cm x 60 cm. Utilizando a Equação 20, estima-se então um peso próprio característico de aproximadamente 1,798 kN/m. Na TABELA 38 e na TABELA 39 a seguir são apresentados os carregamentos característicos das vigas primárias, em que se observa que a viga VP1 é a mais solicitada, juntamente com a VP3.

TABELA 38 – Carregamento característico de peso próprio ($F_{G,k}$) nas vigas primárias.

Viga	F_{Vs1} (kN)	F_{Vs2} (kN)	F_{Vs3} (kN)
VP1	12,9	15,9	12,8
VP2	11,1	13,6	9,8
VP3	12,9	15,9	12,8

FONTE: O autor (2019).

TABELA 39 – Carregamento característico de ocupação ($F_{Q,k}$) nas vigas primárias.

Viga	F_{Vs1} (kN)	F_{Vs2} (kN)	F_{Vs3} (kN)
VP1	82,1	140,8	81,7
VP2	70,5	120,8	42,6
VP3	82,1	140,8	81,7

FONTE: O autor (2019).

Modela-se então, com auxílio do software Ftool, a viga VP1 para se obter as deformações elásticas. Na TABELA 40 a seguir são apresentadas as tentativas de seção e suas verificações frente ao ELS. As deformadas e diagramas obtidos no software podem ser encontradas no Apêndice 9.

TABELA 40 - Dimensionamento das vigas primárias para o ELS para a solução em DLT.

Seção (bxh)	$\delta_{pp,inst,bal}$ (mm)	$\delta_{ocup,inst,bal}$ (mm)	$\delta_{final,bal}$ (mm)	$\delta_{lim,bal}$ (mm)
30x60	3,069	20,06	49,3	20,0
30x80	1,295	8,463	20,8	20,0
30x90	0,910	5,944	14,6	20,0

FONTE: O autor (2019).

Observa-se que a seção de 30 cm x 90 cm atende ao ELS. Sendo assim, deve-se verificar também o ELU. As propriedades da seção calculadas são mostradas na TABELA 41, e são utilizadas de forma auxiliar para as verificações demonstradas na TABELA 42.

TABELA 41 - Propriedades da seção para as vigas primárias da solução em DLT.

h (cm)	b (cm)	W_c (cm ³)	h/b	β_M	I_1 (cm)
90,0	30,0	40500,0	3,00	12,30	1014

FONTE: O autor (2019).

TABELA 42 - Verificação das vigas primárias para o ELU.

M_d (kN.cm)	$\sigma_{c_0,d}$ (MPa)	$f_{c_0,d}$ (MPa)	$\sigma_{c_0,d}/f_{c_0,d}$	V_d (kN)	τ_d (MPa)	$f_{v_0,d}$ (MPa)	$\tau_d/f_{v_0,d}$
26810,00	6,62	17,01	38,92%	136,39	0,76	2,28	33,23%

FONTE: O autor (2019).

Verifica-se que capacidade resistente da madeira não é excedida. Como feito com os demais elementos, verifica-se adicionalmente a ocorrência de esmagamento na região de apoios das vigas secundárias.

Usa-se, então, a Equação 10, em que são substituídos os valores de $R_d = 92,53$ kN, $b = 25$ cm e $c = 25$ cm. A TABELA 43 a seguir contém as verificações feitas para o esmagamento das vigas primárias.

TABELA 43 - Verificação do esmagamento das vigas primárias pelo apoio das vigas secundárias.

$\sigma_{c90,d}$ (MPa)	$f_{c90,d}$ (MPa)	$\sigma_{c90,d}/f_{c90,d}$
0,15	4,25	3,5%

FONTE: O autor (2019).

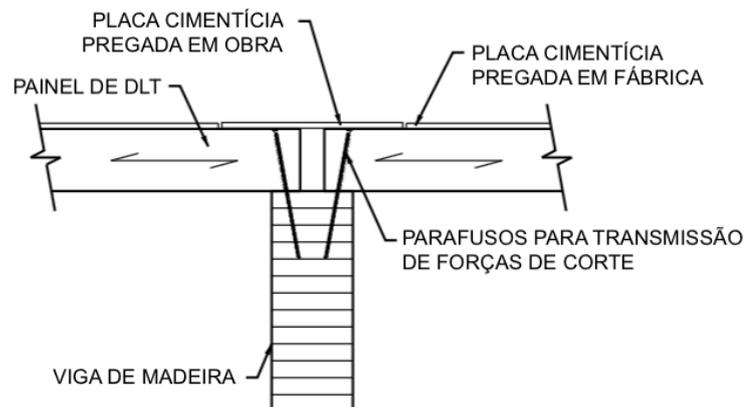
Verifica-se, portanto, que não haverá esmagamento das vigas primárias.

5.2.4 Ligações do *deck*

De forma similar às ligações do *deck* projetado com o sistema *decking*, observa-se que no *deck* a transmissão das cargas se dá por apoio direto entre os elementos. Desta forma, as conexões entre os elementos do *deck* desempenham o papel de facilitar e garantir seu correto posicionamento.

Para a ligação das placas de DLT às vigas, o escritório StructureCraft (2019a) traz, em seu guia de projetos, um desenho esquemático de como seriam conectados esses elementos, como se mostra na FIGURA 40 a seguir. Como a definição de se utilizar placas cimentícias já é feita na fase de projeto, os painéis já são fabricados com as placas “pregadas em fábrica”. Devido a necessidade de união dos painéis com os demais elementos do sistema construtivo, as placas cimentícias localizadas nas bordas dos painéis são pregadas em obra.

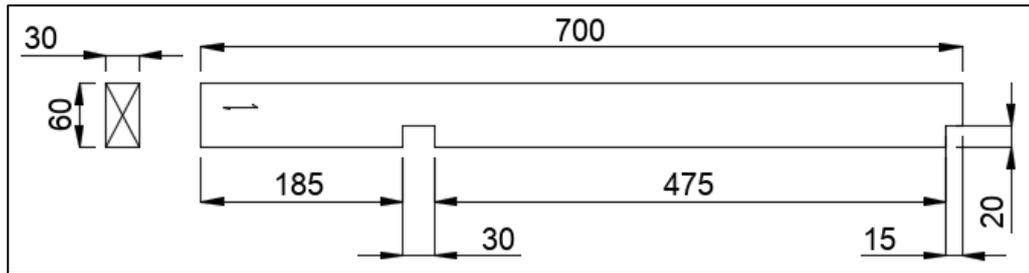
FIGURA 40 - Esquema da ligação entre os painéis de DLT e as vigas.



FONTE: Adaptado de StructureCraft (2019a).

Para as ligações entre as vigas secundárias e primárias, adota-se o uso de entalhes de 20 cm nas vigas secundárias, como demonstrado na FIGURA 41 a seguir.

FIGURA 41 - Entalhes das vigas secundárias.



FONTE: O autor (2019).

Seguindo a recomendação do item 7.4.3 da NBR 7190:1997, como a altura de entalhe é superior a $\frac{1}{4}$ da altura total da peça, é previsto o uso de parafusos verticais dimensionados à tração axial para a força cortante transmitida ao apoio. O maior valor de reação de apoio encontrado de cálculo é de 217,79 kN. Para parafusos com $f_{y,k}$ de 240 MPa e utilizando-se a equação 21 obtém-se que o diâmetro efetivo mínimo necessário é de 11 mm. Adota-se, portanto, dois parafusos de 10 mm de diâmetro.

A ligação das vigas primárias nos pilares, por sua vez, é definida com uso de entalhes de 20 cm na borda inferior das vigas secundárias. Como a dimensão do entalhe não é superior a 25% da altura total da peça apoiada, a NBR 7190:1997 pede que seja verificada novamente a condição de ELU para cisalhamento da peça majorando a força cortante máxima de cálculo por um fator h/h_1 (conforme mostrado na FIGURA 32) e considerando-se a área resistente com o desconto da porção entalhada.

Verifica-se, portanto, novamente as vigas secundárias para o cisalhamento. Os resultados obtidos são apresentados na TABELA 44 a seguir.

TABELA 44 – Verificação do cisalhamento das vigas secundárias com entalhe de 20 cm.

h (cm)	h₁ (cm)	V_d (kN)	V_d · h/h₁ (kN)	τ_d (MPa)	f_{v0,d} (MPa)	τ_d/f_{v0,d}
90,0	20,0	136,39	204,59	1,46	2,28	64,04%

FONTE: O autor (2019).

5.3 QUANTITATIVO DAS PEÇAS DO DECK PARA A SOLUÇÃO EM DLT

Na TABELA 45 é apresentado o levantamento quantitativo dos elementos que compõem o *deck* para a solução em DLT.

TABELA 45 - Quantitativo dos elementos estruturais do *deck* para a solução em DLT.

Descrição	Quant.	Volume (m³)	Peso (kg)
Painéis DLT Douglas Fir (200 cm x 25 cm x 700 cm)	4	14,0	6.860
Painéis DLT Douglas Fir (250 cm x 25 cm x 700 cm)	4	17,5	8.575
Painéis DLT Douglas Fir (250 cm x 25 cm x 500 cm)	4	12,5	6.125
Vigas em Eucalipto Citriodora (30 cm x 60 cm x 700 cm)	6	7,56	7.552
Vigas em Eucalipto Citriodora (30 cm x 90 cm x 500 cm)	3	4,05	4.046
Vigas em Eucalipto Citriodora (30 cm x 90 cm x 700 cm)	3	5,67	5.664
TOTAL	24	61,28	38.822

FONTE: O autor (2019).

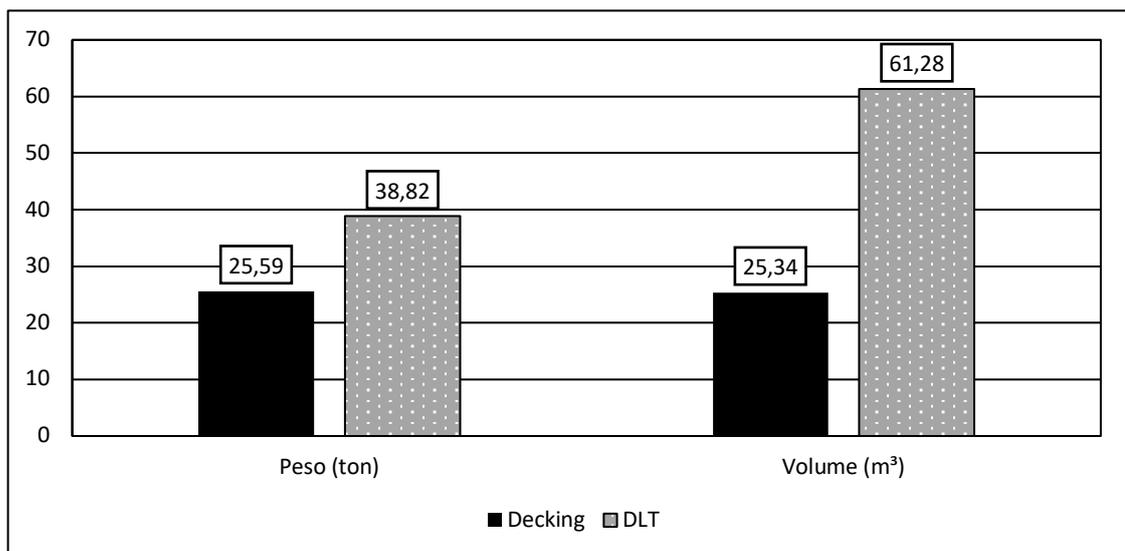
6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Realiza-se, neste capítulo, algumas comparações relevantes entre as soluções estruturais para lajes em madeira de *decking* e DLT. Compara-se, primordialmente, as duas soluções sob a ótica estrutural (considerando o peso próprio das estruturas e a sobrecarga nos pilares). São comparadas, também, as peculiaridades construtivas de cada sistema, como por exemplo a produtividade da construção e sua qualidade da execução. Enfoca-se, ainda, questões relativas à manutenção de ambas as soluções, abordando os cuidados que são necessários a cada uma. Os sistemas construtivos são, também, comparados quanto a sua estética e arquitetura.

6.1 COMPARAÇÃO ESTRUTURAL

O GRÁFICO 2 apresenta de forma resumida o volume de madeira e peso para as duas soluções propostas. É importante mencionar que a contabilização do peso da solução em DLT não considera as placas cimentícias que seriam colocadas sobre os painéis, uma vez que se objetiva comparar as quantidades de madeira necessárias para as soluções sob a ótica estrutural. Como a função das placas tem relação com a durabilidade, não são consideradas nesse comparativo.

GRÁFICO 2 – Resumo das soluções em termos de volume e peso.



FONTE: O autor.

Por ser uma estrutura reticulada, isto é, com vazios entre os elementos estruturais, é esperado que a solução em *decking* seja mais leve que a estrutura maciça em DLT, o que de fato se verifica. Observa-se, porém, que a diferença entre os pesos das duas soluções e seus volumes não segue a mesma proporção: enquanto a alternativa em DLT é 52% mais pesada, essa solução utiliza 142% mais volume de madeira. Essa quebra de proporcionalidade é atribuída ao fato de que na alternativa em DLT se utiliza madeira de menor densidade para compor os painéis.

Outro fator determinante no cálculo dos demais elementos da torre é o montante de carga que se transmite aos pilares. De forma genérica, quanto maiores as solicitações nos pilares mais robustos estes devem ser. Na TABELA 46 a seguir, são comparadas as cargas de cálculo transmitidas por cada uma das soluções aos pilares da torre. Nessa comparação, o peso das placas cimentícias é contabilizado devido ao fato de constituírem uma parcela de sobrecarga nos pilares.

TABELA 46 - Comparativo entre cargas transmitidas aos pilares.

Pilar	Sd (Decking) kN	Sd (DLT) kN	Delta
P1	192	233	22%
P2	167	228	36%
P3	172	142	-17%
P4	175	180	3%
P5	166	184	11%
P6	81	84	4%
P7	204	233	14%
P8	179	228	27%
P9	178	142	-20%

FONTE: O autor (2019).

Observa-se que a solução em DLT solicita mais 7 dos 9 pilares da estrutura quando comparada à solução de *decking*, e que a carga do pilar mais solicitado com o *deck* em DLT é 14% superior à carga do pilar mais solicitado com o *deck* tradicional. Essa característica é explicada pela comparação anterior: uma vez que a solução em DLT emprega mais madeira em peso, os pilares desta solução também recebem mais carga. Essa característica é desfavorável do ponto de vista estrutural, uma vez que o carregamento do *deck* acontece a uma altura elevada e quando somado à ação global do vento na torre pode gerar momentos nas fundações devido a excentricidade originada pelos deslocamentos horizontais da torre.

6.2 DEMAIS COMPARATIVOS

Analisando-se as duas soluções estruturais sob a ótica construtiva, elenca-se como principal diferença o fato de estruturas em *decking* necessitarem que todas as ligações e conexões sejam feitas em obra enquanto estruturas em DLT já vem, primordialmente, prontas de fábrica, restando apenas poucas conexões a serem feitas em obra. A título de comparação, na estrutura do *deck* tradicional deveriam ser posicionados e conectados em obra quase 1.000 peças, enquanto na estrutura em DLT apenas 24 elementos seriam conectados em obra. O impacto dessa diferença construtiva em termos de cronograma e, conseqüentemente, custos com mão de obra ainda é, todavia, de difícil inferência, uma vez que não é encontrada na literatura referências de fatores de produtividade para o sistema de DLT; quando analisada essa diferença construtiva em termos de qualidade de execução, porém, pode-se esperar que a construção em DLT tenha qualidade superior devido tanto ao fato de serem necessárias menos ligações em obra quanto ao fato de as placas serem produzidas industrialmente.

A característica do sistema construtivo de DLT ter suas placas pré-fabricadas poderia ser considerada, ainda, uma vantagem de mercado a ser explorada comercialmente, uma vez que a industrialização da construção é uma das tendências do setor da construção civil para o aumento da produtividade segundo Barreiros; Zancul (2014).

Em termos de logística e transporte dos elementos estruturais até a obra, todos os elementos de ambas as soluções poderiam ser transportados em carretas convencionais. Enquanto no projeto da laje em *decking* a maior peça estrutural em volume é uma viga principal, com cerca de 1 m³ e maior dimensão de 700 cm, no projeto em DLT deve-se transportar um painel de aproximadamente 4 m³ de madeira e maior dimensão de 700 cm.

Quanto à durabilidade e manutenção das estruturas, ambas as soluções necessitam de cuidados quanto ao controle da umidade da madeira para garantir o desempenho estrutural previsto. Para a solução em *decking* é necessário tratamento superficial dos elementos com impregnante, enquanto para as placas de DLT é preciso revestir sua superfície com placas cimentícias impermeabilizadas, por ser um sistema de piso não-vazado. Observa-se que essa intervenção necessária para

manter a estrutura de DLT durável em ambientes externos faz com que se perca o aspecto de madeira aparente, além de diminuir o apelo ambiental desse método construtivo, o que para a aplicação estudada constituem desvantagens significativas para o sistema de DLT em termos estéticos. Como contraponto, por ser uma estrutura maciça e não vazada como a de *decking*, a alternativa em DLT pode ter efeito psicológico nos ocupantes da edificação, transmitindo uma maior sensação de segurança.

No que se refere ao desempenho frente 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.

7 CONCLUSÃO

Ao final deste trabalho, foi atingido o objetivo de se projetar a nível básico duas soluções de *deck* para a torre estudada. É possível, portanto, conceber as duas soluções estruturais para a edificação em questão.

Ao se buscar na literatura o embasamento teórico necessário para o entendimento técnico dos dois métodos construtivos focos deste trabalho, foi notável a dificuldade de encontrar referências brasileiras no assunto, o que confirma os dados que existem sobre a pouco expressiva (embora crescente) participação da madeira como material estrutural em obras civis no cenário nacional. Inclusive, pode-se elencar a falta de atualização da norma brasileira de estruturas de madeira como um dos fatores que reafirmam a falta de protagonismo deste material no Brasil. Ressalta-se que já existe uma atualização da NBR 7190 sob elaboração desde 2011, mas que até 2019 não entrou em vigência.

Para a elaboração do projeto conceitual da torre, ainda, foi necessário recorrer a outras áreas do conhecimento além da engenharia de estruturas: abordou-se, por exemplo, tópicos de arquitetura (como a funcionalidade e finalidade da torre, sua localização e questões de ordem estética, como a escolha de materiais) e logística (como o posicionamento da torre dentro do parque, a acessibilidade de máquinas e equipamentos), obtendo-se assim uma visão mais holística do projeto.

Uma vez definidas as premissas necessárias para o projeto do *deck* no projeto conceitual da torre, foram elaboradas as duas propostas de estrutura a fim de compará-las. Para tanto, buscou-se o embasamento normativo vigente aplicável e as técnicas de engenharia para o dimensionamento das estruturas, garantindo assim as condições necessárias de segurança e desempenho. No projeto da solução em DLT, para o dimensionamento das placas seria necessária sua modelagem em elementos finitos, uma vez que o sistema é de madeira massiva e não se consegue dimensionar seus elementos isoladamente de maneira não-computacional. Dado que esse nível de conhecimento extrapola os conteúdos vistos durante a graduação, recorreu-se a tabelas de pré-dimensionamento de um escritório renomado que já aplica esse sistema construtivo.

No processo de dimensionar as vigas da solução em DLT, ainda, foi observado que as seções necessárias para atender aos critérios de deformações admissíveis das vigas inviabilizariam a sua confecção de forma tradicional (apenas

uma peça maciça de madeira serrada), sendo necessário trabalhar com, por exemplo, vigas de Madeira Laminada Colada ou Madeira Laminada Cruzada. Trabalhando com esses dois sistemas de madeira engenheirada, porém, seria possível alcançar resistências muito superiores às resistências de cálculo utilizadas no dimensionamento realizado, uma vez que a tecnologia empregada nos sistemas de madeira engenheirada eleva a qualidade do material. Como o foco deste trabalho era comparar a diferença entre os sistemas de *decking* e DLT, todavia, optou-se por manter as mesmas resistências de cálculo da madeira para as vigas de ambas as soluções.

Foi realizado, então, o estudo comparativo dos dois métodos de construção de lajes em madeira, em que a principal análise desenvolvida foi sob a ótica estrutural. Foi observado que o volume de madeira necessário na solução em DLT é cerca de 140% superior ao *deck* convencional, embora seja apenas 50% mais pesada. Destaca-se, no entanto, que essa última relação é muito dependente das espécies de madeira escolhidas. Aventa-se que seria possível diminuir o volume de madeira necessário na solução em DLT caso fosse explorada, por exemplo, a alternativa de confecção das vigas em MLC (incorporando mais um sistema de madeira engenheirada em uso crescente no Brasil).

Na avaliação de diferença entre os sistemas estruturais em termos de cargas nos pilares, observa-se que de forma geral os pilares são mais solicitados na alternativa de DLT (como consequência de seu maior peso próprio) o que a torna menos atrativa como solução estrutural, porém não a ponto de inviabilizá-la.

As demais comparações feitas, embora de natureza qualitativa, permitem concluir que o sistema de DLT tem como vantagem principal a agilidade no processo construtivo (por meio da industrialização dos painéis) e o emprego de técnicas que otimizam as características das madeiras (como um sistema de madeira engenheirada). Caso a edificação estudada fosse uma residência ou edifício convencional, o sistema de DLT também contribuiria para um melhor desempenho termo acústico, por ser um sistema de madeira massiva.

Em contrapartida, para a aplicação desejada de uma laje externa em uma torre de observação, o sistema DLT encontra limitações em termos de durabilidade. Seria necessária, então, a instalação de placas cimentícias na superfície superior dos painéis para garantir seu desempenho estrutural. Tal intervenção tem impacto

negativo principalmente na estética da estrutura, que deixaria de ser de madeira aparente.

Em conclusão, o sistema construtivo em DLT é uma alternativa viável sob o ponto de vista técnico, porém menos atrativo em comparação ao sistema tradicional de *decking* quanto ao desempenho estrutural por ser mais pesado e empregar mais madeira em volume. Em contrapartida, por ter característica de pré-fabricação, o sistema de DLT pode apresentar vantagens quanto ao cronograma de construção da obra e quanto a qualidade do material.

7.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Observa-se que no presente trabalho foi adotada uma simplificação para o dimensionamento dos painéis em DLT; como recomendação para trabalhos futuros, seria interessante a elaboração do dimensionamento detalhado dos painéis, utilizando métodos de elementos finitos.

Em termos das comparações entre as duas soluções apresentadas, pode-se abordar outros vieses. A título de exemplo, poder-se-ia comparar seus desempenhos térmicos, a quantidade de carbono sequestrada, tecnologia construtiva necessária e análises dinâmicas das estruturas. Considera-se, ainda, comparar as soluções em termos de custos de materiais e cronograma.

Seria interessante, também, comparar os resultados obtidos com outros métodos construtivos de madeira engenheirada existentes atualmente, como o NLT e o CLT.

REFERÊNCIAS

- ALAMY. Wood observation. Disponível em: <<https://www.alamy.com/wood-observation-image226649278.html?pv=1&stamp=2&imageid=81F478A6-56FB-4987-99FE>>. Acesso em: 18/4/2019.
- AMERICAN WOOD COUNCIL (AWS). **National Design Specification (NDS) for Wood Construction 2018 Edition**. American Wood Council, 2018a.
- AMERICAN WOOD COUNCIL (AWS). **National Design Specification (NDS) Supplement: Design Values for Wood Construction 2018 Edition**. American Wood Council, 2018b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2003.
- BARREIROS, F.; ZANCUL, E. Estudo sobre produtividade na construção civil: desafios e tendências no Brasil. **Ey**, p. 12, 2014.
- BNDES. **Panoramas setoriais: mudanças climáticas**. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2016.
- BOKA POWELL. The Soto | BOKA Powell. Disponível em: <<http://www.bokapowell.com/project/the-soto/>>. Acesso em: 20/10/2019.
- CANADIAN WOOD COUNCIL. **Energy and the Environment in Residential Construction**. 2004.
- CARPINTERIA. Casa Bocaina. Disponível em: <<https://carpinteria.com.br/project/casa-bocaina/>>. Acesso em: 30/9/2019.
- CBCS - CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL. Aspectos da Construção Sustentável no Brasil e Promoção de Políticas Públicas. , p. 111, 2014.
- CORREIA, E. A. S. **Análise e dimensionamento de estruturas de madeira**, 2009. Porto: Universidade do Porto.
- COUTINHO, J. DE S. **Materiais De Construção**. , 1999.
- DIAS, A. **Como a madeira vai se transformar no principal material de construção de edifícios de múltiplos andares**. 1º ed. São Paulo, 2018.
- FEATURE PICS. Wooden Lookout Tower. Disponível em: <<https://www.featurepics.com/online/Wooden-Lookout-Tower-Pics432624.aspx>>. Acesso em: 18/4/2019.
- FERNANDES GASQUES, A. C.; MICHIKO, C.; OKAWA, P.; et al. **IMPACTOS AMBIENTAIS DOS MATERIAIS DA CONSTRUÇÃO CIVIL: Breve revisão teórica**.

Revista Tecnológica, v. 23, n. 1, p. 13–24, 2015.

FIGUEROA, M. J. M.; MORAES, P. D. DE. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. **Ambiente Construído**, v. 9, n. 4, p. 157–174, 2009.

GAZETA DO POVO. Os 10 melhores parques de diversões da América do Sul; a maioria está no Brasil. Disponível em: <<https://www.gazetadopovo.com.br/viver-bem/turismo/10-melhores-parques-diversoes-america-sul/>>. Acesso em: 26/3/2019.

GONG, M. Lumber-Based Mass Timber Products in Construction. **Timber Buildings and Constructions [Working Title]**, 2019. IntechOpen.

GOOGLE EARTH. Beto Carrero World. .

HAIRSTANS, R.; SMITH, R.; WILSON, P. The merits of varying forms of mass timber products for offsite and modular construction. **Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings**, 2018.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). Informações sobre madeiras. Disponível em: <http://www.ipt.br/informacoes_madeiras3.php?madeira=7>. Acesso em: 26/3/2019.

KUKLÍK, P. History of Timber Structures. **Handbook 1. Timber Structures**, 2008. Leonardo da Vinci Pilot Project.

MANZELLO, S. L.; SUZUKI, S. Exposing decking assemblies to continuous wind-driven firebrand showers. *Fire Safety Science*. **Anais...** . v. 11, p.1339–1352, 2014.

DE MELLO SCALIANTE, R.; HENRIQUE DE ALMEIDA, D.; CALIL JUNIOR, C.; et al. Brazilian Criteria Ultimate Limit States Verifications for Glulam Girders and Glulam Transversal Deck Panels Bridges. **International Journal of Materials Engineering**, v. 6, n. 4, p. 134–145, 2016. Scientific and Academic Publishing.

NAUMOVSKI, L. **Construction with engineered timber - Focus on environmental exposure and wetting risks during construction**, 2019. Western Norway University of Applied Sciences.

NETO, E. G. Estruturas de Madeira: Notas de aula. , 2019. Curitiba.

PEREIRA, M. C. DE M. **Painel estrutural de madeira maciça tipo DCLT: Estudo experimental, analítico e numérico de dois painéis de lamelas cruzadas com ligações cavilhadas**, 2019. Universidade de São Paulo.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de Madeira**. 6º ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2003.

ROTHOBLAAS. EWS Cone-shaped concealed head screw. Disponível em: <<https://www.rothoblaas.com/products/fastening/screws/screws-outdoor/ews>>. Acesso em: 18/10/2019.

SHIGUE, E. Z. Difusão da Construção em Madeira no Brasil: Agentes, Ações e Produtos. , 2018.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA (SBS). Área plantada com pinus e eucaliptos no Brasil. Disponível em: <http://www.sbs.org.br/area_plantada.htm>. Acesso em: 23/10/2019.

STRUCTURECRAFT. DLT | Dowel Laminated Timber. Disponível em: <<https://structurecraft.com/materials/mass-timber/dlt-dowel-laminated-timber>>. Acesso em: 12/10/2019.

STRUCTURECRAFT. Museum of Fine Arts - Houston. Disponível em: <<https://structurecraft.com/projects/museum-of-fine-arts-houston>>. Acesso em: 12/10/2019.

STRUCTURECRAFT. **Dowel Laminated Timber Design and Profile Guide**. 4^o ed. 2019a.

STRUCTURECRAFT. T3 Atlanta Office. Disponível em: <<https://structurecraft.com/projects/t3-atlanta>>. Acesso em: 12/10/2019b.

SYVERSON, C. Markets: Ready-Mixed Concrete. **Journal of Economic Perspectives**, v. 22, n. 1, p. 217–233, 2008.

TREX. Decks.com. Disponível em: <<https://www.decks.com/>>. .

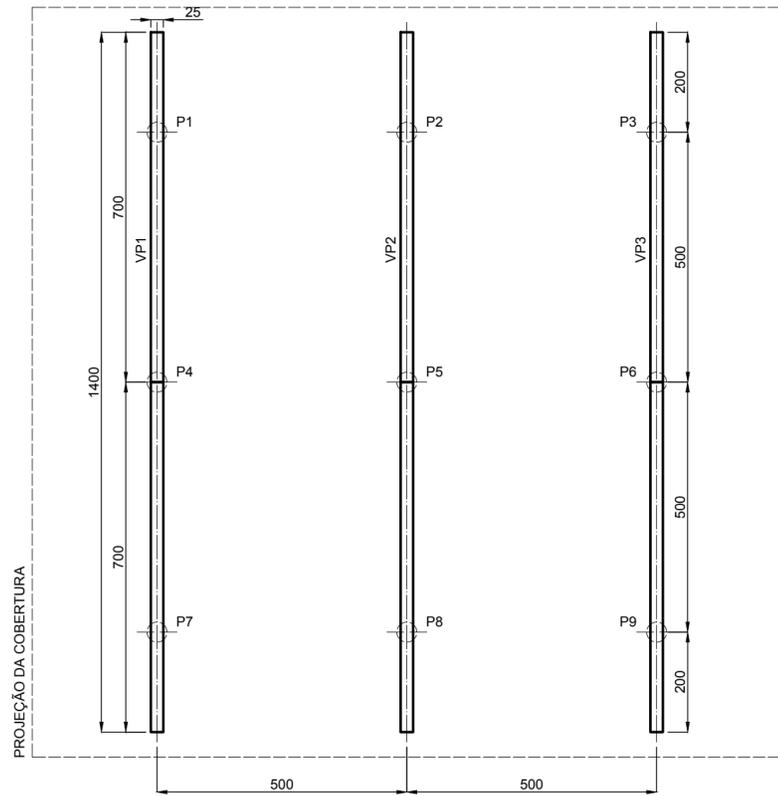
VARA, Â. F. F. **Estudo Comparativo Entre Estruturas em Madeira e Estruturas em Betão Armado**, 2015. Universidade de Évora.

WILDNER, W.; CAMOZZATO, E.; TONIOLO, J. A.; et al. Mapa Geológico do Estado de Santa Catarina. Porto Alegre: CPRM, 2014. Escala 1:500.000. Geologia do Brasil e de Cartografia Geológica Regional. **Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, Ministério de Minas e Energia, Serviço Geológico do Brasil**, 2014.

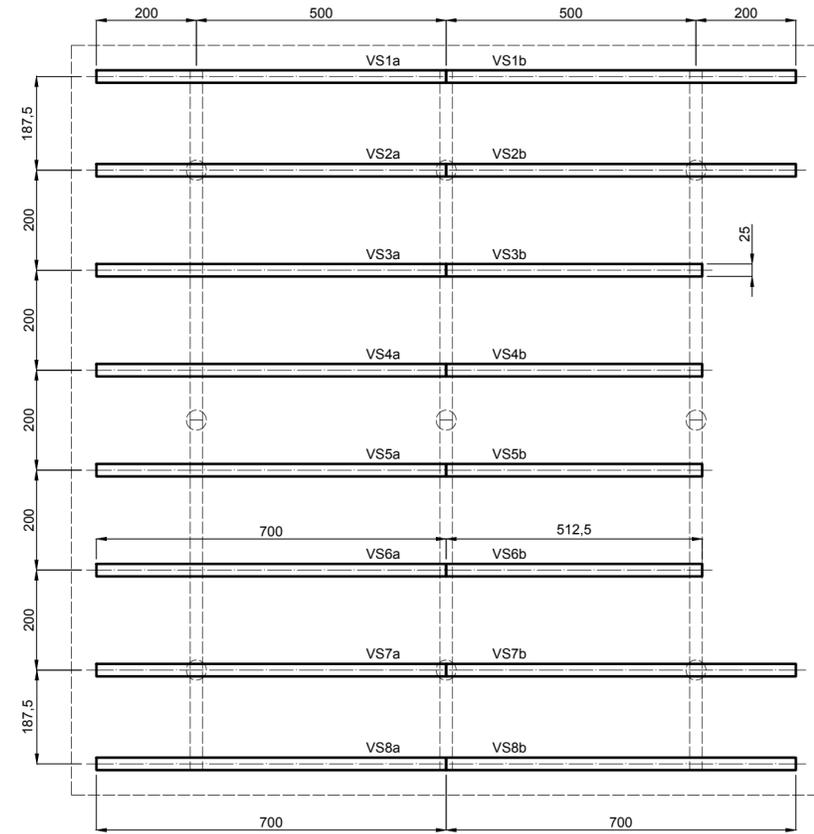
WILLIAMS, R. S.; RAILINGS, D.; CLEANERS, W. Chapter 16 - Finishing of Wood. **Wood Handbook - Wood as an engineering material**, p. 1–39, 2010.

APÊNDICE 1 – PLANTAS E CORTES DA SOLUÇÃO EM *DECKING*

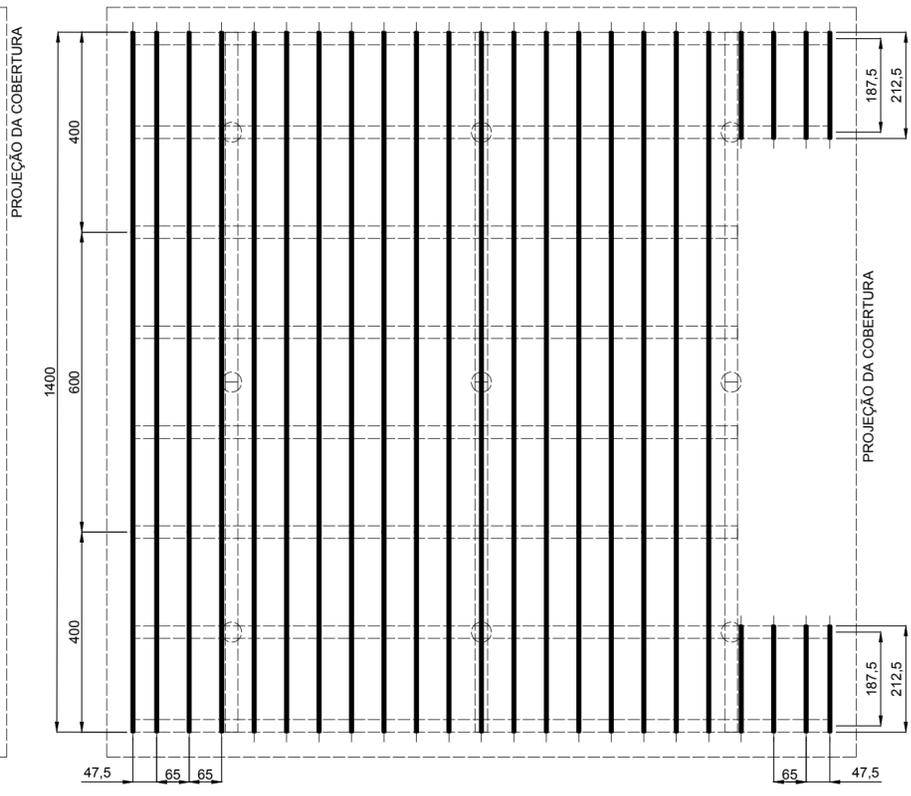
POSICIONAMENTO DAS VIGAS PRIMÁRIAS



POSICIONAMENTO DAS VIGAS SECUNDÁRIAS

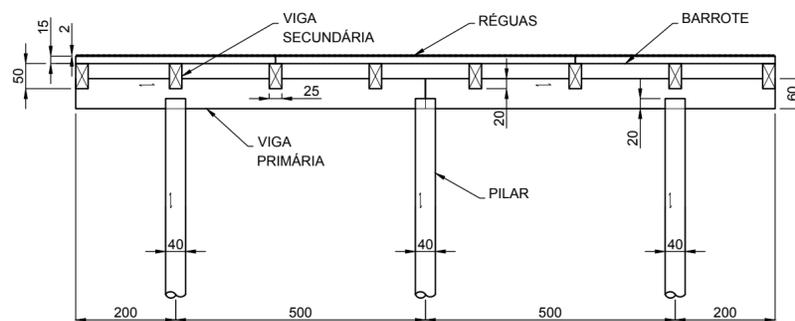


POSICIONAMENTO DOS BARROTES

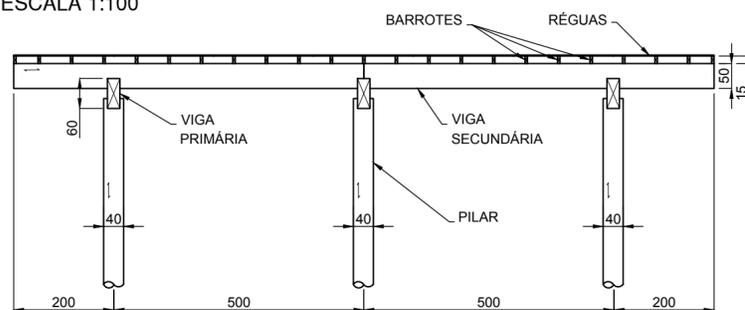


PLANTA DA ESTRUTURA DO DECK
ESCALA 1:100

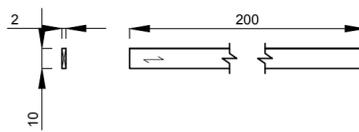
VISTA A
ESCALA 1:100



VISTA B
ESCALA 1:100

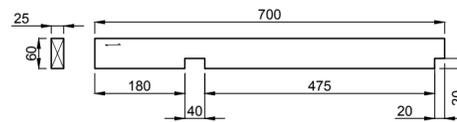


DETALHE DAS RÉGUAS
ESCALA 1:25

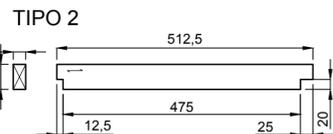
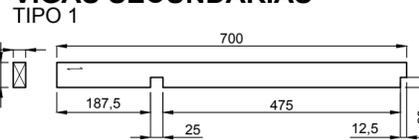


DETALHE DAS VIGAS
ESCALA 1:100

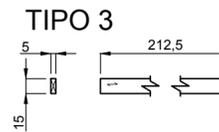
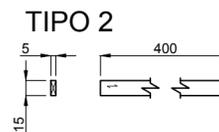
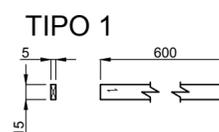
VIGAS PRIMÁRIAS



VIGAS SECUNDÁRIAS



DETALHE DOS BARROTES
ESCALA 1:50



QUANTITATIVO DE PEÇAS

Descrição	Quant.
Réguas em Ipê (10 cm x 2 cm x 200 cm)	880
Barrotes em Eucalipto Citriodora (5 cm x 15 cm x 200 cm)	8
Barrotes em Eucalipto Citriodora (5 cm x 15 cm x 400 cm)	38
Barrotes em Eucalipto Citriodora (5 cm x 15 cm x 600 cm)	19
Vigas em Eucalipto Citriodora (25 cm x 50 cm x 500 cm)	4
Vigas em Eucalipto Citriodora (25 cm x 50 cm x 700 cm)	12
Vigas em Eucalipto Citriodora (25 cm x 60 cm x 700 cm)	6

OBSERVAÇÕES:

- 1 - TODOS OS MATERIAIS, SERVIÇOS E TESTES DEVERÃO ATENDER ÀS EXIGÊNCIAS DAS NORMAS EDITADAS PELA ABNT (NBR 7190)
- 2 - MEDIDAS DADAS EM CM QUANDO NÃO INDICADAS

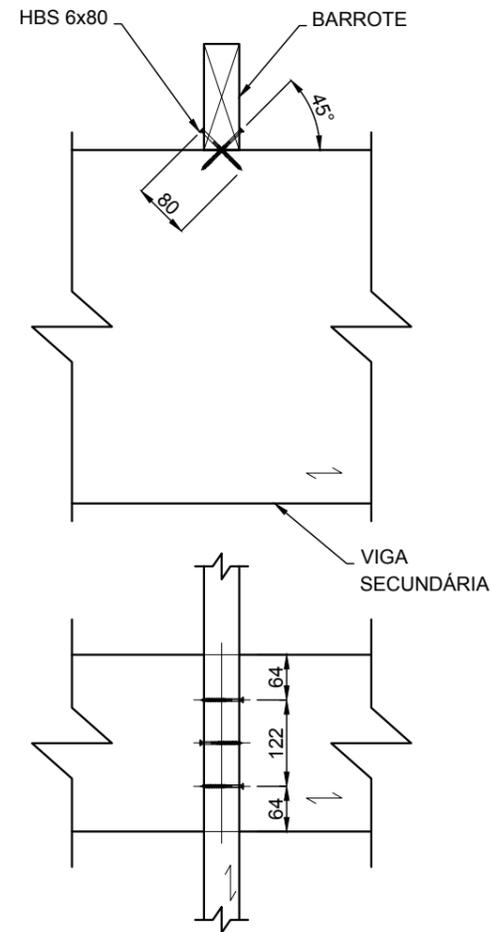
PROJETO ESTRUTURAL

OBRA	DECK DE MADEIRA PARA TORRE DE OBSERVAÇÃO		PRANCHA
RESPONSÁVEL TÉCNICO	GABRIEL MOCELLIN NETO		01
CLIENTE	UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ	CREA XXXXXX/PR	02
CONTEÚDO	PLANTAS E CORTES DA ESTRUTURA		R1
ESCALA	DATA	DESENHO	
INDICADA	NOVEMBRO/2019	GABRIEL MOCELLIN NETO	

APÊNDICE 2 – DETALHES DAS LIGAÇÕES DA SOLUÇÃO EM *DECKING*

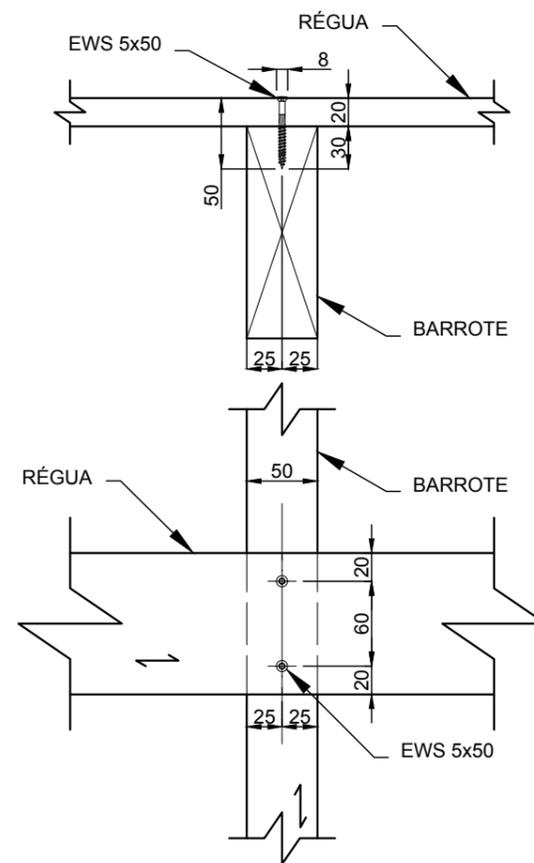
LIGAÇÃO BARROTE-VIGA SEC.

ESCALA 1:100



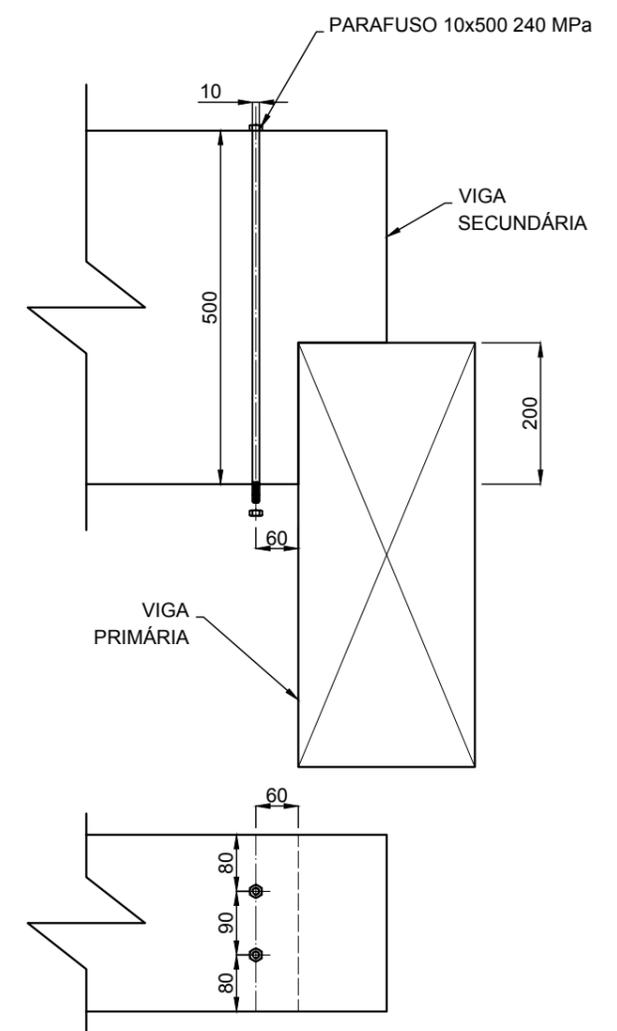
LIGAÇÃO RÉGUA-BARROTE

ESCALA 1:50



LIGAÇÃO VIGA SEC.-VIGA PRIM.

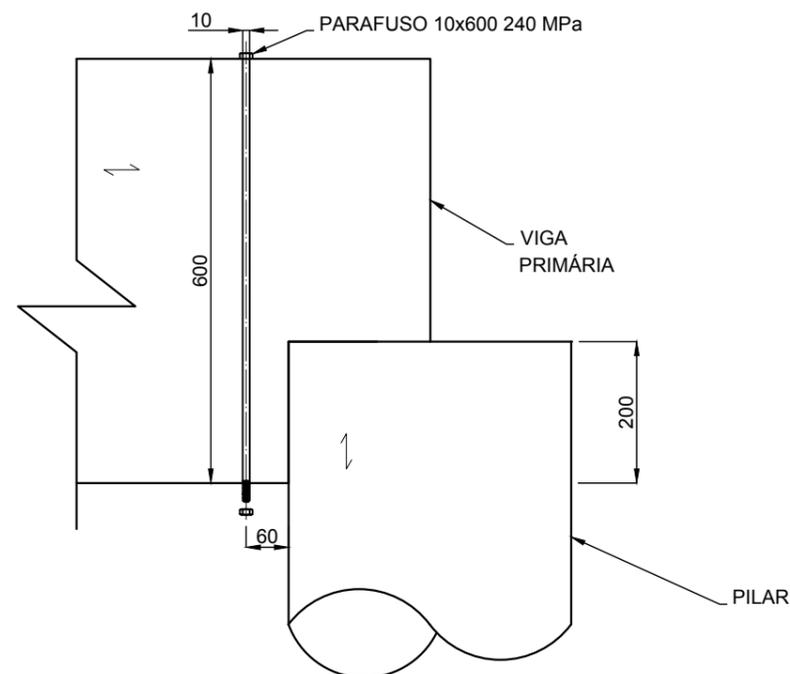
ESCALA 1:100



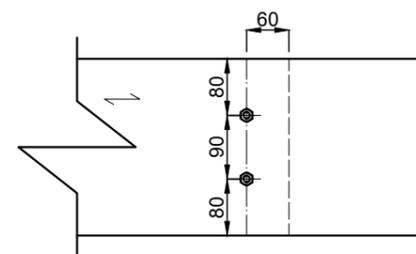
LIGAÇÃO VIGA PRIM.-PILAR

ESCALA 1:100

VISTA EM CORTE



VISTA EM PLANTA



OBSERVAÇÕES:

- 1 - TODOS OS MATERIAIS, SERVIÇOS E TESTES DEVERÃO ATENDER ÀS EXIGÊNCIAS DAS NORMAS EDITADAS PELA ABNT (NBR 7190)
- 2 - MEDIDAS DADAS EM MM QUANDO NÃO INDICADAS

PROJETO ESTRUTURAL

OBRA		DECK DE MADEIRA PARA TORRE DE OBSERVAÇÃO	
RESPONSÁVEL TÉCNICO		GABRIEL MOCELLIN NETO	
CLIENTE		UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ	
CONTEUDO		DETALHES DAS LIGAÇÕES	
ESCALA	DATA	DESENHO	
INDICADA	NOVEMBRO/2019	GABRIEL MOCELLIN NETO	

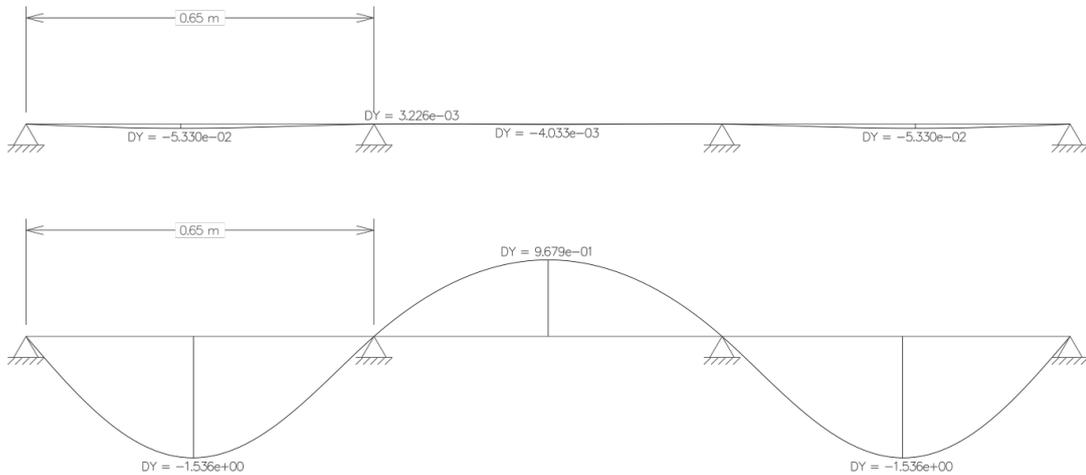
PRANCHA

02
02

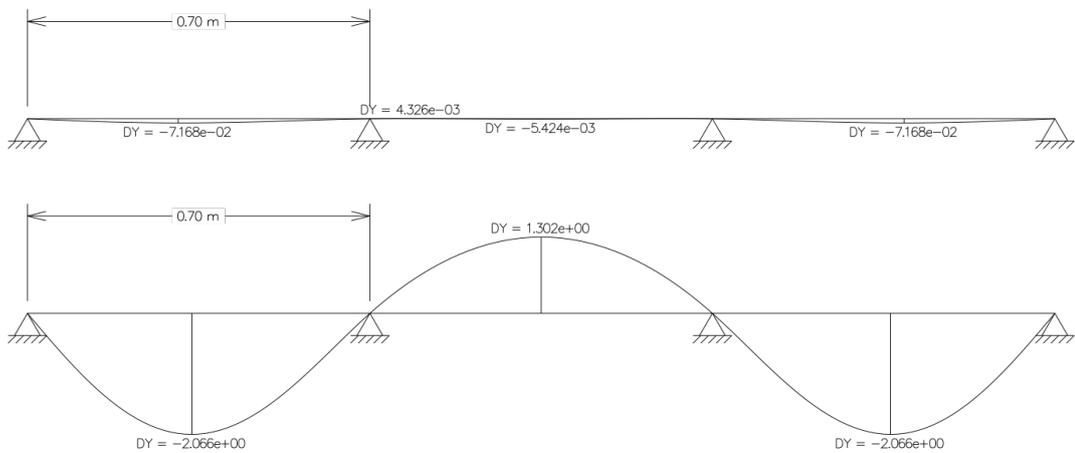
R1

APÊNDICE 3 – VERIFICAÇÃO DAS RÉGUAS (DECKING)

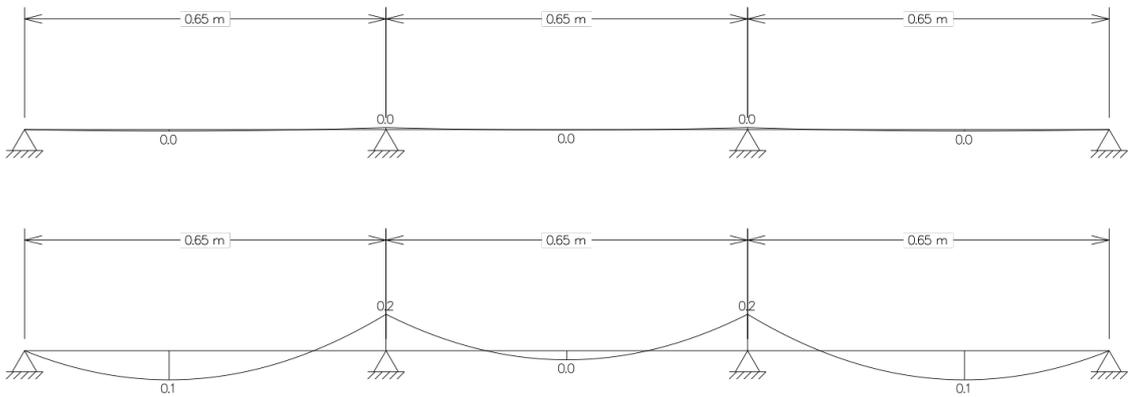
Deformada das régua para a tentativa de vão $L = 65$ cm, com $F_{G,k} = 0,02$ kN/m uniformemente distribuído e $F_{Q,k} = 0,40$ kN/m uniformemente distribuído apenas nos vãos externos.



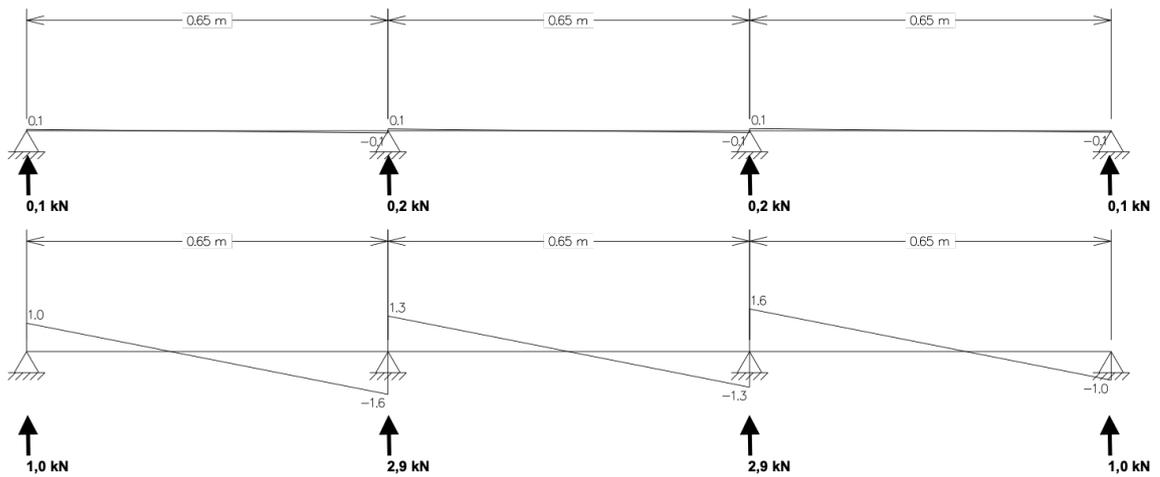
Deformada das régua para a tentativa de vão $L = 70$ cm, com $F_{G,k} = 0,02$ kN/m uniformemente distribuído e $F_{Q,k} = 0,40$ kN/m uniformemente distribuído apenas nos vãos externos.



Diagramas³ característicos de momentos das réguas, com $F_{G,k} = 0,02 \text{ kN/m}$ e $F_{Q,k} = 0,40 \text{ kN/m}$ uniformemente distribuídos.



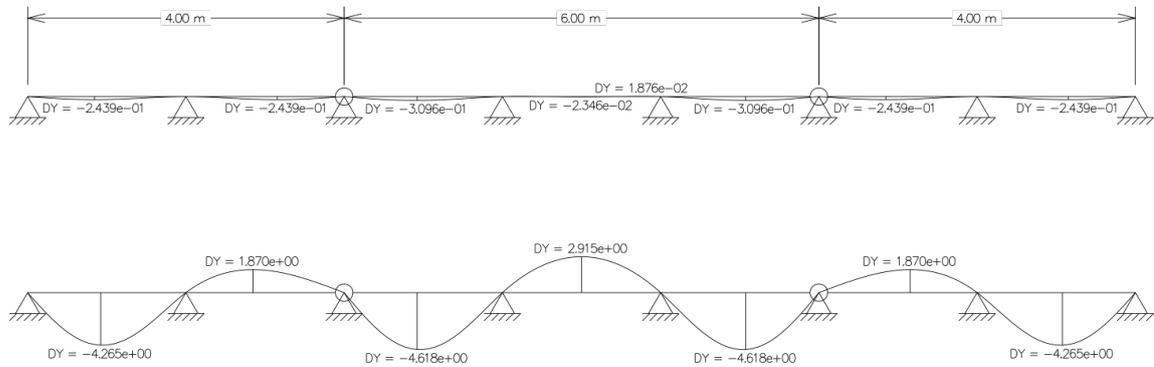
Diagramas característicos de cortantes das réguas, com $F_{G,k} = 0,02 \text{ kN/m}$ e $F_{Q,k} = 0,40 \text{ kN/m}$ uniformemente distribuídos.



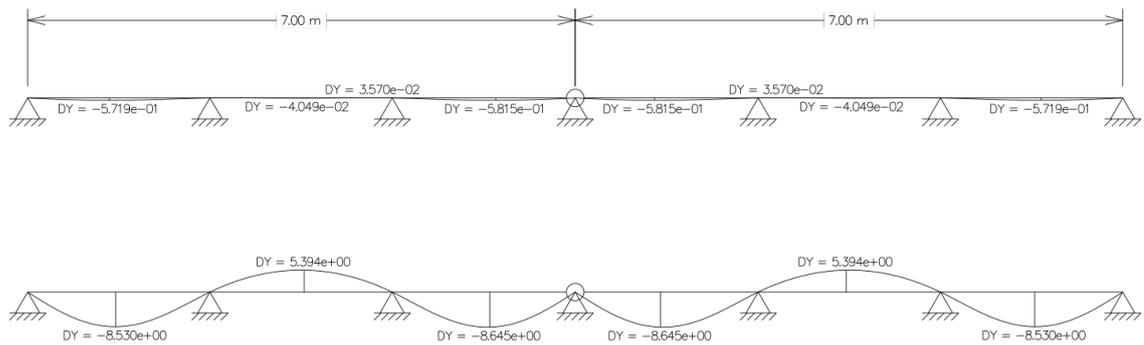
³ Os valores foram multiplicados por 10 para melhor visualização dos esforços gerados.

APÊNDICE 4 – VERIFICAÇÃO DOS BARROTOS (DECKING)

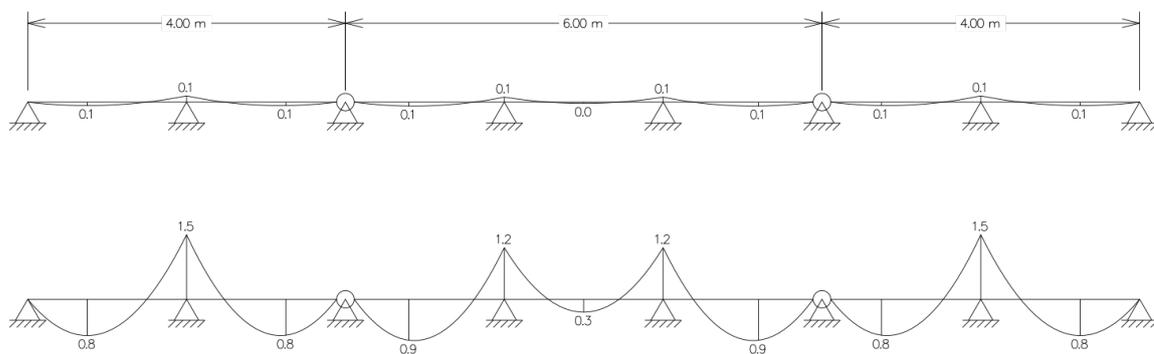
Deformada dos barrotos no arranjo A, com 8 apoios igualmente espaçados, $F_{G,k} = 0,28 \text{ kN/m}$ uniformemente distribuído e $F_{Q,k} = 2,90 \text{ kN/m}$ uniformemente distribuídos alternadamente nos vãos.



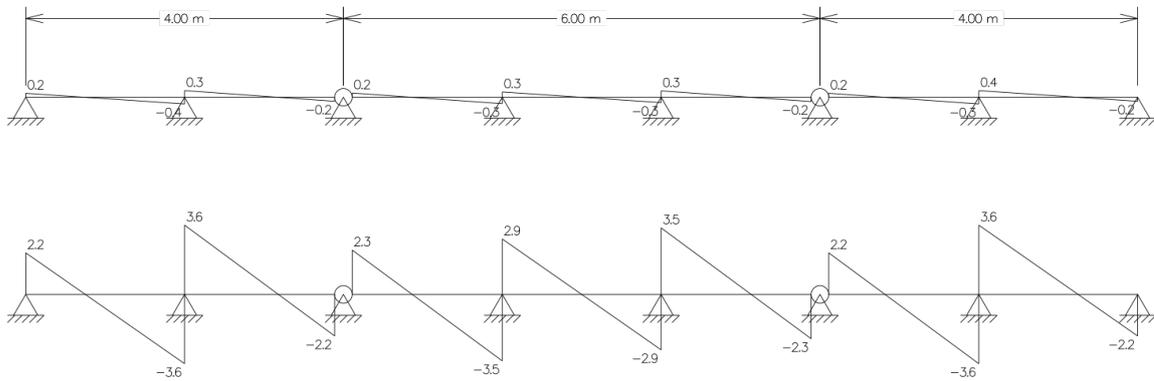
Deformada dos barrotos no arranjo B, com 7 apoios igualmente espaçados, $F_{G,k} = 0,28 \text{ kN/m}$ uniformemente distribuído e $F_{Q,k} = 2,90 \text{ kN/m}$ uniformemente distribuídos alternadamente nos vãos.



Diagramas característicos de momentos dos barrotos, com $F_{G,k} = 0,28 \text{ kN/m}$ e $F_{Q,k} = 2,90 \text{ kN/m}$ uniformemente distribuídos.



Diagramas característicos de cortantes dos barrotos, com $F_{G,k} = 0,28 \text{ kN/m}$ e $F_{Q,k} = 2,90 \text{ kN/m}$ uniformemente distribuídos.



Reações de apoio características (peso próprio) dos barrotos.

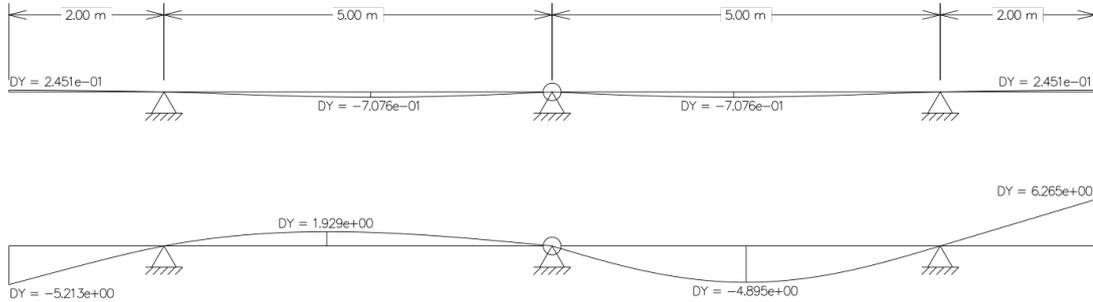
$R_{Vs1} = R_{Vs8} \text{ (kN)}$	$R_{Vs2} = R_{Vs7} \text{ (kN)}$	$R_{Vs3} = R_{Vs6} \text{ (kN)}$	$R_{Vs4} = R_{Vs5} \text{ (kN)}$
0,2	0,7	0,4	0,6

Reações de apoio características (ocupação) dos barrotos.

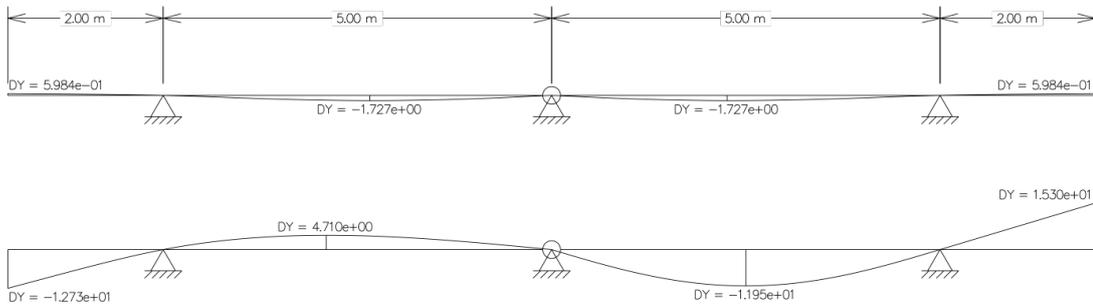
$R_{Vs1} = R_{Vs8} \text{ (kN)}$	$R_{Vs2} = R_{Vs7} \text{ (kN)}$	$R_{Vs3} = R_{Vs6} \text{ (kN)}$	$R_{Vs4} = R_{Vs5} \text{ (kN)}$
2,2	7,2	5,5	6,4

APÊNDICE 5 – VERIFICAÇÃO DAS VIGAS SECUNDÁRIAS (DECKING)

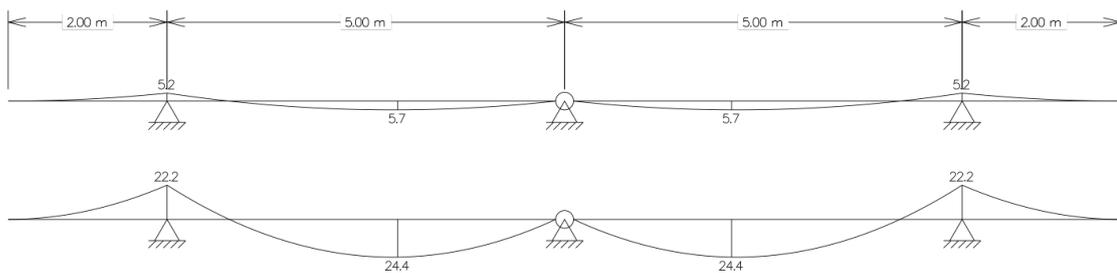
Deformada da VS2 para seção 25 cm x 50 cm, com $F_{G,k} = 2,58$ kN/m uniformemente distribuídos e $F_{Q,k} = 11,08$ kN/m aplicados no balanço (à esquerda) e no vão (à direita).



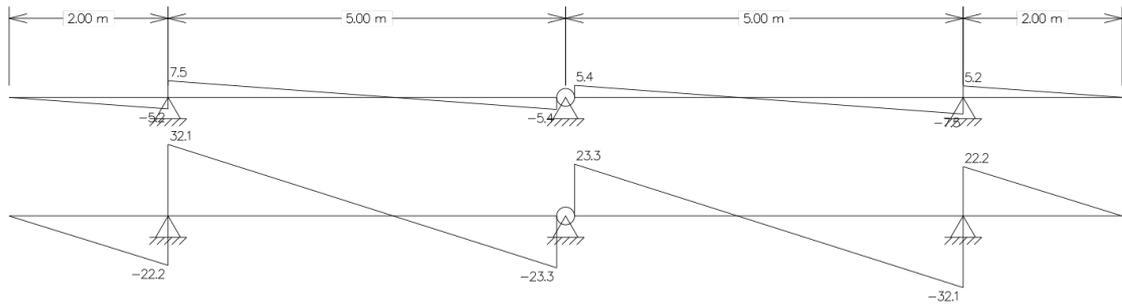
Deformada da VS2 para seção 20 cm x 40 cm, com $F_{G,k} = 2,58$ kN/m uniformemente distribuídos e $F_{Q,k} = 11,08$ kN/m aplicados no balanço (à esquerda) e no vão (à direita).



Diagramas característicos de momentos da VS2, com $F_{G,k} = 2,58$ kN/m e $F_{Q,k} = 11,08$ kN/m uniformemente distribuídos.



Diagramas característicos de cortantes da VS2, com $F_{G,k} = 2,58$ kN/m e $F_{Q,k} = 11,08$ kN/m uniformemente distribuídos.



Reações de apoio características (peso próprio) das vigas secundárias.

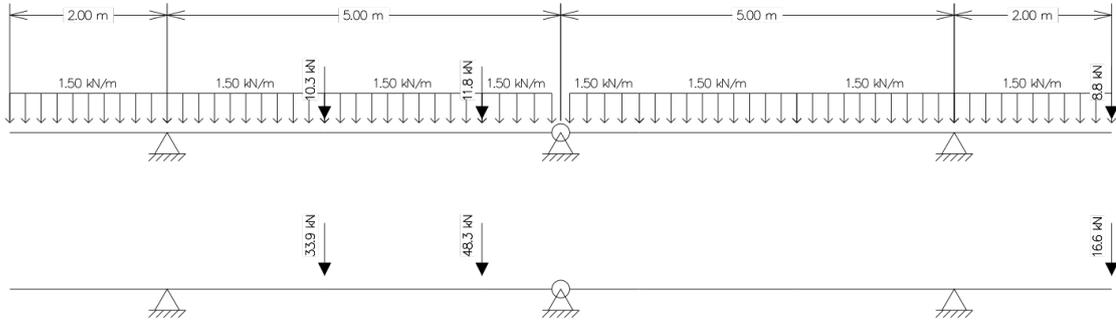
Viga	R_{VP1} (kN)	R_{VP2} (kN)	R_{VP3} (kN)
VS1 e VS8	8,8	7,6	8,8
VS2 e VS7	12,7	10,8	12,7
VS3 e VS6	10,3	9,7	5,3
VS4 e VS5	11,8	11,1	6,0

Reações de apoio características (ocupação) das vigas secundárias.

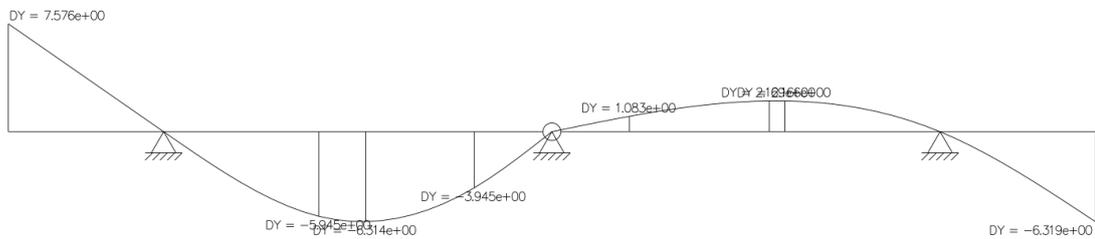
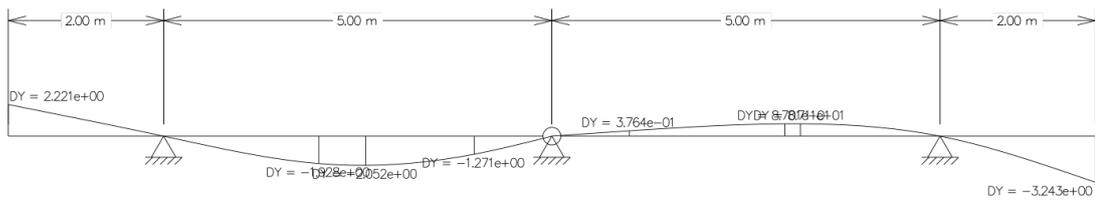
Viga	R_{VP1} (kN)	R_{VP2} (kN)	R_{VP3} (kN)
VS1 e VS8	16,6	14,2	16,6
VS2 e VS7	54,3	46,6	54,3
VS3 e VS6	33,9	31,8	17,3
VS4 e VS5	48,3	45,3	24,6

APÊNDICE 6 – VERIFICAÇÃO DAS VIGAS PRIMÁRIAS (DECKING)

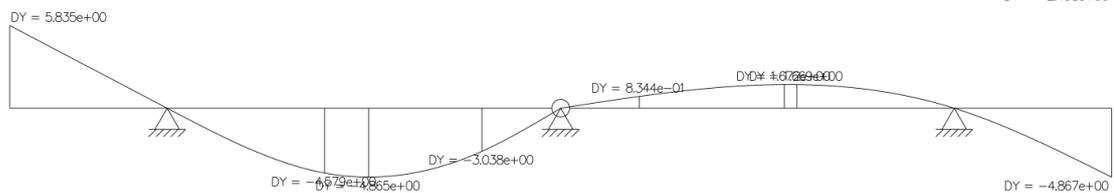
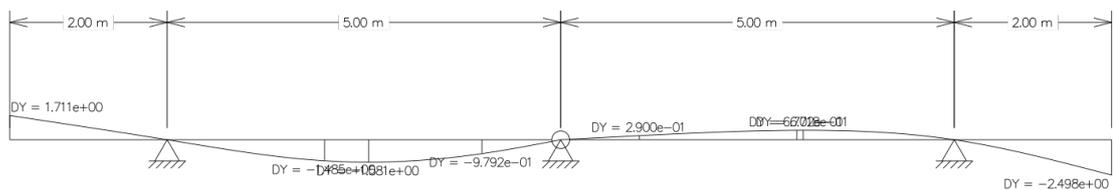
Carregamentos característicos da VP1 para verificação do ELS. Maior flecha no vão obtida na peça da esquerda e maior flecha no balanço obtida na peça da direita.



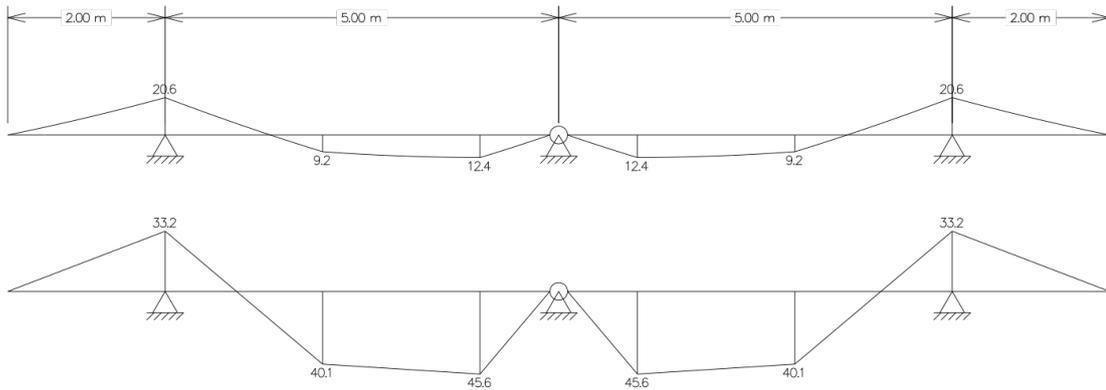
Deformada da VP1 para seção 25 cm x 55 cm, com as condições de carregamento previamente estabelecidas.



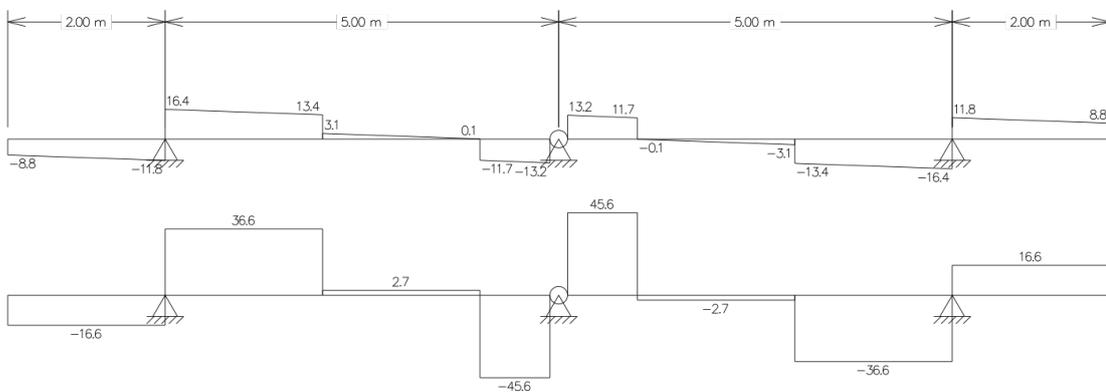
Deformada da VP1 para seção 25 cm x 60 cm, com as condições de carregamento previamente estabelecidas.



Diagramas característicos de momentos da VP1.



Diagramas característicos de cortantes da VP1.



Reações de apoio características (peso próprio) das vigas primárias nos pilares.

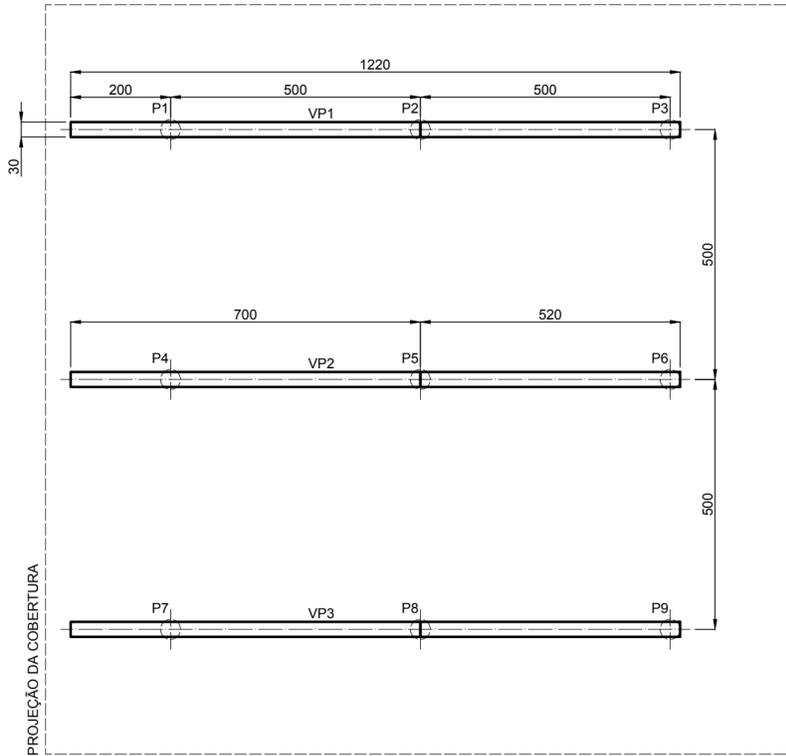
Pilar	R_k (kN)
P1	38,90
P2	33,74
P3	35,74
P4	29,54
P5	27,58
P6	15,26
P7	40,96
P8	35,68
P9	36,80

Reações de apoio características (ocupação) das vigas primárias nos pilares.

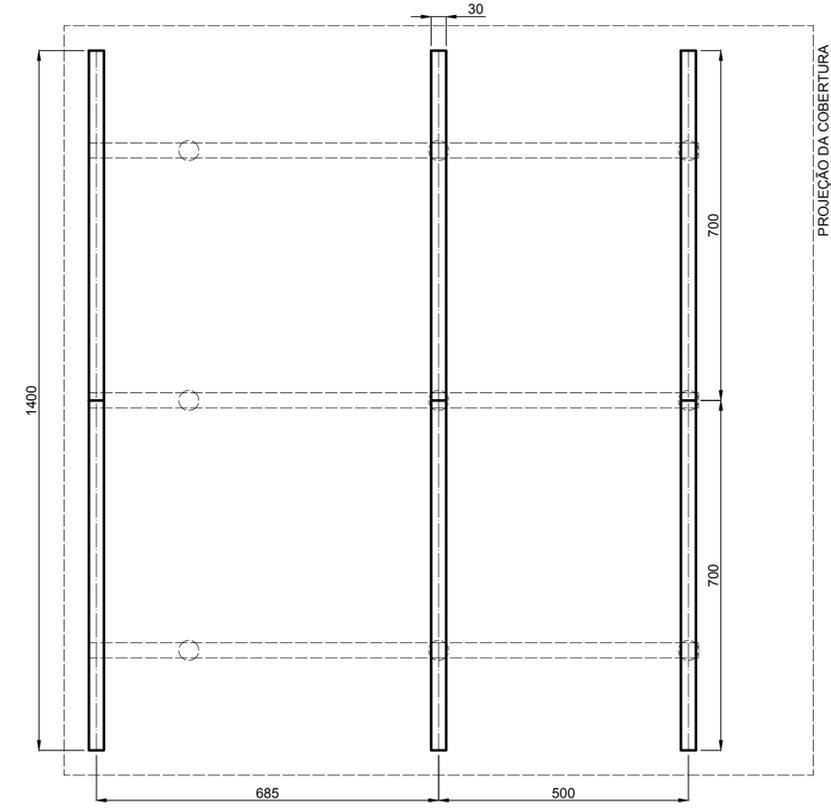
Pilar	R_k (kN)
P1	100,76
P2	88,26
P3	89,38
P4	97,90
P5	92,92
P6	43,38
P7	107,54
P8	94,62
P9	92,84

APÊNDICE 7 – PLANTAS E CORTES DA SOLUÇÃO EM DLT

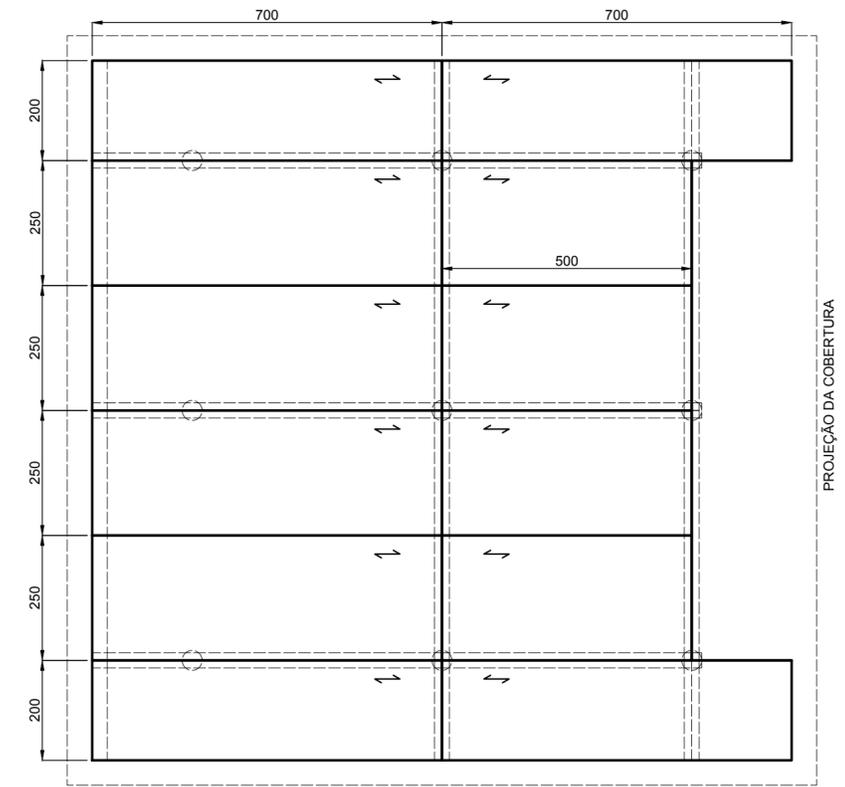
POSICIONAMENTO DAS VIGAS PRIMÁRIAS



POSICIONAMENTO DAS VIGAS SECUNDÁRIAS

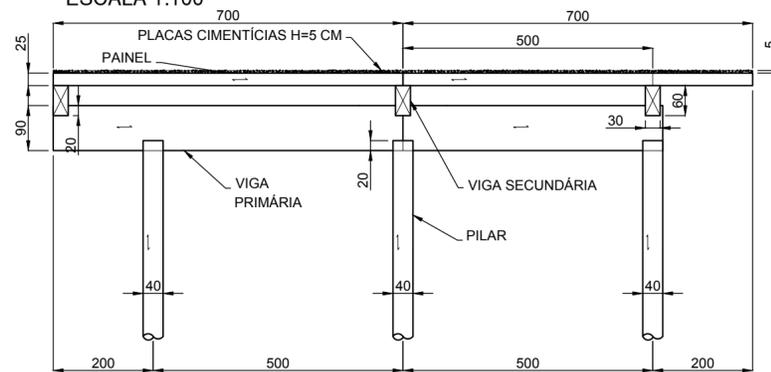


POSICIONAMENTO DOS PAINÉIS

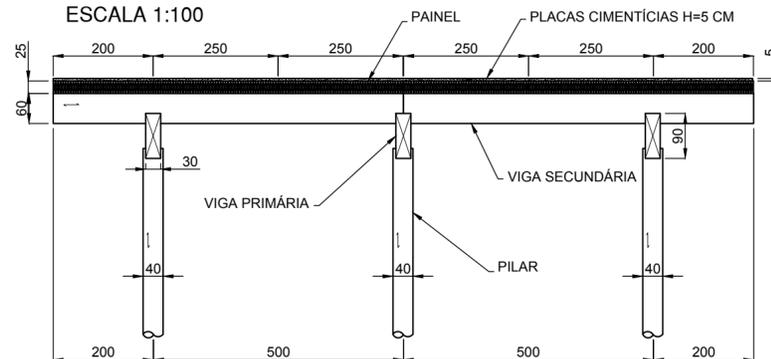


PLANTA DA ESTRUTURA DO DECK ESCALA 1:100

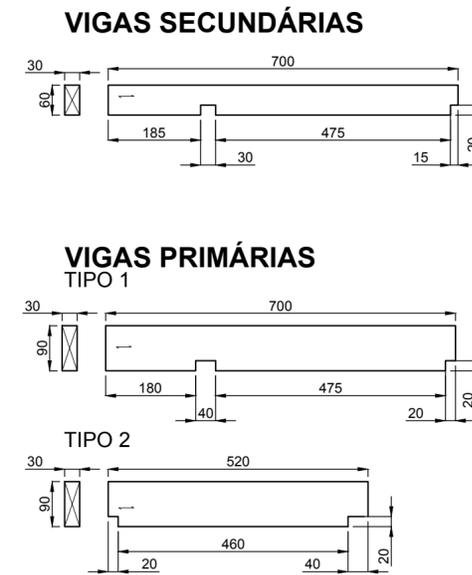
VISTA A ESCALA 1:100



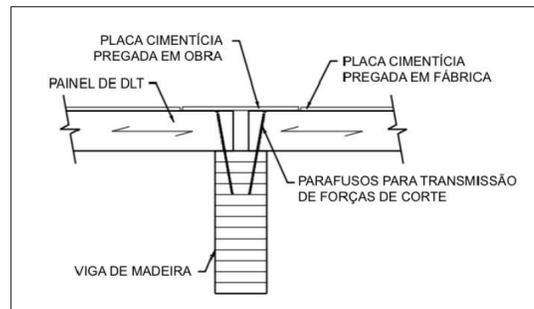
VISTA B ESCALA 1:100



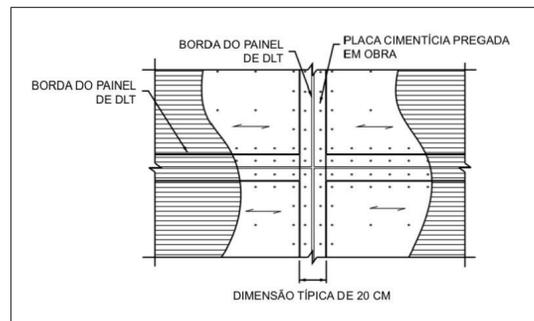
DETALHE DAS VIGAS ESCALA 1:100



DETALHE GENÉRICO DE LIGAÇÃO SEM ESCALA



DETALHE GENÉRICO DE INSTALAÇÃO DOS PAINÉIS SEM ESCALA



QUANTITATIVO DE PEÇAS

Descrição	Quant.
Painéis DLT Douglas Fir (200 cm x 25 cm x 700 cm)	4
Painéis DLT Douglas Fir (250 cm x 25 cm x 700 cm)	4
Painéis DLT Douglas Fir (250 cm x 25 cm x 500 cm)	4
Vigas em Eucalipto Citriodora (30 cm x 60 cm x 700 cm)	6
Vigas em Eucalipto Citriodora (30 cm x 90 cm x 500 cm)	3
Vigas em Eucalipto Citriodora (30 cm x 90 cm x 700 cm)	3

OBSERVAÇÕES:

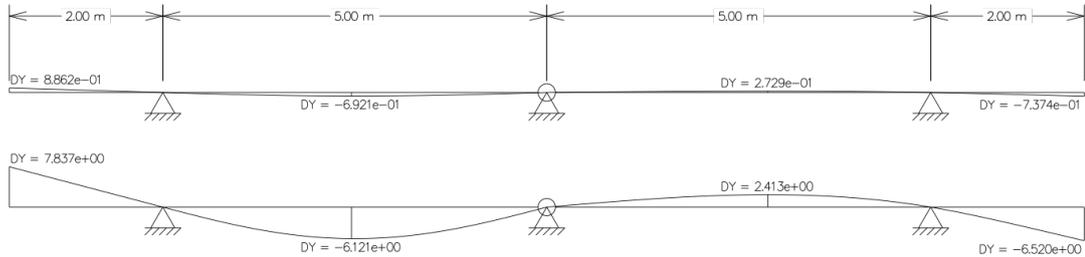
- 1 - TODOS OS MATERIAIS, SERVIÇOS E TESTES DEVERÃO ATENDER ÀS EXIGÊNCIAS DAS NORMAS EDITADAS PELA ABNT (NBR 7190)
- 2 - MEDIDAS DADAS EM CM QUANDO NÃO INDICADAS

PROJETO ESTRUTURAL

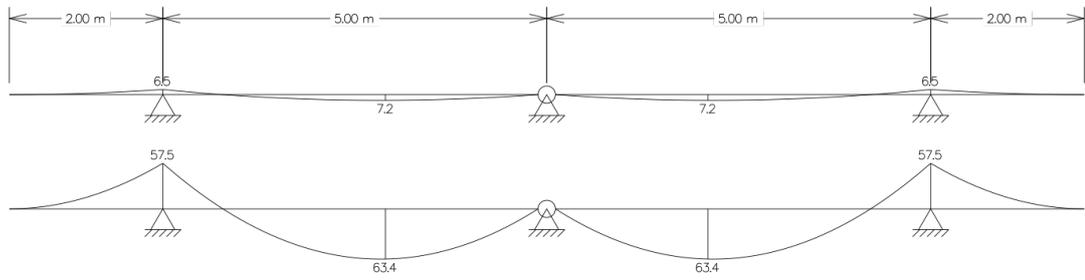
OBRA DECK DE MADEIRA PARA TORRE DE OBSERVAÇÃO		PRANCHA 01
RESPONSÁVEL TÉCNICO GABRIEL MOCELLIN NETO	CREA XXXXXX/PR	01
CLIENTE UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ	CNPJ: 75.095.679/0001-49	R1
CONTEUDO PLANTAS E CORTES DA ESTRUTURA		
ESCALA INDICADA	DATA NOVEMBRO/2019	DESENHO GABRIEL MOCELLIN NETO

APÊNDICE 8 – VERIFICAÇÃO DAS VIGAS SECUNDÁRIAS (DLT)

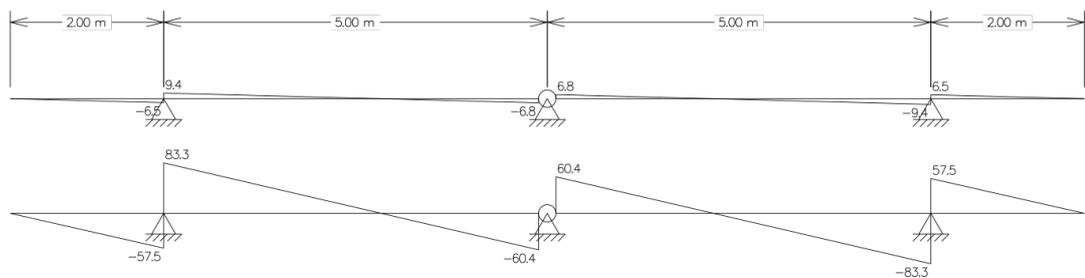
Deformada da VS2 para seção 30 cm x 60 cm, com $F_{G,k} = 2,65$ kN/m uniformemente distribuídos e $F_{Q,k} = 28,74$ kN/m aplicados no balanço (à esquerda) e no vão (à direita).



Diagramas característicos de momentos da VS2.



Diagramas característicos de cortantes da VS2.



Reações de apoio características (peso próprio) das vigas secundárias.

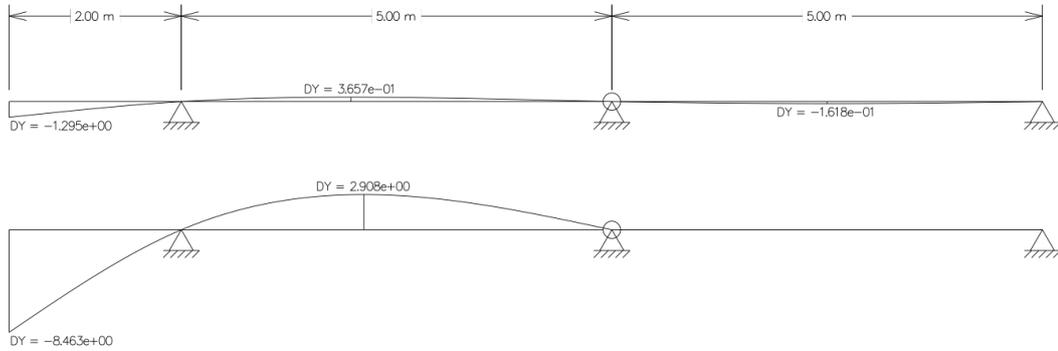
Viga	R_{VP1} (kN)	R_{VP2} (kN)	R_{VP3} (kN)
VS1	12,9	11,1	12,9
VS2	15,9	13,6	15,9
VS3	12,8	9,8	12,8

Reações de apoio características (ocupação) das vigas secundárias.

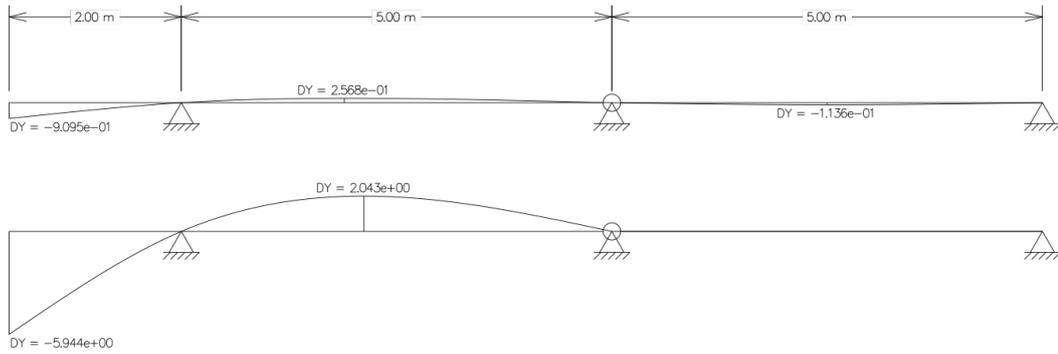
Viga	R_{VP1} (kN)	R_{VP2} (kN)	R_{VP3} (kN)
VS1	82,1	70,5	82,1
VS2	140,8	120,8	140,8
VS3	81,7	42,6	81,7

APÊNDICE 9 – VERIFICAÇÃO DAS VIGAS PRIMÁRIAS (DLT)

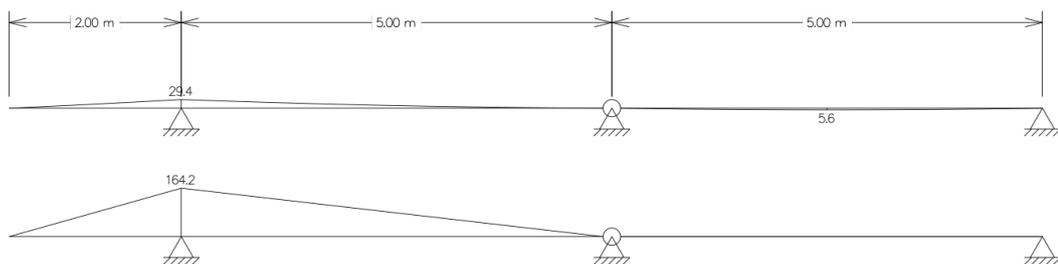
Deformada da VP1 para seção 30 cm x 80 cm.



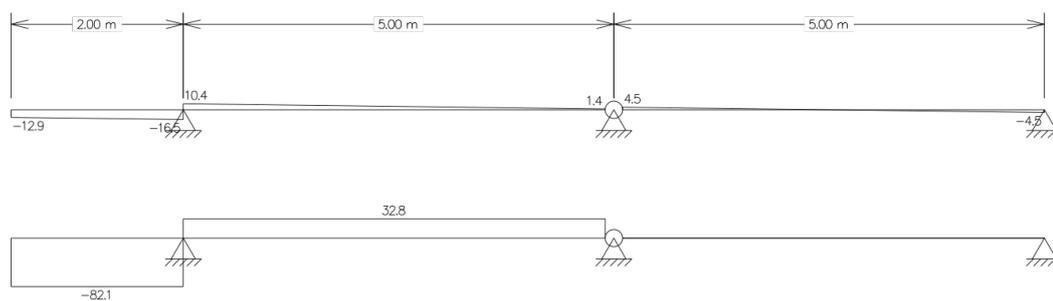
Deformada da VP1 para seção 30 cm x 90 cm.



Diagramas característicos de momentos da VP1.



Diagramas característicos de cortantes da VP1.



Reações de apoio características (peso próprio) das vigas primárias nos pilares.

Pilar	R_k (kN)
P1	28,01
P2	23,42
P3	21,59
P4	25,33
P5	11,12
P6	18,59
P7	28,01
P8	23,42
P9	21,59

Reações de apoio características (ocupação) das vigas primárias nos pilares.

Pilar	R_k (kN)
P1	140,33
P2	140,80
P3	81,70
P4	105,05
P5	120,80
P6	42,60
P7	140,33
P8	140,80
P9	81,70