

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

LUKAS GAMA GONÇALVES

**PROJETO ESTRUTURAL DE PONTE EM MADEIRA EM ARCO COM
TABULEIRO INFERIOR**

Macaé

2023

LUKAS GAMA GONÇALVES

PROJETO ESTRUTURAL DE PONTE EM MADEIRA EM ARCO COM
TABULEIRO INFERIOR

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação submetida à Universidade Federal do Rio de Janeiro – Campus Macaé como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador(es):

Prof. Esdras Pereira de Oliveira

Macaé

2023

CIP - Catalogação na Publicação

G634

Gonçalves, Lukas Gama

Projeto estrutural de ponte em madeira em arco com tabuleiro inferior / Lukas Gama Gonçalves - Macaé, 2023.

169 f.

Orientador(a): Esdras Pereira de Oliveira.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico, Bacharel em Engenharia Civil, 2023.

1. Pontes em arco. 2. Estruturas de madeira. 3. Projeto estrutural .
I. Oliveira, Edras Pereira de, orient. II.Título.

CDD 624

LUKAS GAMA GONÇALVES

PROJETO ESTRUTURAL DE PONTE EM MADEIRA EM ARCO COM
TABULEIRO INFERIOR

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação submetida à Universidade Federal do Rio de Janeiro – Campus Macaé como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em Macaé, 18 de Julho de 2023.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Esdras Pereira de Oliveira, D.Sc. (UFRJ - Macaé)

Prof. Anselmo Leal Carneiro, D.Sc. (UFRJ - Macaé)

Prof. Juliana Corrêa Trindade Leite, D.Sc. (UFRJ - Macaé)

Em homenagem ao meu avô, cujas
histórias cativantes e sábios conselhos
continuarão a ressoar em minha mente e
coração.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela Sua presença constante em minha vida, pela sabedoria que Ele me concedeu e pela força que me sustentou nos momentos mais desafiadores. Sem a Sua orientação e graça, eu não estaria onde estou hoje.

Ao meu orientador, Esdras Pereira de Oliveira, pela orientação, paciência e expertise essenciais para a elaboração deste trabalho. Sou extremamente grato pela oportunidade de aprendizado e pela confiança que depositada em mim.

Aos meus pais, pelo apoio, incentivos e aconselhamentos, que me guiaram ao longo de toda a minha jornada me dando base para construir meus sonhos.

Aos meus avós, que nunca deixaram faltar sabedoria, carinho e generosidade em minha vida. Suas histórias de vida e os valores que compartilharam comigo moldaram a pessoa que sou hoje.

A minha madrinha, pelas orientações e suporte nos momentos mais difíceis, sempre me lembrando de que sou capaz de superar qualquer desafio.

Aos meus amigos, em especial ao João e ao Dudu, por estarem ao meu lado em todas as fases da vida, celebrando minhas conquistas e me apoiando nos momentos de dificuldade.

Ao corpo docente da Universidade Federal do Rio de Janeiro, pelo aprendizado e pela participação em minha formação.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para o meu crescimento e sucesso. Seja com uma palavra de incentivo, um gesto de bondade ou uma oportunidade oferecida. A vocês, meu mais profundo agradecimento.

“Porque todos aqueles que pedem recebem; aqueles que procuram acham; e a porta será aberta para quem bate.”

Mateus 7:8

RESUMO

A madeira junto a outros materiais constitui a base da construção civil. Com o avanço da tecnologia, a utilização deste material vem adquirindo notáveis graus de complexidade. Além disso, a madeira, quando usada de forma consciente, possui a vantagem de ser um recurso renovável, demandando menos energia durante o processo de produção em comparação com materiais como o aço e o concreto, contribuindo assim para a preservação do meio ambiente e para um futuro mais sustentável. O trabalho apresenta o projeto estrutural de uma ponte em arco utilizando madeira laminada e colada (MLC) e tabuleiro em madeira laminada colada cruzada (MLCC). A partir do projeto apresentado são feitas comparações entre as normas NBR 7190 (1997) e NBR 7190 (2022). Além disso, é apresentada uma análise da tensão de cisalhamento na camada transversal (*Rolling shear*). A temática foi escolhida dada a relevância do emprego deste material estrutural sustentável, e para desenvolver e aprofundar conceitos aprendidos durante a graduação em Engenharia Civil. Utilizou-se como metodologia o manual de projeto de construção de pontes de madeira do LaMEM (Laboratório de Madeira e de Estruturas de Madeira), dissertações, livros, normas e o auxílio de software de análise estrutural.

Palavras-chave: Projeto Estrutural. Estrutura de Madeira. Ponte em Arco. Madeira Laminada e Colada. CLT. NBR 7190. Tensão de Cisalhamento na Camada Transversal.

ABSTRACT

Wood, with other materials, forms the foundation of civil construction. With the advancement of technology, the use of this material has been gaining notable degrees of complexity. Furthermore, when used consciously, wood has the advantage of being a renewable resource, requiring less energy during the production process compared to materials such as steel and concrete, thus contributing to environmental preservation and a more sustainable future. This study presents the structural design of an arch bridge using glued laminated timber. Based on the presented design, comparisons are made between the NBR 7190 (1997) and NBR 7190 (2022). Additionally, an analysis of the rolling shear is presented. The topic was chosen due to the relevance of employing sustainable structural material and to deepen the concepts learned during undergraduate studies in Civil Engineering. The methodology used included the LaMEM (Wood and Wood Structures Laboratory) bridge construction design manual, dissertations, books, standards, and the assistance of structural analysis software.

Key words: Structural Design. Wooden Structure. Arch Bridge. Glued Laminated Timber. CLT. NBR 7190. Rolling Shear.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Lagos Wooden Tower, torre nigeriana em madeira (FUTURE ARCHITECTURE, 2023)	28
Figura 2: Mjøstårnet, hotel em madeira na Noruega, (CTBUH, 2023).....	29
Figura 3: Ciclo da produção de peças laminadas e coladas. Adaptado de (BORGSTRÖM, 2019).....	30
Figura 4: Ano aproximado de invenção de diferentes tipos de produtos de madeira engenheirada. Adaptado de (GODONOU, 2022).....	31
Figura 5: Pont-Saint-Martin ponte em arco romana construída em torno de 120 a.c.....	31
Figura 6: Desenhos de uma ponte militar arqueada por Leonardo da Vinci, Atlantic Code, ano 1487-1488 (CERALDI, 2004).	34
Figura 7: Bianhe Rainbow bridge (YANG, 2012).	35
Figura 8: Nappan Marsh Bridge, Canada (WOOD SOLUTIONS, 2022).....	35
Figura 9: Ponte em arco de madeira Finowfurt, Alemanha. (STUCTVILLE, 2022).....	35
Figura 10: Ponte em arco de madeira com passarela (WESTERN WOOD STRUCTURES, 2022).	35
Figura 11: Ponte em arco com tabuleiro inferior (WESTERN WOOD STRUCTURES, 2022).....	36
Figura 12: Ponte em arco com tabuleiro intermediário (WESTERN WOOD STRUCTURES, 2022)	37
Figura 13: Ponte Emarco com tabuleiro inferior (WESTERN WOOD STRUCTURES, 2022).....	37
Figura 14: Ponte de planimetria reta ortogonal (EL DEBS, 2009).	38
Figura 15: Ponte de altimetria reta horizontal (EL DEBS, 2009).	38
Figura 16: Apresentação da ponte, vista lateral.....	40
Figura 17: Apresentação da ponte, vista frontal.....	40
Figura 18: Apresentação da ponte, isometria 3D.	41
Figura 19: Apresentação da ponte, vista lateral.....	41
Figura 20: Apresentação da ponte, vista frontal.....	41
Figura 21: Apresentação da ponte, vista lateral.....	42
Figura 22: Painel de madeira laminada e cruzada com 3 camadas (GODONOU, 2022).	43
Figura 23: Geometria do arco.....	53
Figura 24: Estudo das posições do trem tipo para a transversina.....	53
Figura 25: Seção transversal da ponte.	54
Figura 26: Sistema estrutural separado em permanente e variável.	56
Figura 27: Reações de apoio do sistema estrutural separadas em ações permanentes e variáveis.....	56
Figura 28: Sistema estrutural com distribuição das reações de apoio.	58
Figura 29: Momento Resultante.	58
Figura 30: Cortante Resultante.	58
Figura 31: Sistema estrutural separado em permanente e variável.	61
Figura 32: Reações de apoio do sistema estrutural separadas em ações permanentes e variáveis.....	61
Figura 33: Sistema estrutural com distribuição das reações de apoio.	63
Figura 34: Momento Resultante.	63
Figura 35: Cortante e Reações de Apoio.	63
Figura 36: Estudo das posições do trem tipo para o tabuleiro.....	64
Figura 37: Painel em CLT com eixos principais e locais (Borgstrom, 2019).	65
Figura 38: Tensão de flexão solicitante no eixo x em um painel de MLCC, adaptado de (Borgstrom, 2019).	66

Figura 39: Tensão de flexão solicitante no eixo y em um painel de MLCC, adaptado de (Borgstrom, 2019).	66
Figura 40: Seção do tabuleiro com representação das variáveis a e t (Borgstrom, 2019).	68
Figura 41: Tensão cisalhante solicitante no eixo x em um painel de MLCC (Borgstrom, 2019).	68
Figura 42: Tensão cisalhante solicitante no eixo y em um painel de MLCC (Borgstrom, 2019).	68
Figura 43: Sistema estrutural para pré-dimensionamento do tabuleiro; caso 1 (1° eixo do veículo tipo no meio do vão), caso 2 (1° e 2° eixos do veículo tipo equidistante do meio do vão) e caso 3 (carga de multidão), respectivamente.	70
Figura 44: Diagrama de momento fletor.	71
Figura 45: Diagrama de cortante.	71
Figura 46: Sistema estrutural para pré-dimensionamento do tabuleiro; caso 1 (1° eixo do veículo tipo no meio do vão), caso 2 (1° e 2° eixos do veículo tipo equidistante do meio do vão) e caso 3 (carga de multidão), respectivamente.	73
Figura 47: Diagrama de momento fletor.	74
Figura 48: Diagrama de cortante.	74
Figura 49: Lançamento do sistema estrutural composto por nós e barras, vista 3d.	81
Figura 50: Lançamento dos painéis do tabuleiro, vista XY.	82
Figura 51: Painel do tabuleiro, vista YX.	82
Figura 52: Vista 3D.	83
Figura 53: Vista lateral.	83
Figura 54: Vista superior.	83
Figura 55: Vista frontal.	84
Figura 56: Guarda-rodas modelo New Jersey (DNER, 1996).	85
Figura 57: Carregamento do peso próprio do concreto (1,25 kN/m ²).	85
Figura 58: Carregamento do peso próprio do guarda-rodas (13,8 kN/m ²).	85
Figura 59: Carregamento do peso-próprio do asfalto (1,44 kN/m ²).	86
Figura 60: Carregamento dos elementos metálicos de ligação (30 * 10 – 3 kN/m ²). ...	86
Figura 61: Carregamento do peso próprio do guarda-corpo (1,2 kN/m).	87
Figura 62: Croqui TB450. Fonte: Manual de projeto e construção de pontes de madeira.	87
Figura 63: Trem tipo TB450. Fonte: Manual de projeto e construção de pontes de madeira.	87
Figura 64: Faixa de tráfego do veículo tipo.	88
Figura 65: Força longitudinal. Fonte: Manual de Pontes em madeira.	88
Figura 66: Carregamento de frenagem e aceleração.	89
Figura 67: Vento sobre o veículo. Fonte: Manual de Pontes em madeira.	90
Figura 68: Carregamento devido ao vento aplicado no nível do tabuleiro.	90
Figura 69: Força no guarda-corpo NBR 7190/97. Adaptado de Manual de Pontes em madeira.	90
Figura 70: Força no guarda-corpo NBR 7188 (2013). Adaptado de Manual de Pontes em madeira.	90
Figura 71: Carregamento devido ao guarda-corpo NBR 7190 (1997).	91
Figura 72: Carregamento devido ao guarda-corpo NBR 7188 (2013).	91
Figura 73: Identificação dos apoios da estrutura.	98
Figura 74: Parâmetro de flambagem – NBR 7190 (2022).	101
Figura 75: Contraventamento de uma peça – Critério da Resistência e da Rigidez (Pfeil, 2003).	103
Figura 76: Contraventamento de várias peças – Critério da Resistência e da Rigidez. Adaptado de (Pfeil, 2003).	104

Figura 77: Esforços no arco, e indicação dos elementos críticos.	107
Figura 78: Esforços na transversina, e indicação dos elementos críticos.	109
Figura 79: Esforços no contraventamento em madeira MLC e indicação do elemento crítico.	111
Figura 80: Momento M_x no tabuleiro.	114
Figura 81: Momento M_y no tabuleiro.	115
Figura 82: Cortante V_x no tabuleiro.	115
Figura 83: Cortante V_y no tabuleiro.	115
Figura 84: Esforços no cabo de suspensão, e indicação do elemento crítico.	117
Figura 85: Imagem representativa dos cabos de contraventamento.	118
Figura 86: Detalhe do ângulo do cabo em relação ao contraventamento em madeira.	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedade de alguns materiais de construção. Fonte: (PFEIL, 2003).	30
Tabela 2: Características classe I – B. Adaptado de DNER 1996.	38
Tabela 3: Espécies de madeira comum as versões de 1997 e 2022 da NBR 7190 e classificação de acordo com a NBR 7190 (2022).	43
Tabela 4: Relação entre a resistência média e característica, segundo a NBR 7190 (1997) e NBR 7190 (2022).	44
Tabela 5: Relações entre resistências características, segundo a NBR 7190 (1997).	44
Tabela 6: Relações entre resistências de dimensionamento, segundo a NBR 7190 (2022).	45
Tabela 7: Coeficientes de minoração da resistência, segundo a NBR 7190 (1997) e NBR 7190 (2022).	45
Tabela 8: Classes de umidade, segundo a NBR 7190 (1997) e a NBR 7190 (2022).	45
Tabela 8: Valores de k_{mod} , 1. Adaptado de NBR 7190 (1997).	46
Tabela 9: Valores de k_{mod} , 2. Adaptado de NBR 7190 (1997).	46
Tabela 10: k_{mod} , 3 para madeira laminada e colada. Adaptado de NBR 7190 (1997).	46
Tabela 11: Valores de C_e . Adaptado de NBR 7190 (2022).	47
Tabela 12: Valores de C_c . Adaptado de NBR 7190 (2022).	47
Tabela 13: Valores de C_t . Adaptado de NBR 7190 (2022).	47
Tabela 14: Coeficiente de fluência φ segundo a NBR 7190 (1997).	47
Tabela 15: Coeficiente de fluência φ segundo a NBR 7190 (2022).	48
Tabela 16: Propriedades da classe C30, segundo a NBR 7190 (1997) e a NBR 7190 (2022).	48
Tabela 17: Propriedades de dimensionamento da classe C30, segundo a NBR 7190 (1997) e a NBR 7190 (2022).	49
Tabela 18: Propriedades para o dimensionamento de elementos em MLCC para madeira da espécie Angelim Araroba (<i>Vataireopsis araroba</i>), segundo a NBR 7190 (1997) e a NBR 7190 (2022).	50
Tabela 19: Propriedades dos cabos de aço 6x19 com alma de aço.	51
Tabela 20: Informações dos elementos constituintes do tabuleiro.	54
Tabela 21: Coeficientes de ponderação das ações, (NBR 7190, 1997).	54
Tabela 22: Cargas lineares permanentes e variáveis na transversina.	55
Tabela 23: Cargas para dimensionamento da transversina.	57
Tabela 24: Resumo das cargas atuantes na transversina.	57
Tabela 25: Coeficientes de ponderação das ações, (NBR 7190, 2022).	59
Tabela 26: Cargas lineares permanentes e variáveis na transversina.	60
Tabela 27: Cargas para dimensionamento da transversina.	62
Tabela 28: Resumo de cargas atuantes na transversina.	62
Tabela 29: Cargas lineares no tabuleiro.	69
Tabela 30: Cargas lineares no tabuleiro.	72
Tabela 31: Seções e materiais adotados no SAP para a NBR 7190 (1997).	79
Tabela 32: Seções e materiais adotados no SAP para a NBR 7190 (2022).	79
Tabela 33: Seções e materiais adotados no SAP na versão 97-2.	79
Tabela 34: Propriedades da seção transversal dos elementos.	80
Tabela 35: Propriedades da seção do tabuleiro.	80
Tabela 36: Coeficiente de ponderação das ações permanentes de grande variabilidade. Adaptado da NBR 7190 (1997) e NBR 7190 (2022).	92
Tabela 37: Coeficientes de ponderação das ações variáveis. Adaptado da NBR 7190 (1997) e NBR 8681 (2003).	93

Tabela 38: Fatores de combinação e utilização. Adaptado da NBR 7190 (1997) e NBR 8681 (2003).	93
Tabela 39: Combinação de carregamentos – ELU.	96
Tabela 40: Combinação de carregamentos – ELS.....	97
Tabela 41: Esforços nos elementos críticos – combinação (6).....	107
Tabela 42: Avaliação de esbeltez do arco.	108
Tabela 43: Esforços nos elementos críticos - combinação (6).	110
Tabela 44: Esforços no elemento crítico - combinação (6).	112
Tabela 45: Avaliação de esbeltez do contraventamento.....	112
Tabela 46: Esforços nos elementos críticos - combinação (6).	116
Tabela 47: Esforços no elemento crítico - combinação (5).	118
Tabela 48: Esforços nos elementos críticos - combinação (3)	121
Tabela 49: Avaliação de esbeltez do arco.	121
Tabela 50: Esforços nos elementos críticos - combinação (3)	123
Tabela 51: Avaliação de esbeltez do arco.	123
Tabela 52: Esforços nos elementos críticos - combinação (4).	125
Tabela 53: Esforços nos elementos críticos - combinação (4)	126
Tabela 54: Avaliação de esbeltez do contraventamento.....	126
Tabela 55: Esforços nos elementos críticos - combinação (4)	128
Tabela 56: Esforços no elemento crítico - combinação (1)	129
Tabela 57: Esforços nos elementos críticos – combinação (6).....	131
Tabela 58: Avaliação de esbeltez do arco.	132
Tabela 59: Esforços nos elementos críticos - combinação (6)	133
Tabela 60: Esforços no elemento crítico - combinação (6)	134
Tabela 61: Avaliação de esbeltez do contraventamento.....	135
Tabela 62: Esforços nos elementos críticos - combinação (2)	136
Tabela 63: Esforços no elemento crítico – combinação (5)	138
Tabela 64: Comparação dos valores característicos da classe C30 para Coníferas.....	145
Tabela 65: Comparação entre valores característicos da espécie <i>Angelim Araroba</i> (<i>Vataireopsis araroba</i>).	146
Tabela 66: Comparação entre coeficientes de correção.	146
Tabela 67: Comparação entre valores de dimensionamento da classe C30 para Coníferas.	147
Tabela 68: Comparação entre valores de dimensionamento da espécie <i>Angelim Araroba</i> (<i>Vataireopsis araroba</i>)	147
Tabela 69: Comparação entre coeficientes de combinação (γG) para ações permanentes.	147
Tabela 70: Comparação entre coeficientes de ações variáveis.....	148
Tabela 71: Comparação entre fatores de combinação ψ_0	148
Tabela 72: Comparação entre fatores de combinação ψ_1	148
Tabela 73: Comparação entre fatores de combinação ψ_2	148
Tabela 74: Comparação entre coeficientes devido a carga móvel.....	149
Tabela 75: Comparação entre coeficientes de combinação do ELU para elementos de madeira.	149
Tabela 76: Comparação entre coeficientes de combinação elementos de metálicos. ..	149
Tabela 77: Comparação entre coeficientes de combinação estado limite de serviço... ..	150
Tabela 78: Comparação entre carregamentos.....	150
Tabela 79: Comparação entre as áreas das seções transversais.....	151
Tabela 80: Comparação entre os esforços no arco.	152
Tabela 81: Comparação entre os esforços na transversina.	152
Tabela 82: Comparação entre os esforços no contraventamento.	152
Tabela 83: Comparação entre os esforços no tabuleiro.....	152

Tabela 84: Comparação entre esforços no cabo de suspensão.	152
Tabela 85: Comparação entre razões de tensão no arco.	153
Tabela 86: Comparação entre razões de tensão na transversina.	153
Tabela 87: Comparação entre razões de tensão no contraventamento.	153
Tabela 88: Comparação entre razões de tensão no tabuleiro.	153
Tabela 89: Comparação entre as flechas.	154

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Momento de inércia líquido em x e em y em relação a espessura do MLCC.	156
Gráfico 2: Momento estático líquido em x e em y em relação a espessura do MLCC.	156
Gráfico 3: Tensão solicitante devido ao cortante para as lâminas transversais aos eixos x e y em relação a espessura do MLCC.....	157

LISTA DE ABREVIATURAS

LaMEM – Laboratório de Madeira e de Estruturas de Madeira

MLC – Madeira laminada e colada

MLCC – Madeira laminada colada e cruzada

CLT – *Cross laminated timber*

CBUQ – Concreto betuminoso usinado à quente

CIV – Coeficiente de impacto vertical

CIA – Coeficiente de impacto acidental

CNF – Coeficiente de número de faixas

CRM – Carga de ruptura mínima

CT – Carga de trabalho

FS – Fator de segurança

EIPS – Extra improved plow steel

Long. – Longitudinal

Transv. – Transversal

Instant. – Instantânea

El. – Elemento

Met. – Metálico

Mad. – Madeira

EL – Estado limite

PP – Peso próprio

FH – Força horizontal

LISTA DE SIGLAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
- E.L.U. – Estado limite último
- E.L.S. – Estado limite de serviço

LISTA DE SIMBOLOS

a	coeficiente.
A	área.
A_c	área do cabo.
b	coeficiente.
C	classe de resistência para coníferas.
C_e	coeficiente de emenda de entalhes múltiplos.
C_c	coeficiente de curvatura da peça.
CNF	coeficiente de número de faixas.
C_t	coeficiente de modificação de temperatura.
d_x	posição do centro de gravidade em x.
d_y	posição do centro de gravidade em y.
E	módulo de elasticidade.
$E_{c,ef}$	módulo de elasticidade efetivo.
E_m	módulo de elasticidade médio.
$E_{0,05}$	modulo de elasticidade característico.
e_a	excentricidade acidental.
e_i	excentricidade inicial.
F_{1d}	força que cada nó do contraventamento deve resistir.
F_d	combinação normal do estado limite último, força que um contraventamento deve resistir.
F_e	força crítica normal.
$F_{d,uti}$	combinação do estado limite de serviço de longa duração.
$F_{long,a}$	força longitudinal de aceleração.
$F_{long,f}$	força longitudinal de frenagem.
f	resistência.
$f_{c,d}$	resistência de dimensionamento à compressão paralela às fibras da madeira.
$f_{c,k}$	resistência característica à compressão paralela às fibras da madeira.
$f_{c,m}$	resistência média à compressão paralela às fibras da madeira.
$f_{cn,k}$	resistência característica à compressão perpendicular às fibras da madeira.
$f_{cn,d}$	resistência de dimensionamento à compressão perpendicular às fibras da madeira.
f_d	resistência de dimensionamento.

$f_{e,k}$	resistência característica ao embutimento paralelo as fibras.
$f_{en,k}$	resistência característica ao embutimento perpendicular as fibras.
f_k	resistência característica.
f_m	resistência média.
$f_{m,d}$	resistência de dimensionamento à flexão da madeira.
$f_{m,k}$	resistência característica à flexão da madeira.
$f_{t,d}$	resistência de dimensionamento à tração paralela às fibras da madeira.
$f_{t,k}$	resistência característica à tração paralela às fibras da madeira.
$f_{tn,d}$	resistência de dimensionamento à tração perpendicular às fibras da madeira.
$f_{tn,k}$	resistência característica à tração perpendicular às fibras da madeira.
$f_{v,d}$	resistência de dimensionamento ao cisalhamento da madeira.
$f_{v,k}$	resistência característica ao cisalhamento da madeira.
$f_{v,m}$	resistência média ao cisalhamento da madeira.
$f_{Rv,d}$	resistência de dimensionamento ao cisalhamento na camada transversal da madeira.
H_f	forças horizontais.
h_x ou b	comprimento no eixo x.
h_y ou h	comprimento no eixo y.
h_{MLCC}	espessura total do painel de MLCC.
i	raio de giração.
i_x	raio de giração em relação ao eixo x.
i_y	raio de giração em relação ao eixo y.
I	momento de inércia.
I_x	momento de inércia em relação ao eixo x.
I_y	momento de inércia em relação ao eixo y.
$I_{k,liq}$	momento de inércia líquido em relação a lâmina k.
$I_{0,liq}$	momento de inércia líquido em relação a lâmina 0.
$I_{90,liq}$	momento de inércia líquido em relação a lâmina 90.
K_{br}	coeficiente de rigidez.
$K_{br,1,min}$	coeficiente de rigidez mínimo do contraventamento.
K_{barra}	coeficiente de rigidez da barra.
K_E	coeficiente de flambagem.

k_x	coeficiente.
k_y	coeficiente.
k_{cx}	coeficiente.
k_{cy}	coeficiente.
k_{min}	coeficiente.
k_M	coeficiente.
$k_{mod,i}$	coeficiente de modificação.
L	comprimento do vão.
L_{ef}	comprimento de flambagem efetivo.
$L_{ef,calc}$	comprimento de flambagem efetivo calculado para garantir a estabilidade.
$L_{ef,x}$	comprimento de flambagem efetivo para flexão em torno do eixo x.
$L_{ef,y}$	comprimento de flambagem efetivo para flexão em torno do eixo y.
L_c	comprimento do cabo.
L_{cr}	comprimento de flambagem crítico.
$L_{Transversina}$	comprimento da transversina.
L_{Via}	comprimento da via.
M	momento.
M_d	momento resistente de dimensionamento.
M_{dt}	momento resistente de dimensionamento, para estabilidade.
M_{dx}	momento resistente de dimensionamento em relação ao eixo x.
M_{dy}	momento resistente de dimensionamento em relação ao eixo y.
M_{dxt}	momento resistente de dimensionamento em relação ao eixo x, para verificação da estabilidade.
M_{dyt}	momento resistente de dimensionamento em relação ao eixo y, para verificação da estabilidade.
m	número de intervalos de comprimento L_{ef} .
N_{cr}	carga crítica de Euler.
n	número de barras.
$Q_{long,a}$	carga longitudinal de aceleração.
$Q_{long,f}$	carga longitudinal de frenagem.
r	raio de giro.
R_d	reação de apoio de dimensionamento.
$R_{G,max}$	reação de apoio devido as cargas permanentes máxima.

$R_{Q,max}$	reação de apoio devido as cargas variáveis máxima.
$S_{k,liq}$	momento estático de área na lâmina k.
$S_{0,liq}$	momento estático de área na lâmina 0.
$S_{90,liq}$	momento estático de área na lâmina 90.
$S_{R,k,liq}$	momento estático de área na camada transversal em k.
$S_{R,0,liq}$	momento estático de área na camada transversal em 0.
$S_{R,90,liq}$	momento estático de área na camada transversal em 90.
s	metade do comprimento do arco.
T_d	momento de torção de dimensionamento.
t	espessura da lâmina.
U	umidade.
U_{amb}	umidade relativa do ambiente.
u	flecha da combinação de longa duração.
u_g	flecha devido ao carregamento permanente.
u_{lim}	flecha limite.
u_t	flecha total.
V_d	cortante solicitante de dimensionamento.
V_{dx}	cortante solicitante de dimensionamento em relação ao eixo x.
V_{dy}	cortante solicitante de dimensionamento em relação ao eixo y.
W_x	módulo de resistência à flexão em relação ao eixo x.
W_y	módulo de resistência à flexão em relação ao eixo y.
$W_{k,liq}$	módulo de resistência à flexão líquido em relação a lâmina k.
$W_{0,liq}$	módulo de resistência à flexão líquido em relação a lâmina 0.
$W_{90,liq}$	módulo de resistência à flexão líquido em relação a lâmina 90.
x	coordenada.
y	coordenada.
z	coordenada.
α_m	coeficiente.
β_m	coeficiente.
β_c	coeficiente.
γ_{gi}	coeficiente de ponderação para ações permanentes.
γ_{q1}	coeficiente de ponderação para a ações variável principal.

γ_w	coeficientes de minoração da resistência.
γ_{wc}	coeficientes de minoração da resistência à compressão paralela às fibras da madeira.
γ_{wt}	coeficientes de minoração da resistência à tração paralela às fibras da madeira.
γ_{wv}	coeficientes de minoração da resistência ao cisalhamento da madeira.
δ	coeficiente de variação de resistência.
δ_{inst}	flecha instantânea.
$\delta_{inst,Gi,k}$	flecha instantânea devido as ações permanentes.
$\delta_{inst,Q1,k}$	flecha instantânea devido a ação variável principal.
$\delta_{inst,Qi,k}$	flecha instantânea devido as ações variáveis secundárias.
δ_{fin}	flecha final.
$\delta_{lim,inst}$	flecha instantânea limite.
$\delta_{lim,fin}$	flecha final limite.
$\delta_{lim,líq,fin}$	flecha líquida final limite.
θ	ângulo.
λ	índice de esbeltez.
λ_x	índice de esbeltez em relação ao eixo x.
λ_y	índice de esbeltez em relação ao eixo y.
$\lambda_{rel,x}$	índice de esbeltez relativa em relação ao eixo x.
$\lambda_{rel,y}$	índice de esbeltez relativa em relação ao eixo y.
π	coeficiente matemático.
ρ	densidade.
ρ_m	densidade média.
ρ_{ap}	densidade aparente.
σ_{cd}	tensão de compressão de dimensionamento.
$\sigma_{c1,d}$	máxima tensão de compressão de dimensionamento.
σ_{md}	tensão de flexão de dimensionamento.
σ_{Nd}	tensão de dimensionamento devido ao esforço normal.
σ_{mdx}	tensão devido ao momento fletor em relação ao eixo x.
σ_{mdy}	tensão devido ao momento fletor em relação ao eixo y.
σ_{td}	tensão de tração de dimensionamento.
τ_d	tensão cisalhante longitudinal de dimensionamento.
τ_{vd}	tensão cisalhante de dimensionamento.

- τ_{vdx} tensão cisalhante de dimensionamento, para as lâminas longitudinais ao eixo x.
- τ_{vdy} tensão cisalhante de dimensionamento, para as lâminas longitudinais ao eixo y.
- τ_{Rvd} tensão cisalhante na camada transversal de dimensionamento.
- τ_{Rvdx} tensão cisalhante na camada transversal de dimensionamento, para as lâminas transversais ao eixo x.
- τ_{Rvdy} tensão cisalhante na camada transversal de dimensionamento, para as lâminas transversais ao eixo y.
- φ coeficiente de impacto vertical, coeficiente de fluência.
- ψ_{0j} fator de combinação para ações variáveis.
- ψ_1 fator de redução para ação variável principal.
- ψ_{2j} fator de redução para ações variáveis.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	28
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	28
1.2	JUSTIFICATIVA	31
1.3	OBJETIVOS	32
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	32
2	CONCEPÇÃO DA PONTE.....	34
2.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	34
2.2	DESCRIÇÃO DA PONTE.....	37
2.3	PROPRIEDADES	42
2.3.1	Coeficientes Aplicados Sobre as Propriedades	44
2.3.1.1	Coeficientes de Variação de Resistência δ	44
2.3.1.2	Coeficientes de Relação Entre Resistências Características	44
2.3.1.3	Coeficientes de Minoração da Resistência γ_w	45
2.3.1.4	Umidade.....	45
2.3.1.5	Coeficientes de Modificação k_{mod}	46
2.3.1.6	Coeficientes de Fluência φ	47
2.3.2	Propriedades Mecânicas dos elementos em MLC.....	48
2.3.3	Propriedades Mecânicas dos elementos em MLCC.....	50
2.3.4	Propriedades dos cabos de aço	51
2.4	PRÉ-DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS	51
2.4.1	Arco	51
2.4.2	Transversinas.....	53
2.4.2.1	Transversinas – Dimensionamento Segundo a NBR 7190 (1997) ..	54
2.4.2.2	Transversinas – Dimensionamento Segundo a NBR 7190 (2022) ..	59
2.4.3	Painéis do Tabuleiro em MLCC.....	64
2.4.3.1	MLCC – Dimensionamento Segundo a NBR 7190 (1997)	69
2.4.3.2	MLCC – Dimensionamento Segundo a NBR 7190 (2022)	72
2.4.4	Cabos.....	75
2.4.4.1	Cabos de Suspensão.....	75
2.4.4.2	Cabos de Contraventamento	76
3	MODELAGEM ESTRUTURAL	78
3.1	PROPRIEDADES DOS MATERIAIS E SEÇÕES TRANSVERSAIS.....	78
3.2	GEOMETRIA	80
3.3	CARREGAMENTOS	84
3.3.1	Cargas Permanentes	84
3.3.2	Cargas Acidentais Verticais	87
3.3.3	Cargas Acidentais Horizontais	88
3.3.4	Carga de Vento.....	89
3.3.5	Força no Guarda-Corpo.....	90
3.4	ANÁLISE ESTRUTURAL.....	91
3.5	COMBINAÇÃO DE CARREGAMENTOS.....	92
3.5.1	Estado Limite Último	92
3.5.1.1	Coeficientes de Ponderação – Ações Permanentes.....	92
3.5.1.2	Coeficientes de Ponderação – Ações Variáveis.....	93
3.5.1.3	Coeficiente de Impacto Vertical	93
3.5.1.4	Coeficiente de Número de Faixas	94
3.5.1.5	Coeficiente de Impacto Adicional	95
3.5.2	Estado Limite de Serviço	95

	26
3.5.3	Combinação de Carregamentos..... 96
3.6	SOMATÓRIO DOS CARREGAMENTOS BÁSICOS E COMBINAÇÕES . 97
4	CRITÉRIO DE DIMENSIONAMENTO..... 99
4.1	SOLICITAÇÕES NORMAIS 99
4.2	SOLICITAÇÕES TANGENCIAIS..... 100
4.3	VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE 100
4.3.1	Estabilidade – NBR 7190 (1997) 100
4.3.2	Estabilidade – NBR 7190 (2022) 101
4.3.3	Flambagem Lateral com Torção 102
4.4	SISTEMAS DE CONTRAVENTAMENTO 103
5	DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS..... 106
5.1	ELU NBR 7190 (1997) – MODELO 97 106
5.1.1	Arco 106
5.1.2	Transversina 109
5.1.3	Contraventamentos..... 111
5.1.4	Tabuleiro 114
5.1.5	Cabos..... 117
5.1.5.1	Cabos de Suspensão..... 117
5.1.5.2	Cabos de Contraventamento 118
5.2	ELU NBR 7190 (2022) – MODELO 22 121
5.2.1	Arco 121
5.2.2	Transversina 124
5.2.3	Contraventamentos..... 126
5.2.4	Tabuleiro 128
5.2.5	Cabos..... 129
5.2.5.1	Cabo de suspensão 129
5.2.5.2	Cabo de contraventamento..... 130
5.3	ELU NBR 7190 (1997) – MODELO 97-2..... 131
5.3.1	Arco 131
5.3.2	Transversina 133
5.3.3	Contraventamentos..... 134
5.3.4	Tabuleiro 136
5.3.5	Cabos..... 138
5.3.5.1	Cabo de suspensão 138
5.3.5.2	Cabo de Contraventamento..... 138
5.4	ELS NBR 7190 (1997) – MODELO 97 140
5.4.1	Flecha Global 140
5.4.2	Flecha Transversina..... 140
5.4.3	Flecha Tabuleiro..... 140
5.5	ELS NBR 7190 (2022) – MODELO 22 141
5.5.1	Flecha Global 141
5.5.2	Flecha Transversina..... 142
5.5.3	Flecha Tabuleiro..... 142
5.6	ELS NBR 7190 (1997) – MODELO 97-2..... 143
5.6.1	Flecha Global 143
5.6.2	Flecha Transversina..... 143
5.6.3	Flecha Tabuleiro..... 144
6	COMPARAÇÕES E CONSTATAÇÕES 145
6.1	PROPRIEDADES CARACTERÍSTICAS..... 145
6.2	COEFICIENTES APLICADOS SOBRE AS PROPRIEDADES..... 146

	27
6.3 PROPRIEDADES DE DIMENSIONAMENTO	146
6.4 COEFICIENTES DE COMBINAÇÃO	147
6.5 CARREGAMENTO.....	150
6.6 SEÇÕES	151
6.7 COMPARAÇÃO FINAL	151
6.7.1 Esforços	151
6.7.2 Razão de Tensões / Esforços	153
6.7.3 Deformações.....	154
6.8 CONSTATAÇÃO TENSÃO CISALHANTE ROLLING SHEAR.....	154
7 CONCLUSÕES	158
7.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	159
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	160
APÊNDICE A1	162
APÊNDICE A2	162
APÊNDICE A3	163
APÊNDICE B1.....	163
APÊNDICE B2.....	163
APÊNDICE B3.....	164
APÊNDICE C1	165
APÊNDICE C2	165
APÊNDICE C3	166
APÊNDICE D1	166
ANEXO A.....	167
ANEXO B1	168
ANEXO B2.....	168
ANEXO C1.....	169
ANEXO C2.....	169

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

“O futuro é de madeira” Capa da edição 292 da revista *Téchne* (TÉCHNE, 2023), em que se exibia a imagem do projeto conceitual da torre nigeriana de 87 metros projetada em madeira engenheirada (Figura 1), contrastando o grande preconceito existente na construção civil quanto às limitações do uso da madeira. A manchete ilustra o cenário atual da madeira na construção civil, sendo exibida em formas arquitetônicas cada vez mais complexas e estruturas tão complexas quanto.



Figura 1: Lagos Wooden Tower, torre nigeriana em madeira (FUTURE ARCHITECTURE, 2023)

Outro exemplo notável que representa o avanço da tecnologia da madeira como material de construção sustentável e de alto desempenho é o Mjøstårnet, em Brumunddal, Noruega (Figura 2). Com 18 andares e 85,4 metros de altura, é atualmente o edifício em estrutura de madeira mais alto do mundo, segundo o Conselho de Construções Altas e Habitat Urbano. Essa conquista demonstra que a madeira engenheirada tem a capacidade de competir com materiais tradicionais de construção, como concreto e aço, em termos de resistência e durabilidade. O edifício utiliza madeira lamelada e colada (MLC) como vigas e colunas, e madeira lamelada colada e cruzada (MLCC) para paredes estruturais.



Figura 2: Mjøstårnet, hotel em madeira na Noruega, (CTBUH, 2023).

Até onde se sabe, antigamente a madeira foi popularmente utilizada como estrutura por tentativa e erro, sem estudos prévios sobre o material e sem uma gestão adequada quanto ao seu uso. Com uma gestão adequada, a madeira pode-se tornar um material abundante, devido a menor custo energético de produção em relação aos outros materiais e potencial de reaproveitamento. Além disso o uso de madeira na construção civil além de ter um menor custo ambiental, incentiva o cultivo de árvores formando um ciclo, conforme mostrado na Figura 3 .

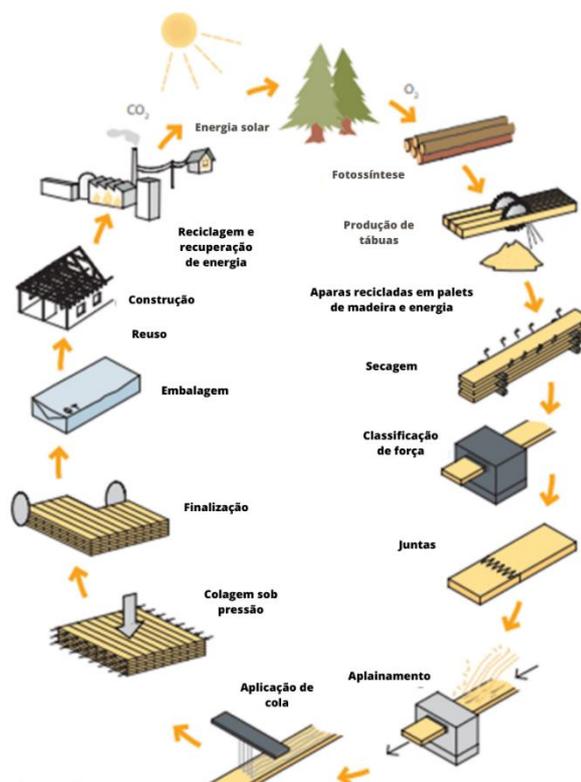


Figura 3: Ciclo da produção de peças laminadas e coladas. Adaptado de (BORGSTRÖM, 2019)

Além dos benefícios ambientais, a madeira é um material com excelente relação resistência - peso, bom isolamento térmico e pode constituir peças de qualquer forma. Na Tabela 1 são relacionadas as propriedades dos materiais mais comuns na construção civil, onde percebe-se que suas propriedades mecânicas a tornam um material competitivo diante dos demais.

Tabela 1: Propriedade de alguns materiais de construção. Fonte: (PFEIL, 2003).

Material	Esforço	ρ (t/m ³)	f (MPa)	f/ρ
Madeira	Tração	0,5 – 1,2	30 – 110	60 – 90
Madeira	Compressão	0,5 – 1,2	30 – 60	50 – 60
Aço	Tração	7,85	250	32
Concreto	Compressão	2,5	40	16

No século XX vários tipos de peças estruturais de madeira engenheirada foram inventados, conforme mostrado na Figura 4.

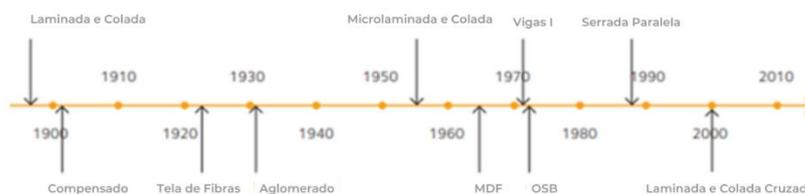


Figura 4: Ano aproximado de invenção de diferentes tipos de produtos de madeira engenheirada.
Adaptado de (GODONOU, 2022)

Por ser um material orgânico, a madeira está sujeita à degradação biológica por ataque de fungos, brocas etc; sendo suscetível também à ação do fogo. Além disso, por ser um material “natural” (não industrializado) apresenta inúmeros defeitos. Entretanto, estas desvantagens em relação a madeira podem ser controladas fazendo uso de produtos químicos que combatem os agentes biológicos, e a produção de produtos industrializados de madeira minimiza os defeitos associados à ser um material “natural”.

O sistema construtivo em arco para pontes é um dos mais antigos e consolidados; os romanos usavam pedras para formar arcos há 2100 anos. Conforme apresentado na Figura 5, a Pont Saint Martin foi construída em torno de 120 a.c.; situada no Vale de Aosta, ainda pode ser vista em funcionamento.



Figura 5: Pont-Saint-Martin ponte em arco romana construída em torno de 120 a.c.
Fonte: (ITALIA.IT, 2023)

1.2 JUSTIFICATIVA

A indústria da construção civil, no Brasil, é dependente do concreto como material de construção, este, representa grande geração de resíduos para a construção civil. A utilização de madeiras engenheiradas propõe uma mudança de parâmetros no cenário da construção civil no Brasil. O sistema construtivo apresentado já é muito difundido em outros continentes e representativo para a redução no impacto ambiental causado por grandes construções em aço e concreto.

Outrossim, visa-se desenvolver o primeiro projeto de uma obra de arte do Campus UFRJ Macaé incentivando futuros trabalhos tão complexos quanto, além do desenvolvimento profissional através da leitura extensiva a ser realizada para produção deste trabalho.

1.3 OBJETIVOS

Como objetivo principal do trabalho, tem-se o projeto estrutural de uma ponte em arco de madeira laminada e colada. O trabalho contempla o anteprojeto (definição de sistema estrutural, materiais e sistema construtivo) e o desenvolvimento do projeto (verificação da estrutura quantos as ações e esforços e definição das dimensões dos elementos).

Como objetivo secundário, espera-se poder estabelecer uma comparação entre a NBR 7190 (2022) e a NBR 7190(1997), visto que a publicação da versão mais recente ocorreu concomitante a elaboração deste trabalho. Além disso tem-se por objetivo secundário analisar o impacto do cisalhamento na camada transversal (*Rolling Shear*) em relação ao dimensionamento das seções utilizando MLCC. Por fim pretende-se difundir o uso da madeira como material estrutural para obras de grande porte, acentuando sua capacidade resistente e versatilidade.

Além disso, é importante destacar que não faz parte dos objetivos deste trabalho o dimensionamento das ligações e das fundações, nem a análise dinâmica da ponte.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O projeto baseou-se em pesquisas bibliográficas, focadas em leituras de manuais, dissertações, livros e publicações nacionais e internacionais. Pode-se citar como referência: o Manual de Projeto e Construção de Pontes de Madeira: LaMEM (Laboratório de Madeira e de Estruturas de Madeira), Manual de Projeto de Obras-de-Arte Especiais: DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem) e Design of Timber Structures: Swedish Wood.

Ao longo do trabalho, serão apresentados todos os dados utilizados para o dimensionamento dos elementos, isto é, as plantas, catálogos com especificações de elementos, normas, etc.; de forma a esclarecer todos os passos da elaboração da memória de cálculo. O modelo estrutural, assim como as verificações de ELU e ELS, serão desenvolvidos com auxílio do programa de análise estrutural SAP2000. Além disso, serão utilizados os softwares Excel, AutoCAD, e outros que se façam necessários.

O desenvolvimento do projeto se dá pela estrutura apresentada abaixo.

O capítulo 1 apresenta a introdução, a contextualização, a justificativa, o objetivo e a estrutura do trabalho.

O capítulo 2 apresenta a concepção da ponte, a revisão bibliográfica, sua descrição, as propriedades dos elementos utilizados e o pré-dimensionamento destes.

No capítulo 3 expõe a modelagem estrutural, apresentando as propriedades dos elementos inseridas no modelo, a geometria da ponte modelada no programa, os carregamentos aplicados, o método de análise estrutural e as combinações utilizadas.

O capítulo 4 apresenta os critérios de dimensionamento dos elementos para a verificação do Estado Limite de Serviço (ELU), em relação as solicitações normais, tangenciais e verificação da estabilidade. Também apresenta os critérios para a verificação do Estado Limite de Serviço (ELS).

No capítulo 5 é realizado o dimensionamento dos elementos de acordo com os Modelos 97, 22 e 97-2, com as verificações dos elementos estruturais segundo os E.L.U. e E.L.S.

No capítulo 6 são realizadas comparações entre as versões das normas em relação ao projeto em questão e a constatação quanto à variação da resistência ao cisalhamento na camada transversal.

2 CONCEPÇÃO DA PONTE

Nos itens a seguir é apresentada a concepção da ponte. Conforme apresentado no item 1.3, este trabalho tem como objetivo secundário realizar uma comparação entre as abordagens para o dimensionamento da ponte segundo a NBR 7190 (2022) e a NBR 7190 (1997). Para tanto, no que diz respeito as propriedades, são apresentadas as metodologias de cálculo das duas normas. Além do que foram escolhidas espécies de madeira e classes que estivessem presentes nas duas versões da norma de modo a possibilitar a comparação.

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A Figura 6 mostra um esboço de uma ponte militar feito por Leonardo da Vinci, constituída por duas estruturas arqueadas paralelas, conectadas transversalmente por vigas.

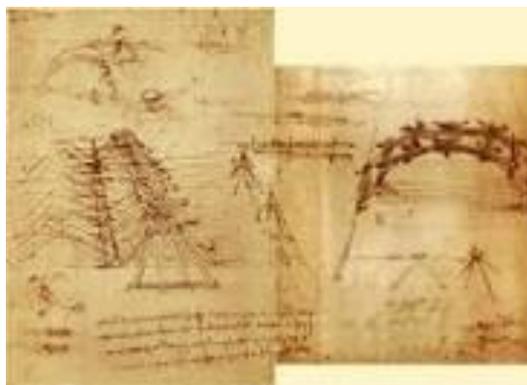


Figura 6: Desenhos de uma ponte militar arqueada por Leonardo da Vinci, Atlantic Code, ano 1487-1488 (CERALDI, 2004).

De acordo com registros históricos a primeira ponte em arco de madeira da China foi construída entre 1032 e 1033 no Norte da China, mostrada na Figura 7. Essa ponte foi reproduzida na famosa pintura de “Chhing-Ming Shang Ho Thu” (Festival de Puro Brilho no Rio) por Northern Song Dynasty (1190 a 1125). Estima-se que tenha 19,2 metros de comprimento e de 8 a 9 metros de largura. De acordo com CERALDI (2004), a ponte foi construída a partir da necessidade de se evitar píers na cabeceira do rio, que obstruíam a navegação, o principal meio comercial numa época de grande desenvolvimento comercial.



Figura 7: Bianhe Rainbow bridge (YANG, 2012).

A Figura 8 à Figura 10 mostram exemplos de pontes e passarelas existentes, usadas como inspiração para o projeto.



Figura 8: Nappan Marsh Bridge, Canada (WOOD SOLUTIONS, 2022).

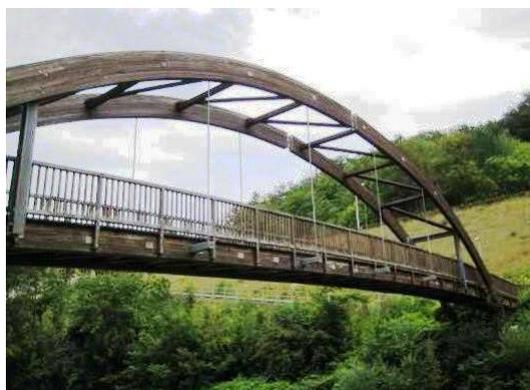


Figura 9: Ponte em arco de madeira Finowfurt, Alemanha. (STUCTVILLE, 2022).



Figura 10: Ponte em arco de madeira com passarela (WESTERN WOOD STRUCTURES, 2022).

Segundo EL DEBS (2009), “ponte é uma construção destinada a estabelecer a continuidade de uma via de qualquer natureza.”, podendo ser chamada de ponte quando o obstáculo a ser transpassado é hídrico, ou viaduto quando não é.

As pontes se diferem das construções convencionais, por motivos estruturais e arquitetônicos, podendo ainda ser chamada de obra de arte. Em geral, a estrutura de uma ponte pode ser dividida em: superestrutura, mesoestrutura e infraestrutura. Neste trabalho serão dimensionadas a superestrutura e mesoestrutura, onde são encontrados o tabuleiro, transversinas, tirantes e o arco.

O sistema estrutural em arco tem como esforço principal a compressão e a flexão no plano, são geralmente biarticulados ou tri articulados. A escolha entre as disposições depende da consideração da fabricação dos arcos e transporte.

Os arcos triarticulados apresentam maior facilidade para transporte, podendo ser dividido em partes, são estáveis em relação a esforços horizontais em seu próprio plano e são estaticamente determinados, ou seja, a distribuição dos momentos não é afetada por recalques diferenciais na fundação ou por deformações nas ligações e conexões. Além disso por ter articulações nos pontos em que se liga à fundação, facilita a construção das fundações (CROCETTI, 2016).

As pontes em arco podem ter seu tabuleiro em 3 diferentes posições: inferior (Figura 11), intermediário (Figura 12) e superior (Figura 13).



Figura 11: Ponte em arco com tabuleiro inferior (WESTERN WOOD STRUCTURES, 2022)



Figura 12: Ponte em arco com tabuleiro intermediário (WESTERN WOOD STRUCTURES, 2022)



Figura 13: Ponte Emarco com tabuleiro inferior (WESTERN WOOD STRUCTURES, 2022)

A escolha da posição do tabuleiro depende das condições do terreno a ser transpassado pela ponte. As pontes com tabuleiro superior são mais indicadas para vales. As pontes com tabuleiro intermediário são menos utilizadas, pois apresentam problemas no processo construtivo. E as pontes com tabuleiro inferior são ideais para locais com altura existente para fundação pequena (EL DEBS, 2009).

Para este trabalho será utilizado o sistema estrutural em arco tri articulado com tabuleiro inferior.

2.2 DESCRIÇÃO DA PONTE

Para a realização deste trabalho foi concebida uma ponte hipotética, classificado segundo EL DEBS (2009) como componente de uma rodovia com natureza de tráfego mista, destinada a mais de um tipo de tráfego (rodoviário tipo TB450 e pedestres), com planialtimetria reta ortogonal (Figura 14), altimetria reta horizontal (Figura 15).

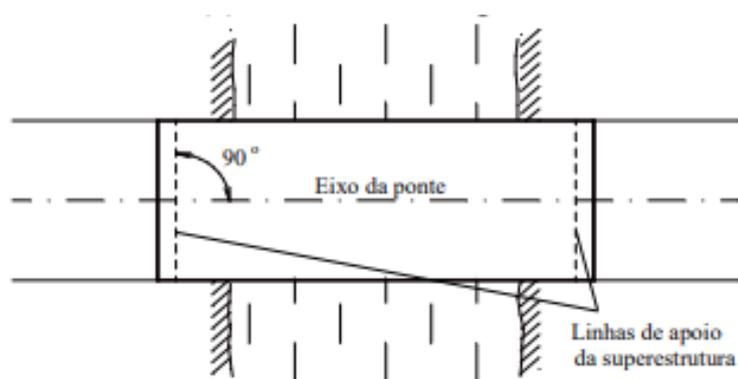


Figura 14: Ponte de planimetria reta ortogonal (EL DEBS, 2009).

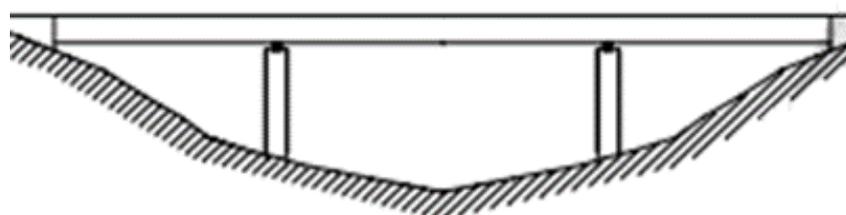


Figura 15: Ponte de altimetria reta horizontal (EL DEBS, 2009).

Analisando o exposto no manual de projetos de obras de arte especiais (DNER ,1996), adotou-se a classe I – B para a ponte, com as características dadas pela Tabela 2.

Tabela 2: Características classe I – B. Adaptado de DNER 1996.

CLASSE DE PROJETO	I - B
Característica	Pista Simples
Região	Plana
Velocidade Diretriz	100 km/h
Largura da Faixa de Rolamento	3,6 m
Declividade da Pista em Tangente	2 %
Afastamento Lateral Mínimo do Bordo de Obstáculos	0,5 m
Gabarito Vertical	5,5 m

Ainda segundo o DNER (1996) a largura mínima para passeios laterais com trânsito predominante de pedestres é de 1,5 m.

A ponte hipotética foi projetada para vencer um vão de 40m, com apenas uma faixa de rolamento de 3,6m de largura, sendo a largura definida pelo DNER para o tráfego de veículos em apenas um único sentido. Não foram adotadas áreas de acostamento. Foi considerado uma área lateral à faixa de rolamento, de cada lado, com 50cm de largura para a drenagem das águas pluviais, e empregou-se o guarda rodas em concreto armado modelo “New Jersey”, definido pelo DNER. Também foram adotados passeios laterais de 1,5m de largura, separados da faixa de rolamento pelo guarda roda. Ao longo de todo

o comprimento da ponte na “faixa” do passeio foi colocado um guarda corpo em aço. A largura total da seção transversal da ponte foi de 8,4m. A Figura 18 ilustra o exposto.

O sistema estrutura utilizado foi em arco tri articulado, considerado apropriado para esta grandeza de vão, composto por madeira laminada e colada (MLC). Foi definida uma subestrutura de contraventamento, composta por peças de madeira laminada e colada (MLC) de seção retangular, além de contraventamentos em cabos conectando os dois arcos, de modo a prover estabilidade à estrutura da ponte.

Foram adotados cabos de contraventamento externos, Figura 17, para garantir a indeslocabilidade horizontal do ponto de contato com o arco. Essa não é uma abordagem usualmente adotada. O arco é articulado na base, o contraventamento em madeira que conecta os dois arcos também é articulado. Tais características tornam difícil a definição do parâmetro de flambagem K necessário ao cálculo da resistência e da estabilidade. Portanto, neste trabalho tal abordagem foi adotada a fim de que o trecho do arco que vai da fundação até o ponto de contato com contraventamento externo funcione como uma barra bi-rotulada, adotando-se, portanto, $K = 1$. Caso tal consideração não tivesse sido feita, seria necessário realizar uma análise de flambagem, que é uma análise não linear, para que fosse possível se obter o parâmetro de flambagem K apropriado.

Do arco de madeira se projetam cabos, com espaçamento horizontal de 2,0 m, que sustentam o pavimento suspenso, que fica pendurado. Os cabos se conectam ao tabuleiro por meio das transversinas, espaçadas a cada 2m, compostas por seção retangular de madeira laminada e colada (MLC). As transversinas por sua vez suportam o tabuleiro, composto por placas de madeira do tipo CLT (*cross laminated timber*) ou MLCC (madeira laminada colada e cruzada). Sobre as placas MLCC foi executada uma camada de concreto armado de 5cm de espessura, e sobre a camada de concreto armado executou-se 6 cm de asfalto CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente). O uso de painéis de MLCC se deu pela praticidade de construção, por serem pré-moldados e pela homogeneização do projeto com uso de madeiras engenheiradas. As camadas de revestimento na pista (concreto e asfalto) auxiliam a distribuição das cargas e proteção dos elementos de madeira do tabuleiro. As Figura 16 à Figura 21 apresentam a descrição da ponte, seus elementos e espaçamentos.

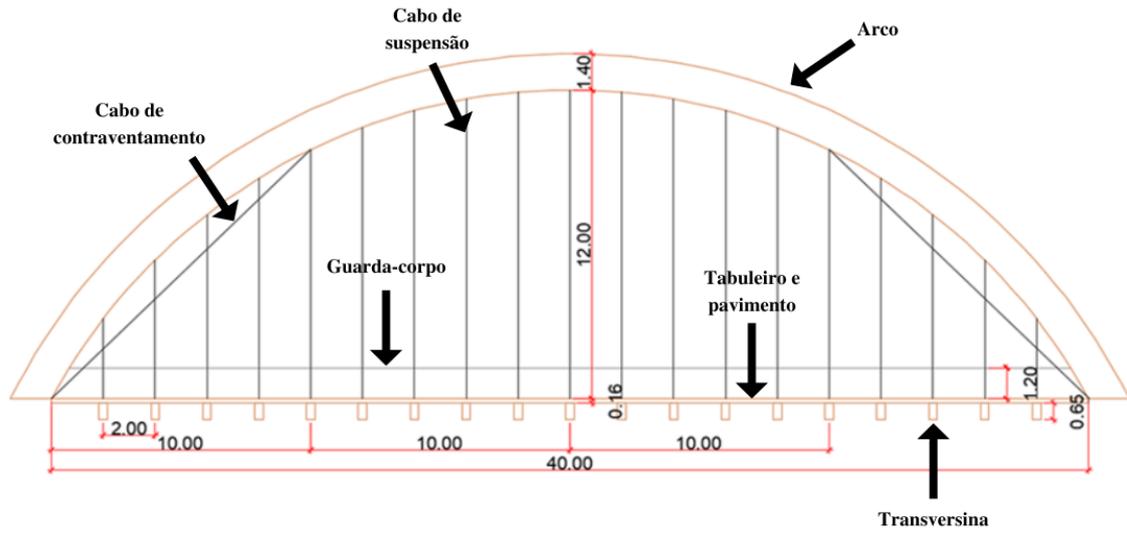


Figura 16: Apresentação da ponte, vista lateral.

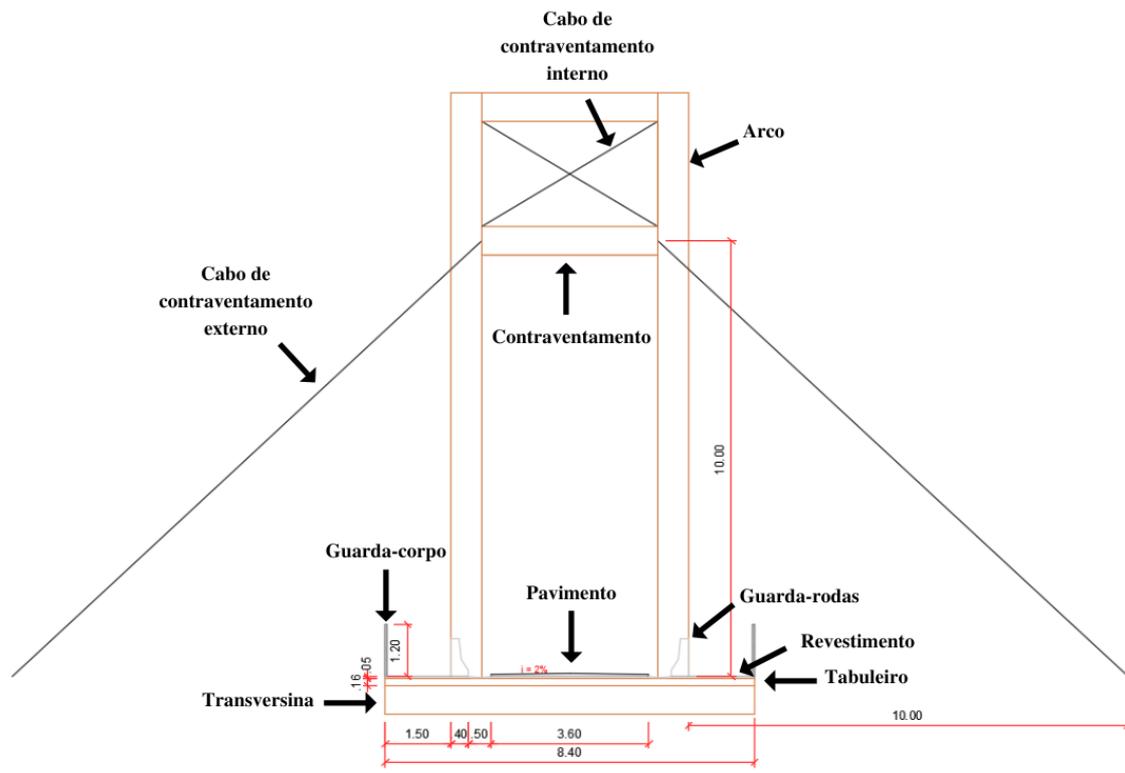


Figura 17: Apresentação da ponte, vista frontal.



Figura 18: Apresentação da ponte, isometria 3D.



Figura 19: Apresentação da ponte, vista lateral.

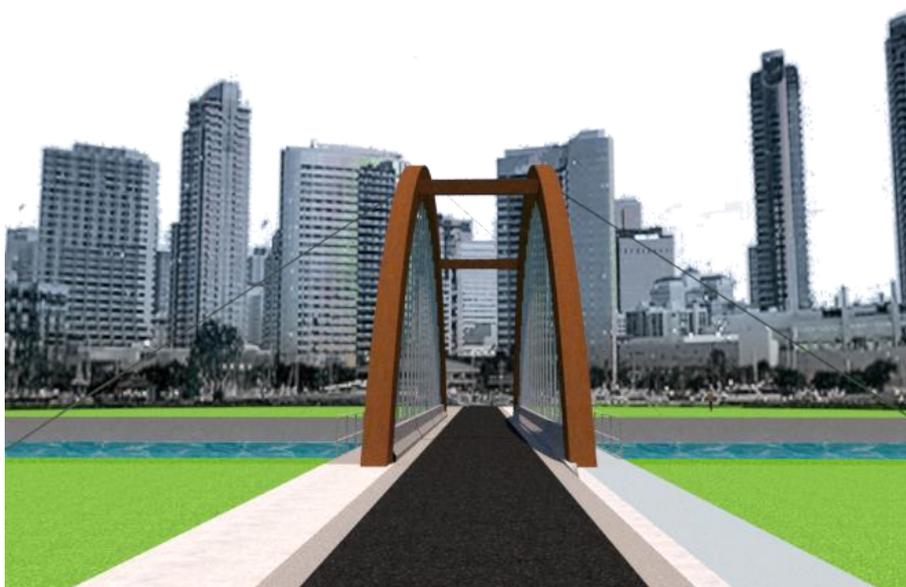


Figura 20: Apresentação da ponte, vista frontal.



Figura 21: Apresentação da ponte, vista lateral.

2.3 PROPRIEDADES

Para o arco, terças e transversinas será utilizado a MLC. Tendo em vista a capacidade de moldar diversos formatos a partir do processo de colagem das lâminas, necessária para formar o arco que é a principal estrutura da ponte.

A madeira laminada e colada ou madeira lamelada e colada, consiste na associação de lâminas de madeira coladas com adesivos e sob pressão. A colagem é feita de modo que as fibras da peça sejam paralelas, com espessura máxima de 5 cm. As peças coladas podem ser emendadas em outras peças e dessa forma atingir grandes comprimentos (PFEIL, 2003).

O desenvolvimento da peça é feito a partir da laminação da madeira, seguido da secagem em estufa até que chegue a uma umidade máxima de 15%, para ter um controle das tensões internas. Posteriormente é feito o preparo das emendas e das lâminas para as dimensões necessárias e por fim a aplicação da cola e colagem (PFEIL, 2003).

O processo de colagem das lâminas faz com que a variação da resistência nas seções de uma mesma peça seja menor do que em peças maciças, devido a distribuição aleatória dos defeitos da madeira, além disso reduz os defeitos provenientes da secagem por possibilitar um maior controle nessa etapa e por fim, permite ser trabalhada em peças curvas, sendo ideal para arcos.

Para o tabuleiro será utilizado o MLCC, sendo este o tipo de madeira ideal para a aplicação e mantendo a característica da ponte com o uso de madeiras engenheiradas. A madeira laminada e cruzada é composta por lâminas dispostas ortogonalmente umas às outras (Figura 22). O número de camadas irá depender da demanda, porém será sempre

um número ímpar, geralmente em 3, 5 ou 7 camadas, garantindo assim que as camadas exteriores estejam na mesma direção, obtendo uma maior resistência.

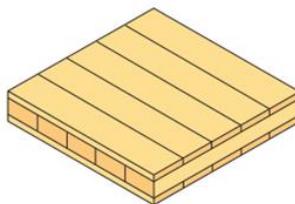


Figura 22: Painel de madeira laminada e cruzada com 3 camadas (GODONOU, 2022).

Para as peças de MLC, será utilizada a classe C30 das coníferas. Para o tabuleiro em MLCC será utilizada a espécie de madeira Angelim Araroba. Buscou-se encontrar uma espécie que além de atender aos requisitos de resistência, fosse comum as versões da NBR 7190 de 1997 e 2022 a fim de possibilitar as comparações. Na Tabela 3, são apresentadas as espécies que são comuns para ambas as versões da norma e suas respectivas classes de resistência definida pela tabela apresentada no Anexo C2. Dentre estas a espécie que se adequou ao dimensionamento deste trabalho foi a Angelim Araroba (*Vataireopsis araroba*), uma espécie de madeira nativa da mata atlântica, endêmica no Brasil, com ocorrência confirmada no estado do Rio de Janeiro. (CARDOSO, 2023)

Tabela 3: Espécies de madeira comum as versões de 1997 e 2022 da NBR 7190 e classificação de acordo com a NBR 7190 (2022).

Espécie	Classe da NBR 7190 (2022)
Cedro doce	D20
Cedro amargo	D20
Quarubarana	D30
Angelim araroba	D40
Branquilha	D40
Cafearana	D40
Canafístula	D40
Cupiúba	D40
Angelim pedra	D50
Casca grossa	D50
Castelo	D50
Louro preto	D50
Angelim ferro	D60
Champagne	D60
Guarucaia	D60
Ipê	D60
Jatobá	D60
Maçaranduba	D60
Mandioqueira	D60
Oiticica amarela	D60
Sucupira	D60
Tatajuba	D60

2.3.1 Coeficientes Aplicados Sobre as Propriedades

2.3.1.1 Coeficientes de Variação de Resistência δ

A NBR 7190 (1997) assume que as resistências das madeiras seguem uma distribuição normal. O valor básico utilizado para representar a resistência característica inferior corresponde ao quantil de 5% da distribuição de resistências. A equação (2.3.1) é utilizada para determinar a resistência característica de um determinado material.

$$f_k = f_m(1 - 1,645 * \delta) \quad (2.3.1)$$

De acordo com a NBR 7190 (1997), em geral, lotes homogêneos de materiais apresentam coeficientes de variação inferiores a 15%. No entanto, devido à falta de valores experimentais precisos para a madeira, a norma adota valores de 18% para o coeficiente de variação δ em esforços normais e 28% em cisalhamento. Com isso, pode-se obter os valores de f_k para resistência a esforços normais e cisalhamento.

A NBR 7190 (2022) manteve a abordagem da NBR 7190 (1997). A Tabela 4 apresenta a relação entre valores médios e característicos para as tensões normais e cisalhantes.

Tabela 4: Relação entre a resistência média e característica, segundo a NBR 7190 (1997) e NBR 7190 (2022).

Resistência	f_k/f_m	
	NBR 7190 (1997)	NBR 7190 (2022)
Compressão paralela às fibras	0,70	0,70
Tração paralela às fibras	0,70	0,70
Cisalhamento	0,54	0,54

2.3.1.2 Coeficientes de Relação Entre Resistências Características

A NBR 7190 (1997) apresenta relações entre os valores característicos quando são usadas as propriedades das classes de resistência. A Tabela 5 apresenta as relações entre resistências características.

Tabela 5: Relações entre resistências características, segundo a NBR 7190 (1997).

Relação	$f_{i,k}/f_{j,k}$
	NBR 7190 (1997)
$f_{c,k}/f_{t,k}$	0,77
$f_{m,k}/f_{t,k}$	1
$f_{cn,k}/f_{c,k}$	0,25
$f_{en,k}/f_{c,k}$	0,25
$f_{e,k}/f_{c,k}$	1
$f_{v,k}/f_{c,k}$ (coníferas)	0,15

$f_{v,k}/f_{c,k}$ (dicotiledôneas)	0,12
------------------------------------	------

A NBR 7190 (2022) apresenta relações entre os valores de dimensionamento para madeiras provenientes de florestas nativas, quando não se dispõe de resultados de ensaios. A Tabela 6 apresenta as relações entre resistências de dimensionamento.

Tabela 6: Relações entre resistências de dimensionamento, segundo a NBR 7190 (2022).

Tipo de emenda	$f_{i,d}/f_{j,d}$
$f_{t,d}/f_{c,d}$	1,0
$f_{m,d}/f_{c,d}$	1,0
$f_{tn,d}/f_{td}$	0,06

2.3.1.3 Coeficientes de Minoração da Resistência γ_w

A Tabela 7 apresenta os coeficientes de minoração da resistência segundo a NBR 7190 (1997) e a NBR 7190 (2022).

Tabela 7: Coeficientes de minoração da resistência, segundo a NBR 7190 (1997) e NBR 7190 (2022).

Resistência	γ_{wc}	
	NBR 7190 (1997)	NBR 7190 (2022)
Compressão paralela às fibras	1,4	1,4
Flexão	---	1,4
Tração paralela às fibras	1,8	1,4
Cisalhamento	1,8	1,8

Para o estado limite de serviço, o coeficiente $\gamma_w = 1,0$ é adotado por ambas as versões da NBR 7190.

2.3.1.4 Umidade

A Tabela 8 apresenta as classes de umidade fornecidas para a NBR 7190 (1997) e para a NBR 7190 (2022). Os projetos em estruturas de madeira devem levar em consideração a classe de umidade com o objetivo de ajustar as propriedades de resistência e rigidez do elemento de madeira em função das condições ambientais de umidade onde a obra será executada.

Tabela 8: Classes de umidade, segundo a NBR 7190 (1997) e a NBR 7190 (2022).

Classes de Umidade	Umidade Relativa do Ambiente U_{amb}	Umidade de Equilíbrio da Madeira U_{eq}
1	$\leq 65\%$	12%
2	$65\% \leq U_{amb} \leq 75\%$	15%
3	$75\% \leq U_{amb} \leq 85\%$	18%
4	$U_{amb} > 85\%$ durante longos períodos	$\geq 25\%$

2.3.1.5 Coeficientes de Modificação k_{mod}

A NBR 7190 (1997) define o coeficiente de modificação k_{mod} de acordo com a equação (2.3.2):

$$k_{mod} = k_{mod,1} * k_{mod,2} * k_{mod,3} \quad (2.3.2)$$

onde:

$k_{mod,1}$ – considera a classe de carregamento e o tipo de material utilizado (Tabela 9);

$k_{mod,2}$ – considera a classe de umidade e o tipo de material utilizado (Tabela 10);

$k_{mod,3}$ – considera a incidência de defeitos na peça de madeira (Tabela 11).

Tabela 9: Valores de $k_{mod,1}$. Adaptado de NBR 7190 (1997).

Classe de carregamento	Tipos de madeira	
	Serrada, laminada colada e compensada	Recomposta
Permanente	0,6	0,3
Longa duração	0,7	0,45
Média duração	0,8	0,65
Curta duração	0,9	0,9
Instantânea	1,1	1,1

Tabela 10: Valores de $k_{mod,2}$. Adaptado de NBR 7190 (1997).

Classes de umidade	Tipo de Madeira	
	Serrada, laminada colada e compensada	Recomposta
(1) e (2)	1,0	1,0
(3) e (4)	0,8	0,9

Tabela 11: $k_{mod,3}$ para madeira laminada e colada. Adaptado de NBR 7190 (1997).

Produto de madeira	Tipo de madeira	Categoria	Tipo	$k_{mod,3}$
Serrada	Dicotiledônea	1 ^a	Reta	1,0
		2 ^a	Reta	0,8
	Conífera	1 ^a ou 2 ^a	Reta	0,8
Laminada e colada	Qualquer	1 ^a ou 2 ^a	Reta	1,0
Laminada e colada	Qualquer	1 ^a ou 2 ^a	Curva	$1 - 2000 \left(\frac{t}{r} \right)^2$ $= 1 - 2000 \left(\frac{0,05}{22,67} \right)^2$ $= 0,99$

Para a NBR 7190 (2022) o coeficiente k_{mod} é calculado de forma similar, mantendo-se os valores de $k_{mod,1}$ e $k_{mod,2}$, aplicando-se os valores da Tabela 9 à Tabela 11. Porém para o $k_{mod,3}$ a nova norma recomenda seu uso apenas para peças de madeira lamelada e colada (MLC), não considerando o uso em peças de MLCC. O coeficiente $k_{mod,3}$ é dado pela equação (2.3.3):

$$k_{mod,3} = C_e * C_c * C_t = 0,95 * 1 * 1 = 0,95 \quad (2.3.3)$$

onde:

C_e – considera entalhes múltiplos (Tabela 12);

C_c – considera a curvatura (Tabela 13);

C_t – considera a temperatura de trabalho (Tabela 14).

Tabela 12: Valores de C_e . Adaptado de NBR 7190 (2022).

Tipo de emenda	C_e
Com emenda de entalhes múltiplos	0,95
Sem emendas longitudinais	1,0

Tabela 13: Valores de C_c . Adaptado de NBR 7190 (2022).

Tipo	C_c
Retas	1,0
Curvas	$1 - 2000 \left(\frac{t}{r}\right)^2 = 1 - 2000 \left(\frac{0,05}{22,67}\right)^2 = 0,99$

Tabela 14: Valores de C_t . Adaptado de NBR 7190 (2022).

Tipo de propriedade	Teor de umidade da madeira em serviço	Temperatura °C		
		°C ≤ 38	38 < °C ≤ 52	52 < °C ≤ 66
Tração paralela e módulo de elasticidade	Seca ou úmida	1,0	0,9	0,9
Demais propriedades e ligações	Seca < 16%	1,0	0,8	0,7
	Úmida ≥ 16%	1,0	0,7	0,5

2.3.1.6 Coeficientes de Fluência φ

A madeira, por ser um material viscoelástico, apresenta uma deformação adicional ao longo do tempo, mesmo sob carga constante. Essa deformação lenta é conhecida como fluência e depende de vários fatores, incluindo as propriedades da madeira e as condições ambientais. A NBR 7190 (1997) define o coeficiente de fluência φ , conforme os valores apresentados na Tabela 15.

Tabela 15: Coeficiente de fluência φ segundo a NBR 7190 (1997).

Classes de carregamento	Classe 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

A NBR 7190 (2022) define o coeficiente de fluência φ , conforme os valores apresentados na Tabela 16.

Tabela 16: Coeficiente de fluência φ segundo a NBR 7190 (2022).

Material	Classe de Umidade		
	(1)	(2) e (3)	(4)
Madeira serrada, MLC, MLCC, LVL e roliça	0,6	0,8	2
Compensado estrutural	0,8	1,0	2,5
OSB estrutural	1,5	2,25	-

2.3.2 Propriedades Mecânicas dos elementos em MLC

A NBR 7190 (1997) em sua Tabela 8 (Anexo B1) estabelece o conceito de classes de resistência, na qual as peças de madeira são classificadas em classes de resistência para as coníferas e dicotiledôneas. A NBR 7190-1 (2022) em sua Tabela 3 (anexo B2) também apresenta classes de resistência para madeiras provenientes de florestas plantadas, coníferas ou dicotiledôneas.

Conforme mencionado no item 2.3, as peças de madeira em MLC foram consideradas da classe C30. Obtendo-se os valores de resistência da classe C30 (Anexo B1 e B2) para ambas as versões da norma e aplicando-se as relações apresentadas na Tabela 5 e na Tabela 6, obteve-se as propriedades apresentados na Tabela 17.

Tabela 17: Propriedades da classe C30, segundo a NBR 7190 (1997) e a NBR 7190 (2022).

Parâmetro	Variável	NBR 7190 (1997)	NBR 7190 (2022)
Resistência característica à flexão (MPa)	$f_{m,k}$	38,96	30
Resistência característica à tração paralela às fibras (MPa)	$f_{t,k}$	38,96	18
Resistência característica à tração perpendicular às fibras (MPa)	$f_{tn,k}$	---	0,4
Resistência característica à compressão paralela às fibras (MPa)	$f_{c,k}$	30	23
Resistência característica à compressão perpendicular às fibras (MPa)	$f_{cn,k}$	7,5	2,7
Resistência característica ao cisalhamento (MPa)	$f_{v,k}$	6	4
Modulo de elasticidade médio paralelo às fibras (GPa)	E_m	14,5	12
Modulo de elasticidade característico paralelo às fibras (GPa)	$E_{0,05}$	---	8
Densidade média (kg/m ³)	ρ_m	500	460
Densidade aparente (kg/m ³)	ρ_{ap}	600	380

As resistências de dimensionamento f_d são obtidas aplicando-se a equação (2.3.4):

$$f_d = k_{mod} * \frac{f_k}{\gamma_w} \quad (2.3.4)$$

onde f_k é a resistências característica, apresentada na Tabela 17 e γ_w o coeficiente de minoração da resistência, apresentado na Tabela 7. Para a definição do coeficiente de

modificação k_{mod} , conforme a NBR 7190 (1997), considerou-se: a classe de carregamento de longa duração e o tipo de madeira laminada e colada que resultou em $k_{mod1} = 0,7$; a classe de umidade 3 que resultou em $k_{mod2} = 0,8$ e considerando peças retas e curvas obtém-se $k_{mod3} = 1$ e $k_{mod3} = 0,99$, respectivamente. Aplicando-se a equação (2.3.2) obteve-se $k_{mod} = 0,56$ e $k_{mod} = 0,5544$, para peças retas e curvas respectivamente.

Entretanto, como citado anteriormente, para definição do coeficiente k_{mod3} de acordo com a NBR 7190 (2022) considerou-se: com emendas que resultou em $C_e = 0,95$, temperatura menor que 38°C que resultou em $C_t = 1$ e considerando peças retas e curvas obtém-se $C_c = 1$ e $C_c = 0,99$, respectivamente. Aplicando-se a equação (2.3.2) e (2.3.3) obteve-se $k_{mod} = 0,532$ e $k_{mod} = 0,5264$, para peças retas e curvas respectivamente.

Para a NBR 7190 (1997), o módulo de elasticidade efetivo $E_{c,ef}$ é obtido aplicando-se a equação (2.3.5).

$$E_{c,ef} = k_{mod} * E_m \quad (2.3.5)$$

Aplicando-se as equações (2.3.4) e (2.3.5) obteve-se as propriedades de dimensionamento para ambas as versões da norma, sendo apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18: Propriedades de dimensionamento da classe C30, segundo a NBR 7190 (1997) e a NBR 7190 (2022).

Parâmetro	Variável	NBR 7190 (1997)	NBR 7190 Arco (1997)	NBR 7190 (2022)	NBR 7190 Arco (2022)
Resistência de dimensionamento à flexão (MPa)	$f_{m,d}$	---	---	11,4	11,29
Resistência de dimensionamento à tração paralela às fibras (MPa)	$f_{t,d}$	12,12	12,00	6,84	6,77
Resistência de dimensionamento à tração perpendicular às fibras (MPa)	$f_{tn,d}$	---	---	0,15	0,15
Resistência de dimensionamento à compressão paralela às fibras (MPa)	$f_{c,d}$	12	11,88	8,74	8,65
Resistência de dimensionamento à compressão perpendicular às fibras (MPa)	$f_{cn,d}$	3	2,97	1,01	1,0
Resistência de dimensionamento ao cisalhamento (MPa)	$f_{v,d}$	1,87	1,85	1,18	1,17
Módulo de elasticidade efetivo paralelo às fibras (GPa)	$E_{c,ef}$	8,12	8,039	6,384	6,320
Densidade média (kg/m ³)	ρ_m	500	500	460	460
Densidade aparente (kg/m ³)	ρ_{ap}	600	600	380	380

2.3.3 Propriedades Mecânicas dos elementos em MLCC

Para os elementos em MLCC foi adotado a madeira da espécie Angelim Araroba.

A NBR 7190 (1997) fornece uma tabela (Anexo C1) com os valores médios de resistência e módulo de deformação longitudinal, para umidade padrão $U = 12\%$ para madeiras dicotiledôneas nativas e de reflorestamento.

No que diz respeito à NBR 7190 (1997), a transformação de valores médios para característicos é obtida empregando-se as relações apresentadas na Tabela 4. Os demais valores de resistência característica são obtidos empregando-se as relações apresentadas na Tabela 5. Os valores das resistências de dimensionamento são calculados empregando-se a equação (2.3.4). O coeficiente de minoração da resistência γ_w foi obtido da Tabela 7. O coeficiente de modificação é o mesmo calculado no tópico anterior, $k_{mod} = 0,56$. O módulo de elasticidade efetivo, foi obtido aplicando-se a equação (2.3.5). Os valores de resistência característica e de dimensionamento, assim como as demais propriedades utilizadas são apresentadas na Tabela 19.

A NBR 7190 (2022) divide as espécies nativas em classes e fornece uma tabela com os valores característicos das respectivas classes (Anexo C2). A espécie Angelim Araroba, se enquadra na classe D40, que apresenta alguns dos valores de resistência característica. Os demais valores de resistência característica são obtidos empregando-se as relações apresentadas na Tabela 6. Os valores das resistências de dimensionamento são calculados empregando-se a equação (2.3.4). O coeficiente de minoração da resistência γ_w foi obtido da Tabela 7. O coeficiente de modificação é o mesmo calculado no tópico anterior, $k_{mod} = 0,532$. O módulo de elasticidade efetivo, foi obtido aplicando-se a equação (2.3.5). Os valores de resistência característica e de dimensionamento, assim como as demais propriedades utilizadas são apresentadas na Tabela 19.

Para o dimensionamento de elementos em MLCC, é necessário se conhecer a resistência ao cisalhamento na camada transversal (*rolling shear*). Como a NBR 7190 (1997) e a NBR 7190 (2022) são omissas em relação à determinação desta propriedade, utilizou-se a recomendação do Eurocode 5, conforme a equação (2.3.6).

$$f_{Rv,d} = 2 * f_{tn,d} \quad (2.3.6)$$

Tabela 19: Propriedades para o dimensionamento de elementos em MLCC para madeira da espécie Angelim Araroba (*Vataireopsis araroba*), segundo a NBR 7190 (1997) e a NBR 7190 (2022).

Parâmetro	Variável	NBR 7190 (1997)	NBR 7190 (2022)
-----------	----------	-----------------	-----------------

		f_m	f_k	f_d	f_k	f_d
Resistência à flexão (MPa)	f_m	---	---	---	---	15,2
Resistência à tração paralela às fibras (MPa)	f_t	69,2	48,44	15,07	---	15,2
Resistência à tração perpendicular às fibras (MPa)	f_{tn}	3,1	2,17	0,675	---	0,91
Resistência à compressão paralela às fibras (MPa)	f_c	50,5	35,35	14,14	40	15,2
Resistência ao cisalhamento (MPa)	f_v	7,1	3,83	1,19	6	1,77
Resistência ao cisalhamento na camada transversal (rolling shear) (MPa)	f_{Rv}	---	---	1,35	---	1,82
Modulo de elasticidade médio paralelo às fibras (GPa)	E_m	12,876	---	12,876	---	14,5
Modulo de elasticidade efetivo paralelo às fibras (GPa)	$E_{c,ef}$	---	---	7,21	---	7,71
Densidade aparente (kg/m ³)	ρ_{ap}	688	---	---	---	750

2.3.4 Propriedades dos cabos de aço

As propriedades dos cabos de aço foram obtidas a partir do manual técnico de cabos CIMAF, que se encontra no anexo A. Os cabos foram pré-dimensionados a partir da metodologia apresentada no item 2.4. O tipo de cabo adotado para este projeto foi o da classe 6x36 com alma de aço Warrington–Seale. A Tabela 20 apresenta as principais propriedades dos cabos utilizados no projeto.

Tabela 20: Propriedades dos cabos de aço 6x19 com alma de aço.

Parâmetro	Valor
Módulo de Elasticidade (MPa)	100000
Peso Específico (kg/m ³)	8005
Resistencia do cabo de 42 mm (kN)	1196,8
Resistencia do cabo de 45 mm (kN)	1383,2
Resistencia do cabo de 102 mm (kN)	5836,95

2.4 PRÉ-DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS

Neste item é apresentado o pré-dimensionamento das seções transversais dos elementos que compõem a estrutura da ponte de modo a se ter um ponto de partida para a modelagem estrutural da ponte.

2.4.1 Arco

O pré-dimensionamento do arco foi dirigido pelo estudo da flambagem, seguindo-se as recomendações de BLASS (1995) e sua aplicação em DA CRUZ (2016). O índice de esbeltez do arco em torno dos eixos x (λ_x) e y (λ_y) é definido pela equação (2.4.3):

Segundo DA CRUZ (2016), arbitra-se $\lambda_x = \lambda_y = 100$ e encontra-se o respectivo valor para a seção. Entretanto, visando obter uma análise mais simplificada, foi definido

$\lambda_x = \lambda_y = 80$, o que de acordo com a NBR 7190 (1997), a classifica como uma peça medianamente esbelta, simplificando assim as verificações quanto a esbeltez. A NBR 7190 (2022) não apresenta uma classificação para os elementos comprimidos, de acordo com a esbeltez, conforme sua versão anterior. A flambagem lateral é um grande problema para os arcos. Este efeito pode ser contornado aumentando a seção na direção transversal ou reduzindo a distância entre os elementos que promovem pontos de contenção lateral ao arco.

Para a determinação da carga crítica de Euler, máximo esforço normal que pode ser aplicado que conduz a peça à eminência de flambagem, aplica-se a equação (2.4.1). Para calcular o comprimento de flambagem, utilizou-se a aproximação de BLASS (1995) para a equação de Euler. Sendo h a altura do arco e L o vão, a aproximação de BLASS (1995) indica que, para arcos tri articulados com relação h/L entre 0,15 e 0,5 e seção uniforme, o comprimento efetivo de flambagem $L_{ef,x}$, no plano do arco pode ser obtido pela equação (2.4.2):

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{ef,x}^2} \quad (2.4.1)$$

$$L_{ef,x} = 1,25 * s \quad (2.4.2)$$

onde, s é a metade do comprimento do arco.

Substituindo-se (2.4.5) e (2.4.6) em (2.4.4), obtém-se (2.4.7). Substituindo-se (2.4.7) em (2.4.3) e isolando-se h_y obtém-se (2.4.8). Executando-se o mesmo procedimento em relação em relação ao eixo y e isolando-se $L_{ef,y}$ obtém-se (2.4.9). As equações (2.4.8) e (2.4.9) definem uma relação entre as dimensões da seção transversal do arco com o comprimento de flambagem, no plano principal ($L_{ef,x}$) e fora do plano principal ($L_{ef,y}$), respectivamente, e o índice de esbeltez.

$$\lambda = \frac{L_{ef}}{i} \quad (2.4.3)$$

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (2.4.4)$$

$$I_x = h_x * \frac{h_y^3}{12} \quad (2.4.5)$$

$$A = h_x * h_y \quad (2.4.6)$$

$$i_x = \frac{h_y}{\sqrt{12}} \quad (2.4.7)$$

$$h_y = \frac{L_{ef,x} \sqrt{12}}{\lambda_x} \quad (2.4.8)$$

$$L_{ef,y} = \frac{\sqrt{12}}{h_y * \lambda_y} \quad (2.4.9)$$

Adotando-se a relação $h/L = 0,3$, obtém-se a altura do arco de 12 m e o comprimento $s = 24,5$ m, conforme ilustrado na Figura 23.

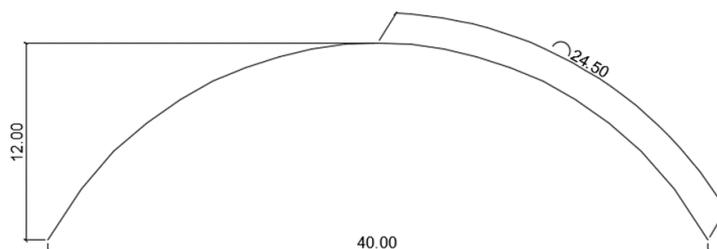


Figura 23: Geometria do arco.

Substituindo-se $s = 24,5$ m na equação (2.4.2), obtém-se o comprimento de flambagem do arco $L_{ef,x} = 30,63$ m. Aplicando-se a equação (2.4.8) obtém-se a altura da seção transversal no plano de flexão do arco $h_y = 1,33$ m, sendo adotada a altura $h_y = 1,4$ m. Foi definida a proporção entre as dimensões da seção transversal $h_x/h_y = 2$, o que conduz à largura da seção transversal do arco $h_x = 0,7$ m. Aplicando-se a equação (2.4.9), obtém-se o comprimento efetivo de flambagem máximo para flexão fora do plano principal do arco $L_{ef,y} = 16,16$ m. Este comprimento define o espaçamento máximo entre os pontos de contenção lateral que devem ser adicionados ao arco mediante a adoção de uma subestrutura de contraventamento. Para o projeto desta ponte adotou-se o valor de 12,25 m para a distância entre ponto de contenção lateral.

2.4.2 Transversinas

A seção transversal das transversinas foi obtida estimando-se a sua carga de trabalho. Com auxílio do software Autocad elaborou-se um croqui das cargas atuantes nas transversinas e possíveis casos da posição do trem tipo que produziriam os esforços máximos, mostrados na Figura 24.

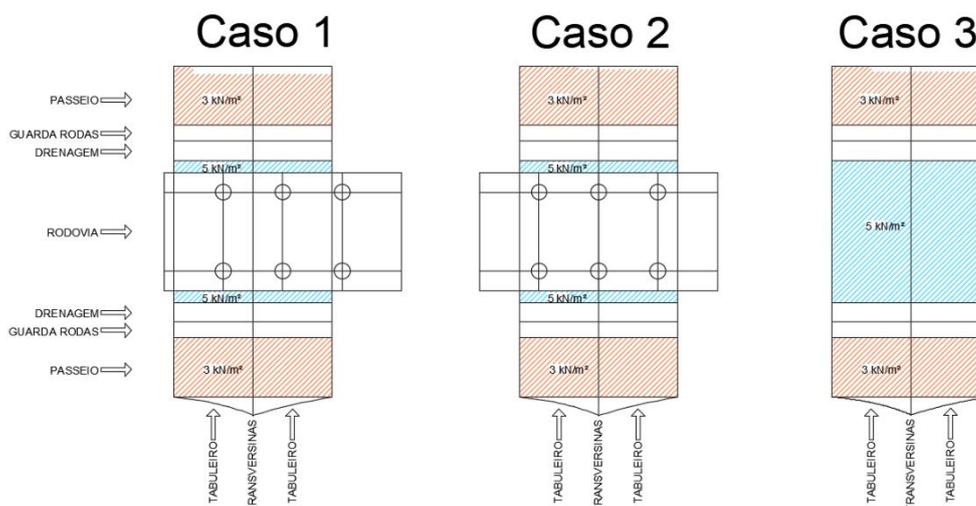


Figura 24: Estudo das posições do trem tipo para a transversina.

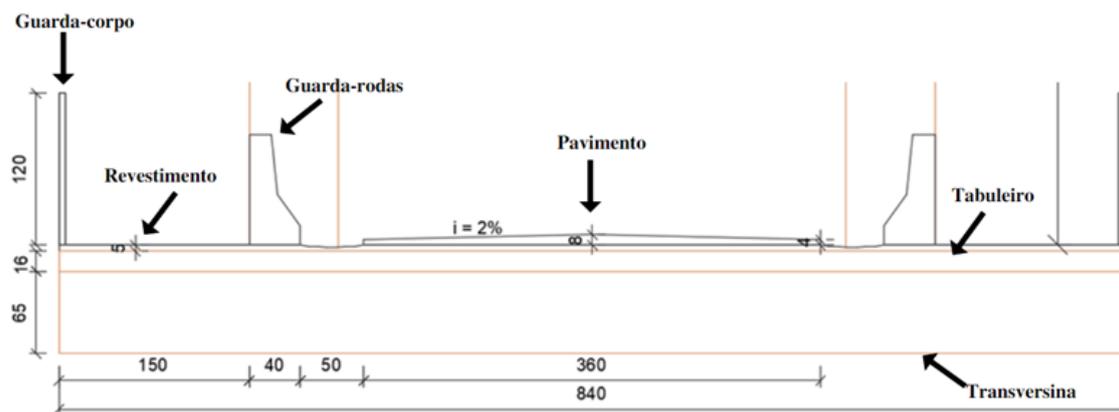


Figura 25: Seção transversal da ponte.

A Tabela 21 apresenta informações dos elementos constituintes presentes na ponte, necessários para o pré-dimensionamento da transversina

Tabela 21: Informações dos elementos constituintes do tabuleiro.

Elemento	Seção ou espessura (m)	Densidade (kN/m ³)	Referência
Transversina	0,325 x 0,65	5,88	Tabela 18
Revestimento Asfáltico	0,06	24,0	NBR 6120 (2019)
Revestimento Concreto Armado	0,05	25,0	NBR 6120 (2019)
Tabuleiro	0,16	6,75	Tabela 19
Guarda-rodas em Concreto Armado (modelo New Jersey, DNER)	0,22	25	NBR 6120 (2019)
Guarda corpo	0,015	77,8	NBR 6120 (2019)
Conexões	3% do PP da madeira		NBR 7190 (2019)

2.4.2.1 Transversinas – Dimensionamento Segundo a NBR 7190 (1997)

Para o pré-dimensionamento das seções conforme a NBR 7190 (1997), adotou-se os coeficientes de ponderação das ações conforme a Tabela 22. Para o cálculo final, os coeficientes utilizados serão apresentados no item 3.5.3.

Tabela 22: Coeficientes de ponderação das ações, (NBR 7190, 1997).

Carga Permanente			
γ_G	Ações permanentes de grande variabilidade	1,4	NBR 7190 (1997)
Carga Variável			
γ_Q	Ações variáveis	1,4	NBR 7190 (1997)
CIV	$1 + \frac{\alpha}{L_{iv} + 40}$ $= 1 + \frac{12}{40 + 40} = 1,15$	1,15	NBR 7190 (1997)
Redução para ações de curta duração	Ação de curta duração (impacto)	0,75	NBR 7190 (1997)
Total		1,21	

Com as seções, espessuras e densidades apresentadas na Tabela 21, elaborou-se a Tabela 23 com as cargas permanentes e as cargas variáveis do trem tipo.

Tabela 23: Cargas lineares permanentes e variáveis na transversina.

	Cargas	Carga Majorada
Carga Permanente		
Peso Próprio Transversina	$0,325m * 0,65m * 5,88 \frac{kN}{m^3} = 1,24 \text{ kN}$	$1,4 * 1,24kN = 1,8 \text{ kN}$
Revestimento Asfáltico	$0,06m * 24 \frac{kN}{m^3} = 1,44 \frac{kN}{m}$	$1,4 * 1,44 \frac{kN}{m} = 2,0 \frac{kN}{m}$
Revestimento Concreto Armado	$0,05m * 25 \frac{kN}{m^3} = 1,25 \frac{kN}{m}$	$1,4 * 1,25 \frac{kN}{m} = 1,8 \frac{kN}{m}$
Peso Próprio Tabuleiro	$0,16m * 6,75 \frac{kN}{m^3} = 1,08 \frac{kN}{m}$	$1,4 * 1,08 \frac{kN}{m} = 1,5 \frac{kN}{m}$
Conexões	$3\% * (0,95 + 1,5) \frac{kN}{m} = 0,07 \frac{kN}{m}$	$1,4 * 0,07 \frac{kN}{m} = 0,1 \frac{kN}{m}$
Carga Acidental		
Veículo Tipo	$450kN \div 3 = 150 \text{ kN}$	$1,21 * 150kN = 181 \text{ kN}$
Carga de Multidão Casos 1 e 2	$0,6m * 5 \frac{kN}{m^2} = 3 \frac{kN}{m}$	$1,21 * 3 \frac{kN}{m} = 3,6 \frac{kN}{m}$
Carga de Multidão Caso 3	$3,6m * 5 \frac{kN}{m^2} = 18 \frac{kN}{m}$	$1,21 * 18 \frac{kN}{m} = 21,8 \frac{kN}{m}$

Com o estudo das cargas atuantes feito, lançou-se a estrutura no software ftool. No esquema estrutural apresentado na Figura 26 as vigas representam os vãos de 2,0 m com as placas MLCC e os apoios representam as transversinas. Na Figura 26 são apresentadas as cargas conforme, a Tabela 23 e a Figura 24 (casos para as posições do veículo tipo). Na Figura 27, são apresentadas as reações de apoio do sistema, que representam as cargas uniformemente distribuídas que estão atuando nas transversinas para cada um dos 3 casos de posição do veículo tipo.

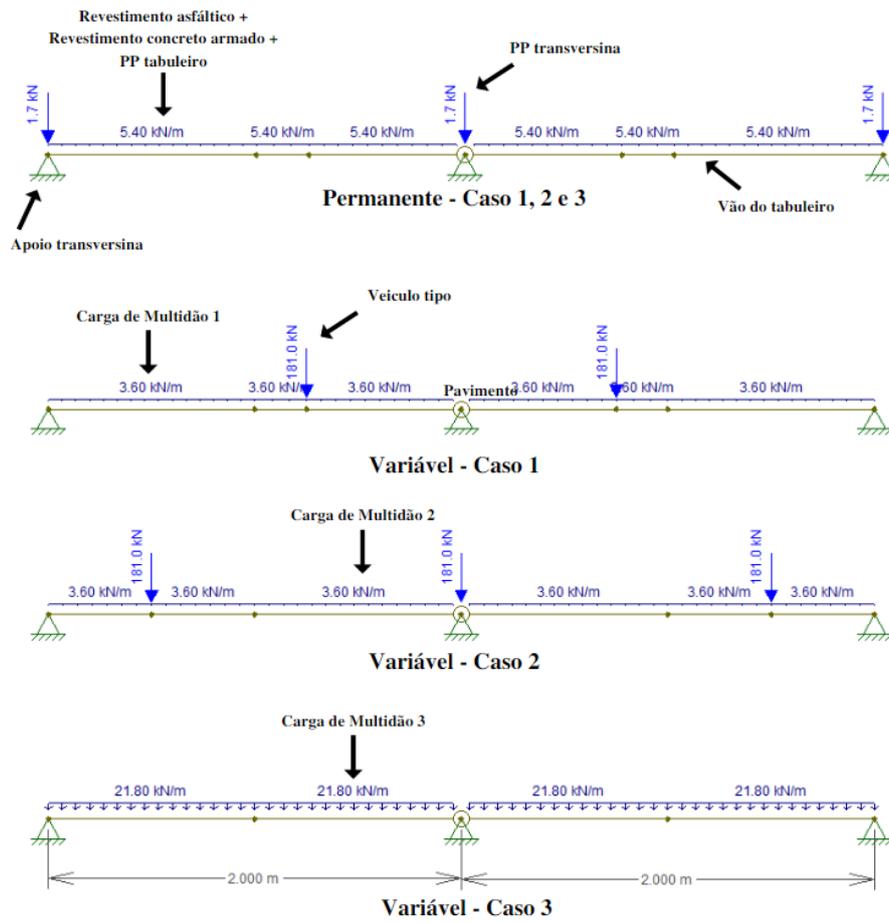


Figura 26: Sistema estrutural separado em permanente e variável.

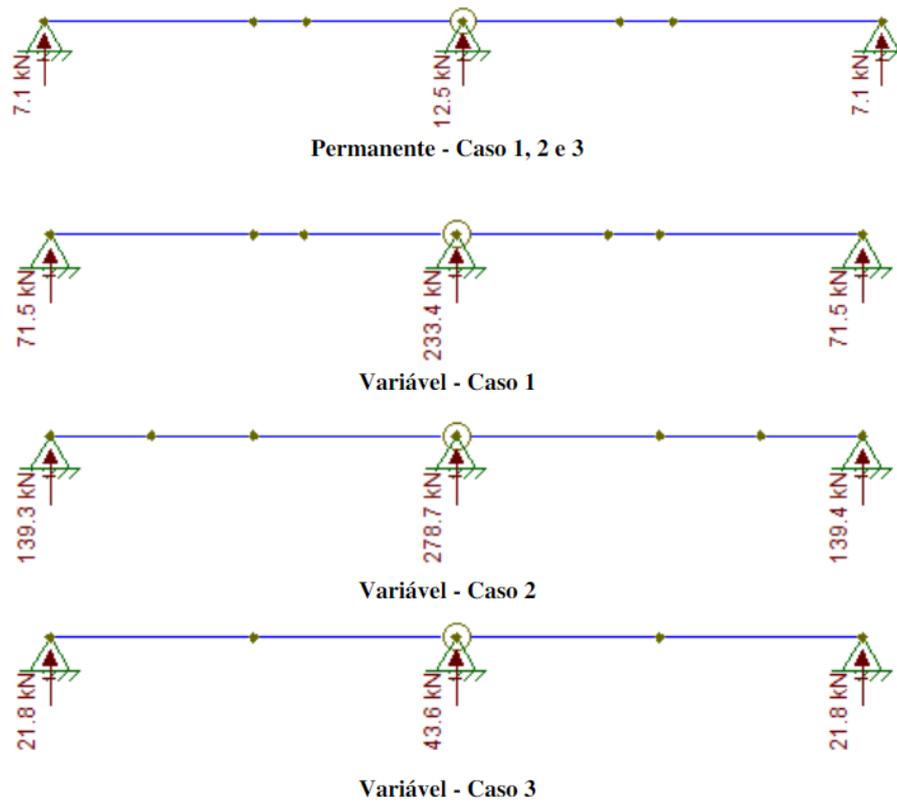


Figura 27: Reações de apoio do sistema estrutural separadas em ações permanentes e variáveis.

A reação de apoio máxima do carregamento permanente foi distribuída ao longo de toda a transversina, para fazer isso dividiu-se a reação de apoio máxima pelo comprimento da transversina, obtendo uma carga por metro, conforme a equação (2.4.10). Para a carga variável foi realizado um procedimento similar, diferenciando-se na área de distribuição da carga, a carga foi distribuída ao longo do comprimento da via, conforme a equação (2.4.11).

$$\text{Carga permanente atuante} = \frac{R_{G,max}}{L_{Transversina}} = \frac{12,5}{8,4} = 1,4 \text{ kN/m} \quad (2.4.10)$$

$$\text{Carga variável atuante} = \frac{R_{Q,max}}{L_{Via}} = \frac{278,7}{3,6} = 77,4 \text{ kN/m} \quad (2.4.11)$$

Adicionalmente, com as seções, espessuras e densidades apresentadas na Tabela 21, elaborou-se a Tabela 24, que apresenta a consideração das cargas oriundas do guarda corpo, guarda rodas, e a carga acidental devido ao passeio de pedestres.

Tabela 24: Cargas para dimensionamento da transversina.

	Cargas	Carga Majorada
Carga Permanente		
Guarda Rodas	$0,22m^2 * 2m * \frac{25kN}{m^3} = 11kN$	$1,4 * 11 \text{ kN} = 15,4 \text{ kN}$
Guarda Corpo	$0,03 m^3 * 77,8 \frac{kN}{m^3} = 2,3 \text{ kN}$	$1,4 * 2,3 \text{ kN} = 3,3 \text{ kN}$
Carga Acidental		
Carga de Pedestres	$2 m * 3 \frac{kN}{m^2} = 6 \frac{kN}{m}$	$1,4 * 6 \frac{kN}{m} = 8,4 \frac{kN}{m}$

A Tabela 25 apresenta o resumo das cargas atuantes na transversina.

Tabela 25: Resumo das cargas atuantes na transversina.

	Carga Distribuída (kN/m)	Carga Pontual (kN)
Passeio	$1,4 + 8,4 = 9,8$	3,3
Guarda Rodas e Drenagem	1,4	15,4
Rodovia	$1,4 + 77,4 = 78,8$	

Com os carregamentos calculados em (2.4.10), (2.4.11), e as cargas apresentadas na Tabela 24 e na Tabela 25 elaborou-se o esquema estrutural apresentado na Figura 28. O diagrama de momento fletor e esforço cortante são apresentados na Figura 29 e Figura 30, respectivamente.

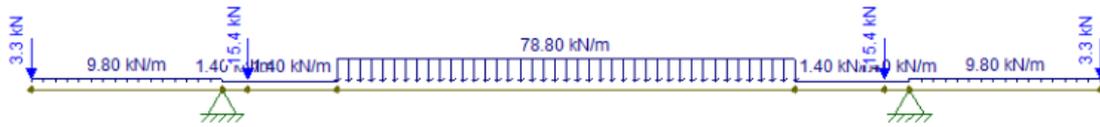


Figura 28: Sistema estrutural com distribuição das reações de apoio.

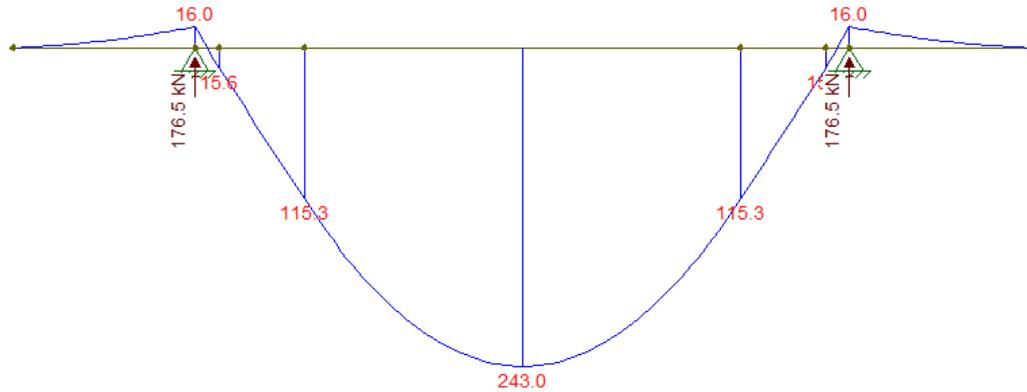


Figura 29: Momento Resultante.

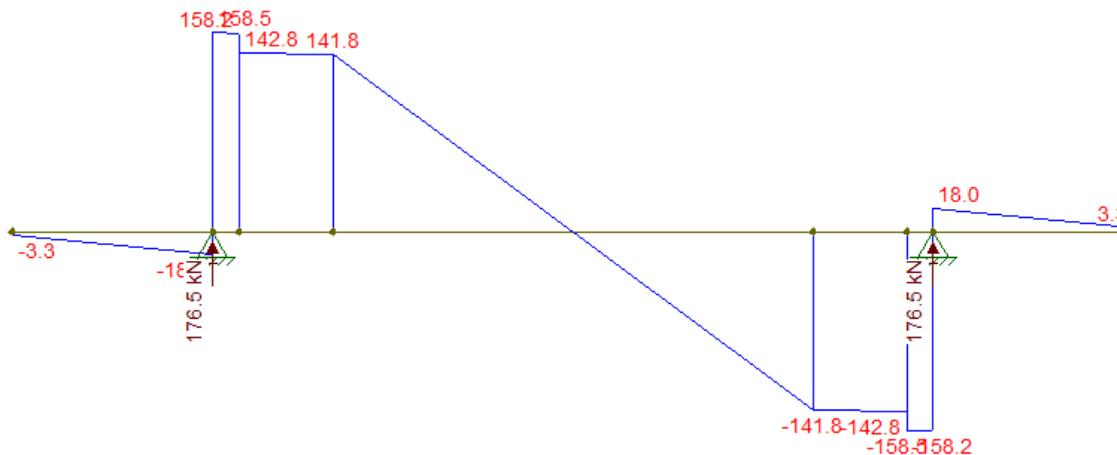


Figura 30: Cortante Resultante.

Para a seção transversal da transversina foi definida a proporção entre as dimensões da seção transversal de $h/b = 2$. Com os esforços solicitantes atuantes na transversina $M_d = 243$ kNm, $V_d = 158,2$ kN e $R_d = 176,5$ kN, a relação h/b definida, e as resistências definidas na Tabela 18 aplicou-se as equações (2.4.12) à (2.4.19) de modo a se obter razões de tensão menores que 90%. Deixou-se 10% de folga, decisão do projetista, como previsão de eventuais enfeites que a ponte pode receber para ocasiões comemorativas. Assim, obteve-se as dimensões $b = 32,5$ cm de largura e $h = 65$ cm de altura.

Análise das tensões normais devido a flexão na seção de maior momento:

$$\sigma_{td} = \sigma_{cd} = 10^6 \frac{6M_d}{bh^2} = 10^6 \frac{6 * 243}{650^2 * 325} = 10,62 \text{ MPa} \quad (2.4.12)$$

$$Raz\tilde{a}o = \frac{\sigma_{cd}}{f_{c,d}} = 88\% \quad (2.4.13)$$

$$Raz\tilde{a}o = \frac{\sigma_{td}}{f_{t,d}} = 88\% \quad (2.4.14)$$

Análise da seção com cortante máximo:

$$\tau_{vd} = 10^3 \frac{3V_d}{2bh} = 10^3 \frac{3 * 158,2}{2 * 325 * 650} = 1,12 \text{ MPa} \quad (2.4.15)$$

$$Raz\tilde{a}o = \frac{\tau_{vd}}{f_{vd}} = 60\% \quad (2.4.16)$$

Tensões associadas à flambagem lateral:

$$L_{ef} = 5,4 \text{ m} \quad (2.4.17)$$

$$\beta_m = \frac{1}{0,26 * \pi} * \frac{\sqrt{\left(\frac{h}{b}\right)^3}}{\sqrt{\left(\frac{h}{b}\right) - 0,63}} * \frac{4}{1,4} \quad (2.4.18)$$

$$= \frac{1}{0,26 * \pi} * \frac{\sqrt{\left(\frac{65}{32,5}\right)^3}}{\sqrt{\left(\frac{65}{32,5}\right) - 0,63}} * \frac{4}{1,4} = 8,45 \text{ MPa}$$

$$L_{ef,calc} = 0,01 * \frac{E_{c,ef} * b}{\beta_m * f_{c,d}} = 0,01 * \frac{8120 * 32,5}{8,45 * 12} = 26,02 \text{ m} > L_{ef} \quad (2.4.19)$$

É dispensada a verificação de tensões de flexão com flambagem lateral.

2.4.2.2 Transversinas – Dimensionamento Segundo a NBR 7190 (2022)

Para o pré-dimensionamento das seções conforme a NBR 7190 (2022), adotou-se os coeficientes de ponderação das ações conforme a Tabela 26. Para o cálculo final, os coeficientes utilizados serão apresentados no item 3.5.3.

Tabela 26: Coeficientes de ponderação das ações, (NBR 7190, 2022).

Carga Permanente			
γ_G	Elementos estruturais industrializados de madeira	1,25	NBR 7190 (2022)
Carga Variável			
γ_Q	Ações variáveis em pontes	1,5	NBR 8681 (2003)
CIV	$1 + 1,06 * \frac{20}{L + 50}$ $= 1 + 1,06 * \frac{20}{40 + 50}$	1,24	NBR 7188 (2013)
CIA	Adotado o maior entre os disponíveis, visto que o projeto em questão não se enquadra nos disponíveis.	1,25	NBR 7188 (2013)
Redução por carga de curta duração	Ação de curta duração	0,75	NBR 7190 (2022)

Total	1,74
-------	------

Com as seções, espessuras e densidades apresentadas na Tabela 21, elaborou-se a Tabela 27 com as cargas permanentes e as cargas variáveis do trem tipo.

Tabela 27: Cargas lineares permanentes e variáveis na transversina.

	Cargas	Carga Majorada
Carga Permanente		
Peso Próprio Transversina	$0,41m * 0,82m * \frac{4,51kN}{m^3} = 1,52 kN$	$1,25 * 1,52 kN = 1,9 kN$
Revestimento Asfáltico	$0,06m * \frac{24kN}{m^3} = 1,44 \frac{kN}{m}$	$1,25 * 1,44 \frac{kN}{m} = 1,8 \frac{kN}{m}$
Revestimento Concreto Armado	$0,05m * \frac{25kN}{m^3} = 1,25 \frac{kN}{m}$	$1,25 * 1,25 \frac{kN}{m} = 1,6 \frac{kN}{m}$
Peso Próprio Tabuleiro	$0,20m * \frac{7,35kN}{m^3} = 1,47 \frac{kN}{m}$	$1,25 * 1,47 \frac{kN}{m} = 1,8 \frac{kN}{m}$
Conexões	$3\% * (1,2 + 1,8) \frac{kN}{m} = 0,07 \frac{kN}{m}$	$1,25 * 0,07 \frac{kN}{m} = 0,1 \frac{kN}{m}$
Carga Acidental		
Veículo Tipo	$450kN \div 3 = 150 kN$	$1,74 * 150kN = 261,6 kN$
Carga de Multidão Casos 1 e 2	$0,6m * 5 \frac{kN}{m^2} = 3 \frac{kN}{m}$	$1,74 * 3 \frac{kN}{m} = 5,2 \frac{kN}{m}$
Carga de Multidão Caso 3	$3,6m * 5 \frac{kN}{m^2} = 18 \frac{kN}{m}$	$1,74 * 18 \frac{kN}{m} = 31,3 \frac{kN}{m}$

Com o estudo das cargas atuantes feito, lançou-se a estrutura no software ftool. No esquema estrutural apresentado na Figura 31 as vigas representam os vãos de 2,0 m com as placas MLCC e os apoios representam as transversinas. Na Figura 31 são apresentadas as cargas conforme, a Tabela 27 e a Figura 24 (casos para as posições do veículo tipo). Na Figura 32, são apresentadas as reações de apoio do sistema, que representam as cargas uniformemente distribuídas que estão atuando nas transversinas para cada um dos 3 casos de posição do veículo tipo.

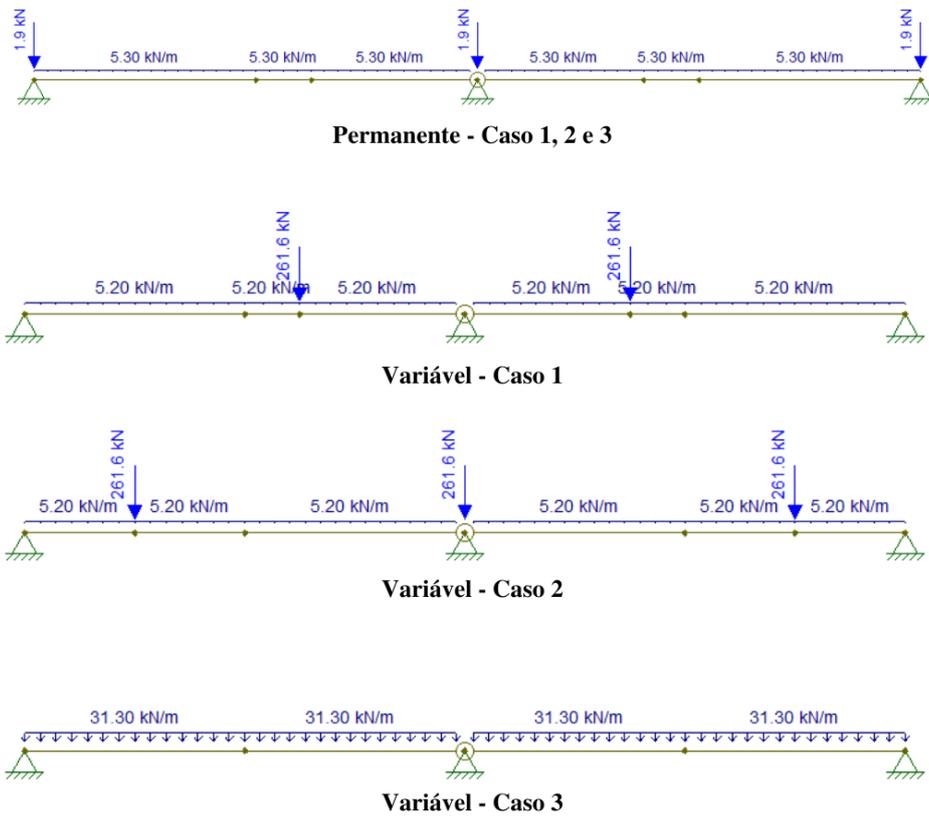


Figura 31: Sistema estrutural separado em permanente e variável.

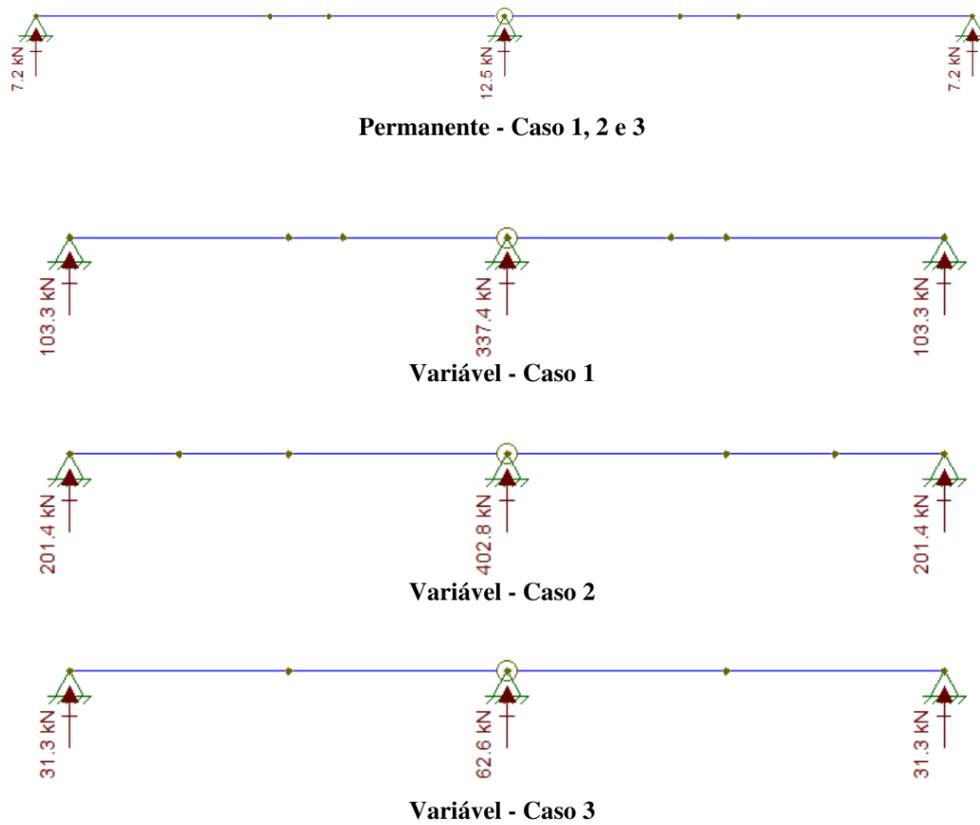


Figura 32: Reações de apoio do sistema estrutural separadas em ações permanentes e variáveis.

A reação de apoio máxima do carregamento permanente foi distribuída ao longo de toda a transversina, para fazer isso dividiu-se a reação de apoio máxima pelo comprimento da transversina, obtendo uma carga por metro, conforme a equação (2.4.20). Para a carga variável foi realizado um procedimento similar, diferenciando-se na área de distribuição da carga, a carga foi distribuída ao longo do comprimento da via, conforme a equação (2.4.21).

$$\text{Carga permanente atuante} = \frac{R_{G,max}}{L_{Transversina}} = \frac{12,5}{8,4} = 1,5 \text{ kN/m} \quad (2.4.20)$$

$$\text{Carga variável atuante} = \frac{R_{Q,max}}{L_{Via}} = \frac{402,8}{3,6} = 111,9 \text{ kN/m} \quad (2.4.21)$$

Adicionalmente, considerando as seções, espessuras e densidades apresentadas na Tabela 21, a Tabela 28 apresenta a consideração das cargas oriundas do guarda corpo, guarda rodas e a carga acidental devido ao passeio de pedestres.

Tabela 28: Cargas para dimensionamento da transversina.

	Cargas	Carga Majorada
Carga Permanente		
Guarda Rodas	$0,22 \text{ m}^2 * 2 \text{ m} * 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 11 \text{ kN}$	$1,25 * 11 \text{ kN} = 13,75 \text{ kN}$
Guarda Corpo	$0,03 \text{ m}^3 * 77,8 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 2,3 \text{ kN}$	$1,25 * 2,3 \text{ kN} = 2,9 \text{ kN}$
Carga Acidental		
Carga de Pedestres	$2 \text{ m} * 3 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 6 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$	$1,5 * 6 \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 9,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

A Tabela 29 apresenta o resumo das cargas atuantes na transversina.

Tabela 29: Resumo de cargas atuantes na transversina.

	Carga Distribuída (kN/m)	Carga Pontual (kN)
Passeio	$1,5 + 9 = 10,5$	2,9
Guarda Rodas e Drenagem	1,5	13,75
Rodovia	$1,5 + 111,9 = 113,9$	

Com os carregamentos calculados em (2.4.20), (2.4.21), e as cargas apresentadas na Tabela 28 e na Tabela 29 elaborou-se o esquema estrutural apresentado na Figura 33. O diagrama de momento fletor e esforço cortante são apresentados na Figura 34 e Figura 35, respectivamente.

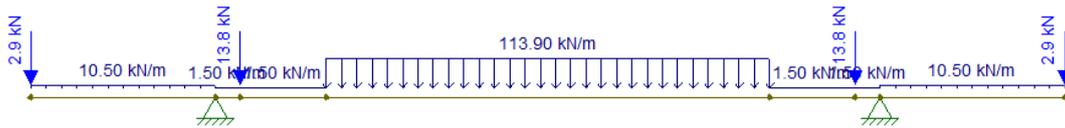


Figura 33: Sistema estrutural com distribuição das reações de apoio.

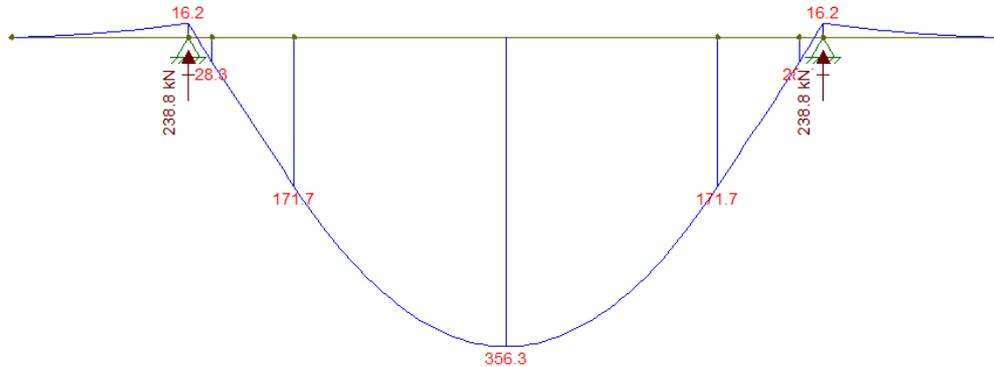


Figura 34: Momento Resultante.

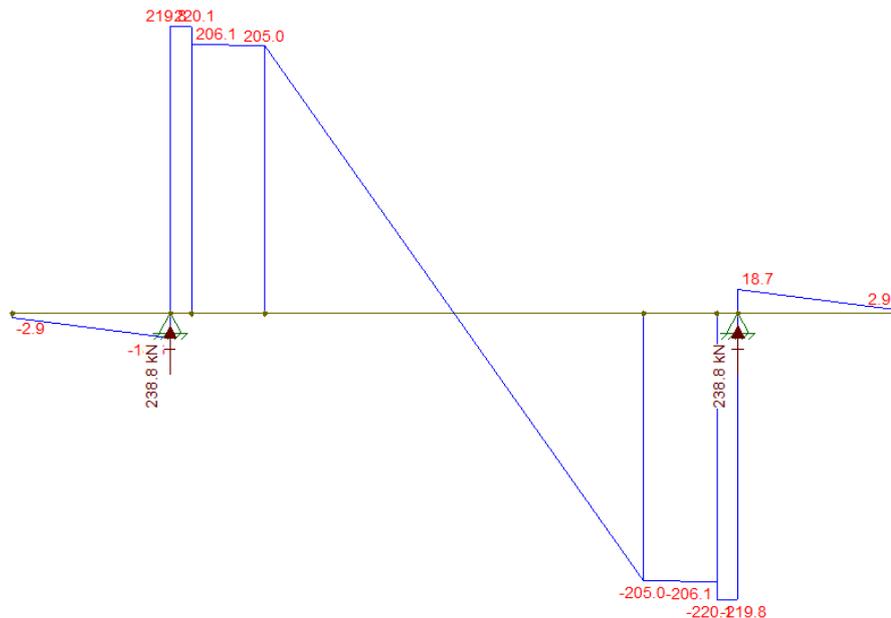


Figura 35: Cortante e Reações de Apoio.

Para a seção transversal da transversina foi definida a proporção entre as dimensões da seção transversal da transversina $h/b = 2$. Com os esforços solicitantes atuantes na transversina $M_d = 356,3$ kNm, $V_d = 220,1$ kN e $R_d = 238,8$ kN, a relação h/b definida, e as resistências definidas na Tabela 18 aplicou-se as equações (2.4.22) à (2.4.28), de modo a se obter razões de tensão menores que 90%. Deixou-se 10% de folga, decisão do projetista, como previsão de eventuais efeitos que a ponte pode receber para ocasiões comemorativas. Assim, obteve-se as dimensões $b = 41$ cm de largura e $h = 82$ cm de altura.

Análise das tensões normais devido a flexão na seção de maior momento:

$$\sigma_{md} = 10^6 \frac{6M_d}{bh^2} = 10^6 \frac{6 * 356,3}{820^2 * 410} = 7,75 \text{ MPa} \quad (2.4.22)$$

$$\text{Razão} = \frac{\sigma_{md}}{f_{md}} = 87\% \quad (2.4.23)$$

Análise da seção com cortante máximo:

$$\tau_{vd} = 10^3 \frac{3V_d}{2bh} = 10^3 \frac{3 * 220,1}{2 * 410 * 820} = 0,98 \text{ MPa} \quad (2.4.24)$$

$$\text{Razão} = \frac{\tau_{vd}}{f_{vd}} = 83\% \quad (2.4.25)$$

Tensões associadas à flambagem lateral:

$$L_{ef} = 5,4 \text{ m} \quad (2.4.26)$$

$$\beta_m = \frac{1}{0,26 * \pi} * \frac{\sqrt{\left(\frac{h}{b}\right)^3}}{\sqrt{\left(\frac{h}{b}\right)} - 0,63} * \frac{4}{1,4} \quad (2.4.27)$$

$$= \frac{1}{0,26 * \pi} * \frac{\sqrt{\left(\frac{82}{41}\right)^3}}{\sqrt{\left(\frac{82}{41}\right)} - 0,63} * \frac{4}{1,4} = 8,45 \text{ MPa}$$

$$L_{ef,calc} = 0,01 * \frac{E_{c,ef} * b}{\beta_m * f_{m,d}} = 0,01 * \frac{6384 * 41}{8,45 * 11,4} = 27,17 \text{ m} > L_1 \quad (2.4.28)$$

É dispensada a verificação de tensões de flexão com flambagem lateral.

2.4.3 Painéis do Tabuleiro em MLCC

Com auxílio do software Autocad elaborou-se um croqui das cargas atuantes no tabuleiro e possíveis casos da posição crítica do veículo tipo de modo a produzir os maiores esforços no painel MLCC, apresentado na Figura 36.

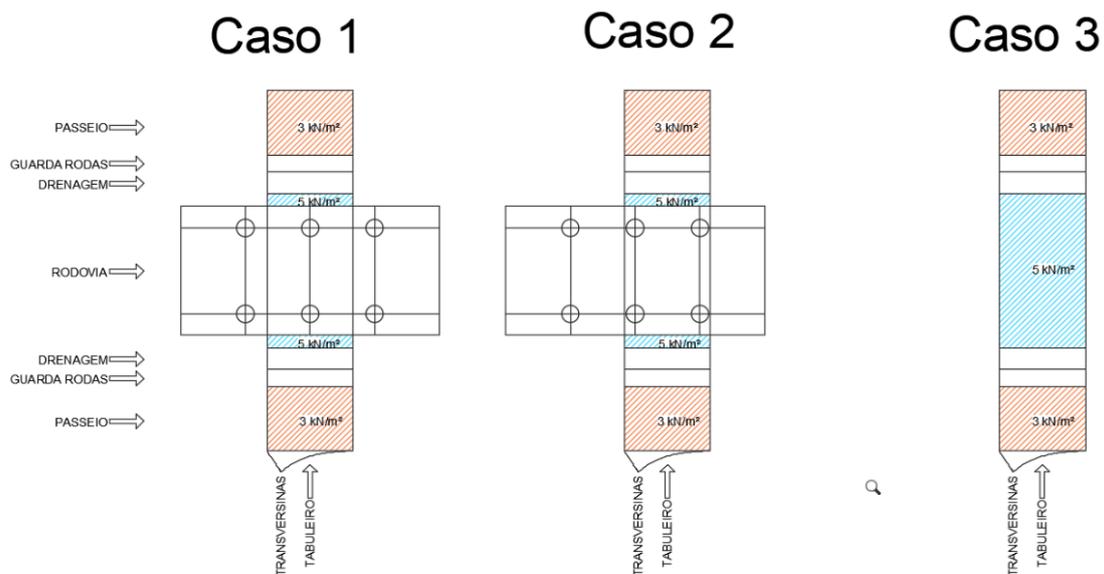


Figura 36: Estudo das posições do trem tipo para o tabuleiro.

Para a verificação dos esforços atuantes nos painéis de CLT será adotado o procedimento descrito por Borgstrom (2019) para obter as tensões atuantes na estrutura; visto que não há descrição clara nas normas quanto ao cálculo dos esforços para esses elementos. Sendo assim as tensões atuantes serão comparadas às tensões resistentes definidas pelas normas brasileiras.

As placas de CLT possuem cargas distribuídas em três direções principais, direção longitudinal (x), transversal (y) e perpendicular ao plano (z). Além disso cada camada possui duas direções:

- 0 - representa o eixo paralelo à camada;
- 90 - representa o eixo transversal a camada;
- 090 - representa um esforço perpendicular ao eixo paralelo à camada;
- 9090 - representa um esforço perpendicular ao eixo perpendicular a camada.

Os eixos referidos podem ser identificados na Figura 37.

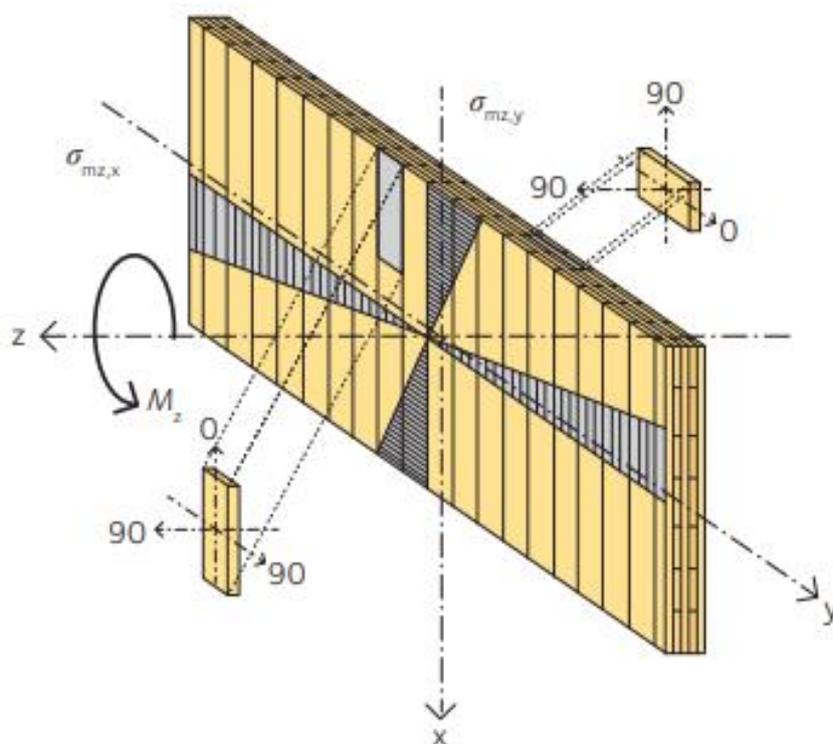


Figura 37: Painel em CLT com eixos principais e locais (Borgstrom, 2019).

A Figura 38 e a Figura 39 apresentam a atuação do momento em torno dos eixos x e y, respectivamente, em um tabuleiro de MLCC, e a tensão resultante do momento. De acordo com a Borgstrom (2019), para um painel de MLCC simétrico sujeito a momento

fletor, sua tensão de flexão pode ser obtida conforme descrito nas equações (2.4.29) e (2.4.30) para os eixos x e y, respectivamente:

$$\sigma_{mdx} = \frac{M_{dx}}{W_{0,líq}} \leq f_{cd} \text{ e } f_{td} \text{ 7190 (1997) ou } f_{md} \text{ 7190 (2022)} \quad (2.4.29)$$

$$\sigma_{mdy} = \frac{M_{dy}}{W_{90,líq}} \leq f_{cd} \text{ e } f_{td} \text{ 7190 (1997) ou } f_{md} \text{ 7190 (2022)} \quad (2.4.30)$$

$$W_{k,líq} = \frac{2 * I_{k,líq}}{h_{MLCC}} \quad (2.4.31)$$

$$I_{k,líq} = \sum \frac{b_k * t_i^3}{12} + \sum b_k * t_i * a_i^2 \quad (2.4.32)$$

onde σ_{mdx} e σ_{mdy} são as tensões solicitantes devido ao momento que curva os eixos x e y, respectivamente, sem distinção entre tração e compressão; M_{dx} e M_{dy} são os momentos atuantes que curvam os eixos x e y, respectivamente; $W_{k,líq}$ é o módulo resistênte elástico líquido do painel em relação a lâmina k ; $I_{k,líq}$ é o momento de inércia líquido do painel em relação a lâmina k ; h_{MLCC} é a espessura do painel; t_i é a espessura da lâmina; a_i é a distância do centro de gravidade do painel ao centro de gravidade da lamina; e b_k é a largura do painel, que para verificação adota-se $b_k = 1,0 \text{ m}$.

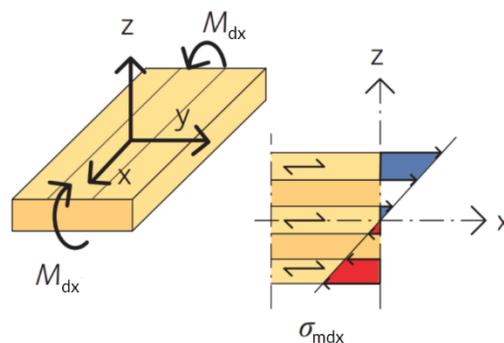


Figura 38: Tensão de flexão solicitante no eixo x em um painel de MLCC, adaptado de (Borgstrom, 2019).

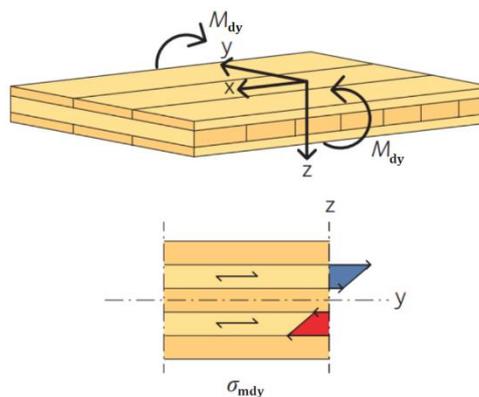


Figura 39: Tensão de flexão solicitante no eixo y em um painel de MLCC, adaptado de (Borgstrom, 2019).

De acordo com a Borgstrom (2019), para um painel de MLCC simétrico sujeito a cisalhamento, sua tensão cisalhante pode ser obtida conforme descrito nas equações (2.4.33) e (2.4.34) para as lâminas longitudinais e transversais ao eixo x, respectivamente.

$$\tau_{v,dx} = \frac{V_{dx} * S_{0,liq}}{I_{0,liq} * b_x} \leq f_{vd} \quad (2.4.33)$$

$$\tau_{v,dy} = \frac{V_{dy} * S_{90,liq}}{I_{90,liq} * b_y} \leq f_{vd} \quad (2.4.34)$$

$$S_{k,liq} = b_k * t_i * a_i + \frac{b_k}{2} * \left(\frac{t_k}{2} - a_k \right)^2 \quad (2.4.35)$$

$$S_{k,liq} = b_k * t_i * a_i \quad (2.4.36)$$

onde:

V_{dx} cortante atuante nas lâminas longitudinais ao eixo x (Figura 41);

V_{dy} cortante atuante nas lâminas transversais ao eixo x (Figura 42);

$\tau_{v,dx}$ tensão solicitante devido ao cortante para as lâminas longitudinais ao eixo x (Figura 41);

$\tau_{v,dy}$ tensão solicitante devido ao cortante para as lâminas longitudinais ao eixo y (Figura 42);

$S_{k,liq}$ momento estático líquido do painel na lâmina de orientação k , que para painéis com centro de gravidade atuando na camada paralela ao eixo k é calculada pela equação (2.4.35) e caso contrário calcula-se pela equação (2.4.36);

$I_{k,liq}$ momento de inércia líquido do painel na lâmina de orientação k ;

t_i espessura da lâmina (Figura 40);

a_i distância do centro de gravidade do painel ao centro de gravidade da lâmina (Figura 40);

t_k espessura da lâmina de orientação paralela ao eixo k mais próxima do centro de gravidade;

a_k distância do centro de gravidade do painel ao centro de gravidade da lâmina de orientação paralela ao eixo k mais próxima ao centro de gravidade;

b_k largura do painel, que para verificação adota-se $b_k = 1,0 m$.

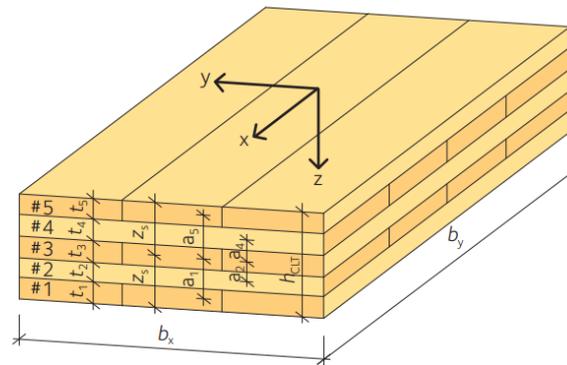


Figura 40: Seção do tabuleiro com representação das variáveis a e t (Borgstrom, 2019).

A tensão descrita acima é ilustrada pela Figura 41 para as lâminas 1, 3 e 5, longitudinais ao eixo x . Para as lâminas 2 e 4, transversais ao eixo x , a tensão é ilustrada pela Figura 42. Nas figuras é possível observar a atuação do cortante nas lâminas de um tabuleiro em MLCC e a sua tensão resultante.

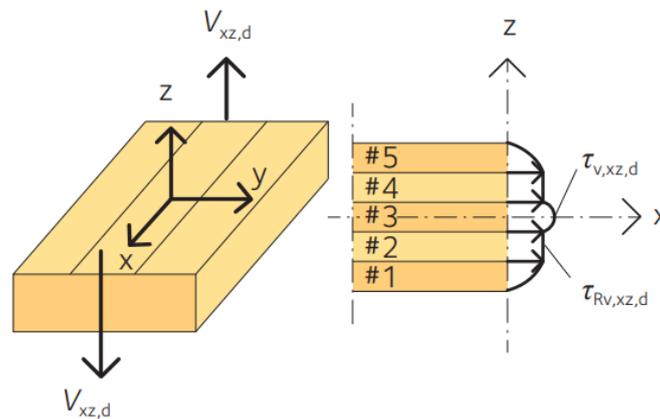


Figura 41: Tensão cisalhante solicitante no eixo x em um painel de MLCC (Borgstrom, 2019).

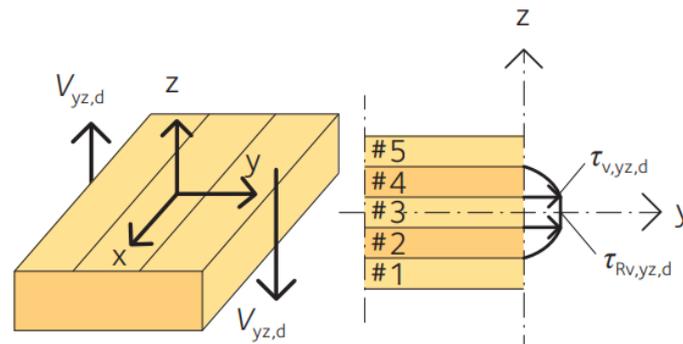


Figura 42: Tensão cisalhante solicitante no eixo y em um painel de MLCC (Borgstrom, 2019).

De acordo com a Borgstrom (2019), para um painel de MLCC simétrico sujeito a cisalhamento na camada transversal (*rolling shear*) sua tensão cisalhante pode ser obtida conforme descrito nas equações (2.4.37) e (2.4.38) para as lâminas longitudinais e transversais ao eixo y , respectivamente. O cortante $V_{xz,d}$ produz tensão de cisalhamento na camada transversal (*rolling shear*) para as lâminas 2 e 4, transversais ao eixo x , Figura

41. O cortante $V_{y,z,d}$ produz tensão de cisalhamento na camada transversal (*rolling shear*) para as lâminas 1, 3 e 5, transversais ao eixo y, Figura 42. Nas figuras é possível observar a atuação do cortante nas lâminas de um tabuleiro em MLCC e a sua tensão resultante.

$$\tau_{Rvv,d,x} = \frac{V_{dx} * S_{R0,liq}}{I_{0,liq} * b} \leq f_{Rv,d} \quad (2.4.37)$$

$$\tau_{Rv,d,y} = \frac{V_{dy} * S_{R90,liq}}{I_{90,liq} * b} \leq f_{Rv,d} \quad (2.4.38)$$

$$S_{rk,liq} = b_k * t_i * a_i \quad (2.4.39)$$

onde

V_{dx} cortante atuante no eixo x;

V_{dy} cortante atuante no eixo y;

$\tau_{rv,d,x}$ tensão solicitante devido ao cortante, para as lâminas transversais ao eixo x;

$\tau_{rv,d,y}$ tensão solicitante devido ao cortante, para as lâminas transversais ao eixo y;

$S_{rk,liq}$ momento estático líquido do painel na lâmina de orientação k ;

$I_{k,liq}$ momento de inércia líquido do painel na lâmina de orientação k ;

t_i espessura da lâmina;

a_i distância do centro de gravidade do painel ao centro de gravidade da lâmina;

b_k largura do painel, que para verificação adota-se $b_k = 1,0 \text{ m}$.

2.4.3.1 MLCC – Dimensionamento Segundo a NBR 7190 (1997)

Inicialmente, com as densidades dos materiais e cargas do trem tipo elaborou-se a Tabela 30, com as cargas atuantes no tabuleiro. Para o pré-dimensionamento das seções, adotou-se os coeficientes conforme a Tabela 22. Para o cálculo final, os coeficientes utilizados serão apresentados no item 3.5.3.

Tabela 30: Cargas lineares no tabuleiro.

	Cargas	Carga Majorada
Carga Permanente		
Revestimento Asfáltico	$0,06\text{m} * 24 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 1,44 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$	$1,4 * 1,44 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 2,02 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
Revestimento Concreto Armado	$0,05\text{m} * 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 1,25 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$	$1,4 * 1,25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 1,75 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
Peso Próprio Tabuleiro	$0,16\text{m} * 6,75 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 1,08 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$	$1,4 * 1,08 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 1,51 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
Conexões	$3\% * 1,08 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 0,04 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$	$1,4 * 0,04 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 0,06 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
	Total	5,34 kN/m²

Carga Acidental		
Veículo Tipo	$\frac{450}{6} kN = 75 kN$	$1,19 * 75 kN = 88,99 kN$
Carga de Multidão	$5 \frac{kN}{m^2}$	$1,19 * 5 \frac{kN}{m} = 5,93 \frac{kN}{m^2}$

Com os carregamentos calculados na Tabela 30 elaborou-se o esquema estrutural apresentado na Figura 43. O diagrama de momento fletor e esforço cortante são apresentados na Figura 44 e Figura 45, respectivamente.

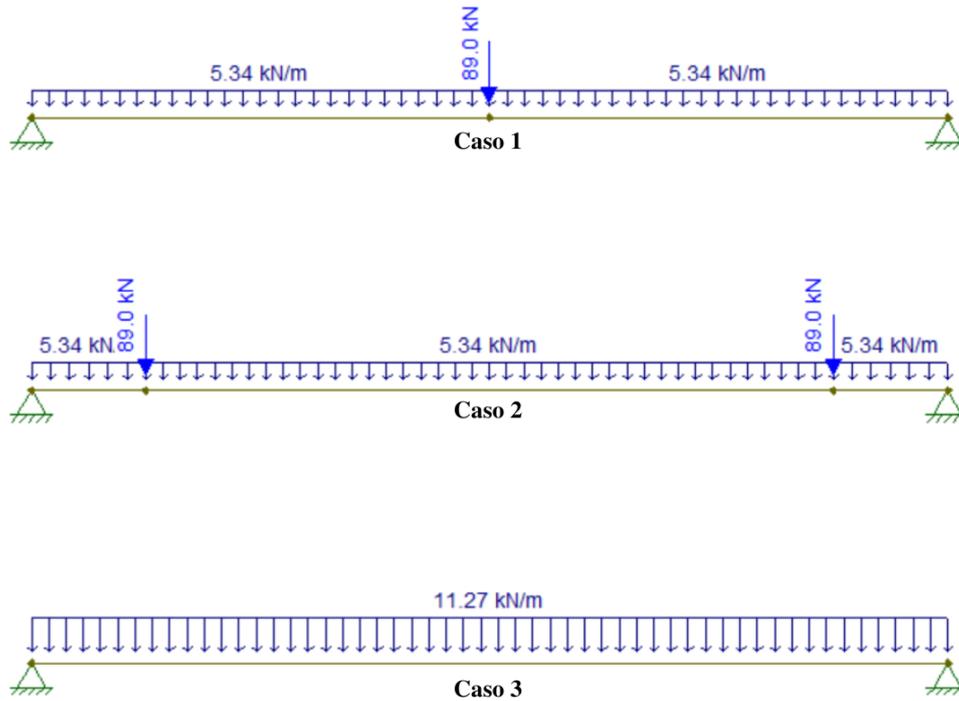


Figura 43: Sistema estrutural para pré-dimensionamento do tabuleiro; caso 1 (1º eixo do veículo tipo no meio do vão), caso 2 (1º e 2º eixos do veículo tipo equidistante do meio do vão) e caso 3 (carga de multidão), respectivamente.

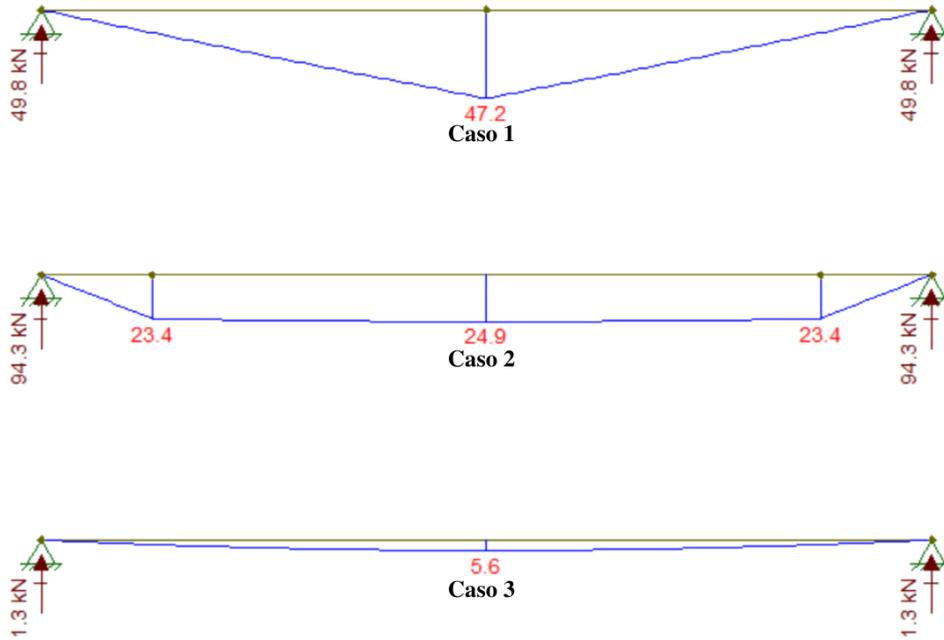


Figura 44: Diagrama de momento fletor.

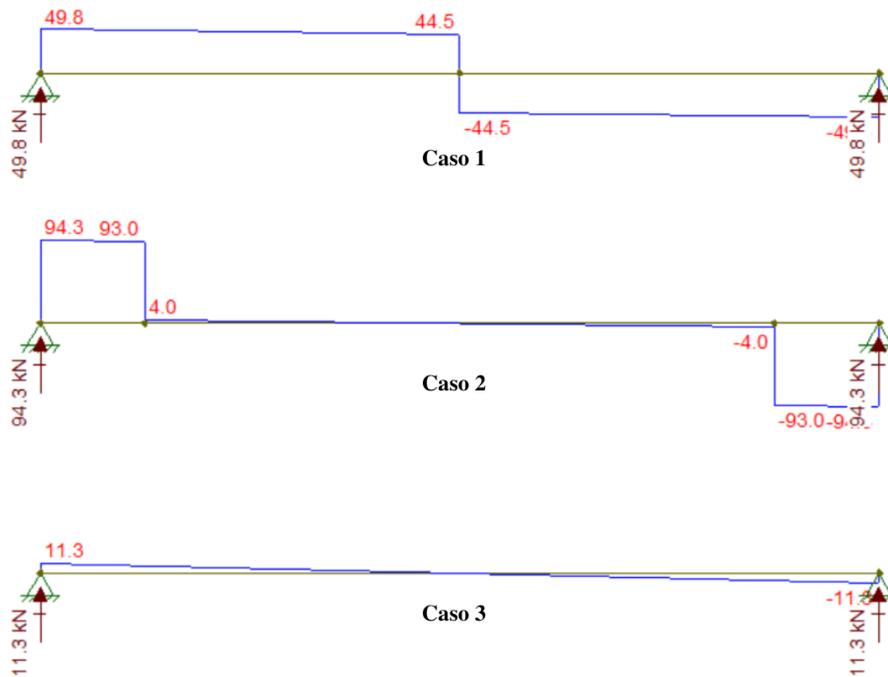


Figura 45: Diagrama de cortante.

Com a estimativa dos esforços atuantes no painel MLCC, adotou-se um painel com 160 mm de espessura, composto por 7 lâminas com o seguinte arranjo: 30/20/20/20/20/20/30; sendo cada número a espessura da lâmina em mm. E foi feita a verificação utilizando as propriedades listadas na Tabela 19 e conforme as equações apresentadas na seção 2.4.3.

Para a verificação da flexão, em relação ao momento $M_d = 47,2$ kNm, aplicou-se a equação (2.4.29), resultando em (2.4.44) para compressão e (2.4.43) para tração.

$$I_{0,liq} = h_x \left(2 \frac{t_1^3}{12} + 2 \frac{t_3^3}{12} + 2 * t_1 * a_1^2 + 2 * t_3 * a_3^2 \right) \\ = 1000 \left(2 \frac{30^3}{12} + 2 \frac{20^3}{12} + 2 * 30 * 65^2 + 2 * 20 * 20^2 \right) \quad (2.4.40)$$

$$= 27533 * 10^4 \text{ mm}^4 \\ W_{0,liq} = \frac{2 * I_{0,liq}}{h} = \frac{2 * 27533 * 10^4}{160} = 3442 * 10^3 \text{ mm}^3 \quad (2.4.41)$$

$$\sigma_{md} = \frac{M_d}{W_{0,liq}} = \frac{47,2 * 10^3}{3442} = 13,7 \text{ MPa} \quad (2.4.42)$$

$$\text{Razão} = \frac{\sigma_{md}}{f_{td}} = 97\% \quad (2.4.43)$$

$$\text{Razão} = \frac{\sigma_{md}}{f_{cd}} = 91\% \quad (2.4.44)$$

Para a verificação do cisalhamento longitudinal para o cortante $V_d = 94,3$ kN, aplicou-se a equação (2.4.33), resultando em (2.4.47).

$$S_{0,liq} = b_x * t_1 * a_1 + b_x * t_3 * a_3 \\ = 1000 * 30 * 65 + 1000 * 20 * 40 = 2350 * 10^3 \text{ mm}^3 \quad (2.4.45)$$

$$\tau_d = V_d * 10^3 * \frac{S_{0,liq}}{I_{0,liq} * b_x} = 94,3 * 10^3 * \frac{2350 * 10^3}{27533 * 10^4 * 1000} = 0,81 \text{ MPa} \quad (2.4.46)$$

$$\text{Razão} = \frac{\tau_d}{f_{vd}} = 67\% \quad (2.4.47)$$

Para a verificação do cisalhamento na camada transversal (*rolling shear*) para o cortante $V_d = 94,3$ kN, aplicou-se a equação (2.4.37), resultando em (2.4.50).

$$S_{R,0,liq} = b_x * t_1 * a_1 + b_x * t_3 * a_3 \\ = 1000 * 30 * 65 + 1000 * 20 * 40 = 2350 * 10^3 \text{ mm}^3 \quad (2.4.48)$$

$$\tau_{Rd} = V_d * 10^3 * \frac{S_{R,0,liq}}{I_{0,liq} * b_x} = 94,3 * 10^3 * \frac{2350 * 10^3}{27533 * 10^4 * 1000} = 0,8 \text{ MPa} \quad (2.4.49)$$

$$\text{Razão} = \frac{\tau_{Rd}}{f_{Rvd}} = 60\% \quad (2.4.50)$$

2.4.3.2 MLCC – Dimensionamento Segundo a NBR 7190 (2022)

Inicialmente, com as densidades dos materiais e cargas do trem tipo elaborou-se a Tabela 31, com as cargas atuantes no tabuleiro. Para o pré-dimensionamento das seções, adotou-se os coeficientes conforme a Tabela 26. Para o cálculo final, os coeficientes utilizados serão apresentados no item 3.5.3.

Tabela 31: Cargas lineares no tabuleiro.

	Cargas	Carga Majorada
Carga Permanente		
Revestimento Asfáltico	$0,06m * 24 \frac{kN}{m^3} = 1,44 \frac{kN}{m}$	$1,25 * 1,44 \frac{kN}{m^2} = 1,80 \frac{kN}{m^2}$

Revestimento Concreto Armado	$0,05m * 25 \frac{kN}{m^3} = 1,25 \frac{kN}{m}$	$1,25 * 1,25 \frac{kN}{m^2} = 1,56 \frac{kN}{m^2}$
Peso Próprio Tabuleiro	$0,2m * 7,35 \frac{kN}{m^3} = 1,47 \frac{kN}{m}$	$1,25 * 1,47 \frac{kN}{m^2} = 1,84 \frac{kN}{m^2}$
Conexões	$3\% * 1,89 \frac{kN}{m^2} = 0,06 \frac{kN}{m^2}$	$1,25 * 0,06 \frac{kN}{m^2} = 0,07 \frac{kN}{m^2}$
Total		$5,27 \frac{kN}{m^2}$
Carga Acidental		
Veículo Tipo	$\frac{450}{6} kN = 75 kN$	$1,74 * 75 kN = 130,78 kN$
Carga de Multidão	$5 \frac{kN}{m^2}$	$1,74 * 5 \frac{kN}{m} = 8,72 \frac{kN}{m^2}$

Com os carregamentos calculados na Tabela 31 elaborou-se o esquema estrutural apresentado na Figura 46. O diagrama de momento fletor e esforço cortante são apresentados na Figura 47 e Figura 48, respectivamente.

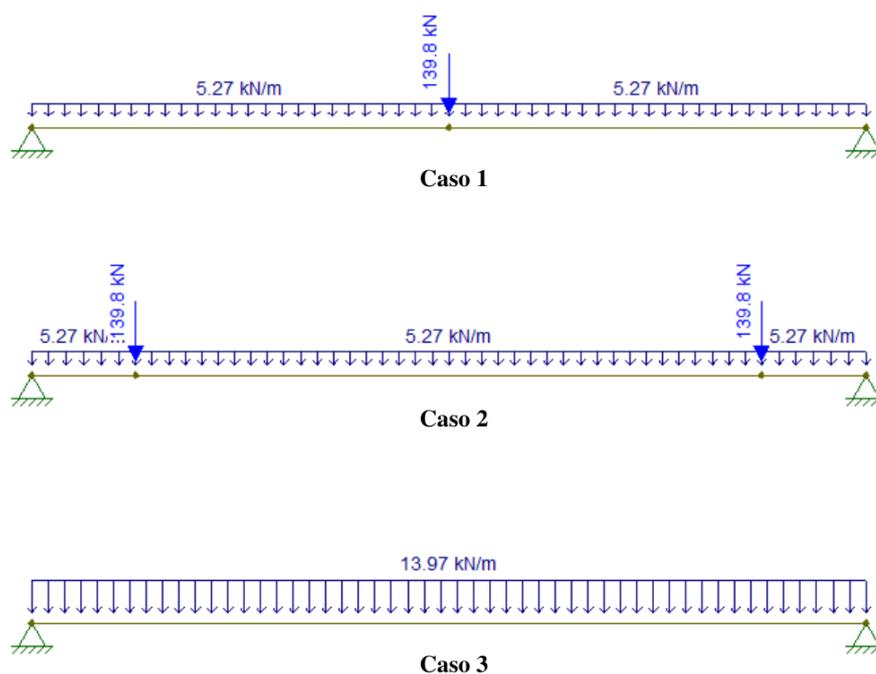


Figura 46: Sistema estrutural para pré-dimensionamento do tabuleiro; caso 1 (1º eixo do veículo tipo no meio do vão), caso 2 (1º e 2º eixos do veículo tipo equidistante do meio do vão) e caso 3 (carga de multidão), respectivamente.

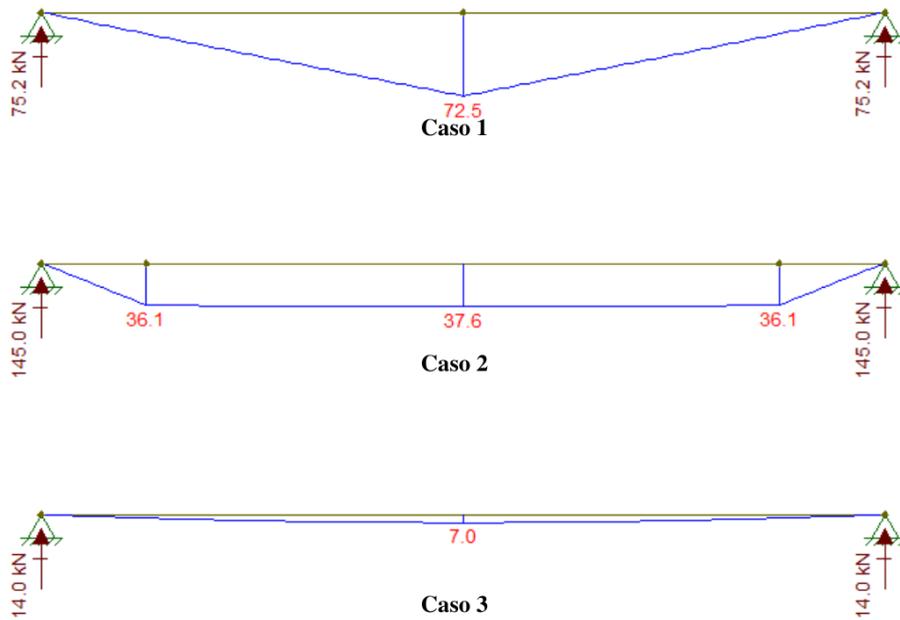


Figura 47: Diagrama de momento fletor.

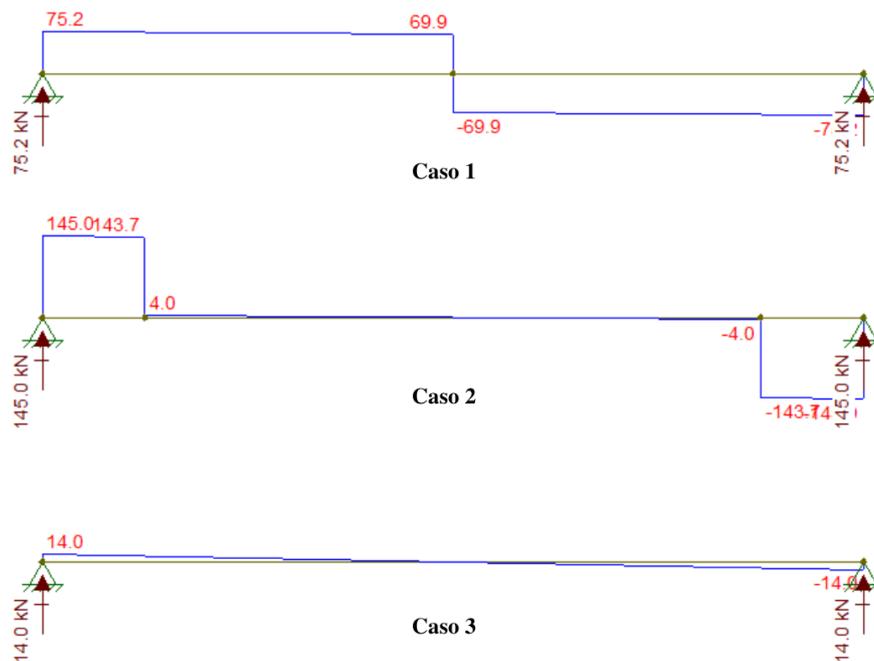


Figura 48: Diagrama de cortante.

Com a estimativa dos esforços atuantes no painel MLCC, adotou-se um painel com 200 mm composto por 5 lâminas com o seguinte arranjo: 40/40/40/40/40; sendo cada número a espessura da lâmina em mm. E foi feita a verificação utilizando as propriedades listadas na Tabela 19 e conforme as equações apresentadas na seção 2.4.3.

Para a verificação da flexão, em relação ao momento $M_d = 72,2$ kNm, aplicou-se a equação (2.4.29), resultando em (2.4.54).

$$I_{0,liq} = b_x \left(3 \frac{t_1^3}{12} + 2 * t_1 * a_1^2 \right) = 1000 * \left(3 \frac{40^3}{12} + 2 * 40 * 80^2 \right) \quad (2.4.51)$$

$$= 52800 * 10^4 \text{ mm}^4$$

$$W_{0,liq} = \frac{2 * I_{0,liq}}{h} = \frac{2 * 52800 * 10^4}{200} = 5280 * 10^3 \text{ mm}^3 \quad (2.4.52)$$

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W_{0,liq}} = \frac{72,5 * 10^3}{5280} = 13,73 \text{ MPa} \quad (2.4.53)$$

$$\text{Razão} = \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} = 90\% \quad (2.4.54)$$

Para a verificação do cisalhamento longitudinal para o cortante $V_d = 145 \text{ kN}$, aplicou-se a equação (2.4.33), resultando em (2.4.57).

$$S_{0,liq} = b_x * t_1 * a_1 + b_x * \frac{t_1^2}{4 * 2} \quad (2.4.55)$$

$$= 1000 * 40 * 80 + 1000 * \frac{40^2}{8} = 3400 * 10^3 \text{ mm}^3$$

$$\tau_d = V_d * 10^3 * \frac{S_{0,liq}}{I_{0,liq} * h_x} = 145 * 10^3 * \frac{3400 * 10^3}{52800 * 10^4 * 1000} = 0,93 \text{ MPa} \quad (2.4.56)$$

$$\text{Razão} = \frac{\tau_d}{f_{vd}} = 53\% \quad (2.4.57)$$

Para a verificação do cisalhamento na camada transversal (*rolling shear*) para o cortante $V_d = 145 \text{ kN}$, aplicou-se a equação (2.4.37), resultando em (2.4.60).

$$S_{R,0,liq} = b_x * t_1 * a_1 = 1000 * 40 * 80 = 3200 * 10^3 \text{ mm}^3 \quad (2.4.58)$$

$$\tau_{Rd} = V_d * 10^3 * \frac{S_{R,0,liq}}{I_{0,liq} * h_x} = 145 * 10^3 * \frac{3200 * 10^3}{52800 * 10^4 * 1000} = 0,88 \text{ MPa} \quad (2.4.59)$$

$$\text{Razão} = \frac{\tau_{rd}}{f_{Rvd}} = 48\% \quad (2.4.60)$$

2.4.4 Cabos

2.4.4.1 Cabos de Suspensão

Para o pré-dimensionamento dos cabos de suspensão do tabuleiro, levou-se em conta as reações de apoio obtidas no pré-dimensionamento das transversinas devido a carga permanente e a reação devido a carga móvel dividida por 0,75 considerando que em elementos metálicos não há redução de cargas de curta duração. Para o cálculo do diâmetro do cabo, aplica-se a equação abaixo:

$$CT * FS \leq CRM \quad (2.4.61)$$

onde CRM é a carga de ruptura mínima do fabricante, CT é a carga de trabalho e FS o fator de segurança. Entretanto, no catálogo da CIMAF, não é abordado um valor de FS para o caso de pontes. Segundo Nickerson (1998), o fator de segurança para cabos em diversos tipos de ponte varia entre 2,4 e 4,0. Portanto será adotado um FS de 4,0.

Para o dimensionamento de acordo com a NBR 7190 (1997), verificou-se que o esforço de tração nos cabos de suspensão do tabuleiro devido a carga permanente é de 34,7kN e para a carga móvel é de 141,8kN. Aplicando-se a equação (2.4.61) obteve-se (2.4.62).

$$CRM = CT * FS = \left(34,7 + \frac{141,8}{0,75} \right) * 4 = 895,1 \text{ kN} \quad (2.4.62)$$

Portanto, adotou-se um cabo com diâmetro de 42 mm com $CRM = 122 \text{ tf} = 1196,8 \text{ kN}$; da classe 6x36 com alma de aço Warrington-Seale, pré-formado, galvanizado, com torção regular, pré-esticado e com capacidade de carga na categoria EIPS.

Para o dimensionamento de acordo com a NBR 7190 (2022), verificou-se que o esforço de tração nos cabos de suspensão do tabuleiro devido a carga permanente é de 33,8kN e para a carga móvel é de 205kN. Aplicando-se a equação (2.4.61) obteve-se (2.4.63).

$$CRM = CT * FS = \left(33,8 + \frac{205}{0,75} \right) * 4 = 1228,5 \text{ kN} \quad (2.4.63)$$

Portanto, adotou-se um cabo com diâmetro de 45 mm com $CRM = 141 \text{ tf} = 1383,2 \text{ kN}$; da classe 6x36 com alma de aço Warrington-Seale, pré-formado, galvanizado, com torção regular, pré-esticado e com capacidade de carga na categoria EIPS.

2.4.4.2 Cabos de Contraventamento

Os critérios aplicados para a realização do pré-dimensionamento dos cabos de contraventamento são apresentados no tópico 4.4. Recomenda-se que o leitor leia o referido tópico antes de prosseguir a leitura no tópico atual.

Como base para o pré-dimensionamento do cabo de contraventamento, será aplicado a verificação do Critério da Rigidez, porquanto ainda não se conhece a força de compressão N_d do arco, que possibilitaria a verificação do Critério da Resistência com o cálculo da força F_{1d} por meio da equação (4.4.1).

Com as propriedades dos materiais obtidas na Tabela 18 e Tabela 20, aplicou-se a equação (4.4.7), resultando em (2.4.70). Portanto, adotou-se um cabo com diâmetro de 102 mm com $CRM = 595 \text{ tf} = 5836,95 \text{ kN}$; da classe 6x36 com alma de aço Warrington-Seale, pré-formado, galvanizado, com torção regular, pré-esticado e com capacidade de carga na categoria EIPS.

$$A = F * d^2 = 0,41 * 10,2^2 = 42,66 \text{ cm}^2 \quad (2.4.64)$$

$$I_y = \frac{h * b^3}{12} = 4001667 \text{ cm}^4 \quad (2.4.65)$$

$$L_{ef,y} = 12,25 \text{ m} \quad (2.4.66)$$

$$\alpha_m = 1 + \cos\left(\frac{\pi}{m}\right) = \alpha_m = 1 + \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) = 1 \quad (2.4.67)$$

$$k_{br,1,min} = 2\alpha_m \frac{\pi^2 E_{co,ef} I}{L_1^3} \quad (2.4.68)$$

$$= \frac{2 * 1 * \pi^2 * 8039 * 10^3 * 4001667 * 10^{-8}}{12,25^3} = 3454,33 \frac{kN}{m}$$

$$K_{br} = \frac{2}{3} n K_{br,1,min} = \frac{2}{3} * 2 * 3454,33 = 4605,78 \frac{kN}{m} \quad (2.4.69)$$

$$A_c = K_{br} * \frac{L_c}{E * \cos^2(\theta)} \quad (2.4.70)$$

$$= 4605,78 * \frac{11,61}{100 * 10^6 * \cos^2(62,3^\circ)} * 10^4 = 24,75 \text{ cm}^2$$

Como a área do cabo de contraventamento $A = 42,66 \text{ cm}^2$ é superior à área A_c , então o critério da rigidez é satisfeito.

3 MODELAGEM ESTRUTURAL

Nesta seção será apresentado o modelo estrutural desenvolvido para análise das ações atuantes sobre a estrutura. Sendo necessário o auxílio do software AutoCad e SAP2000 – *Structural Software for Analysis and Design* – V14 da empresa CSI.

O pré-dimensionamento evidenciou que as seções obtidas pelo dimensionamento segundo a NBR 7190 (2022), para todos os elementos em madeira, foram superiores às obtidas pela NBR 7190 (1997). A fim de se realizar a comparação entre os dimensionamentos das versões da norma, elaborou-se um terceiro modelo com as seções obtidas pelo dimensionamento segundo a NBR 7190 (2022), avaliadas pelos critérios da NBR 7190 (1997).

Foram elaborados 3 modelos estruturais:

- Modelo 97: modelos com as seções e critérios da NBR 7190 (1997);
- Modelos 22: modelo com as seções e critérios da NBR 7190 (2022);
- Modelos 97-2: modelo com as seções obtidas pelo pré-dimensionamento segundo os critérios da NBR 790 (2022), avaliado com os critérios da NBR 7190 (1997).

3.1 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS E SEÇÕES TRANSVERSAIS

Os materiais foram modelados conforme as propriedades apresentadas no item 2.3. O arco, as transversinas e os contraventamentos em madeira MLC, em todos os modelos, foram modelados considerando-se as propriedades apresentadas na Tabela 18. Os painéis em MLCC, modelados como cascas espessas, foram modelados considerando-se as propriedades do material apresentadas na Tabela 19. Os cabos foram modelados com as propriedades do material apresentadas na Tabela 20.

A placa em MLCC é ortotrópica, possui momentos de inércia diferentes nos dois planos principais de flexão, calculados conforme a equação (2.4.32) e apresentados na Tabela 36. As cascas espessas utilizadas para modelar o tabuleiro, são cascas isotrópicas com momento de inércia calculado pela teoria da resistência dos materiais. No programa em que a estrutura foi modelada utilizou-se o recurso de coeficientes multiplicadores de propriedades para multiplicar os momentos de inércia principais e assim representar adequadamente o comportamento da placa em MLCC, como placa ortotrópica.

Para o tabuleiro pré-dimensionado no item 2.4.3.1, o coeficiente utilizado para multiplicar o momento de inércia que curva o eixo x (eixo x – direção do tráfego) foi de

0,81. O coeficiente utilizado para multiplicar o momento de inércia que curva o eixo y (eixo y – direção perpendicular ao tráfego) foi de 0,19.

Para o tabuleiro pré-dimensionado no item 2.4.3.2, o coeficiente utilizado para multiplicar o momento de inércia que curva o eixo x (eixo x – direção do tráfego) foi de 0,79. O coeficiente utilizado para multiplicar o momento de inércia que curva o eixo y (eixo y – direção perpendicular ao tráfego) foi de 0,21.

A Tabela 32 apresenta um resumo das seções para o dimensionamento para o Modelo 97. A

Tabela 33 apresenta um resumo das seções para o Modelo 22, e a

Tabela 34 apresenta as seções utilizadas para o Modelo 97-2, elaborado para a comparação.

Tabela 32: Seções e materiais adotados no SAP para a NBR 7190 (1997).

Parâmetro	Tipo	Seção (cm)	Material
Arco	Retangular	70 x 140	C30-1997
Transversinas	Retangular	32.5 x 65	C30-1997
Contraventamento	Retangular	32.5 x 65	C30-1997
Cabos de Contraventamento	Circular	10,2	Aço dos cabos de contraventamento
Cabos de Suspensão	Circular	4,2	Aço dos cabos de suspensão
Tabuleiro	Casca Espessa	16	Angelim Araroba

Tabela 33: Seções e materiais adotados no SAP para a NBR 7190 (2022).

Parâmetro	Tipo	Seção (cm)	Material
Arco	Retangular	80 x 160	C30-2022
Transversinas	Retangular	41 x 82	C30-2022
Contraventamento	Retangular	41 x 82	C30-2022
Cabos de Contraventamento	Circular	10,2	Aço dos cabos de contraventamento
Cabos de Suspensão	Circular	4,5	Aço dos cabos de suspensão
Tabuleiro	Casca Espessa	20	Angelim Araroba (D-40)

Tabela 34: Seções e materiais adotados no SAP na versão 97-2.

Parâmetro	Tipo	Seção (cm)	Material
Arco	Retangular	80 x 160	C30-1997
Transversinas	Retangular	41 x 82	C30-1997
Contraventamento	Retangular	41 x 82	C30-1997

Cabos de Contraventamento	Circular	10,2	Aço dos cabos de contraventamento
Cabos de Suspensão	Circular	4,5	Aço dos cabos de suspensão
Tabuleiro	Casca Espessa	20	Angelim Araroba

A Tabela 35 apresenta as propriedades para a seção transversal dos elementos e a Tabela 36 apresenta as propriedades da seção do tabuleiro.

Tabela 35: Propriedades da seção transversal dos elementos.

Elemento	A (cm^2)	I_x (cm^4)	I_y (cm^4)	i_x (cm^4)	i_y (cm^4)	d_x (cm)	d_y (cm)	W_x (cm^3)	W_y (cm^3)
Arco 70 x 140	9800	16006667	4001667	40,42	20,21	70	35	228667	1144333
Arco 80 x 160	12800	27306667	6826667	46,19	23,09	80	40	341333	170667
Contraventamento/ Transversina 32,5 x 65	2112,5	743776	185944	19	9	32,5	16,25	22885	11443
Contraventamento/ Transversina 41 x 82	3362	1883841	470960	24	12	41	21	45947	22974
Cabo 42 mm	7,23	---	---	---	---	---	---	---	---
Cabo 45 mm	8,3	---	---	---	---	---	---	---	---
Cabo 102 mm	42,66	---	---	---	---	---	---	---	---

Tabela 36: Propriedades da seção do tabuleiro.

Elemento	$I_{0,liq}$ (cm^4)	$I_{90,liq}$ (cm^4)	$W_{0,liq}$ (cm^3)	$W_{90,liq}$ (cm^3)	$S_{0,liq}$ (cm^3)	$S_{90,liq}$ (cm^3)	$S_{R,0,liq}$ (cm^3)	$S_{R,90,liq}$ (cm^3)
Tabuleiro 16 cm	27533	6600	3442	825	2350	850	2350	800
Tabuleiro 20 cm	52800	13867	5280	1387	3400	1600	3200	1600

3.2 GEOMETRIA

Após a realização do pré-dimensionamento dos elementos, obteve-se o desenho da estrutura através do AutoCad. A partir deste, modelou-se a estrutura, formada por nós, barras, placas, considerando sua simetria, conforme a Figura 49.

Com o intuito de promover o contraventamento do arco, provendo um ponto de contenção lateral para a flambagem fora do plano do arco, foi adicionado um cabo externo à volumetria principal da ponte. E a partir do ponto de contato do cabo com o arco propagou-se o contraventamento em x ao longo da estrutura do arco. A posição do apoio externo, ao qual o cabo se ancora, foi definido de modo que se formasse um ângulo de 45° com a ponte, tornando-o eficiente estruturalmente e esteticamente agradável.

Foi utilizado o sistema de contraventamento em x no plano do tabuleiro, para conter os esforços na direção perpendicular a direção do vão da ponte no tabuleiro, conforme mostrado na Figura 50.

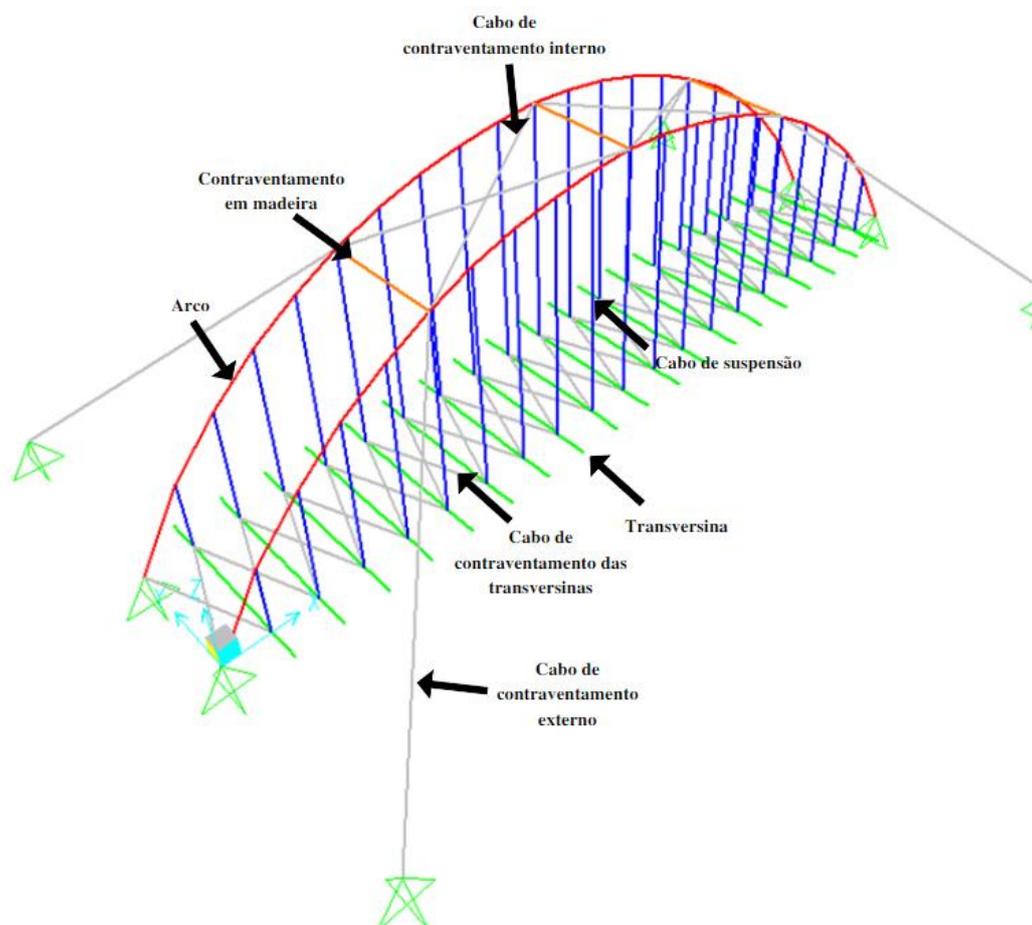


Figura 49: Lançamento do sistema estrutural composto por nós e barras, vista 3d.

No tabuleiro, os painéis em MLCC foram modelados como elementos de casca espessa, apoiados nas transversinas. Elementos de casca espessa são utilizados para representar lajes com espessura significativa, em que é necessário considerar a resistência à flexão e ao cisalhamento, levando em conta a espessura do elemento.

A ligação das placas com as barras da transversina foi feita com elementos do tipo “link” de modo a simular ligações rotuladas. Posteriormente as placas foram discretizadas em elementos menores com dimensões da ordem de 12,5 cm com o objetivo de aumentar a precisão na obtenção dos esforços.

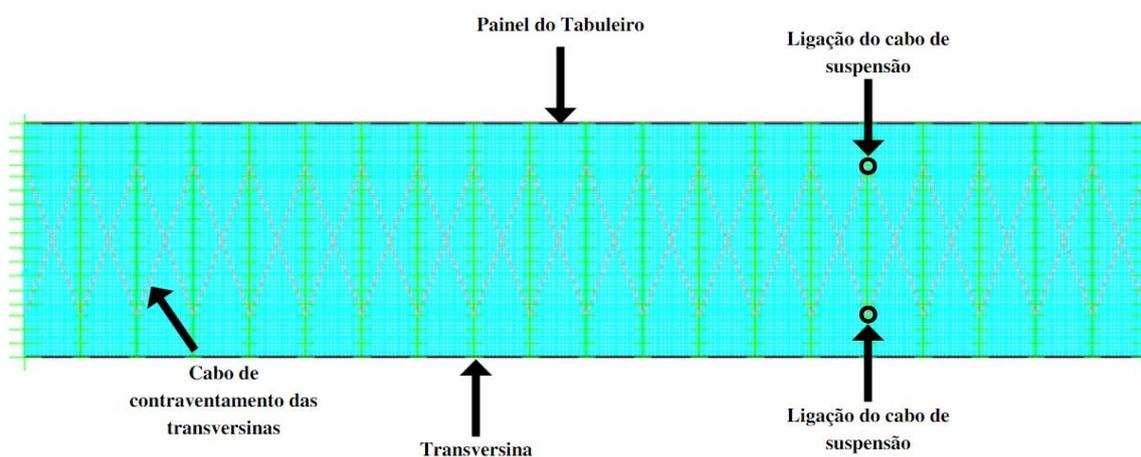


Figura 50: Lançamento dos painéis do tabuleiro, vista XY.

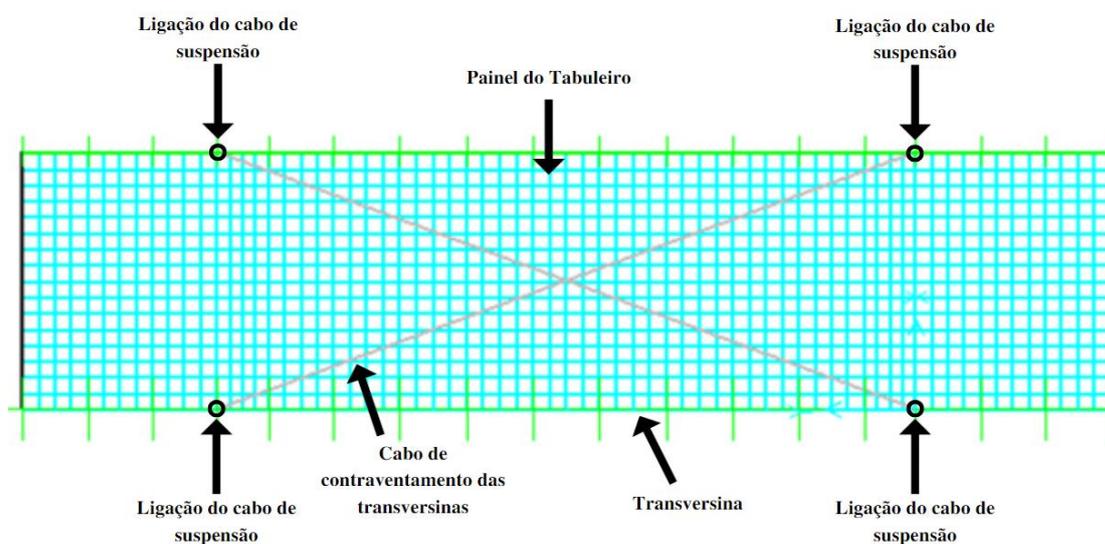


Figura 51: Painel do tabuleiro, vista YX.

Ademais, todo o tabuleiro foi configurado para trabalhar como um diafragma rígido, ou seja, não há deformação no plano do tabuleiro. Assim, as placas do tabuleiro, representativas dos painéis em MLCC, trabalham apenas à flexão simples.

Na Figura 52 à Figura 55 são mostrados os elementos lançados no SAP 2000, com suas respectivas seções.

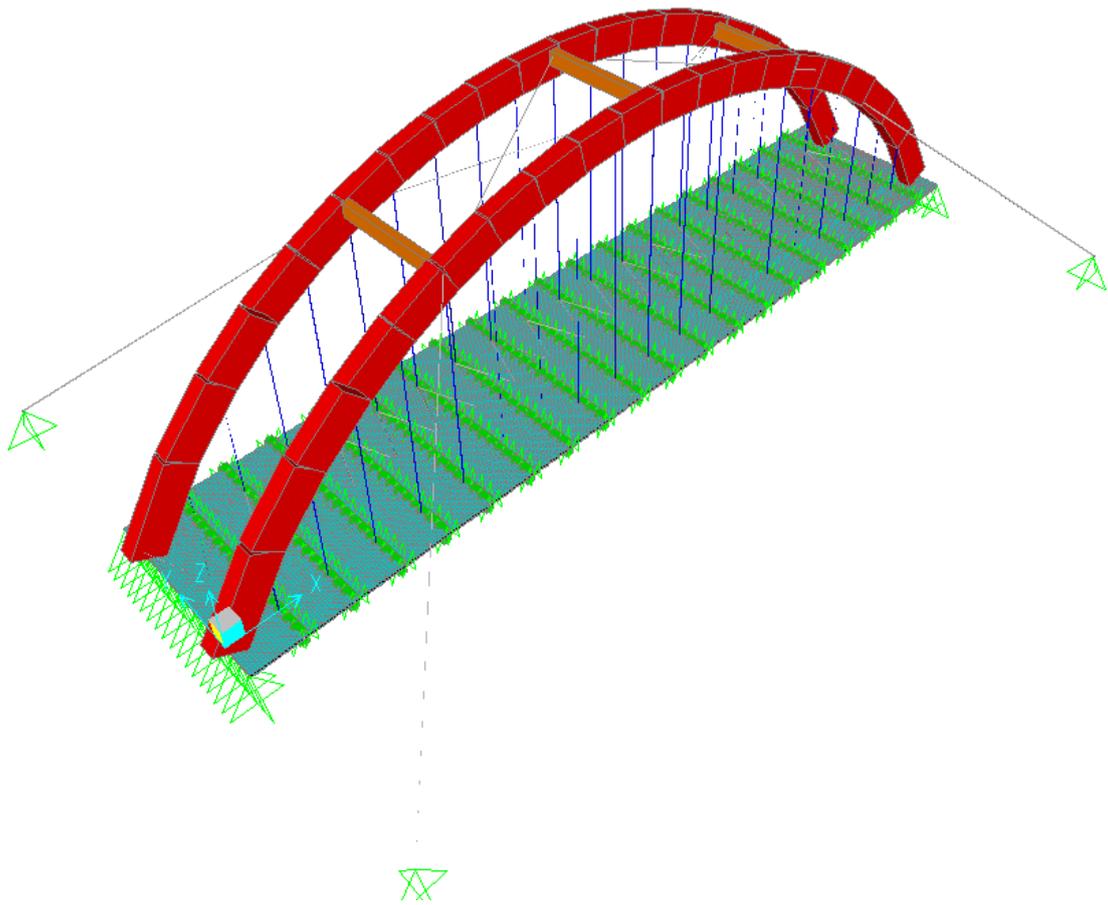


Figura 52: Vista 3D.

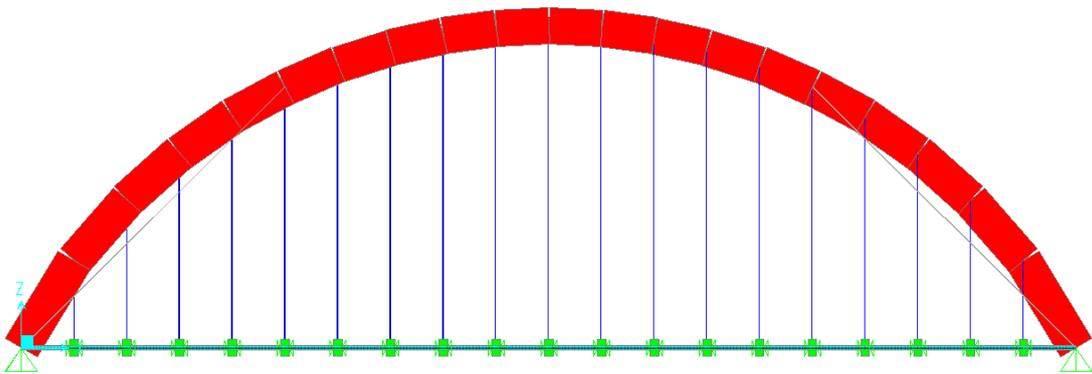


Figura 53: Vista lateral.

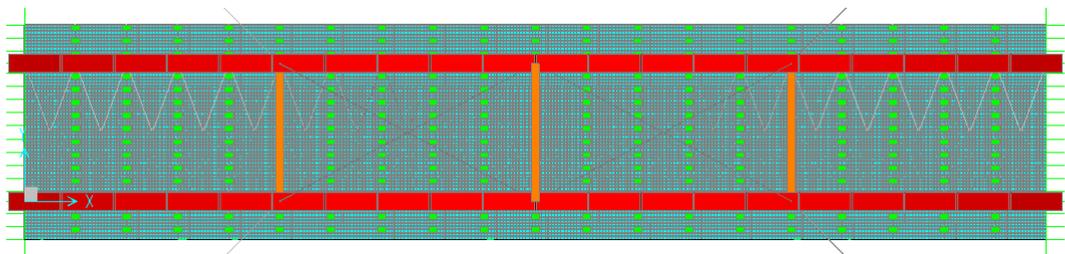


Figura 54: Vista superior.

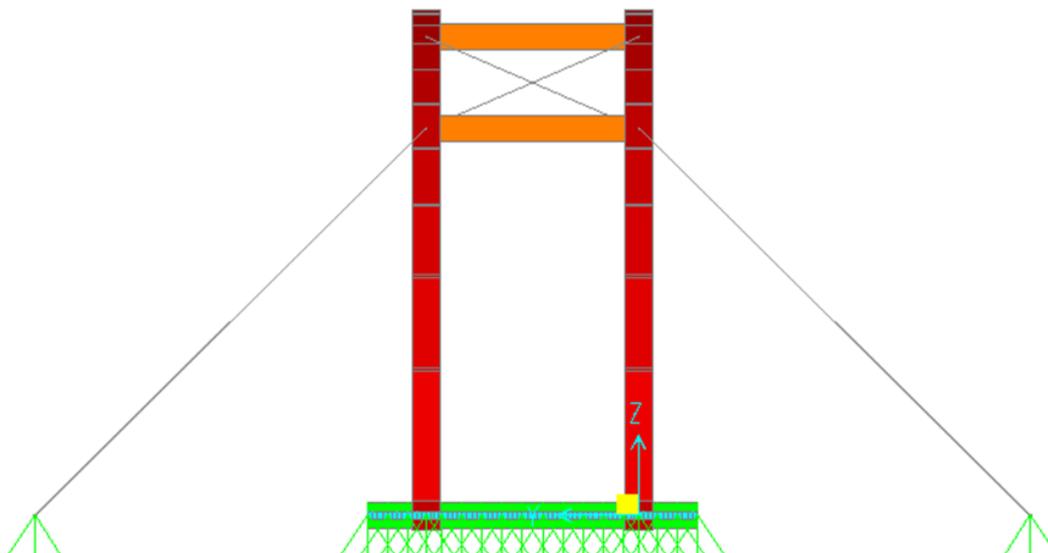


Figura 55: Vista frontal.

3.3 CARREGAMENTOS

3.3.1 Cargas Permanentes

As cargas permanentes se dividem em cargas permanentes modeladas, constituídas pelo peso próprio dos elementos estruturais modelados (calculado automaticamente pelo programa), e as cargas permanentes dos elementos não estruturais que são inseridos manualmente no programa.

- Cargas permanentes modeladas, calculadas automaticamente pelo programa:
 - Arco, Contraventamentos e Transversinas:
 - MLC 1997: 5,88 kN/m³
 - MLC 2022: 4,51 kN/m³
 - Tabuleiro:
 - MLCC 1997: 6,75 kN/m³
 - MLCC 2022: 7,35 kN/m³
- Cargas permanentes não modeladas:
 - Concreto Armado: 25 kN/m³ (NBR 6120, 2019);
 - Revestimento Asfáltico: 24kN/m² (NBR 6120, 2019);
 - Guarda Corpo: 77,8 kN/m³ (NBR 6120, 2019);
 - Elementos metálicos das conexões 3% do peso próprio da madeira (NBR 7190, 1997).

Com as seções e densidades apresentadas na Tabela 21 calculou-se as cargas de superfície: Concreto Armado (1,25 kN/m²), Revestimento asfáltico (1,44 kN/m²), Guarda corpo (1,2 kN/m), elementos metálicos das conexões (0,03 kN/m²) e guarda roda de concreto armado modelo New Jersey, padrão DNER (Figura 56), (13,8 kN/m²)

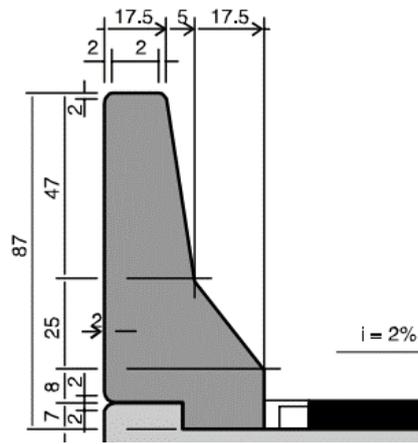


Figura 56: Guarda-rodas modelo New Jersey (DNER, 1996).

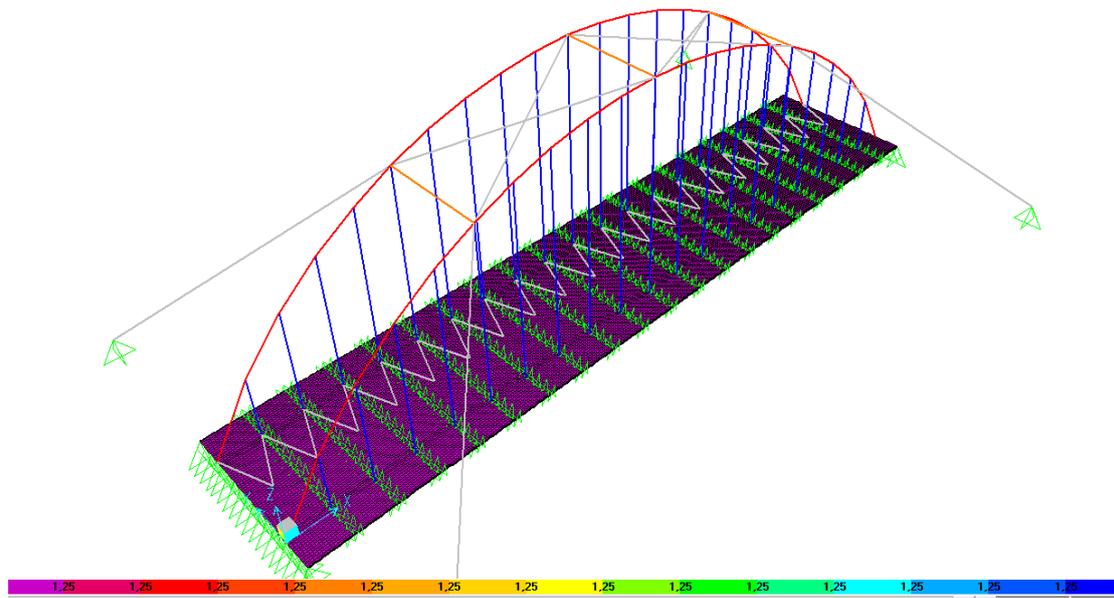


Figura 57: Carregamento do peso próprio do concreto ($1,25 \text{ kN/m}^2$).

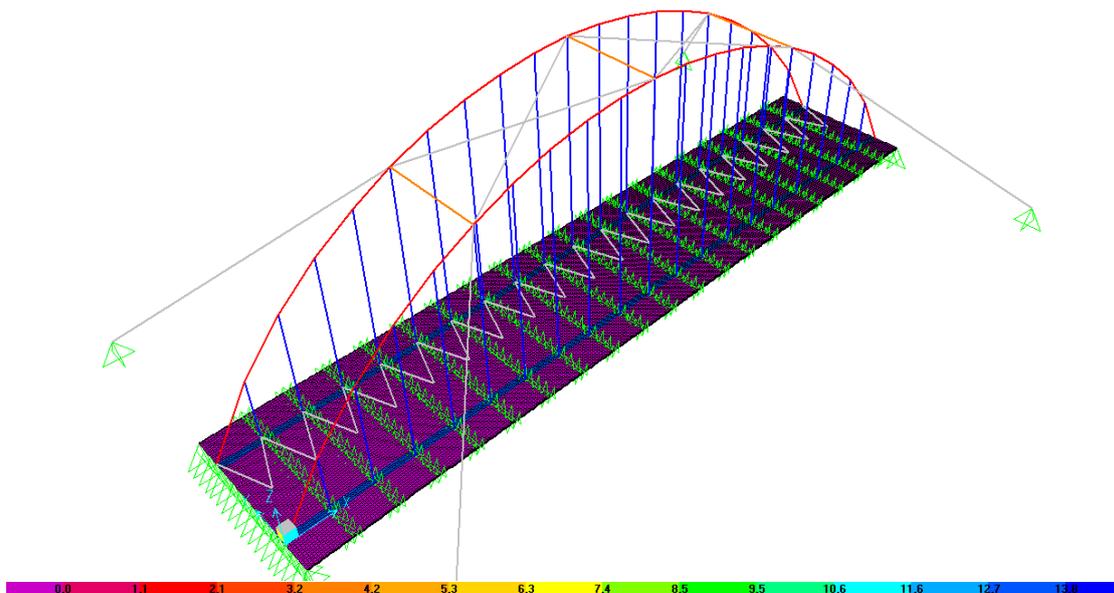


Figura 58: Carregamento do peso próprio do guarda-rodas ($13,8 \text{ kN/m}^2$).

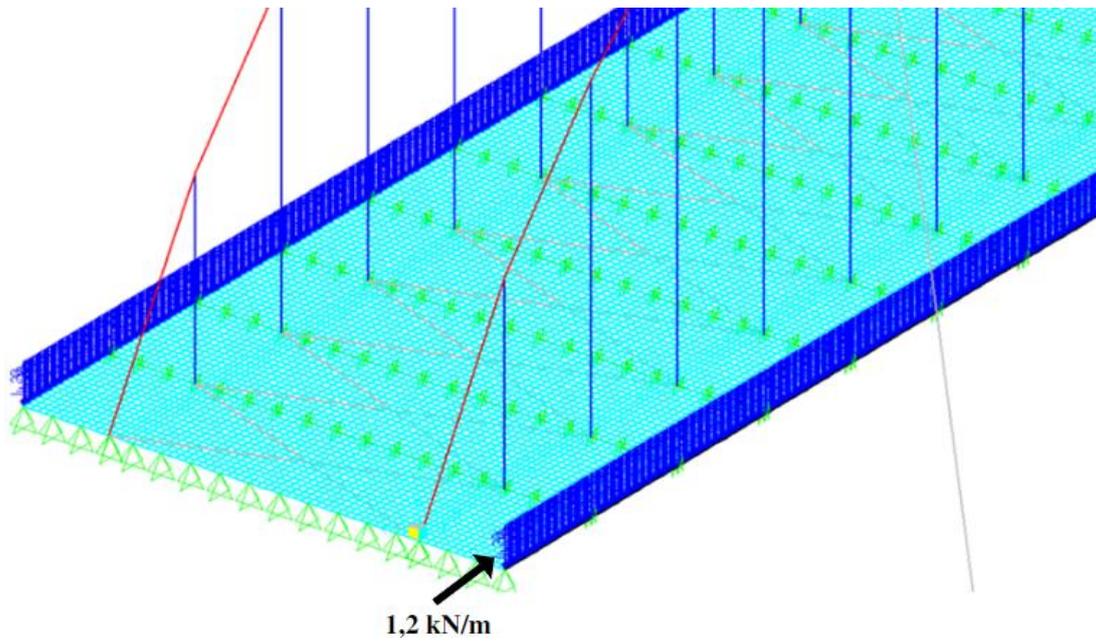


Figura 61: Carregamento do peso próprio do guarda-corpo (1,2 kN/m).

3.3.2 Cargas Acidentais Verticais

As cargas acidentais verticais compreendem as ações, consideradas de longa duração, que atuam em função da utilização da obra de arte. Considera-se o trem tipo TB450 disposto conforme a Figura 62 e Figura 63, sendo $p = 5 \text{ kN/m}^2$ a carga de multidão adotada em toda a pista e $p' = 3 \text{ kN/m}^2$ a carga aplicada no passeio.

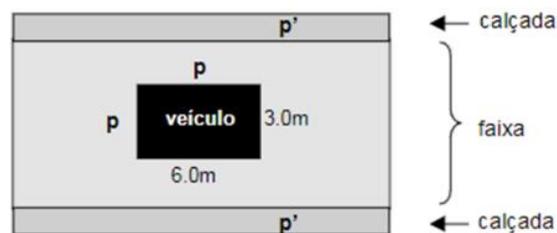


Figura 62: Croqui TB450. Fonte: Manual de projeto e construção de pontes de madeira.

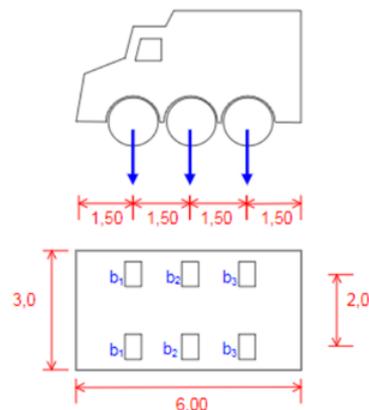


Figura 63: Trem tipo TB450. Fonte: Manual de projeto e construção de pontes de madeira.

Para aplicar o carregamento do veículo tipo foi necessário delimitar a faixa de tráfego por onde o veículo passaria, definida a largura de 3,6 m e a distância de 40 m considerando que o eixo do veículo em sua posição inicial está no eixo da ponte (Figura 64). Em seguida definiu-se as características do veículo tipo TB450 conforme estabelecido pela norma. Após a definição das características do veículo e da delimitação da faixa de tráfego, utilizou-se o padrão de carga “Bridge Live” para distribuir a carga do veículo ao longo do tabuleiro na faixa pré-definida. Em seguida definiu-se a análise do carregamento como “Linear Multistep Static”, levando em consideração diferentes posições do veículo ao longo da ponte. E definiu-se uma envoltória de esforços de modo a se obter os esforços máximos em cada elemento que compõe a ponte, para cada posição do veículo tipo.

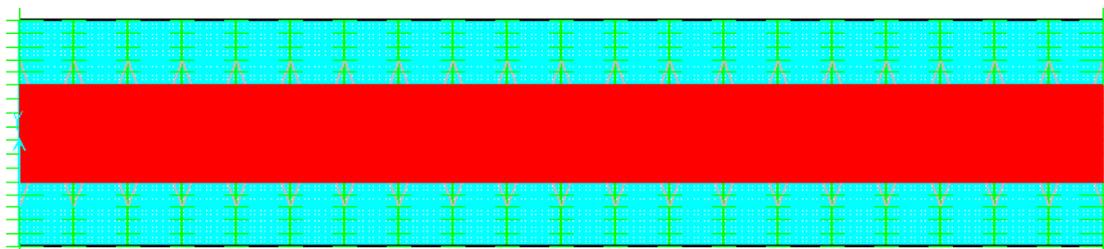


Figura 64: Faixa de tráfego do veículo tipo.

3.3.3 Cargas Acidentais Horizontais

As cargas acidentais horizontais são constituídas das forças longitudinais, que são ações de curta duração derivadas da aceleração ou frenagem do veículo sobre a ponte. Para a consideração desta ação será comparada a abordagem entre a NBR 7190 (1997) e a NBR 7188 (2013).

De acordo com a NBR-7190 (1997): “Nas pontes rodoviárias, a força longitudinal será considerada com o valor característico convencional igual ao maior dos seguintes valores: 5% do carregamento total do tabuleiro com carga móvel uniformemente distribuída, ou, para cada via de tráfego, 30% do peso do caminhão tipo. Esta força longitudinal deve ser aplicada, sem impacto, a 2,0 m acima da superfície de rolamento.” (Figura 65).

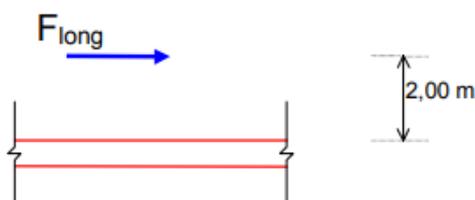


Figura 65: Força longitudinal. Fonte: Manual de Pontes em madeira.

As cargas de aceleração ($F_{long,a}$) e frenagem ($F_{long,f}$) são dadas pelas equações (3.3.1) e (3.3.2), respectivamente, onde $Q_{aceleração}$ é a carga total do tabuleiro com carga móvel uniformemente distribuída, e $Q_{frenagem}$ é a carga do veículo-tipo para cada faixa de tráfego.

$$F_{long,a} = 5\% * Q_{aceleração} = 5\% * 5 \frac{kN}{m^2} * 3,6m * 40m = 36 kN \quad (3.3.1)$$

$$F_{long,f} = 30\% * Q_{frenagem} = 30\% * 450kN = 135kN \quad (3.3.2)$$

De acordo com a NBR 7188 (2013), a força de frenagem/aceleração é dada pela equação (3.3.3):

$$H_f = \max(0,25 * b * L * CNF; 135) \\ = \max(0,25 * 8,4m * 40m * 1,05; 135) = \max(87; 135) = 135 kN \quad (3.3.3)$$

A partir da comparação entre os resultados das equações, obteve-se a convergência entre as normas para o valor de 135kN para a força longitudinal. Para inserção no modelo a força de 135kN foi dividida pelas 6 rodas do veículo e aplicada no tabuleiro (Figura 66).

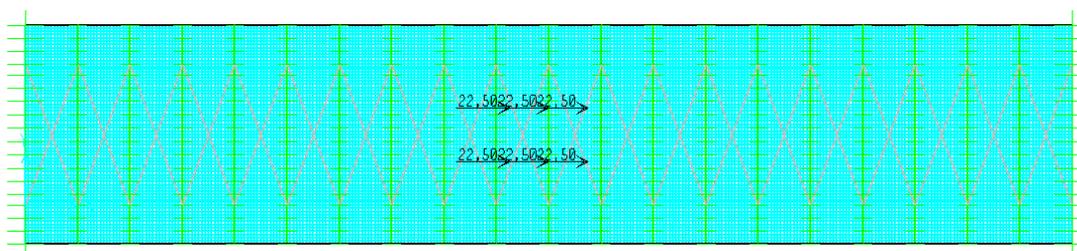


Figura 66: Carregamento de frenagem e aceleração.

3.3.4 Carga de Vento

De acordo com a BBR 7190 (2022) as cargas de vento devem ser calculadas de acordo com a NBR 6123 (1988). Tentou-se calcular a pressão dinâmica do vento com as equações apresentadas pela referida norma. Entretanto, na parte do cálculo do coeficiente de arrasto, as dimensões da ponte fizeram com que o valor de entrada no ábaco da Figura 4 da referida norma ficasse fora do domínio do ábaco; impossibilitando a continuidade dos cálculos.

Segundo EL DEBS (2009), a NBR 6123 não apresenta um procedimento específico para o cálculo do vento em pontes, indicando o uso da NB-2 (1961). Como a NBR 7190 (1997) apresenta considerações acerca do cálculo da carga de vento para pontes, e sendo esta norma mais recente que a NB-2 (1961), neste trabalho será considerado o procedimento descrito pela NBR 7190 (1997) para o cálculo das cargas de vento na ponte.

A carga de vento possui natureza de curta duração. A NBR-7190 (1997) versa sobre a ação do vento sobre veículos considerando uma carga linear de 2 kN/m aplicada a 1,2 m acima da superfície de rolamento (Figura 67). A Figura 68, apresenta a carga de vento inserida no modelo.

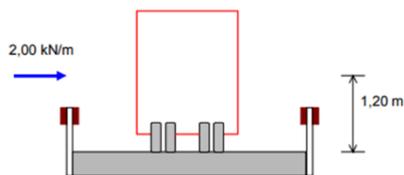


Figura 67: Vento sobre o veículo. Fonte: Manual de Pontes em madeira.



Figura 68: Carregamento devido ao vento aplicado no nível do tabuleiro.

3.3.5 Força no Guarda-Corpo

Segundo a NBR 7190 (1997), a ação acidental no guarda-corpo é composta por uma força uniformemente distribuída 1 kN/m, ao longo do seu comprimento, aplicada horizontalmente na sua parte superior, conforme mostrado na Figura 69. Entretanto a NBR 7190 (2022) adota o exposto na NBR 7188 (2013), que altera a carga distribuída para 2 kN/m, conforme mostrado na Figura 71.

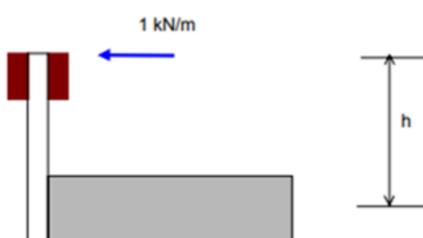


Figura 69: Força no guarda-corpo NBR 7190/97. Adaptado de Manual de Pontes em madeira.

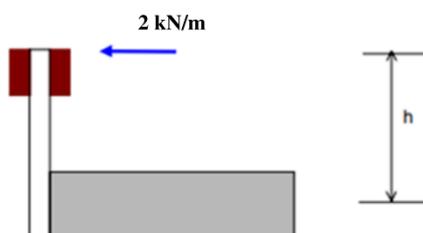


Figura 70: Força no guarda-corpo NBR 7188 (2013). Adaptado de Manual de Pontes em madeira.

Sendo $h = 1,5$ m; para a NBR 7190 (1997) e NBR 7190 (2022), além da carga horizontal mencionada para cada versão da norma, foi aplicado um momento $M = 1,5$ kN.m (Figura 71) e $M = 3,0$ kN.m (Figura 72), respectivamente, no bordo do tabuleiro.

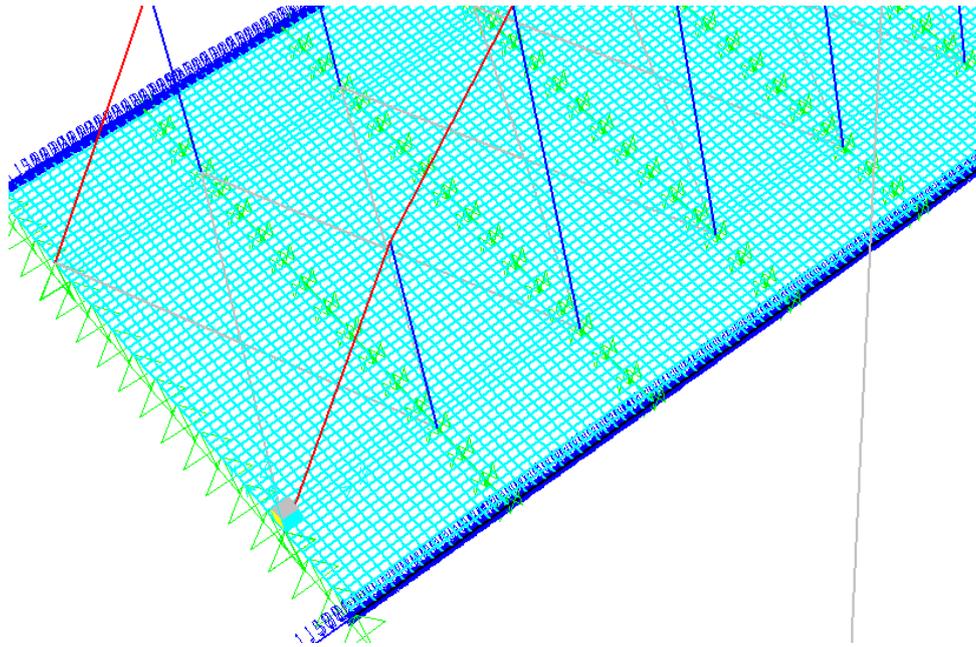


Figura 71: Carregamento devido ao guarda-corpo NBR 7190 (1997).

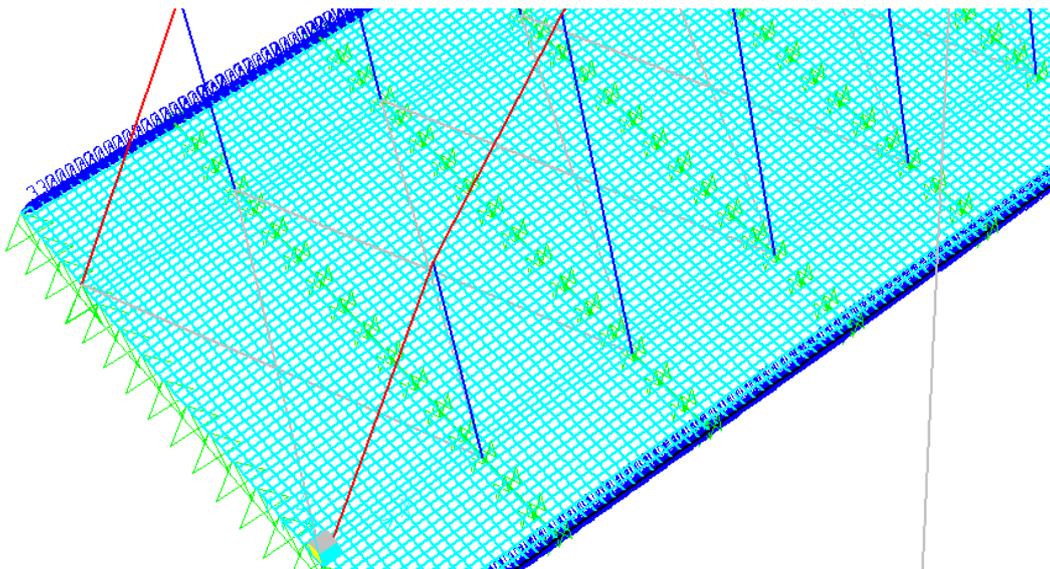


Figura 72: Carregamento devido ao guarda-corpo NBR 7188 (2013).

3.4 ANÁLISE ESTRUTURAL

Quanto à análise estrutural, será realizada uma análise estática linear de 1ª ordem. Salienta-se que pontes com tabuleiro suspenso podem ser suscetíveis a grandes deslocamentos devido aos efeitos de amplificação dinâmica (ressonância), devido às cargas de vento. Entretanto, a análise dinâmica não está contemplada no escopo deste trabalho.

As fundações foram representadas como apoios de segundo gênero. Não será considerado qualquer tipo de interação solo-estrutura. Todas as ligações foram consideradas como perfeitamente flexíveis. O dimensionamento da ligação não faz parte do escopo deste trabalho.

3.5 COMBINAÇÃO DE CARREGAMENTOS

Nesta seção são apresentados os pressupostos para a elaboração das combinações de carregamentos.

3.5.1 Estado Limite Último

Segundo a NBR 7190 (1997) e a NBR 7190 (2022), para combinações no estado limite último, utiliza-se a equação (3.5.1).

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{Gi} F_{Gi,k} + \gamma_Q \left[F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{0j} F_{Qj,k} \right] \quad (3.5.1)$$

Os coeficientes γ_{Gi} , γ_Q e ψ_{0j} são adotados conforme o descrito nas seções abaixo.

3.5.1.1 Coeficientes de Ponderação – Ações Permanentes

Segundo a NBR 7190 (1997), para as ações constituídas pelo peso próprio das estruturas e dos elementos construtivos permanentes não estruturais e dos equipamentos fixos, todos considerados globalmente, quando o peso próprio da estrutura não supera 75% da totalidade dos pesos permanentes, adotam-se os valores de ações de grande variabilidade situados na Tabela 37.

Segundo a NBR 7190 (2022), para uma dada ação permanente, todas as suas parcelas são ponderadas pelo mesmo coeficiente, para o caso de elementos estruturais industrializados de madeira, adotam-se os valores situados na Tabela 37.

Tabela 37: Coeficiente de ponderação das ações permanentes de grande variabilidade. Adaptado da NBR 7190 (1997) e NBR 7190 (2022).

Combinações	Efeitos Desfavoráveis (γ_G)		Efeitos Favoráveis (γ_G)	
	NBR 7190 (1997)	NBR 7190 (2022)	NBR 7190 (1997)	NBR 7190 (2022)
Normais	1,4	1,25	0,9	1,0
Especiais ou de Construção	1,3	1,15	0,9	1,0
Excepcionais	1,2	1,10	0,9	1,0

3.5.1.2 Coeficientes de Ponderação – Ações Variáveis

De acordo com a NBR 7190 (1997), os coeficientes das ações variáveis majoram os valores das ações que produzem efeitos desfavoráveis para a segurança. As parcelas favoráveis não são consideradas nas combinações. Os coeficientes de ponderação das ações variáveis seguem conforme a Tabela 38. A NBR 7190 (2022) adota as recomendações da NBR 8681 (2003), apresentadas na Tabela 38.

Tabela 38: Coeficientes de ponderação das ações variáveis. Adaptado da NBR 7190 (1997) e NBR 8681 (2003).

Combinações	Efeitos variáveis em geral, incluídas as cargas acidentais móveis (γ_Q)	
	NBR 7190 (1997)	NBR 8681 (2003)
Normais	1,4	1,5
Especiais ou de Construção	1,2	1,3
Excepcionais	1,0	1,0

Para redução nos valores de combinação, em situações em que ações variáveis de diferentes naturezas coexistem, A NBR 7190 (1997) adota os fatores de combinação apresentados na Tabela 39. A NBR 7190 (2022) adota as recomendações da NBR 8681 (2003) cujos fatores de combinação para situações em que ações variáveis de diferentes naturezas coexistem são apresentados na Tabela 39.

Tabela 39: Fatores de combinação e utilização. Adaptado da NBR 7190 (1997) e NBR 8681 (2003).

Ações	NBR 7190 (1997)			NBR 8681 (2003)		
	ψ_0	ψ_1	ψ_2	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Pressão dinâmica do vento	0,5	0,2	0	0,6	0,3	0
Locais em que há predominância de pesos de equipamentos fixos, ou de elevadas concentrações de pessoas	0,7	0,6	0,4	0,7	0,6	0,4
Pontes rodoviárias	0,6	0,4	0,2	0,7	0,5	0,3

3.5.1.3 Coeficiente de Impacto Vertical

O impacto vertical é o coeficiente que considera o acréscimo de solicitações oriundas do efeito dinâmico do impacto vertical.

De acordo com a NBR 7190 (1997), os valores característicos das cargas móveis devem ser multiplicados pelo coeficiente φ , dado pela equação (3.5.2). Para a ponte em análise com vão $L = 40$ m, de caráter rodoviário, com soalho revestido de concreto e asfalto, o valor de φ é calculado na equação (3.5.3). Ainda de acordo com a NBR 7190 (1997), os acréscimos de solicitações devido ao impacto vertical, por ser considerado uma ação de curta duração, são multiplicados por 0,75, para considerar a maior resistência da

madeira para cargas de curta duração. Portanto, para a NBR 7190 (1997) o valor adotado é calculado na equação (3.5.4).

$$\varphi = 1 + \frac{\alpha}{40 + L} \quad (3.5.2)$$

$$\varphi = 1 + \frac{12}{40 + 40} = 1,15 \quad (3.5.3)$$

$$\varphi = 1,15 * 0,75 = 0,8625 \quad (3.5.4)$$

A NBR 7190 (2022) aponta para o disposto na NBR 7188 (2013). De acordo com a NBR 7188 (2013) os valores característicos das cargas móveis devem ser multiplicados pelo coeficiente de impacto vertical *CIV*, dado pela equação (3.5.5), para vãos entre 10 m e 200 m. Para a ponte em análise com vão $L = 40$ m. o valor de *CIV* é calculado na equação (3.5.6). A NBR 7190 (2022) apresenta as mesmas considerações que a versão anterior quanto ao fator 0,75. Portanto, para a NBR 7190 (2022) o valor adotado é calculado na equação (3.5.7). A NBR 7188 (2013), salienta ainda que o coeficiente não deve ser considerado para carga nos passeios.

$$CIV = 1 + 1,06 * \frac{20}{50 + L} \quad (3.5.5)$$

$$CIV = 1 + \frac{12}{50 + 40} = 1,24 \quad (3.5.6)$$

$$CIV = 1,24 * 0,75 = 0,93 \quad (3.5.7)$$

3.5.1.4 Coeficiente de Número de Faixas

Segundo a NBR 7188 (2013), as cargas móveis características devem ser multiplicadas pelo coeficiente *CNF*, dado pela equação (3.5.8), a fim de serem ajustadas, Para a ponte em análise com número de faixas de tráfego rodoviário $n = 1$, o valor do *CNF* é calculado na equação (3.5.9).

$$CNF = \max(1 - 0,05 * (n - 2); 0,9) \quad (3.5.8)$$

$$CNF = \max(1 - 0,05 * (1 - 2); 0,9) = (1,05; 0,9) = 1,05 \quad (3.5.9)$$

Este coeficiente só deve ser aplicado ao dimensionamento de elementos estruturais longitudinais à direção do tráfego, tais como vigas principais e secundárias. Já elementos estruturais transversais à direção do tráfego, como lajes e transversinas, não devem ser dimensionados utilizando o coeficiente *CNF*. Para a ponte em análise, o coeficiente *CNF* será aplicado ao dimensionamento do arco e da laje.

Este coeficiente não é abordado pela NBR 7190 (1997).

3.5.1.5 Coeficiente de Impacto Adicional

Conforme a NBR 7188 (2013), os esforços das cargas móveis devem ser majorados nas regiões das juntas estruturais e extremidades da obra. Para as seções dos elementos estruturais que estão localizadas a uma distância horizontal, normal à junta, inferior a 5,0 m para cada lado da junta ou descontinuidade estrutural, os esforços das cargas móveis devem ser dimensionados com o coeficiente de impacto adicional, que é determinado pelo tipo de material utilizado na obra.

No caso de obras em concreto ou mistas, o coeficiente de impacto adicional é $CIA = 1,25$. Para obras em aço, o coeficiente de impacto adicional é $CIA = 1,15$.

Essa medida é essencial para garantir que a estrutura seja dimensionada adequadamente para suportar os esforços máximos que possam ocorrer em locais críticos do projeto, como as juntas estruturais e extremidades. Ajudando a evitar danos à estrutura e a garantir sua segurança e durabilidade.

A NBR 7188 (2013) não aborda obras de madeira, portanto será considerado o valor de 1,25, sendo o pior caso exposto pela referida norma.

Este coeficiente não é abordado pela NBR 7190 (1997).

3.5.2 Estado Limite de Serviço

Segundo a NBR 7190 (1997), para construções correntes a verificação do estado limite de serviço são feitas a partir da combinação de longa duração, conforme a equação (3.5.10).

$$F_{d,uti} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \sum_{j=1}^n \psi_{2j} F_{Qj,k} \quad (3.5.10)$$

O coeficiente ψ_{2j} foi apresentado no item 3.5.1.2. Ainda segundo a NBR 7190 (1997), deve se considerar os efeitos de fluência da madeira através do coeficiente de fluência φ , definidos na tabela 15 da referida norma, apresentado na Tabela 15.

Sendo assim, a análise da flecha segundo a NBR 7190 (1997), é dada pela equação (3.5.11):

$$u_t = u_g * (1 + \varphi) + (u - u_g) * (1 + \varphi) \quad (3.5.11)$$

onde u_t é a flecha total considerando os efeitos de fluência; u_g é a flecha devido a ações permanentes; u é a flecha total devido a combinação de longa duração e φ é o coeficiente de fluência.

Segundo a NBR 7190 (1997) a flecha efetiva limite u_{lim} , não pode superar 1/200 dos vãos, nem 1/100 do comprimento dos balanços correspondentes para construções correntes.

Segundo a NBR 7190 (2022), deve-se verificar a flecha para deslocamentos instantâneos, desconsiderando o efeito da fluência a partir da combinação rara de serviço da NBR 8681 (2003), conforme a equação (3.5.12).

$$\delta_{inst} = \sum_{i=1}^m \delta_{inst,Gi,k} + \delta_{inst,Q1,k} \sum_{j=2}^n \psi_{1j} \delta_{inst,Qj,k} \quad (3.5.12)$$

Deve-se ainda, verificar a flecha final a partir de uma combinação quase permanente, através da equação (3.5.13).

$$\delta_{fin} = \delta_{inst,Gi,k} * (1 + \varphi) + \delta_{inst,Qj,k} * \psi_{1j} * (1 + \varphi) \quad (3.5.13)$$

Segundo a NBR 7190 (2022) a flecha instantânea limite $\delta_{lim,inst}$, não pode superar 1/300 dos vãos, nem 1/150 do comprimento dos balanços correspondentes. A flecha final limite $\delta_{lim,fin}$, não pode superar 1/150 dos vãos, nem 1/75 do comprimento dos balanços correspondentes. E ainda a flecha final líquida limite $\delta_{lim,lq,fin}$, não pode superar 1/250 dos vãos, nem 1/125 do comprimento dos balanços correspondentes.

3.5.3 Combinação de Carregamentos

Considerando o exposto nos itens 3.5.1 e 3.5.2, montou-se a Tabela 40, que contém as combinações das ações utilizadas na análise do software. Nesta diferencia-se a análise das duas versões da norma e ainda na versão da norma de 2022 inclui o uso dos coeficientes de majoração provenientes da carga móvel que devem ser considerados em determinado sentido conforme exposto na seção 3.5.2. Para as combinações de Estados Limites Últimos – ELU, utilizou-se apenas as combinações normais.

Tabela 40: Combinação de carregamentos – ELU.

Carregamentos Básicos	NBR 7190 (2022)				NBR 7190 (1997)	
	EL. Metálicos		EL. Madeira		---	
	Cabo Suspensão	Cabos Contrav.	Arco	Transversina, Tabuleiro e Contrav. em Madeira	Elementos Metálicos	Elementos em Madeira
	1	2	3	4	5	6

Permanentes	PP Arco	1,25	1,25	1,25	1,25	1,4	1,4
	PP Tirantes	1,25	1,25	1,25	1,25	1,4	1,4
	PP Transversinas	1,25	1,25	1,25	1,25	1,4	1,4
	PP Tabuleiro	1,25	1,25	1,25	1,25	1,4	1,4
	PP Concreto	1,25	1,25	1,25	1,25	1,4	1,4
	PP Asfalto	1,25	1,25	1,25	1,25	1,4	1,4
	PP Guarda rodas	1,25	1,25	1,25	1,25	1,4	1,4
	PP Guarda corpo	1,25	1,25	1,25	1,25	1,4	1,4
	PP Conexões	1,25	1,25	1,25	1,25	1,4	1,4
Variáveis	SC Pedestres	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4
	SC Multidão	1,95	2,33	1,46	1,74	1,61	1,21
	Veículo tipo	1,95	2,33	1,46	1,74	1,61	1,21
	Forças Long.	1,05	1,05	1,05	1,05	0,84	0,84
	F.H. Guarda corpo	1,05	1,05	1,05	1,05	0,84	0,84
	Vento 0°	0,84	0,84	0,84	0,84	0,7	0,7

Tabela 41: Combinação de carregamentos – ELS.

Carregamentos Básicos		NBR 7190 (2022)		NBR 7190 (1997)
		Flecha Instantânea	Flecha Final	Longa Duração
		7	8	9
Permanentes	PP Arco	1	1,8	1
	PP Tirantes	1	1,8	1
	PP Transversinas	1	1,8	1
	PP Tabuleiro	1	1,8	1
	PP Concreto	1	1,8	1
	PP Asfalto	1	1,8	1
	PP Guarda rodas	1	1,8	1
	PP Guarda corpo	1	1,8	1
PP Conexões	1	1,8	1	
Variáveis	SC Pedestres	1	0,54	0,2
	SC Multidão	1	0,54	0,2
	Veículo tipo	1	0,54	0,2
	Forças Long.	0,5	0,54	0,2
	F.H. Guarda corpo	0,5	0,54	0,2
	Vento 0°	0,3	0	0

3.6 SOMATÓRIO DOS CARREGAMENTOS BÁSICOS E COMBINAÇÕES

A Figura 73 apresenta a identificação dos apoios para a identificação das correspondentes reações absorvidas por tais apoios.

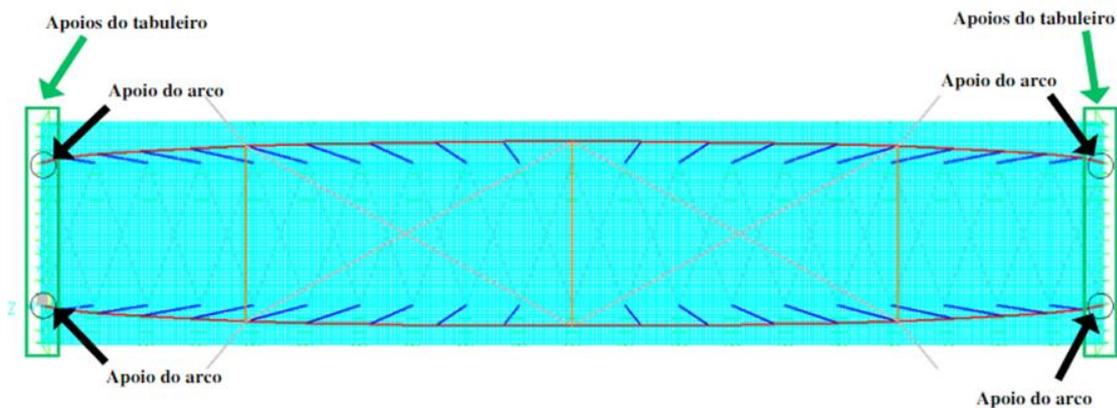


Figura 73: Identificação dos apoios da estrutura.

Os apêndices A1, A2 e A3 apresentam o somatório dos carregamentos básicos apresentados no item 3.3, sem a aplicação de qualquer coeficiente de ponderação. Os apêndices B1, B2 e B3 apresentam o somatório dos carregamentos combinados apresentados no item 3.5, mais especificamente a Tabela 40 e a Tabela 41, com a aplicação dos coeficientes de ponderação apresentados. Além disso, os apêndices C1, C2 e C3 apresentam os carregamentos lineares que representam as reações de apoio devido ao apoio do tabuleiro no encontro da ponte.

4 CRITÉRIO DE DIMENSIONAMENTO

4.1 SOLICITAÇÕES NORMAIS

Segundo a NBR 7190 (1997) e NBR 7190 (2022), a segurança em peças tracionadas ou comprimidas axialmente é garantida pelas equações (4.1.1) e (4.1.2), respectivamente.

$$\sigma_{td} \leq f_{td} \quad (4.1.1)$$

$$\sigma_{cd} \leq f_{cd} \quad (4.1.2)$$

onde σ_{td} e σ_{cd} são as tensões de tração e compressão de dimensionamento, respectivamente.

De acordo com a NBR 7190 (1997), para as barras sujeitas a momento fletor a garantia de segurança é alcançada ao cumprir simultaneamente as condições descritas nas equações (4.1.3) e (4.1.4). De acordo com a NBR 7190 (2022), a verificação à flexão deve seguir a equação (4.1.5):

$$\sigma_{c1,d} \leq f_{c,d} \quad (4.1.3)$$

$$\sigma_{t2,d} \leq f_{t,d} \quad (4.1.4)$$

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d} \quad (4.1.5)$$

onde $\sigma_{c1,d}$ e $\sigma_{t2,d}$ são as tensões de compressão e tração, respectivamente, no bordo da peça devido ao momento; e $\sigma_{m,d}$ é a tensão solicitante devido ao momento, sem distinção entre tração e compressão.

Segundo a NBR 7190 (1997) a verificação à flexocompressão é dada pelas equações (4.1.6) e (4.1.7). Para a NBR 7190 (2022) a verificação à flexocompressão é dada pelas equações (4.1.8) e (4.1.9).

$$\left(\frac{\sigma_{Nd}}{f_{c,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{mdx}}{f_{c,d}} + k_M \frac{\sigma_{mdy}}{f_{c,d}} \leq 1 \quad (4.1.6)$$

$$\left(\frac{\sigma_{Nd}}{f_{c,d}}\right)^2 + k_M \frac{\sigma_{mdx}}{f_{c,d}} + \frac{\sigma_{mdy}}{f_{c,d}} \leq 1 \quad (4.1.7)$$

$$\left(\frac{\sigma_{Nd}}{f_{c,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{mdx}}{f_{m,d}} + k_M \frac{\sigma_{mdy}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (4.1.8)$$

$$\left(\frac{\sigma_{Nd}}{f_{c,d}}\right)^2 + k_M \frac{\sigma_{mdx}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{mdy}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (4.1.9)$$

onde σ_{Nd} é a tensão de dimensionamento devido ao esforço normal, σ_{Mdx} é a tensão de flexão devido ao momento M_{dx} , σ_{Mdy} é a tensão de flexão devido ao momento M_{dy} e k_M é um coeficiente em função da geometria da seção, para as seções retangulares, adotadas

na ponte em análise quanto a NBR 7190 (1997) $k_M = 0,5$, quanto a NBR 7190 (2022), $k_M = 0,7$.

4.2 SOLICITAÇÕES TANGENCIAIS

Para as vigas que estão sujeitas à flexão com força cortante, a avaliação da segurança em relação às tensões tangenciais deve ser verificada conforme a equação (4.2.1), indicado pelas duas versões da norma.

$$\tau_d \leq f_{v,d} \quad (4.2.1)$$

Para vigas de seção transversal retangular com largura b e altura h , τ_d é dado pela equação (4.2.2):

$$\tau_d = \frac{3}{2} * \frac{V_d}{bh} \quad (4.2.2)$$

4.3 VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE

4.3.1 Estabilidade – NBR 7190 (1997)

Para o dimensionamento de uma peça comprimida deve-se primeiro avaliar sua esbeltez, conforme a equação (4.3.1):

$$\lambda = \frac{L_{ef}}{i_{min}} \quad (4.3.1)$$

onde L_0 é o comprimento de flambagem e i_{min} o raio de giração mínimo.

Peças com $\lambda \leq 40$, são consideradas peças curtas, e dispensam a verificação da estabilidade. Peças com $40 < \lambda \leq 80$, são consideradas medianamente esbeltas e são verificadas conforme a equação (4.3.2):

$$\frac{\sigma_{Nd}}{f_{c,d}} + \frac{\sigma_{md}}{f_{c,d}} \leq 1 \quad (4.3.2)$$

onde σ_{Nd} é a tensão normal de compressão e σ_{md} a tensão devido ao momento, calculada com o M_d dado pela equação (4.3.3):

$$M_{dt} = N_d * (e_a + e_i) * \frac{F_e}{F_e - N_d} \quad (4.3.3)$$

$$F_e = \frac{\pi^2 * E_{c,ef} * I}{L_{ef}^2} \quad (4.3.4)$$

$$e_a = \frac{L_{ef}}{300} \quad (4.3.5)$$

$$e_i = \frac{M_d}{N_d} \quad (4.3.6)$$

onde M_{dt} é o momento de dimensionamento para verificação da estabilidade, N_d é o esforço normal de compressão, F_e é a força crítica normal, e_a é a excentricidade accidental, e_i é a excentricidade inicial, L_{ef} é o comprimento de flambagem.

Peças com $80 < \lambda \leq 140$, são consideradas esbeltas e sua verificação se dá conforme a seção 7.5.5 da NBR 7190 (1997). Destaca-se que a esbeltez limite para peças em madeira é de 140.

4.3.2 Estabilidade – NBR 7190 (2022)

Inicialmente, deve-se avaliar sua esbeltez, conforme a equação (4.3.1). Entretanto, nesta equação o L_{ef} é definido a partir da equação (4.3.7), onde o parâmetro de flambagem K_E pode assumir diversos valores de acordo com as condições de vinculação, conforme a Figura 74.

$$L_{ef} = K_E * L \quad (4.3.7)$$

Para a ponte em análise todos os elementos de barra são birotulados, portanto adota-se o $K_E = 1$.

Tabela 7 – Valores dos coeficientes K_E

Modos de flambagem						
Valores de projeto para K_E	0,65	0,80	1,20	1,00	2,10	2,40
Código das condições de extremidade		Rotação e translação lateral impedidas, translação vertical livre				
		Rotação e translação vertical livres, translação lateral impedida				
		Rotação livre e translações impedidas				
		Rotação impedida e translações livres				
		Rotação e translações livres				

Figura 74: Parâmetro de flambagem – NBR 7190 (2022).

Em seguida, verifica-se a esbelteza relativa para o eixo x ($\lambda_{rel,x}$) e para o eixo y, ($\lambda_{rel,y}$) dada pelas equações (4.3.8) e (4.3.9). Caso $\lambda_{rel,x} > 0,3$ ou $\lambda_{rel,y} > 0,3$, deve ser feita a verificação da estabilidade conforme as equações (4.3.10) a (4.3.15):

$$\lambda_{rel,x} = \frac{\lambda_x}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c0,k}}{E_{0,05}}} \quad (4.3.8)$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c0,k}}{E_{0,05}}} \quad (4.3.9)$$

$$k_x = 0,5 \left[1 + \beta_c (\lambda_{rel,x} - 0,3) + (\lambda_{rel,x})^2 \right] \quad (4.3.10)$$

$$k_y = 0,5 \left[1 + \beta_c (\lambda_{rel,y} - 0,3) + (\lambda_{rel,y})^2 \right] \quad (4.3.11)$$

$$k_{cx} = \frac{1}{k_x + \sqrt{k_x^2 - \lambda_{rel,x}^2}} \quad (4.3.12)$$

$$k_{cy} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} \quad (4.3.13)$$

$$\frac{\sigma_{Nc,d}}{k_{cx} f_{c,d}} + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + k_M \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (4.3.14)$$

$$\frac{\sigma_{Nc,d}}{k_{cy} f_{c,d}} + k_M \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (4.3.15)$$

onde k_x , k_y , k_{cx} , k_{cy} são coeficientes; β_c é um coeficiente função do produto de madeira. (para a ponte em análise – peças em MLC, $\beta_c = 0,1$).

4.3.3 Flambagem Lateral com Torção

A NBR 7190 (1997) e NBR 7190 (2022) não apresentam uma formulação para a verificação da flambagem lateral com torção (FLT), mas sim critérios para a dispensa da verificação da flambagem lateral com torção. O critério de dispensa da verificação da flambagem lateral com torção deve ser verificada por meio da equação (4.3.16):

$$L_{ef} \leq \frac{E_{c,ef} b}{(\beta_m * f_{c0,d})}, \text{ para a NBR 7190 (1997)} \quad (4.3.16)$$

$$L_{ef} \leq \frac{E_{c,ef} b}{(\beta_m * f_{m,d})}, \text{ para a NBR 7190 (2022)}$$

$$\beta_m = \frac{1}{0,26\pi} \frac{4}{1,4} \frac{\left(\frac{h}{b}\right)^{3/4}}{\left(\frac{h}{b} - 0,63\right)^{1/2}} \quad (4.3.17)$$

onde L_1 é a distância entre ponto de contenção lateral que impedem o deslocamento e rotação da seção, b é a largura da seção e h é a altura da seção.

Se a distância entre pontos de contenção lateral for inferior ao valor dado pela equação (4.3.16), a verificação da FLT é dispensada. Todavia, se o critério definido em

(4.3.16) não for atendido, ainda a verificação da FLT pode ser dispensada se o critério definido pela equação (4.3.18) for atendido:

$$\sigma_{c1,d} \leq \frac{E_{c,ef}}{\left(\frac{L_{ef}}{b}\right) \beta_m} \quad (4.3.18)$$

onde $\sigma_{c1,d}$ é a máxima tensão de compressão atuando no elemento analisado.

4.4 SISTEMAS DE CONTRAVENTAMENTO

No que diz respeito ao dimensionamento dos elementos de contraventamento, a NBR 7190 (1997) e NBR 7190 (2022) apresentam a mesma formulação.

Para peças que estão sendo submetidas à compressão por uma força de cálculo N_d , com articulações fixas em ambas as extremidades e que exigem estabilidade por meio de contraventamento lateral por elementos espaçados com distância L_1 , devem ser respeitados os Critérios de Resistência e da Rigidez.

A coluna com imperfeição geométrica δ_0 da ordem de $L/300$ tem seu contraventamento representado pela mola de rigidez k na Figura 75. Para que o deslocamento lateral máximo seja da ordem de grandeza da imperfeição geométrica δ_0 , resultando em $2 * \delta_0$, o contravenamento deve satisfazer o Critério da Resistência e da Rigidez.

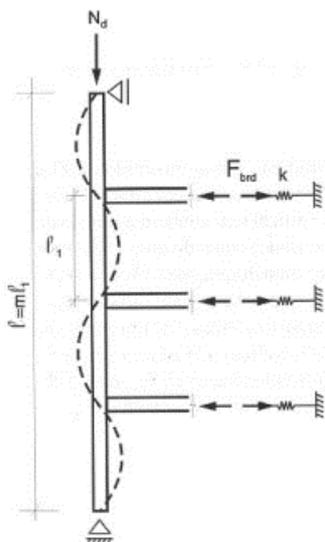


Figura 75: Contraventamento de uma peça – Critério da Resistência e da Rigidez (Pfeil, 2003).

Para o Critério da Resistência, em cada nó que pertence ao elemento comprimido, a mola deve ser capaz de resistir a uma força transversal ao elemento dada pela equação (2.4.63). Em que N_d representa o valor de cálculo da resultante das tensões que atuam no banço comprimido de um elemento do sistema principal. Além disso, as estruturas de

contraventamento nas extremidades da construção e em quaisquer posições intermediárias, se houver, devem resistir em cada um dos seus nós a forças cujo valor de cálculo F_d dado pela equação (4.4.2):

$$F_{1d} \geq \frac{N_d}{150} \quad (4.4.1)$$

$$F_d \geq \frac{2}{3} * n * F_{1d} \quad (4.4.2)$$

onde n é a quantidade de forças F_{1d} , conforme a .

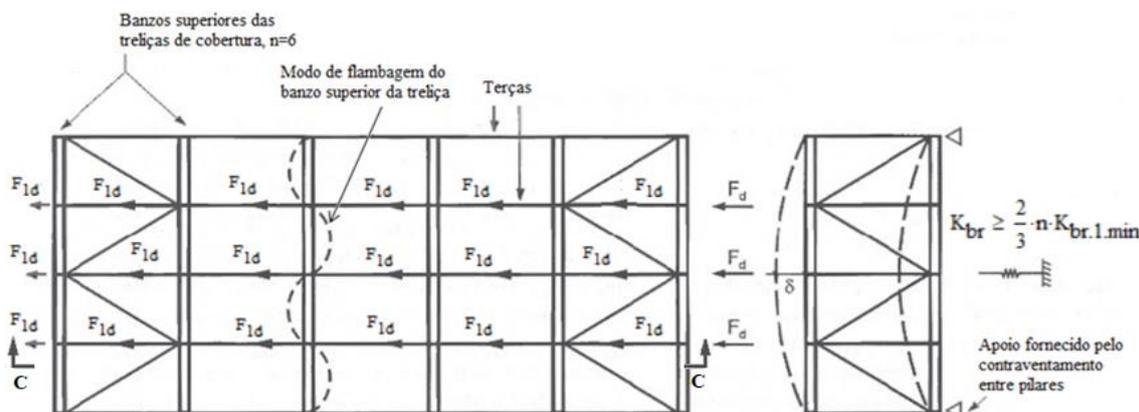


Figura 76: Contraventamento de várias peças – Critério da Resistência e da Rigidez. Adaptado de (Pfeil, 2003).

A Figura 75 apresenta o modo de flambagem do elemento de contraventamento, uma semi-onda de comprimento L_{ef} . Para que o modo de flambagem seja garantido, a rigidez da mola k , deve atender ao Critério de Rigidez. Em cada ponto a ser contraventado, o elemento de contraventamento deve prover uma rigidez mínima $K_{br,1,min}$, dada pela equação (4.4.3):

$$K_{br,1,min} \geq 2\alpha_m \frac{\pi^2 E_{c,ef} I}{L_{ef}^3} \quad (4.4.3)$$

$$\alpha_m = 1 + \cos\left(\frac{\pi}{m}\right) \quad (4.4.4)$$

onde I é o momento de inércia da seção da peça a ser contraventada, para a flexão no plano do contraventamento.

As estruturas de contraventamento nas extremidades da construção e em quaisquer posições intermediárias, se houver, devem atender ao critério de rigidez dado pela equação (4.4.5). O nó mais deslocável da estrutura deve atender a este critério, conforme a Figura 76. A equação (4.4.6) apresenta a projeção da rigidez axial de uma barra de contraventamento na direção perpendicular à barra a ser contraventada. Substituindo-se (4.4.6) em (4.4.5) e isolando-se a área A_c , obtém-se a equação (4.4.7), que corresponde a área necessária do contraventamento para o atendimento ao critério da rigidez.

$$K_{br} \geq \frac{2}{3} n K_{br,1,\min} \quad (4.4.5)$$

$$K_{barra} = \frac{A_c * E * \cos^2(\theta)}{L_c} \quad (4.4.6)$$

$$A_c \geq K_{br} * \frac{L_c}{E * \cos^2(\theta)} \quad (4.4.7)$$

onde n é o número de elementos comprimidos a serem contraventados; L_c é comprimento do contraventamento; E é o módulo de elasticidade do elemento de contraventamento; e θ é o ângulo entre o elemento de contraventamento e a direção perpendicular ao elemento a ser contraventado.

5 DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS

Com o modelo estrutura descrito no capítulo 3 realizou-se a análise estrutural para as combinações de carregamentos descritas na Tabela 40 e Tabela 41. Com os esforços obtidos na análise, foram realizadas as verificações dos critérios de dimensionamento apresentados no capítulo 4.

O item 5.1 apresenta as verificações segundo os critérios da NBR 7190 (1997) para o Modelo 97. O item 5.2 apresenta as verificações segundo os critérios da NBR 7190 (2022) para o Modelo 22. O item 5.3 apresenta as verificações segundo os critérios da NBR 7190 (1997) para o Modelo 97-2 descrito no item 3.

Para a verificação dos elementos estruturais, serão selecionados os elementos que apresentaram a solicitação crítica para a aplicação das verificações.

5.1 ELU NBR 7190 (1997) – MODELO 97

5.1.1 Arco

O arco foi modelado como uma série de elementos retos. A Figura 77 apresenta os elementos críticos para a verificação do arco.

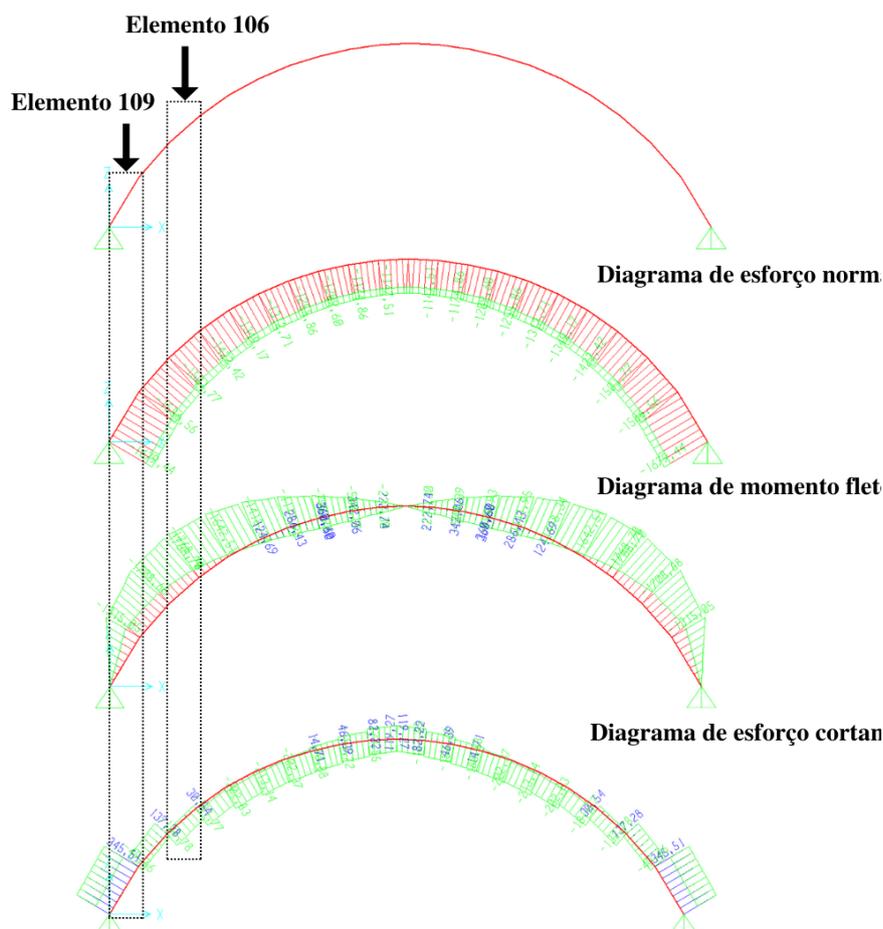


Figura 77: Esforços no arco, e indicação dos elementos críticos.

Na Tabela 42, são apresentados os esforços atuantes nos elementos críticos do arco. O elemento 106 apresentou o caso crítico para a verificação da flexo compressão e da estabilidade. O elemento 109 apresentou o caso crítico para a verificação do cisalhamento.

Tabela 42: Esforços nos elementos críticos – combinação (6).

Elemento	Seção		Esforços					
	h_x (cm)	h_y (cm)	N_d (kN)	V_{dy} (kN)	V_{dx} (kN)	T_d (kN.m)	M_{dx} (kN.m)	M_{dy} (kN.m)
Arco 70 x 140 (106)	70	140	-1487,4	-116,6	0	-0,09	-1768,7	0,07
Arco 70 x 140 (109)	70	140	-1411,4	345,5	0	0,12	-567,9	-0,04

Considerando-se as propriedades dos materiais para os elementos em MLC apresentadas na Tabela 18 e as propriedades da seção transversal do arco, apresentadas na Tabela 35, procedeu-se as verificações.

A Tabela 43 apresenta a classificação da esbeltez do arco, aplicando-se a equação (2.4.3) e os critérios de classificação descritos no item 4.3.1.

Tabela 43: Avaliação de esbeltez do arco.

Elemento	L_{0x} (cm)	L_{0y} (cm)	λ_x	Classificação (x)	λ_y	Classificação (y)
Arco 70 x 140	3063	1225	76	Coluna Medianamente Esbelta para flexão em torno do eixo x	61	Coluna Medianamente Esbelta para flexão em torno do eixo y

Para a verificação da estabilidade, aplicou-se a equação (4.3.3), resultando em (5.1.7) e (5.1.8), para os momentos de flexão em torno dos eixos x e y, respectivamente. Em seguida, aplicou-se a equação (4.3.2), resultando em (5.1.12) e (5.1.13), para a verificação da estabilidade, para flexão em torno dos eixos x e y, respectivamente.

$$e_{ix} = 100 * \frac{M_{dx}}{N_d} = 100 * \frac{1768,7}{1487,4} = 118,91 \text{ cm} \quad (5.1.1)$$

$$e_{iy} = 100 * \frac{M_{dy}}{N_d} = 100 * \frac{0}{1487,4} = 0 \text{ cm} \quad (5.1.2)$$

$$e_{ax} = \frac{L_{fx}}{300} = \frac{3063}{300} = 10,21 \text{ cm} \quad (5.1.3)$$

$$e_{ay} = \frac{L_{fy}}{300} = \frac{1225}{300} = 4,08 \text{ cm} \quad (5.1.4)$$

$$F_{ex} = \pi^2 * E_{c.ef} * \frac{I_x}{L_{fx}^2} = \pi^2 * 803,9 * \frac{16006666}{3063^2} = 13536,23 \text{ kN} \quad (5.1.5)$$

$$F_{ey} = \pi^2 * E_{c.ef} * \frac{I_y}{L_{fy}^2} = \pi^2 * 803,9 * \frac{4001666}{1225^2} = 21157,27 \text{ kN} \quad (5.1.6)$$

$$M_{dxt} = N_d * (e_{ax} + e_{ix}) * \frac{F_{ex}}{F_{ex} - N_d} \quad (5.1.7)$$

$$= 1487,4 * (10,21 + 118,91) * \frac{13536,23}{13536,23 - 1487,4} = 215765 \text{ kN.cm}$$

$$M_{dyt} = N_d * (e_{ay} + e_{iy}) * \frac{F_{ey}}{F_{ey} - N_d} \quad (5.1.8)$$

$$= 1487,4 * (4,08 + 0) * \frac{21157,27}{21157,27 - 1487,4} = 6540 \text{ kN.cm}$$

$$\sigma N_d = \frac{N_d}{A} = \frac{1487,4}{9800} = 0,15 \text{ kN.cm}^2 \quad (5.1.9)$$

$$\sigma M_{dtx} = \frac{M_{dtx}}{W_x} = \frac{215765}{228667} = 0,94 \text{ kN.cm}^2 \quad (5.1.10)$$

$$\sigma M_{dty} = \frac{M_{dty}}{W_y} = \frac{6540}{114333} = 0,05 \text{ kN.cm}^2 \quad (5.1.11)$$

$$\text{Razão}_{xe} = \frac{\sigma N_d}{f_{cd}} + \frac{\sigma M_{dtx}}{f_{cd}} = \frac{0,15}{1,19} + \frac{0,94}{1,19} = 92\% \quad (5.1.12)$$

$$\text{Razão}_{ye} = \frac{\sigma N_d}{f_{cd}} + \frac{\sigma M_{dty}}{f_{cd}} = \frac{0,15}{1,19} + \frac{0,05}{1,19} = 18\% \quad (5.1.13)$$

Para a verificação da flexo compressão aplicou-se as equações (4.1.6) e (4.1.7), resultando em (5.1.17) e (5.1.18), respectivamente.

$$\sigma N_d = \frac{N_d}{A} = \frac{1487,4}{9800} = 0,15 \text{ kN.cm}^2 \quad (5.1.14)$$

$$\sigma M_{dx} = \frac{M_{dx}}{W_x} = \frac{100 * 1768,7}{228667} = 0,77 \text{ kN.cm}^2 \quad (5.1.15)$$

Na Tabela 44, são fornecidos os esforços aplicados nos elementos críticos da transversina. O elemento 1043 destaca-se como caso crítico para a verificação da flexão simples e o elemento 949 destaca-se como caso crítico para a verificação do cisalhamento.

Tabela 44: Esforços nos elementos críticos - combinação (6).

Elemento	Seção		Esforços					
	h_x (cm)	h_y (cm)	N_d (kN)	V_{dy} (kN)	V_{dx} (kN)	T_d (kN.m)	M_{dx} (kN.m)	M_{dy} (kN.m)
Transversina 32,5 x 65 (1043)	32,5	65	0	0	0	0	240,83	0
Transversina 32,5 x 65 (949)	32,5	65	0	168,86	0	0	-16,17	0

Considerando-se as propriedades dos materiais para os elementos em MLC apresentadas na Tabela 18, prosseguiu-se a verificação da flexão simples aplicando-se as equações (4.1.3) e (4.1.4), resultando em (5.1.22) e (5.1.23), respectivamente.

$$\sigma_{td} = \sigma_{cd} = \frac{6M_{dx}}{b * h^2} = \frac{6 * 240,83}{32,5 * 65^2} = 1,05 \text{ kN/cm}^2 \quad (5.1.21)$$

$$\text{Razão} = \frac{\sigma_{cd}}{0,1 * f_{cd}} = \frac{1,05}{0,1 * 12} = 88\% \quad (5.1.22)$$

$$\text{Razão} = \frac{\sigma_{td}}{0,1 * f_{td}} = \frac{1,05}{0,1 * 12,12} = 87\% \quad (5.1.23)$$

Para verificação do cisalhamento aplicou-se as equações (4.2.2) e (4.2.1), obtendo-se, respectivamente, (5.1.24) e (5.1.25).

$$\tau_{vd} = \frac{3V_{dy}}{2bh} = \frac{3168,86}{2 * 32,5 * 65} = 0,120 \text{ kN/cm}^2 \quad (5.1.24)$$

$$\text{Razão} = \frac{\tau_{vd}}{0,1 * f_{vd}} = \frac{0,12}{0,1 * 1,87} = 64\% \quad (5.1.25)$$

Para verificação da flambagem lateral, definiu-se o valor de $L_{ef} = 5,4$ m, distância entre os pontos de contenção lateral da transversina, considerando-se que estes contêm a rotação em torno do eixo longitudinal da peça Figura 51. Dessa forma aplicou-se as equações (4.3.17) e (4.3.16), resultando em (5.1.26) e (5.1.27), respectivamente.

$$\beta_m = \frac{1}{0,25 * \pi} * \frac{\sqrt{\left(\frac{h}{b}\right)^3}}{\sqrt{\left(\frac{h}{b}\right) - 0,63}} * \frac{4}{1,4} \quad (5.1.26)$$

$$= \frac{1}{0,26 * \pi} * \frac{4}{1,4} * \frac{\sqrt{\left(\frac{65}{32,5}\right)^3}}{\sqrt{\left(\frac{65}{32,5}\right) - 0,63}} = 8,45 \text{ MPa}$$

$$L_{ef,calc} = 0,01 * \frac{E_{c,ef} * b}{\beta_m * f_{c,d}} = 0,01 * \frac{8120 * 32,5}{8,45 * 12} = 26,02 \text{ m} > L_{ef} \quad (5.1.27)$$

Após a constatação de que $L_{ef,calc} > L_{ef}$, a verificação de tensões de flexão com flambagem lateral pode ser dispensada.

5.1.3 Contraventamentos

A Figura 79 apresenta o elemento crítico para a verificação do contraventamento em madeira que conecta os dois arcos paralelos.

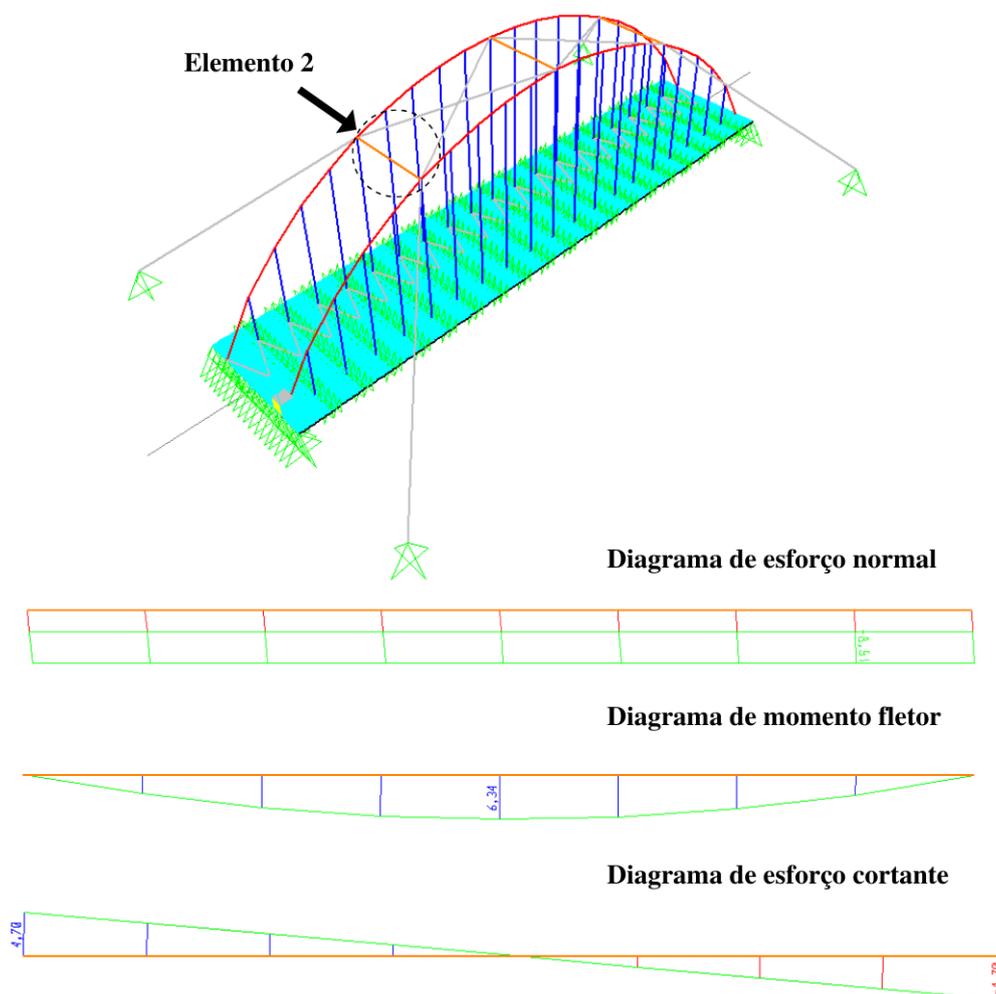


Figura 79: Esforços no contraventamento em madeira MLC e indicação do elemento crítico.

Na Tabela 45, são apresentados os esforços atuantes no elemento crítico do contraventamento em madeira. O elemento 2 apresenta o caso crítico para a verificação da flexo compressão, da estabilidade e do cisalhamento.

Tabela 45: Esforços no elemento crítico - combinação (6).

Elemento	Seção		Esforços					
	h_x (cm)	h_y (cm)	N_d (kN)	V_{dy} (kN)	V_{dx} (kN)	T_d (kN.m)	M_{dx} (kN.m)	M_{dy} (kN.m)
Contraventamento 32.5 x 65 (2)	32,5	65	-27,07	4,7	0	0	6,34	0

Considerando-se as propriedades dos materiais para os elementos em MLC, apresentadas na Tabela 18 e as propriedades da seção transversal do contraventamento apresentadas na Tabela 35, prosseguiu-se para as verificações. A Tabela 46 apresenta a classificação de esbeltez do contraventamento, aplicando-se os critérios de classificação descritos no item 4.3.1.

Tabela 46: Avaliação de esbeltez do contraventamento.

Elemento	L_{0x} (cm)	L_{0y} (cm)	λ_x	Classificação (x)	λ_y	Classificação (y)
Contraventamento 32.5 x 65 (2)	540	540	29	Coluna Curta para flexão em torno do eixo x	58	Coluna Medianamente Esbelta para flexão em torno do eixo y

Para a verificação da estabilidade global, procedeu-se a verificação do critério da rigidez, aplicando-se a equação (4.4.3) e (4.4.5), resultando em (5.1.29) e (5.1.30). Em seguida aplicou-se a equação (4.4.7), que define a área mínima A_c do contraventamento em madeira; resultando em (5.1.31). Como a área do contraventamento em madeira $A = 2112,5 \text{ cm}^2$ é superior à área A_c , então o critério da rigidez é satisfeito.

$$\alpha_m = 1 + \cos\left(\frac{\pi}{m}\right) = 1 + \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) = 1 \quad (5.1.28)$$

$$K_{br,1,min} = 2\alpha_m \frac{\pi^2 E_{co,ef} I}{L_1^3} \quad (5.1.29)$$

$$K_{br,1,min} = 2 * 1 * \frac{\pi^2 * 8039 * 10^3 * 4001667 * 10^{-8}}{12,25^3} = 3454,34 \frac{kN}{m}$$

$$K_{br} = \frac{2}{3} n K_{br,1,min} = \frac{2}{3} * 2 * 3454,34 = 4605,78 \frac{kN}{m} \quad (5.1.30)$$

$$A_c = K_{br} * \frac{L_c}{E * \cos^2(\theta)} \quad (5.1.31)$$

$$= 10^4 * 4605,78 * \frac{5,4}{14500 * 10^3 * \cos(0^\circ)} = 17,15 \text{ cm}^2$$

Além disso verificou-se o critério da resistência, aplicando-se a equação (4.4.2), para o esforço normal de compressão no arco $N_d = 1340,23 \text{ kN}$, fruto da combinação 6, resultando em (5.1.33). Em seguida foi verificada a resistência do contraventamento à flexo compressão para a força de compressão F_d .

$$F_{1d} = \frac{N_d}{150} = \frac{1340,23}{150} = 8,93 \text{ kN} \quad (5.1.32)$$

$$F_d = \frac{2}{3} * n * F_{1d} = \frac{2}{3} * 2 * 8,93 = 11,91 \text{ kN} \quad (5.1.33)$$

Conforme a Tabela 46, a esbeltez do contraventamento em madeira em relação ao eixo x é menor que 40, sendo classificado como coluna curta. Portanto não é necessário verificar a estabilidade em torno do eixo x. Entretanto, no eixo y verificou-se que é uma coluna medianamente esbelta. Portanto procedeu-se a verificação da estabilidade em torno do eixo y. Aplicando-se a equação (4.3.3), resultou em (5.1.37); em seguida, aplicou-se a equação (4.3.2), resultando em (5.1.40).

$$e_{iy} = 100 * \frac{M_{dy}}{N_d} = 100 * \frac{0}{(11,91 + 27,07)} = 0 \text{ cm} \quad (5.1.34)$$

$$e_{ay} = \frac{L_{fy}}{300} = \frac{540}{300} = 1,80 \text{ cm} \quad (5.1.35)$$

$$F_{ey} = \frac{\pi^2 E_{c,ef} I_y}{L_{efy}^2} = \frac{\pi^2 * 812 * 185944}{540^2} = 5110 \text{ kN} \quad (5.1.36)$$

$$M_{dyt} = N_d * (e_{ay} + e_{iy}) * \frac{F_{ey}}{F_{ey} - N_d} \quad (5.1.37)$$

$$= (11,91 + 27,07) * (1,8 + 0) * \frac{5110}{5110 - (11,91 + 27,07)} = 70,7 \text{ kN.cm}$$

$$\sigma N_d = \frac{N_d}{A} = \frac{(11,91 + 27,07)}{2113} = 0,018 \text{ kN/cm}^2 \quad (5.1.38)$$

$$\sigma M_{dyt} = \frac{M_{dyt}}{W_y} = \frac{70,7}{11,443} = 0,006 \text{ kN/cm}^2 \quad (5.1.39)$$

$$\text{Razão}_{oye} = \frac{\sigma N_d}{f_{cd}} + \frac{\sigma M_{dyt}}{f_{cd}} = \frac{0,018}{1,2} + \frac{0,006}{1,2} = 2,1\% \quad (5.1.40)$$

Para a verificação da resistência à flexo compressão aplicou-se as equações (4.1.6) e (4.1.7), resultando em (5.1.44) e (5.1.45), respectivamente.

$$\sigma N_d = \frac{N_d}{A} = \frac{(11,91 + 27,07)}{2113} = 0,018 \text{ kN/cm}^2 \quad (5.1.41)$$

$$\sigma M_{dx} = \frac{M_{dx}}{W_x} = \frac{6,34}{2885} = 0,03 \text{ kN/cm}^2 \quad (5.1.42)$$

$$\sigma M_{dy} = \frac{M_{dy}}{W_y} = 0 \text{ kN.cm}^2 \quad (5.1.43)$$

$$\text{Razão}_{ofc} = \left(\frac{\sigma N_d}{f_{cd}} \right)^2 + \frac{\sigma M_{dx}}{f_{cd}} + k_M * \frac{\sigma M_{dy}}{f_{cd}} \quad (5.1.44)$$

$$= \left(\frac{0,018}{1,2} \right)^2 + \frac{0,03}{1,2} + 0,5 * \frac{0}{1,2} = 2,3\%$$

$$\text{Razão}_{ofc} = \left(\frac{\sigma N_d}{f_{cd}} \right)^2 + k_M * \frac{\sigma M_{dx}}{f_{cd}} + \frac{\sigma M_{dy}}{f_{cd}} \quad (5.1.45)$$

$$\left(\frac{0,018}{1,2} \right)^2 + 0,5 * \frac{0,03}{1,2} + \frac{0}{1,2} = 1,2\%$$

Para a verificação do cisalhamento aplicou-se a equação (4.2.2) e (4.2.1), resultando em (5.1.46) e (5.1.47), respectivamente.

$$\tau_{vd} = \frac{3V_{dy}}{2bh} = \frac{3 * 4,7}{2 * 32,5 * 65} = 0,003 \text{ kN/cm}^2 \quad (5.1.46)$$

$$Razão = \frac{\tau_{vd}}{f_{vd}} = \frac{0,03}{0,187} = 1,8\% \quad (5.1.47)$$

5.1.4 Tabuleiro

O tabuleiro foi modelado a partir de um elemento de casca espessa formando uma malha de elementos finitos. As Figura 80 à Figura 83 apresentam os elementos críticos para a verificação do tabuleiro.

O momento M_x é o momento que curva o eixo x, sendo o eixo x o eixo no sentido do tráfego. Isso significa que o momento M_x causa flexão no sentido longitudinal da estrutura. O momento M_y é o momento que curva o eixo y, sendo o eixo y o eixo perpendicular ao tráfego. Isso significa que o momento M_y causa flexão no sentido transversal da estrutura.

Os elementos quadriláteros representam a malha de elementos finitos. A distribuição de cores nos diagramas é uma representação gráfica da distribuição de esforços ao longo da estrutura. As diferentes cores resultam da análise dos esforços atuantes na estrutura, considerando as diferentes posições do veículo tipo, suas interações com a estrutura e a influência das características geométricas da ponte.

Como o veículo tipo é uma carga móvel, então os esforços nos elementos constituintes da ponte variam de acordo com a posição do veículo tipo. Com o objetivo de capturar os esforços máximos foi feita uma envoltória de esforços para as diferentes posições do veículo tipo. Os esforços apresentados nas figuras abaixo são referentes a esta envoltória de esforços.

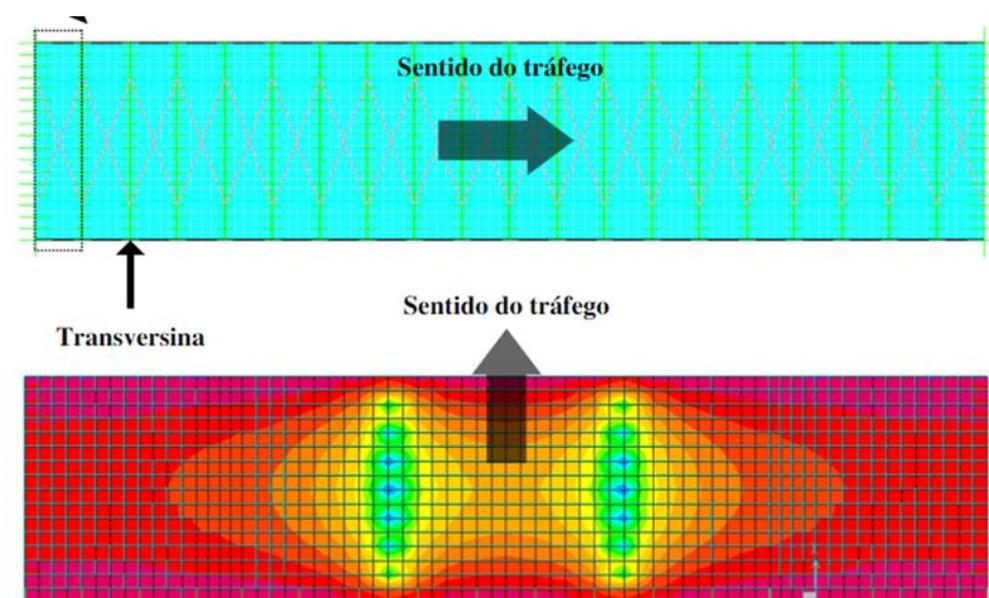


Figura 80: Momento M_x no tabuleiro.

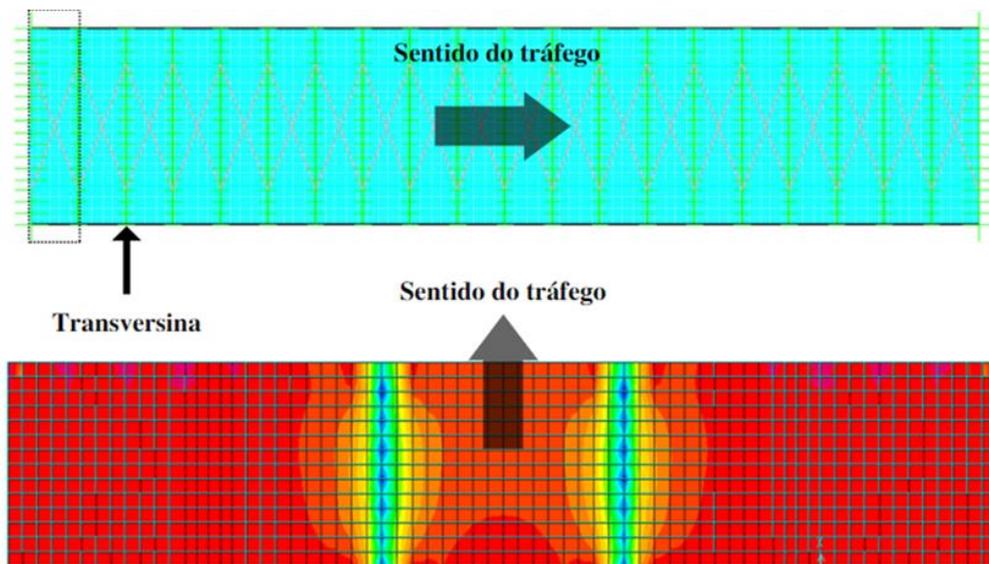


Figura 81: Momento M_y no tabuleiro.

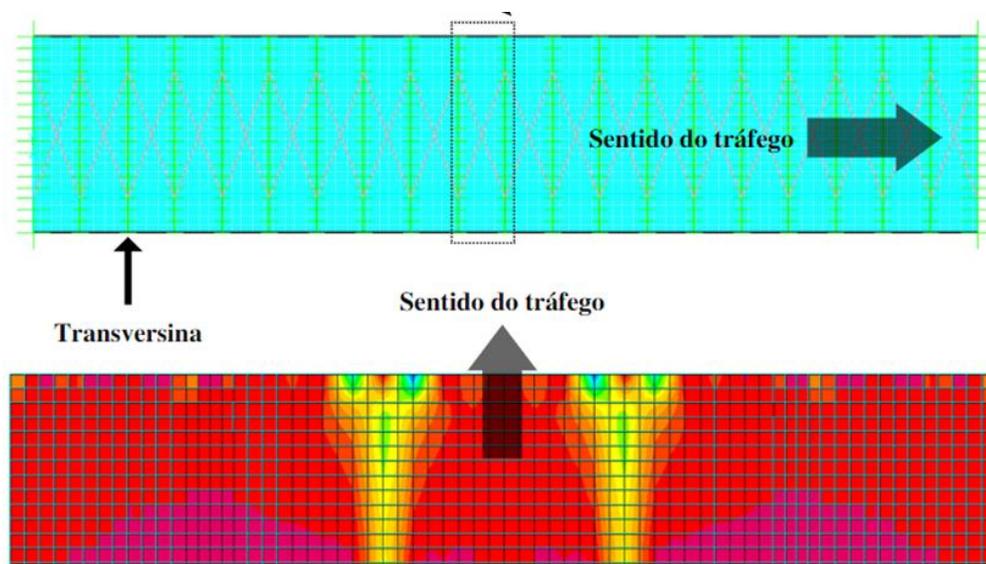


Figura 82: Cortante V_x no tabuleiro.

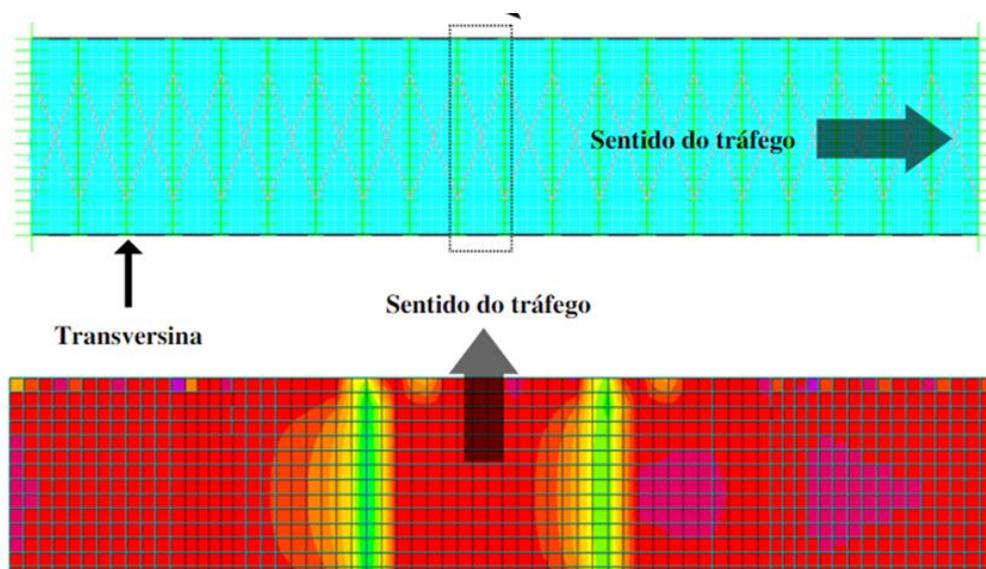


Figura 83: Cortante V_y no tabuleiro.

Na Tabela 47, são apresentados os esforços atuantes nos elementos críticos do tabuleiro. Para a verificação dos esforços do tabuleiro, não foi adotado como parâmetro o esforço máximo do elemento, pois representaria uma carga concentrada em uma área reduzida do tabuleiro. Além disso, acima do tabuleiro tem-se uma camada de concreto de 5 cm e uma camada de asfalto com espessura média de 6 cm que auxiliam na distribuição dos esforços. Portanto para a verificação do tabuleiro adotou-se o valor mais representativo para cada esforço avaliado.

Tabela 47: Esforços nos elementos críticos - combinação (6).

Elemento	Esforços			
	V_{dy} (kN)	V_{dx} (kN)	M_{dx} (kN.m)	M_{dy} (kN.m)
Tabuleiro 16 cm	84	132	36	11,2

Considerando a Tabela 36 onde são apresentadas as propriedades da seção transversal e longitudinal do tabuleiro, e a Tabela 19 onde pode se obter as propriedades dos materiais para os elementos de MLCC, procedeu-se as verificações.

Para a verificação da flexão do eixo x, para o momento $M_{dx} = 36$ kN.m, aplicou-se a equação (2.4.29), resultando em (5.1.50) para compressão e (5.1.52) para tração. E para a flexão do eixo y, para o momento $M_{dy} = 11,2$ kN.m, aplicou-se (2.4.30), resultando em (5.1.51) para compressão e (5.1.53) para tração no eixo y.

$$\sigma_{mdx} = \frac{M_{dx}}{W_{0,liq}} = \frac{100 * 36}{3442} = 1,05 \frac{kN}{cm^2} \quad (5.1.48)$$

$$\sigma_{mdy} = \frac{M_{dy}}{W_{90,liq}} = \frac{100 * 11,2}{825} = 1,36 \frac{kN}{cm^2} \quad (5.1.49)$$

$$Razão_{oc_x} = \frac{1,05}{1,41} = \frac{\sigma_{mdx}}{f_{cd}} = 74\% \quad (5.1.50)$$

$$Razão_{oc_y} = \frac{1,36}{1,41} = \frac{\sigma_{mdy}}{f_{cd}} = 96\% \quad (5.1.51)$$

$$Razão_{ot_x} = \frac{1,05}{1,51} = \frac{\sigma_{mdx}}{f_{td}} = 69\% \quad (5.1.52)$$

$$Razão_{ot_y} = \frac{1,36}{1,51} = \frac{\sigma_{mdy}}{f_{td}} = 90\% \quad (5.1.53)$$

Para a verificação do cisalhamento em relação ao eixo x e y, para os cortantes $V_{dx} = 132$ kN e $V_{dy} = 84$ kN, aplicou-se as equações (2.4.33) e (2.4.34), resultando em (5.1.56) e (5.1.57), respectivamente.

$$\tau_{v,dx} = \frac{V_{dx} * S_{0,liq}}{I_{0,liq} * b} = \frac{132 * 2350}{27533 * 100} = 0,113 \frac{kN}{cm^2} \quad (5.1.54)$$

$$\tau_{v,dy} = \frac{V_{dy} * S_{90,liq}}{I_{90,liq} * b} = \frac{84 * 850}{6600 * 100} = 0,108 \frac{kN}{cm^2} \quad (5.1.55)$$

$$\text{Razão } \tau_{v,dx} = \frac{0,113}{1,19} = \frac{\tau_{v,dx}}{f_{vd}} = 95\% \quad (5.1.56)$$

$$\text{Razão } \tau_{v,dy} = \frac{0,108}{1,19} = \frac{\tau_{v,dy}}{f_{vd}} = 91\% \quad (5.1.57)$$

Para a verificação do cisalhamento em relação ao eixo y (*rolling shear*), para os cortantes $V_{dx} = 132$ kN e $V_{dy} = 84$ kN, aplicou-se as equações (2.4.37) e (2.4.38), resultando em (5.1.60) e (5.1.61), respectivamente.

$$\tau_{Rv,dx} = \frac{V_{dx} * S_{R0,liq}}{I_{0,liq} * b} = \frac{132 * 2350}{27533 * 100} = 0,113 \frac{kN}{cm^2} \quad (5.1.58)$$

$$\tau_{Rv,dy} = \frac{V_{dy} * S_{R90,liq}}{I_{90,liq} * b} = \frac{84 * 800}{6600 * 100} = 0,102 \frac{kN}{cm^2} \quad (5.1.59)$$

$$\text{Razão } \tau_{Rvdx} = \frac{0,113}{1,35} = \frac{\tau_{Rvdx}}{f_{Rv,d}} = 83\% \quad (5.1.60)$$

$$\text{Razão } \tau_{Rvdy} = \frac{0,102}{1,35} = \frac{\tau_{Rvdy}}{f_{Rv,d}} = 75\% \quad (5.1.61)$$

5.1.5 Cabos

5.1.5.1 Cabos de Suspensão

A Figura 84 apresenta o elemento crítico para a verificação dos cabos de suspensão da ponte.

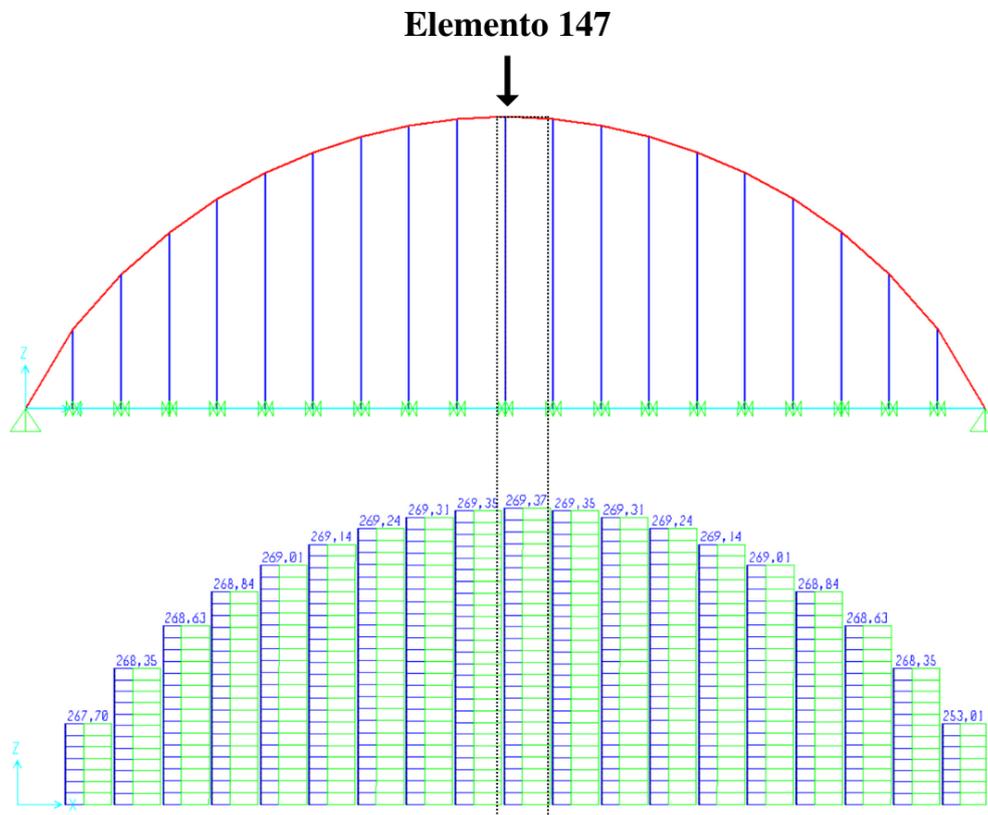


Figura 84: Esforços no cabo de suspensão, e indicação do elemento crítico.

Na Tabela 48, são apresentados os esforços atuantes no elemento 147, que apresenta o caso crítico para verificação do cabo de suspensão.

Tabela 48: Esforços no elemento crítico - combinação (5).

Elemento	Seção	Esforços					
	Diâmetro (cm)	N_d (kN)	V_{dy} (kN)	V_{dx} (kN)	T_d (kN.m)	M_{dx} (kN.m)	M_{dy} (kN.m)
Cabo de Suspensão 42 mm (147)	4,2	269,37	0	0	0	0	0

Considerando-se as propriedades dos materiais para os elementos em cabo apresentadas na Tabela 20 e o diâmetro de 42 mm do cabo, verificou-se o cabo aplicando-se a equação (2.4.61), com os dados do catálogo $CRM = 1196,8$ kN e $FS = 4$, resultando em (5.1.62).

$$Razão = \frac{N_d * FS}{CRM \text{ Fabricante}} = \frac{269,37 * 4}{1196,8} = 90\% \quad (5.1.62)$$

5.1.5.2 Cabos de Contraventamento

A Figura 85 apresenta os cabos de contraventamento.

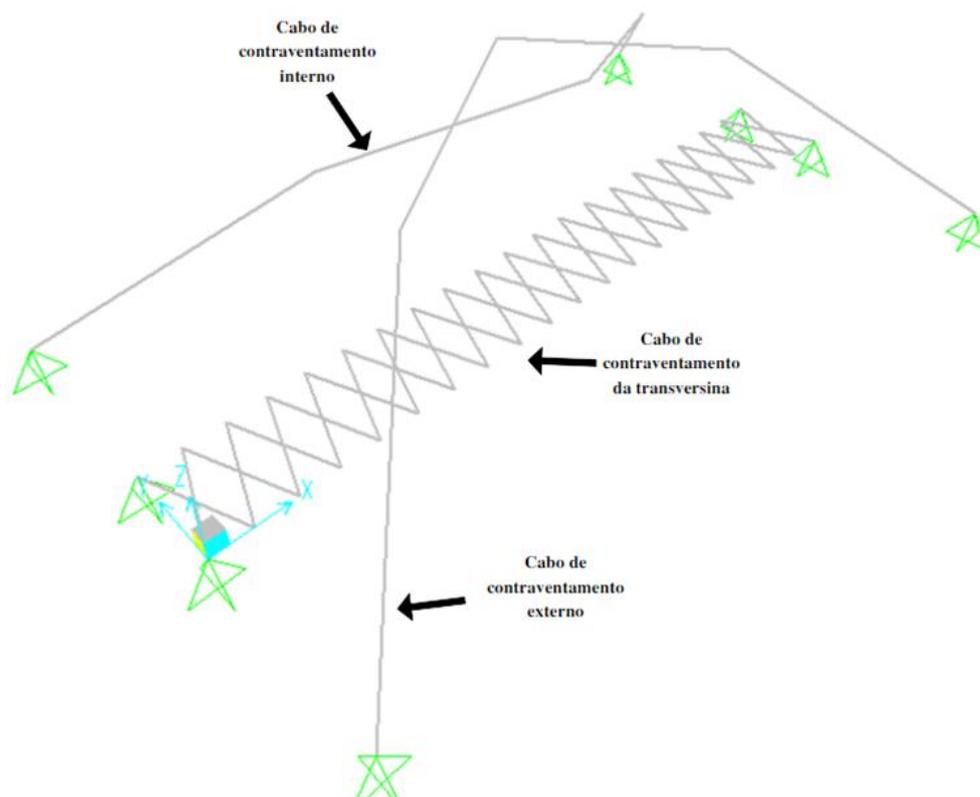


Figura 85: Imagem representativa dos cabos de contraventamento.

Considerando-se as propriedades dos materiais para os elementos em cabo apresentadas na Tabela 18, na Tabela 20 e o diâmetro de 102 mm do cabo de contraventamento do arco, procedeu-se as verificações.

Para o cabo externo:

Para o cabo de contraventamento do arco aplicou-se a verificação do critério da resistência por meio da equação (4.4.2) para o esforço normal no arco $N_d = 1340,23$ kN, resultando em (5.1.64), que é a força necessária para prover estabilidade ao arco. A partir da análise da Figura 86 obtém-se o ângulo $\theta = 54,7^\circ$ que o cabo faz com a direção perpendicular ao arco, no ponto de contato do cabo com o arco. Com este ângulo calcula-se a força de tração no cabo T_d , equação (5.1.65), para absorver a força F_d . Por fim aplicou-se a equação (2.4.61), com os dados do catálogo $CRM = 5836,95$ kN e $FS = 4$, resultando em (5.1.66)

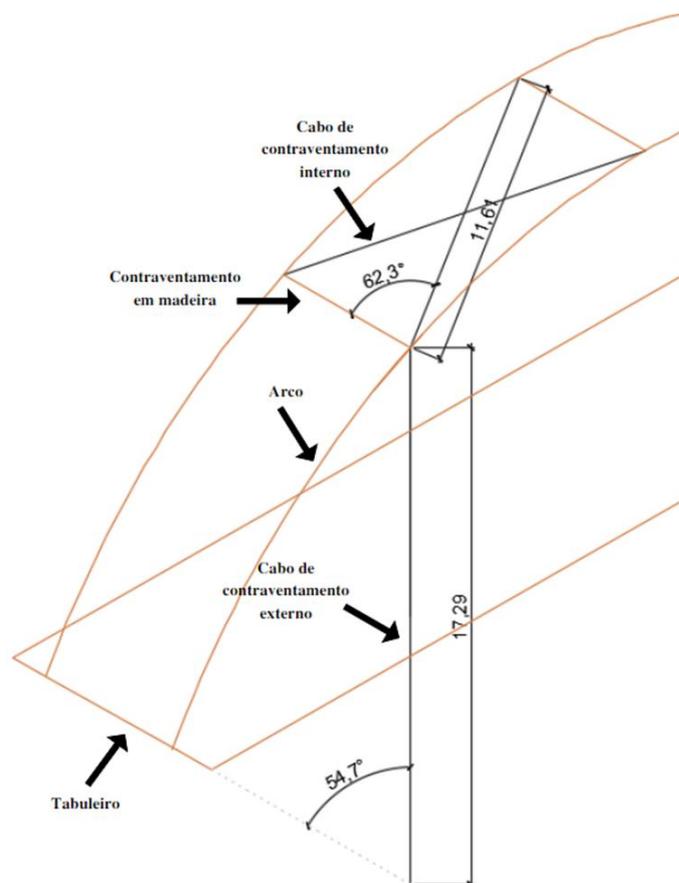


Figura 86: Detalhe do ângulo do cabo em relação ao contraventamento em madeira.

$$F_{1d} = \frac{N_d}{150} = \frac{1340,23}{150} = 8,9 \text{ kN} \quad (5.1.63)$$

$$F_d = \frac{2}{3} n F_{1d} = \frac{2}{3} * 2 * F_{1d} = 11,91 \text{ kN} \quad (5.1.64)$$

$$T_d = \frac{F_d}{\cos(\theta)} = \frac{11,91}{\cos(54,7)} = 20,61 \text{ kN} \quad (5.1.65)$$

$$\text{Razão}T_c = \frac{T_d * FS}{CRM} = \frac{20,61 * 4}{5836,95} = 2,44\% \quad (5.1.66)$$

Com as propriedades dos materiais obtidas na Tabela 18 e Tabela 20, e com as propriedades das seções obtidas na Tabela 35, realizou-se a verificação do critério da rigidez. Para a verificação do critério da rigidez, aplicou-se a equação (4.4.7), resultando em (5.1.71).

$$\alpha_m = 1 + \cos\left(\frac{\pi}{m}\right) = \alpha_m = 1 + \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) = 1 \quad (5.1.67)$$

$$k_{br,1,min} = 2\alpha_m \frac{\pi^2 E_{co,ef} I}{L_1^3} \quad (5.1.68)$$

$$= \frac{2 * 1 * \pi^2 * 8039 * 10^3 * 4001667 * 10^{-8}}{12,25^3} = 3454,33 \frac{kN}{m}$$

$$K_{br} = \frac{2}{3} n k_{br,1,min} = \frac{2}{3} * 2 * 3454,33 = 4605,78 \frac{kN}{m} \quad (5.1.69)$$

$$A_c = K_{br} * \frac{L_c}{E * \cos^2(\theta)} \quad (5.1.70)$$

$$= 4605,78 * \frac{17,29}{100 * 10^6 * \cos^2(54,7^\circ)} * 10^4 = 23,85 \text{ cm}^2$$

$$\text{Razão}A_c = \frac{A_c}{A} = \frac{23,85}{42,66} = 56\% \quad (5.1.71)$$

Para o cabo interno:

Para o dimensionamento dos cabos internos de contraventamento são válidos os mesmos valores de F_d e K_{br} calculados em (5.1.64) e (5.1.69), respectivamente; a única coisa que muda é o ângulo $\theta = 62,3$. Com este ângulo calcula-se a força de tração no cabo T_d , equação (5.1.72), para absorver a força F_d . Por fim aplicou-se a equação (2.4.61), com os dados do catálogo $CRM = 5836,95$ kN e $FS = 4$, resultando em (5.1.73).

$$T_d = \frac{F_d}{\cos(\theta)} = \frac{11,91}{\cos(62,3)} = 25,62 \text{ kN} \quad (5.1.72)$$

$$\text{Razão}A_c = \frac{T_d * FS}{CRM} = \frac{25,62 * 4}{5836,95} = 1,75\% \quad (5.1.73)$$

Com as propriedades dos materiais obtidas na Tabela 18 e Tabela 20, e com as propriedades das seções obtidas na Tabela 35, realizou-se a verificação do critério da rigidez. Para a verificação do critério da rigidez, aplicou-se a equação (4.4.7), resultando em (5.1.75). Como a razão foi inferior a 100%, então o critério da rigidez foi satisfeito.

$$A_c = K_{br} * \frac{L_c}{E * \cos^2(\theta)} \quad (5.1.74)$$

$$= 4605,78 * \frac{11,61}{100 * 10^6 * \cos^2(62,3^\circ)} * 10^4 = 24,75 \text{ cm}^2$$

$$\text{Razão}A_c = \frac{A_c}{A} = \frac{24,75}{42,66} = 58\% \quad (5.1.75)$$

5.2 ELU NBR 7190 (2022) – MODELO 22

5.2.1 Arco

O arco foi modelado como uma série de elementos retos. A Figura 77 apresenta os elementos críticos para a verificação do arco. Na Tabela 49 são apresentados os esforços atuantes nos elementos críticos do arco. O elemento 106 apresenta a seção crítica para a verificação da estabilidade do arco e da flexo compressão. O elemento 109 apresenta a seção crítica para verificação do cisalhamento.

Tabela 49: Esforços nos elementos críticos - combinação (3)

Elemento	Seção		Esforços					
	h_x (cm)	h_y (cm)	N_d (kN)	V_{dy} (kN)	V_{dx} (kN)	T_d (kN.m)	M_{dx} (kN.m)	M_{dy} (kN.m)
Arco 70 x 140 106	70	140	-1508,1	-142,8	0	0,07	-1919,42	-0,01
Arco 70 x 140 109	70	140	-1377,78	362,5	0	0,03	-478,5	-0,01

Procedeu-se às verificações utilizando as propriedades dos elementos em MLC, conforme evidenciado na Tabela 18, e as propriedades da seção transversal do arco, conforme fornecidas na Tabela 35.

A Tabela 50 apresenta o coeficiente para a verificação de estabilidade do arco, conforme a equação (2.4.4).

Tabela 50: Avaliação de esbeltez do arco.

Elemento	L_{0x} (cm)	L_{0y} (cm)	λ_x	λ_y
Arco 70 x 140	3063	1225	76	60,6

Para a verificação da estabilidade, aplicou-se a equação (4.3.14) e (4.3.15), resultando em (5.2.10) e (5.2.11), para flexão em torno dos eixos x e y, respectivamente.

$$\lambda_{relx} = \frac{\lambda_x}{\pi} \sqrt{\frac{f_{ck}}{Ec_{0,05}}} = \frac{75,8}{\pi} \sqrt{\frac{23}{8000}} = 1,29 > 0,3 \quad (5.2.1)$$

$$\lambda_{rely} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{ck}}{Ec_{0,05}}} = \frac{60,6}{\pi} \sqrt{\frac{23}{8000}} = 1,03 > 0,3 \quad (5.2.2)$$

$$k_x = 0,5 * (1 + (\beta_c * (\lambda_{relx} - 0,3))) + (\lambda_{relx}^2) \\ = 0,5 * [1 + (0,1 * (0,29 - 0,3)) + 0,29^2] = 1,39 \quad (5.2.3)$$

$$k_y = 0,5 * (1 + (\beta_c * (\lambda_{rely} - 0,3))) + (\lambda_{rely}^2) \\ = 0,5 * [1 + (0,1 * (1,03 - 0,3)) + 1,03^2] = 1,07 \quad (5.2.4)$$

$$k_{cx} = \frac{1}{k_x + \sqrt{k_x^2 - \lambda_{relx}^2}} = \frac{1}{1,39 + \sqrt{1,39^2 - 1,29^2}} = 0,53 \quad (5.2.5)$$

$$k_{cy} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rely}^2}} = \frac{1}{1,07 + \sqrt{1,07^2 - 1,03^2}} = 0,74 \quad (5.2.6)$$

$$\sigma N_d = \frac{N_d}{A} = \frac{1508,1}{9800} = 0,15 \text{ kN/cm}^2 \quad (5.2.7)$$

$$\sigma M_{dx} = \frac{M_{dx}}{W_x} = \frac{1919,42}{228667} = 0,84 \text{ kN/cm}^2 \quad (5.2.8)$$

$$\sigma M_{dy} = \frac{M_{dy}}{W_y} = \frac{0}{114333} = 0,00 \text{ kN/cm}^2 \quad (5.2.9)$$

$$\begin{aligned} \text{Razão}_{xe} &= \frac{\sigma N_d}{k_{cx} * f_{cd}} + \frac{\sigma M_{dx}}{f_{md}} + k_M * \frac{\sigma M_{dy}}{f_{md}} \\ &= \frac{0,15}{0,53 * 0,86} + \frac{0,84}{1,13} + 0,7 * \frac{0}{1,13} = 108\% \end{aligned} \quad (5.2.10)$$

$$\begin{aligned} \text{Razão}_{ye} &= \frac{\sigma N_d}{k_{cy} * f_{cd}} + k_M * \frac{\sigma M_{dx}}{f_{md}} + \frac{\sigma M_{dy}}{f_{md}} \\ &= \frac{0,15}{0,74 * 0,86} + 0,7 * \frac{0,84}{1,13} + \frac{0}{1,13} = 76\% \end{aligned} \quad (5.2.11)$$

Foi executada a verificação da flexo compressão com base nas equações (4.1.8) e (4.1.9), obtendo-se os resultados expressos pelas equações (5.2.15) e (5.2.16), respectivamente.

$$\sigma N_d = \frac{1508,1}{9800} = 0,15 \text{ kN.cm}^2 \quad (5.2.12)$$

$$\sigma M_{dx} = \frac{1919,42}{228667} = 0,84 \text{ kN.cm}^2 \quad (5.2.13)$$

$$\sigma M_{dy} = \frac{0}{114333} = 0,00 \text{ kN.cm}^2 \quad (5.2.14)$$

$$\begin{aligned} \text{Razão}_{fc} &= \left(\frac{\sigma N_d}{f_{cd}} \right)^2 + \frac{\sigma M_{dx}}{f_{md}} + k_M * \frac{\sigma M_{dy}}{f_{m,d}} \\ &= \left(\frac{0,15}{0,86} \right)^2 + \frac{0,84}{1,13} + 0,7 * \frac{0}{1,13} = 104\% \end{aligned} \quad (5.2.15)$$

$$\begin{aligned} \text{Razão}_{fc} &= \left(\frac{\sigma N_d}{f_{cd}} \right)^2 + k_M * \frac{\sigma M_{dx}}{f_{md}} + \frac{\sigma M_{dy}}{f_{m,d}} \\ &= \left(\frac{0,15}{0,86} \right)^2 + 0,7 * \frac{0,84}{1,13} + \frac{0}{1,13} = 55\% \end{aligned} \quad (5.2.16)$$

Foi executada a verificação do cisalhamento com base nas equações (4.2.2) e (4.2.1), obtendo-se os resultados expressos pelas equações (5.2.17) e (5.2.18), respectivamente.

$$\tau_{vdy} = \frac{3 * V_{dy}}{2 * A} = \frac{3 * 362,5}{2 * 9800} = 0,06 \text{ kN/cm}^2 \quad (5.2.17)$$

$$\text{Razão} = \frac{\tau_{vdy}}{f_{vd}} = \frac{0,06}{0,117} = 47\% \quad (5.2.18)$$

A partir das verificações realizadas, verifica-se a necessidade de redimensionamento do arco, pois não atendeu aos critérios de flexo compressão e de estabilidade à compressão. Sendo assim, aumentou-se a seção do arco para 80 cm x 160 cm e foram feitas as verificações.

A Tabela 51 fornece informações sobre os esforços atuantes nos elementos críticos do arco. O elemento 106 é considerado a seção crítica para a verificação da estabilidade do arco e da flexo compressão, enquanto o elemento 109 é a seção crítica para a verificação do cisalhamento. As propriedades da seção transversal do arco são apresentadas na Tabela 35.

Tabela 51: Esforços nos elementos críticos - combinação (3)

Elemento	Seção		Esforços					
	h_x (cm)	h_y (cm)	N_d (kN)	V_{dy} (kN)	V_{dx} (kN)	T_d (kN.m)	M_{dx} (kN.m)	M_{dy} (kN.m)
Arco 80 x 160 (106)	80	160	-1570,3	-142,2	0	0,07	-1970,6	0,05
Arco 80 x 160 (109)	80	160	-1437,3	376,3	0	0,1	-509,46	-0,03

Com base nas informações contidas na Tabela 17 e na Tabela 18 para os elementos em MLC e na Tabela 35 para a seção transversal do arco, procedeu-se às verificações. A Tabela 52 apresenta o coeficiente para a verificação de estabilidade do arco, conforme a equação (2.4.4).

Tabela 52: Avaliação de esbeltez do arco.

Elemento	L_{0x} (cm)	L_{0y} (cm)	λ_x	λ_y
Arco 80 x 160	3063	1225	66	53

Realizou-se a verificação da estabilidade aplicando-se as equações (4.3.14) e (4.3.15), resultando nas expressões (5.2.28) e (5.2.29), respectivamente.

$$\lambda_{relx} = \frac{\lambda_x}{\pi} \sqrt{\frac{f_{ck}}{Ec_{0,05}}} = \frac{66}{\pi} \sqrt{\frac{23}{8000}} = 1,13 > 0,3 \quad (5.2.19)$$

$$\lambda_{rely} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{ck}}{Ec_{0,05}}} = \frac{53}{\pi} \sqrt{\frac{23}{8000}} = 0,91 > 0,3 \quad (5.2.20)$$

$$k_x = 0,5 * (1 + (\beta_c * (\lambda_{relx} - 0,3))) + (\lambda_{relx}^2) \\ = 0,5 * [(1 + (0,1 * (1,13 - 0,3))) + (1,13^2)] = 1,18 \quad (5.2.21)$$

$$k_y = 0,5 * (1 + (\beta_c * (\lambda_{rely} - 0,3))) + (\lambda_{rely}^2) \\ = 0,5 * [(1 + (0,1 * (0,91 - 0,3))) + (0,91^2)] = 0,94 \quad (5.2.22)$$

$$k_{cx} = \frac{1}{k_x + \sqrt{k_x^2 - \lambda_{relx}^2}} = \frac{1}{1,18 + \sqrt{1,18^2 - 1,13^2}} = 0,66 \quad (5.2.23)$$

$$k_{cy} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rely}^2}} = \frac{1}{0,94 + \sqrt{0,94^2 - 0,91^2}} = 0,92 \quad (5.2.24)$$

$$\sigma N_d = \frac{N_d}{A} = \frac{1570,33}{12800} = 0,12 \text{ kN.cm}^2 \quad (5.2.25)$$

$$\sigma M_{dx} = \frac{M_{dx}}{W_x} = \frac{1970,57}{341333} = 0,58 \text{ kN.cm}^2 \quad (5.2.26)$$

$$\sigma M_{dy} = \frac{M_{dy}}{W_y} = \frac{0}{170667} = 0,00 \text{ kN.cm}^2 \quad (5.2.27)$$

$$\begin{aligned} \text{Razão}_{xe} &= \frac{\sigma N_d}{k_{cx} * f_{cd}} + \frac{\sigma M_{dxt}}{f_{md}} + k_M * \frac{\sigma M_{dyt}}{f_{md}} \\ &= \frac{0,12}{0,66 * 0,87} + \frac{0,58}{1,13} + 0,7 * \frac{0}{1,13} = 73\% \end{aligned} \quad (5.2.28)$$

$$\begin{aligned} \text{Razão}_{ye} &= \frac{\sigma N_d}{k_{cy} * f_{cd}} + k_M * \frac{\sigma M_{dxt}}{f_{md}} + \frac{\sigma M_{dyt}}{f_{md}} \\ &= \frac{0,12}{0,92 * 0,87} + 0,7 * \frac{0,58}{1,13} + \frac{0}{1,13} = 53\% \end{aligned} \quad (5.2.29)$$

Para a verificação da flexo compressão, as equações (4.1.8) e (4.1.9) foram empregadas, resultando em (5.2.33) e (5.2.34), respectivamente.

$$\sigma N_d = \frac{1570,33}{12800} = 0,12 \text{ kN.cm}^2 \quad (5.2.30)$$

$$\sigma M_{dx} = \frac{1970,57}{341333} = 0,58 \text{ kN.cm}^2 \quad (5.2.31)$$

$$\sigma M_{dyt} = \frac{0}{170667} = 0,00 \text{ kN.cm}^2 \quad (5.2.32)$$

$$\begin{aligned} \text{Razão}_{fc} &= \left(\frac{\sigma N_d}{f_{cd}} \right)^2 + \frac{\sigma M_{dx}}{f_{md}} + k_M \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \\ &= \left(\frac{0,12}{0,87} \right)^2 + \frac{0,58}{1,13} + 0,7 \frac{0}{1,13} = 53\% \end{aligned} \quad (5.2.33)$$

$$\begin{aligned} \text{Razão}_{fc} &= \left(\frac{\sigma N_d}{f_{cd}} \right)^2 + k_M \frac{\sigma M_{dx}}{f_{md}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \\ &= \left(\frac{0,12}{0,87} \right)^2 + 0,7 \frac{0,58}{1,13} + \frac{0}{1,13} = 38\% \end{aligned} \quad (5.2.34)$$

Foi executada a verificação do cisalhamento com base nas equações (4.2.2) e (4.2.1), obtendo-se os resultados expressos pelas equações (5.2.35) e (5.2.36), respectivamente.

$$\tau_{vdy} = \frac{3 * V_{dy}}{2 * A} = \frac{3 * 376,3}{2 * 12800} = 0,044 \text{ kN/cm}^2 \quad (5.2.35)$$

$$\text{Razão} = \frac{\tau_{vdy}}{f_{vd}} = 38\% \quad (5.2.36)$$

O aumento da seção deste elemento não causa impacto no tabuleiro ou transversinas, entretanto causa impacto nos esforços do contraventamento. Portanto o contraventamento será verificado para a seção do arco de 80x160cm.

5.2.2 Transversina

A Figura 78 ilustra os elementos críticos que apresentam os maiores esforços para a verificação da transversina.

Na Tabela 53, são apresentados os esforços aplicados nos elementos críticos da transversina. O elemento 1043 é identificado como o caso crítico para a verificação da

flexão simples, enquanto o elemento 949 destaca-se como o caso crítico para a verificação do cisalhamento.

Tabela 53: Esforços nos elementos críticos - combinação (4).

Elemento	Seção		Esforços					
	h_x (cm)	h_y (cm)	N_d (kN)	V_{dy} (kN)	V_{dx} (kN)	T_d (kN.m)	M_{dx} (kN.m)	M_{dy} (kN.m)
Transversina 41 x 82 (1043)	41	82	0	0	0	0	339,28	0
Transversina 41 x 82 (949)	41	82	0	227,8	0	0	-12,61	0

Com base nas informações contidas na Tabela 18 para os elementos em MLC, prosseguiu-se a verificação da flexão simples, do cisalhamento e da estabilidade lateral da transversina.

Foi executada a verificação da flexão simples compressão com base na equação (4.1.5), obtendo-se o resultado expresso pela equação (5.2.38), respectivamente.

$$\sigma_{md} = \frac{6M_{dx}}{b * h^2} = \frac{6 * 339,28}{41 * 82^2} = 0,74 \text{ kN/cm}^2 \quad (5.2.37)$$

$$\text{Razão} = \frac{\sigma_{md}}{0,1 * f_{cd}} = \frac{0,74}{0,1 * 8,74} = 85\% \quad (5.2.38)$$

A verificação do cisalhamento foi executada com base nas equações (4.2.2) e (4.2.1), obtendo-se, respectivamente, (5.2.39) e (5.2.40).

$$\tau_{vd} = \frac{3V_d}{2bh} = \frac{3 * 227,8}{2 * 41 * 82} = 0,102 \text{ kN/cm}^2 \quad (5.2.39)$$

$$\text{Razão} = \frac{\tau_{vd}}{0,1 * f_{vd}} = \frac{0,102}{0,1 * 1,18} = 86\% \quad (5.2.40)$$

Para verificação da flambagem lateral, definiu-se o valor de $L_{ef} = 5,4$ m, sendo a distância entre os pontos de apoio da transversina, considerando-se que estes contêm a rotação em torno do eixo longitudinal da peça Figura 51. Dessa forma aplicou-se as equações (4.3.17) e (4.3.16), resultando em (5.2.41) e (5.2.42), respectivamente.

$$\beta_m = \frac{1}{0,26 * \pi} * \frac{\sqrt{\left(\frac{h}{b}\right)^3}}{\sqrt{\left(\frac{h}{b}\right) - 0,63}} * \frac{4}{1,4} \quad (5.2.41)$$

$$= \frac{1}{0,26 * \pi} * \frac{\sqrt{\left(\frac{82}{41}\right)^3}}{\sqrt{\left(\frac{82}{41}\right) - 0,63}} * \frac{4}{1,4} = 8,45$$

$$L_{ef,calc} = 0,01 * \frac{E_{c,ef} * b}{\beta_m * f_{m,d}} = 0,01 * \frac{6384 * 41}{8,45 * 11,4} = 27,17 \text{ m} > L_{ef} \quad (5.2.42)$$

Após a constatação de que $L_{ef,calc} > L_{ef}$, a verificação de tensões de flexão com flambagem lateral pode ser dispensada.

5.2.3 Contraventamentos

Na Tabela 54, são apresentados os esforços críticos do para verificação do contraventamento, representados pela Figura 79.

Tabela 54: Esforços nos elementos críticos - combinação (4)

Elemento	Seção		Esforços					
	h_x (cm)	h_y (cm)	N_d (kN)	V_{dy} (kN)	V_{dx} (kN)	T_d (kN.m)	M_{dx} (kN.m)	M_{dy} (kN.m)
Contraventamento 41 x 82 (2)	41	82	-23,5	5,12	0	0	6,91	0

Utilizando as propriedades dos elementos em MLC, apresentadas na Tabela 17 e na Tabela 18, e as propriedades da seção transversal do arco, conforme fornecidas na Tabela 35, procedeu-se as verificações. A Tabela 55 apresenta o coeficiente para a verificação de estabilidade do contraventamento, conforme a equação (2.4.4).

Tabela 55: Avaliação de esbeltez do contraventamento.

Elemento	L_{0x} (cm)	L_{0y} (cm)	λ_x	λ_y
Contraventamento 41 x 82 (2)	540	540	23	46

Para a verificação da estabilidade global, procedeu-se a verificação através do critério da rigidez aplicando a equação (4.4.3) e (4.4.5), resultando em (5.2.44) e (5.2.45). Em seguida aplicou-se a equação (4.4.7), que define a área mínima A_c do contraventamento em madeira; resultando em (5.2.46). Como a área do contraventamento em madeira $A = 3362 \text{ cm}^2$ é superior à área A_c , então o critério da rigidez é satisfeito.

$$\alpha_m = 1 + \cos\left(\frac{\pi}{m}\right) = 1 + \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) = 1 \quad (5.2.43)$$

$$K_{br,1,min} = 2\alpha_m \frac{\pi^2 E_{co,ef} I}{L_1^3} \quad (5.2.44)$$

$$K_{br,1,min} = 2 * 1 * \frac{\pi^2 * 6320 * 10^3 * 6826667 * 10^{-8}}{12,25^3} = 4632,84 \frac{kN}{m}$$

$$K_{br} = \frac{2}{3} n K_{br,1,min} = \frac{2}{3} * 2 * 4632,84 = 6177,12 \text{ kN/m} \quad (5.2.45)$$

$$A_c = K_{br} * \frac{L_c}{E * \cos^2(\theta)} \quad (5.2.46)$$

$$= 10^4 * 6177,12 * \frac{5,4}{12000 * 10^3 * \cos(0^\circ)} = 27,80 \text{ cm}^2$$

Além disso verificou-se o critério da resistência, aplicando-se a equação (4.4.2), para o esforço normal de compressão no arco $N_d = 1421,23 \text{ kN}$, fruto da combinação 6,

resultando em (5.2.48). Em seguida foi verificada a resistência do contraventamento à flexo compressão para a força de compressão F_d somada ao esforço normal atuante no contraventamento de $N_d = -23,5$ kN, apresentado na Tabela 54.

$$F_{1d} = \frac{N_d}{150} = \frac{1421,23}{150} = 9,48 \text{ kN} \quad (5.2.47)$$

$$F_d = \frac{2}{3} * n * F_{1d} = \frac{2}{3} * 2 * 9,48 = 12,64 \text{ kN} \quad (5.2.48)$$

Para a verificação da estabilidade, aplicou-se a equação (4.3.14) e (4.3.15), resultando em (5.2.58) e (5.2.59), para a verificação da estabilidade, para flexão em torno dos eixos x e y, respectivamente.

$$\lambda_{relx} = \frac{\lambda_x}{\pi} \sqrt{\frac{f_{ck}}{Ec_{0,05}}} = \frac{23}{\pi} \sqrt{\frac{23}{8000}} = 0,4 > 0,3 \quad (5.2.49)$$

$$\lambda_{rely} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{ck}}{Ec_{0,05}}} = \frac{46}{\pi} \sqrt{\frac{23}{8000}} = 0,8 > 0,3 \quad (5.2.50)$$

$$k_x = 0,5 * (1 + (\beta_c * (\lambda_{relx} - 0,3))) + (\lambda_{relx}^2) \\ = 0,5 * (1 + (0,1 * (0,4 - 0,3))) + (0,4^2) = 0,58 \quad (5.2.51)$$

$$k_y = 0,5 * (1 + (\beta_c * (\lambda_{rely} - 0,3))) + (\lambda_{rely}^2) \\ = 0,5 * (1 + (0,1 * (0,8 - 0,3))) + (0,8^2) = 0,83 \quad (5.2.52)$$

$$k_{cx} = \frac{1}{k_x + \sqrt{k_x^2 - \lambda_{relx}^2}} = \frac{1}{0,58 + \sqrt{0,58^2 - 0,4^2}} = 0,99 \quad (5.2.53)$$

$$k_{cy} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rely}^2}} = \frac{1}{0,83 + \sqrt{0,83^2 - 0,8^2}} = 0,90 \quad (5.2.54)$$

$$\sigma N_d = \frac{N_d}{A} = \frac{(12,64 + 36,14)}{3362} = 0,01 \text{ kN.cm}^2 \quad (5.2.55)$$

$$\sigma M_{dx} = \frac{M_{dx}}{W_x} = \frac{6,91}{45947} = 0,015 \text{ kN.cm}^2 \quad (5.2.56)$$

$$\sigma M_{dy} = \frac{M_{dy}}{W_y} = \frac{0}{22974} = 0 \text{ kN.cm}^2 \quad (5.2.57)$$

$$\text{Razão}_{xe} = \frac{\sigma N_d}{k_{cx} * f_{cd}} + \frac{\sigma M_{dx}}{f_{md}} + k_M * \frac{\sigma M_{dy}}{f_{md}} \\ = \frac{0,01}{0,99 * 0,87} + \frac{0,015}{1,14} + 0,7 * \frac{0}{1,14} = 2,6\% \quad (5.2.58)$$

$$\text{Razão}_{ye} = \frac{\sigma N_d}{k_{cy} * f_{cd}} + k_M * \frac{\sigma M_{dx}}{f_{md}} + \frac{\sigma M_{dy}}{f_{md}} \\ = \frac{0,01}{0,90 * 0,87} + 0,7 * \frac{0,015}{1,14} + \frac{0}{1,14} = 2,3\% \quad (5.2.59)$$

Foi executada a verificação da flexo compressão com base nas equações (4.1.8) e (4.1.9), obtendo-se os resultados expressos pelas equações (5.2.63) e (5.2.64), respectivamente.

$$\sigma N_d = \frac{N_d}{A} = \frac{(12,64 + 36,14)}{3362} = 0,01 \text{ kN.cm}^2 \quad (5.2.60)$$

$$\sigma M_{dx} = \frac{M_{dx}}{W_x} = \frac{6,91}{45947} = 0,015 \text{ kN.cm}^2 \quad (5.2.61)$$

$$\sigma M_{dyt} = \frac{M_{dyt}}{W_y} = \frac{0}{22974} = 0,000 \text{ kN.cm}^2 \quad (5.2.62)$$

$$\begin{aligned} \text{Razão}_{fc} &= \left(\frac{\sigma N_d}{f_{cd}}\right)^2 + \frac{\sigma M_{dx}}{f_{md}} + k_M * \frac{\sigma M_{dy}}{f_{md}} \\ &= \left(\frac{0,01}{0,87}\right)^2 + \frac{0,015}{1,14} + 0,7 * \frac{0}{1,14} = 1,3\% \end{aligned} \quad (5.2.63)$$

$$\begin{aligned} \text{Razão}_{fc} &= \left(\frac{\sigma N_d}{f_{cd}}\right)^2 + k_M * \frac{\sigma M_{dx}}{f_{md}} + \frac{\sigma M_{dy}}{f_{md}} \\ &= \left(\frac{0,01}{0,87}\right)^2 + 0,7 * \frac{0,015}{1,14} + \frac{0}{1,14} = 0,9\% \end{aligned} \quad (5.2.64)$$

Foi executada a verificação do cisalhamento com base nas equações (4.2.2) e (4.2.1), obtendo-se os resultados expressos pelas equações (5.2.65) e (5.2.66), respectivamente.

$$\tau_{dy} = \frac{3 * V_{dy}}{2 * A} = \frac{3 * 5,12}{2 * 3362} = 0,002 \text{ kN/cm}^2 \quad (5.2.65)$$

$$\text{Razão} = \frac{\tau_{dy}}{f_{vd}} = \frac{0,02}{0,118} = 1,9\% \quad (5.2.66)$$

5.2.4 Tabuleiro

O tabuleiro foi modelado a partir de um elemento de casca espessa formando uma malha de elementos finitos. As Figura 80 à Figura 83 apresentam os elementos críticos para a verificação do tabuleiro. Na Tabela 56, são apresentados os esforços atuantes nos elementos críticos do tabuleiro.

Tabela 56: Esforços nos elementos críticos - combinação (4)

Elemento	Esforços			
	V_{dy} (kN)	V_{dx} (kN)	M_{dx} (kN.m)	M_{dy} (kN.m)
Tabuleiro 20 cm	136	196	60,5	20

Considerando a Tabela 36 onde são apresentadas as propriedades da seção transversal e longitudinal do tabuleiro e a Tabela 19 onde pode se obter as propriedades dos materiais para os elementos de MLCC, procedeu-se para as verificações.

Para a verificação da flexão para os momentos $M_{dx} = 60,5$ kNm e $M_{dy} = 20$ kNm, aplicou-se as equações (2.4.29) e (2.4.30), resultando em (5.2.69) e (5.2.70), para flexão em torno dos eixos x e y, respectivamente.

$$\sigma_{mdx} = \frac{M_{dx}}{W_{0,liq}} = \frac{60,5}{5280} = 1,15 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \quad (5.2.67)$$

$$\sigma_{mdy} = \frac{M_{dy}}{W_{90,liq}} = \frac{20}{1387} = 1,44 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \quad (5.2.68)$$

$$\text{Razão}_{m_x} = \frac{\sigma_{mdx}}{f_{md}} = \frac{1,15}{1,52} = 75\% \quad (5.2.69)$$

$$Razão_{m_y} = \frac{\sigma_{m_{dy}}}{f_{md}} = \frac{1,44}{1,52} = 95\% \quad (5.2.70)$$

Para a verificação do cisalhamento em relação ao eixo x e y, para os cortantes $V_{dx} = 196$ kN e $V_{dy} = 119$ kN, aplicou-se as equações (2.4.33) e (2.4.34), resultando em (5.2.73) e (5.2.74), respectivamente.

$$\tau_{v,dx} = \frac{V_{dx} * S_{0,liq}}{I_{0,liq} * b} = \frac{196 * 3400}{52800 * 100} = 0,126 \frac{kN}{cm^2} \quad (5.2.71)$$

$$\tau_{v,dy} = \frac{V_{dy} * S_{90,liq}}{I_{90,liq} * b} = \frac{119 * 1600}{13867 * 100} = 0,137 \frac{kN}{cm^2} \quad (5.2.72)$$

$$Razão_{\tau_{v,dx}} = \frac{\tau_{v,dx}}{f_{vd}} = \frac{0,126}{1,77} = 71\% \quad (5.2.73)$$

$$Razão_{\tau_{v,dy}} = \frac{\tau_{v,dy}}{f_{vd}} = \frac{0,137}{1,77} = 78\% \quad (5.2.74)$$

Para a verificação do cisalhamento em relação ao eixo y (*rolling shear*), para os cortantes $V_{dx} = 196$ kN e $V_{dy} = 136$ kN, aplicou-se as equações (2.4.37) e (2.4.38), resultando em (5.2.77) e (5.2.78), respectivamente.

$$\tau_{Rv,dx} = \frac{V_{dx} * S_{r0,liq}}{I_{0,liq} * b} = \frac{196 * 3200}{52800 * 100} = 0,119 \frac{kN}{cm^2} \quad (5.2.75)$$

$$\tau_{Rv,dy} = \frac{V_{dy} * S_{r90,liq}}{I_{90,liq} * b} = \frac{119 * 1600}{13867 * 100} = 0,137 \frac{kN}{cm^2} \quad (5.2.76)$$

$$Razão_{\tau_{Rv,dx}} = \frac{\tau_{Rv,dx}}{f_{Rvd}} = \frac{0,119}{1,82} = 65\% \quad (5.2.77)$$

$$Razão_{\tau_{Rv,dy}} = \frac{\tau_{Rv,dy}}{f_{Rvd}} = \frac{0,137}{1,82} = 75\% \quad (5.2.78)$$

5.2.5 Cabos

5.2.5.1 Cabo de suspensão

A Figura 84 apresenta o elemento crítico para a verificação dos cabos de suspensão da ponte. Na Tabela 57, são apresentados os esforços atuantes no elemento 147, que apresenta o caso crítico para verificação do cabo de suspensão.

Tabela 57: Esforços no elemento crítico - combinação (1)

Elemento	Seção	Esforços					
	Diâmetro (cm)	N_d (kN)	V_{dy} (kN)	V_{dx} (kN)	T_d (kN.m)	M_{dx} (kN.m)	M_{dy} (kN.m)
Cabo de Suspensão 45 mm (147)	4,5	312,31	0	0	0	0	0

Considerando-se as propriedades dos materiais para os elementos em cabo apresentadas na Tabela 20 e o diâmetro do cabo de 45 mm, verificou-se o cabo aplicando-

se a equação (2.4.61), com os dados do catálogo $CRM = 1383,2$ kN e $FS = 4$, resultando em (5.2.79).

$$Razão = \frac{N_d * FS}{CRM \text{ Fabricante}} = \frac{312,31 * 4}{1383,2} = 90\% \quad (5.2.79)$$

5.2.5.2 Cabo de contraventamento

Os cabos de contraventamento são apresentados na Figura 85. Considerando-se as propriedades dos materiais para os elementos em cabo apresentadas na Tabela 20 e o diâmetro de 102 mm do cabo, procedeu-se para as verificações.

Para o cabo externo:

Para a verificação do critério da resistência aplicou-se a equação (4.4.2), para o esforço normal no arco $N_d = 1421,23$ kN resultando em (5.2.82). Com o ângulo $\theta = 54,7^\circ$ calcula-se a força de tração no cabo T_d , equação (5.2.82), para absorver a força F_d . Por fim aplicou-se a equação (2.4.61), com os dados do catálogo $CRM = 5836,95$ kN e $FS = 4$, resultando em (5.2.83).

$$F_{1d} = \frac{N_d}{150} = \frac{1421,21}{150} = 9,5 \text{ kN} \quad (5.2.80)$$

$$F_d = \frac{2}{3} n F_{1d} = \frac{2}{3} * 2 * 9,5 = 12,7 \text{ kN} \quad (5.2.81)$$

$$T_d = \frac{F_d}{\cos(\theta)} = \frac{12,7}{\cos(54,7^\circ)} = 21,98 \text{ kN} \quad (5.2.82)$$

$$Razão_{A_c} = \frac{T_d * FS}{CRM} = \frac{21,98 * 4}{5836,95} = 1,51\% \quad (5.2.83)$$

Com as propriedades dos materiais obtidas na Tabela 18 e Tabela 20, e com as propriedades das seções obtidas na Tabela 35, realizou-se a verificação do critério da rigidez. Para a verificação do critério da rigidez, aplicou-se a equação (4.4.7), resultando em (5.2.88).

$$\alpha_m = 1 + \cos\left(\frac{\pi}{m}\right) = \alpha_m = 1 + \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) = 1 \quad (5.2.84)$$

$$k_{br,1min} = 2\alpha_m \frac{\pi^2 E_{co,ef} I}{L_1^3} \quad (5.2.85)$$

$$= \frac{2 * 1 * \pi^2 * 6320 * 10^3 * 6826667 * 10^{-8}}{12,25^3} = 4632,84 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$K_{br} = \frac{2}{3} n K_{br,1min} = \frac{2}{3} * 2 * 4632,84 = 6177,12 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (5.2.86)$$

$$A_c = k_{br} * \frac{L_c}{E * \cos^2(\theta)} \quad (5.2.87)$$

$$= 6177,12 * \frac{17,29}{100 * 10^6 * \cos^2(54,7^\circ)} * 10^4 = 31,98 \text{ cm}^2$$

$$Razão_{A_c} = \frac{A_c}{A} = \frac{31,78}{42,66} = 75\% \quad (5.2.88)$$

Para o cabo interno:

Para o dimensionamento dos cabos internos de contraventamento são válidos os mesmos valores de F_d e K_{br} calculados em (5.2.81) e (5.2.86), respectivamente; a única coisa que muda é o ângulo $\theta = 62,3^\circ$. Com este ângulo calcula-se a força de tração no cabo T_d , equação (5.2.89), para absorver a força F_d . Por fim aplicou-se a equação (2.4.61), com os dados do catálogo $CRM = 5836,95$ kN e $FS = 4$, resultando em (5.2.90).

$$T_d = \frac{F_d}{\cos(\theta)} = \frac{12,7}{\cos(62,3^\circ)} = 27,32 \text{ kN} \quad (5.2.89)$$

$$\text{Razão}A_c = \frac{T_d * FS}{CRM} = \frac{27,32 * 4}{5836,95} = 1,87\% \quad (5.2.90)$$

Com as propriedades dos materiais obtidas na Tabela 18 e Tabela 20, e com as propriedades das seções obtidas Tabela 35, realizou-se a verificação do critério da rigidez. Para a verificação do critério da rigidez, aplicou-se a equação (4.4.7), resultando em (5.2.92).

$$A_c = K_{br} * \frac{L_c}{E * \cos^2(\theta)} \quad (5.2.91)$$

$$= 6177,12 * \frac{11,61}{100 * 10^6 * \cos^2(62,3^\circ)} * 10^4 = 21,48 \text{ cm}^2$$

$$\text{Razão}A_c = \frac{A_c}{A} = \frac{33,19}{42,66} = 78\% \quad (5.2.92)$$

5.3 ELU NBR 7190 (1997) – MODELO 97-2

5.3.1 Arco

Os elementos críticos para a verificação do arco são apresentados pela Figura 77. Na Tabela 58, são apresentados os esforços atuantes nos elementos críticos do arco. O elemento 106 foi identificado como o caso crítico para a verificação da flexo compressão e da estabilidade do arco. O elemento 109 apresentou o caso crítico para a verificação do cisalhamento.

Tabela 58: Esforços nos elementos críticos – combinação (6)

Elemento	Seção		Esforços					
	h_x (cm)	h_y (cm)	N_d (kN)	V_{dy} (kN)	V_{dx} (kN)	T_d (kN.m)	M_{dx} (kN.m)	M_{dy} (kN.m)
Arco 80 x 160 (106)	80	160	-1652,4	-117	0	0,06	-1906,15	0,05
Arco 80 x 160 (109)	80	160	-1588,6	-379,2	0	0,09	-678,57	0,03

Considerando-se as propriedades dos materiais para os elementos em MLC apresentadas na Tabela 18 e as propriedades da seção transversal do arco, apresentadas

na Tabela 35, procedeu-se as verificações. A Tabela 59 apresenta a classificação da esbelteza do arco, aplicando-se a equação (2.4.3) e os critérios de classificação descritos no item 4.3.1.

Tabela 59: Avaliação de esbelteza do arco.

Elemento	L_{0x} (cm)	L_{0y} (cm)	λ_x	Classificação (x)	λ_y	Classificação (y)
Arco 80 x 160	3063	1225	66	Coluna Medianamente Esbelta para flexão em torno do eixo x	53	Coluna Medianamente Esbelta para flexão em torno do eixo y

Para verificar a estabilidade do arco, foi aplicada a equação (4.3.3), resultando em (5.3.7) e (5.3.8) para os momentos de flexão em torno dos eixos x e y, respectivamente. Em seguida, utilizou-se a equação (4.3.2) para a verificação da estabilidade, resultando em (5.3.12) e (5.3.13) para a flexão ao redor dos eixos x e y, respectivamente.

$$e_{ix} = 100 * \frac{M_{dx}}{N_d} = 100 * \frac{1906,15}{1652,4} = 115,4 \text{ cm} \quad (5.3.1)$$

$$e_{iy} = 100 * \frac{M_{dy}}{N_d} = 100 * \frac{0}{1652,4} = 0 \text{ cm} \quad (5.3.2)$$

$$e_{ax} = \frac{L_{fx}}{300} = \frac{3063}{300} = 10,21 \text{ cm} \quad (5.3.3)$$

$$e_{ay} = \frac{L_{fy}}{300} = \frac{1225}{300} = 3,33 \text{ cm} \quad (5.3.4)$$

$$F_{ex} = \pi^2 * E_{c.ef} * \frac{I_x}{L_{fx}^2} = \pi^2 * 803,9 * \frac{27306666}{3063^2} = 23092 \text{ kN} \quad (5.3.5)$$

$$F_{ey} = \pi^2 * E_{c.ef} * \frac{I_y}{L_{fy}^2} = \pi^2 * 803,9 * \frac{6826666}{1225^2} = 54163 \text{ kN} \quad (5.3.6)$$

$$M_{dtx} = N_d * (e_{ax} + e_{ix}) * \frac{F_{ex}}{F_{ex} - N_d} \quad (5.3.7)$$

$$= 1652,4 * (10,21 + 115,4) * \frac{23092,2}{23092,2 - 1652,4} = 223477 \text{ kN.cm}$$

$$M_{dty} = N_d * (e_{ay} + e_{iy}) * \frac{F_{ey}}{F_{ey} - N_d} \quad (5.3.8)$$

$$= 1652,4 * (3,33 + 0) * \frac{36093,4}{36093,4 - 1652,4} = 7071 \text{ kN.cm} = 5683 \text{ kN.cm}$$

$$\sigma N_d = \frac{N_d}{A} = \frac{1652,4}{12800} = 0,13 \text{ kN.cm}^2 \quad (5.3.9)$$

$$\sigma M_{dtx} = \frac{M_{dtx}}{W_x} = \frac{223477}{341333} = 0,65 \text{ kN.cm}^2 \quad (5.3.10)$$

$$\sigma M_{dty} = \frac{M_{dty}}{W_y} = \frac{7071}{170667} = 0,03 \text{ kN.cm}^2 \quad (5.3.11)$$

$$\text{Razão}_{xe} = \frac{\sigma N_d}{f_{cd}} + \frac{\sigma M_{dtx}}{f_{cd}} = \frac{0,13}{1,19} + \frac{0,65}{1,19} = 66\% \quad (5.3.12)$$

$$\text{Razão}_{ye} = \frac{\sigma N_d}{f_{cd}} + \frac{\sigma M_{dty}}{f_{cd}} = \frac{0,13}{1,19} + \frac{0,04}{1,19} = 14\% \quad (5.3.13)$$

Para a verificação da flexo compressão aplicou-se as equações (4.1.6) e (4.1.7), resultando em (5.3.17) e (5.3.18), respectivamente.

$$\sigma N_d = \frac{N_d}{A} = \frac{1652,4}{12800} = 0,13 \text{ kN.cm}^2 \quad (5.3.14)$$

$$\sigma M_{dx} = \frac{M_{dx}}{W_x} = \frac{1906,15}{341333} = 0,56 \text{ kN.cm}^2 \quad (5.3.15)$$

$$\sigma M_{dy} = \frac{M_{dy}}{W_y} = \frac{0}{170667} = 0 \text{ kN.cm}^2 \quad (5.3.16)$$

$$\begin{aligned} \text{Razão}_{f_c} &= \left(\frac{\sigma N_d}{f_{cd}}\right)^2 + \frac{\sigma M_{dx}}{f_{cd}} + k_M * \frac{\sigma M_{dy}}{f_{cd}} \\ &= \left(\frac{0,13}{1,19}\right)^2 + \frac{0,56}{1,19} + 0,5 * \frac{0}{1,19} = 48\% \end{aligned} \quad (5.3.17)$$

$$\begin{aligned} \text{Razão}_{f_c} &= \left(\frac{\sigma N_d}{f_{cd}}\right)^2 + k_M * \frac{\sigma M_{dx}}{f_{cd}} + \frac{\sigma M_{dy}}{f_{cd}} \\ &= \left(\frac{0,13}{1,19}\right)^2 + 0,5 * \frac{0,56}{1,19} + \frac{0}{1,19} = 25\% \end{aligned} \quad (5.3.18)$$

Para a verificação do cisalhamento aplicou-se as equações (4.2.2) e (4.2.1), resultando em (5.3.19) e (5.3.20), respectivamente.

$$\tau_{dx} = \frac{3 * V_d}{2 * A} = \frac{3 * 379,23}{2 * 12800} = 0,045 \text{ kN/cm}^2 \quad (5.3.19)$$

$$\text{Razão} = \frac{\tau_{dx}}{f_{vd}} = \frac{0,045}{0,185} = 24\% \quad (5.3.20)$$

5.3.2 Transversina

A Figura 78 apresenta os elementos críticos com os maiores esforços para a verificação da transversina.

Os esforços atuantes nos elementos críticos da transversina são fornecidos na Tabela 60. O elemento 1043 destaca-se como caso crítico para a verificação da flexão simples e o elemento 949 destaca-se como caso crítico para a verificação do cisalhamento.

Tabela 60: Esforços nos elementos críticos - combinação (6)

Elemento	Seção		Esforços					
	h_x (cm)	h_y (cm)	N_d (kN)	V_{dy} (kN)	V_{dx} (kN)	T_d (kN.m)	M_{dx} (kN.m)	M_{dy} (kN.m)
Transversina 41 x 82 (1043)	41	82	0	0	0	0	249,97	0
Transversina 41 x 82 (949)	41	82	0	174,81	0	0	-19,41	0

Considerando-se as propriedades dos materiais para os elementos em MLC apresentadas na Tabela 18, prosseguiu-se a verificação da flexão simples aplicando-se as equações (4.1.3) e (4.1.4), resultando em (5.3.22) e (5.3.23), respectivamente.

$$\sigma_{td} = \sigma_{cd} = \frac{6M_{dx}}{b * h^2} = \frac{6 * 249,97}{41 * 82^2} = 0,54 \text{ kN/cm}^2 \quad (5.3.21)$$

$$\text{Razão} = \frac{\sigma_{cd}}{0,1 * f_{cd}} = \frac{0,54}{0,1 * 12} = 45\% \quad (5.3.22)$$

$$Raz\tilde{a}o = \frac{\sigma_{td}}{0,1 * f_{td}} = \frac{0,54}{0,1 * 12,12} = 45\% \quad (5.3.23)$$

Para verificação do cisalhamento aplicou-se as equações (4.2.2) e (4.2.1), obtendo-se, respectivamente, (5.3.24) e (5.3.25).

$$\tau_{vd} = \frac{3V_d}{2bh} = \frac{3 * 174,81}{2 * 41 * 81} = 0,078 \text{ kN/cm}^2 \quad (5.3.24)$$

$$Raz\tilde{a}o = \frac{\tau_{vd}}{0,1 * f_{vd}} = \frac{0,078}{0,1 * 1,87} = 42\% \quad (5.3.25)$$

Para verificação da flambagem lateral, definiu-se o valor de $L_{ef} = 5,4$ m, distância entre os pontos de contenção lateral da transversina, considerando-se que estes contm a rotação em torno do eixo longitudinal da peça (Figura 51). Dessa forma aplicou-se as equações (4.3.17) e (4.3.16), resultando em (5.3.26) e (5.3.27), respectivamente.

$$\beta_m = \frac{1}{0,26 * \pi} * \frac{\sqrt{\left(\frac{h}{b}\right)^3}}{\sqrt{\left(\frac{h}{b}\right)} - 0,63} * \frac{4}{1,4} \quad (5.3.26)$$

$$= \frac{1}{0,26 * \pi} * \frac{\sqrt{\left(\frac{82}{41}\right)^3}}{\sqrt{\left(\frac{82}{41}\right)} - 0,63} * \frac{4}{1,4} = 8,45 \text{ MPa}$$

$$L_{ef,calc} = 0,01 * \frac{E_{c,ef} * b}{\beta_m * f_{c,d}} = 0,01 * \frac{8120 * 41}{8,45 * 12} = 32,83 \text{ m} > L_{ef} \quad (5.3.27)$$

Após a constatação de que $L_{ef,calc} > L_{ef}$, a verificação de tensões de flexão com flambagem lateral pode ser dispensada.

5.3.3 Contraventamentos

A Figura 79 apresenta o elemento crítico para a verificação do contraventamento em madeira que conecta os dois arcos paralelos. Os esforços atuantes no elemento crítico do contraventamento são apresentados na Tabela 61. O elemento 2 representa o caso crítico para a verificação da flexão compressão, da estabilidade e do cisalhamento.

Tabela 61: Esforços no elemento crítico - combinação (6)

Elemento	Seção		Esforços					
	h_x (cm)	h_y (cm)	N_d (kN)	h_x (cm)	h_y (cm)	T_d (kN.m)	h_x (cm)	h_y (cm)
Contraventamento 82 x 41 (2)	82	41	-17,78	7,47	0	0	10,09	0

Considerando-se as propriedades dos materiais para os elementos em MLC, apresentadas na Tabela 18 e as propriedades da seção transversal do contraventamento apresentadas na Tabela 35, prosseguiu-se para as verificações. A Tabela 62 apresenta a

classificação de esbeltez do contraventamento, aplicando-se os critérios de classificação descritos no item 4.3.1.

Tabela 62: Avaliação de esbeltez do contraventamento.

Elemento	L_{0x} (cm)	L_{0y} (cm)	λ_x	Classificação (x)	λ_y	Classificação (y)
Contraventamento 41 x 82 (2)	540	540	26	Coluna Curta para flexão em torno do eixo x	46	Coluna Medianamente Esbelta para flexão em torno do eixo y

Para a verificação da estabilidade global, procedeu-se a verificação do critério da rigidez, aplicando-se a equação (4.4.3) e (4.4.5), resultando em (5.3.29) e (5.3.30). Em seguida aplicou-se a equação (4.4.7), que define a área mínima A_c do contraventamento em madeira; resultando em (5.3.31). Como a área do contraventamento em madeira $A = 3362 \text{ cm}^2$ é superior à área A_c , então o critério da rigidez é satisfeito.

$$\alpha_m = 1 + \cos\left(\frac{\pi}{m}\right) = 1 + \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) = 1 \quad (5.3.28)$$

$$K_{br,1,min} = 2\alpha_m \frac{\pi^2 E_{co,ef} I}{L_1^3} \quad (5.3.29)$$

$$K_{br,1,min} = 2 * 1 * \frac{\pi^2 * 8039 * 10^3 * 6826667 * 10^{-8}}{12,25^3} = 5892,94 \frac{kN}{m}$$

$$K_{br} = \frac{2}{3} n K_{br,1,min} = \frac{2}{3} * 2 * 3454,33 = 7857,26 \frac{kN}{m} \quad (5.3.30)$$

$$A_c = K_{br} * \frac{L_c}{E * \cos^2(\theta)} \quad (5.3.31)$$

$$= 10^4 * 7857,26 * \frac{5,4}{14500 * 10^3 * \cos(0^\circ)} = 29,26 \text{ cm}^2$$

Além disso verificou-se o critério da resistência, aplicando-se a equação (4.4.2), para o esforço normal de compressão no arco $N_d = 1488,28 \text{ kN}$, fruto da combinação 6, resultando em (5.3.33). Em seguida foi verificada a resistência do contraventamento à flexo compressão para a força de compressão F_d somada ao esforço $N_d = -17,78 \text{ kN}$, apresentado na Tabela 62.

$$F_{1d} = \frac{N_d}{150} = \frac{1488,28}{150} = 9,92 \text{ kN} \quad (5.3.32)$$

$$F_d = \frac{2}{3} * n * F_{1d} = \frac{2}{3} * 2 * 9,92 = 13,23 \text{ kN} \quad (5.3.33)$$

Conforme a Tabela 62, a esbeltez do contraventamento em madeira em relação ao eixo x é menor que 40, sendo classificado como coluna curta. Portanto não é necessário verificar a estabilidade em torno do eixo x. Entretanto, no eixo y verificou-se que é uma coluna medianamente esbelta. Portanto procedeu-se a verificação da estabilidade em torno do eixo y. Aplicando-se a equação (4.3.3), resultou em (5.3.37); em seguida, aplicou-se a equação (4.3.2), resultando em (5.3.40).

$$e_{iy} = 100 * \frac{M_{dy}}{N_d} = 100 * \frac{0}{(13,23 + 17,78)} = 0 \text{ cm} \quad (5.3.34)$$

$$e_{ay} = \frac{L_{fy}}{300} = \frac{540}{300} = 1,8 \text{ cm} \quad (5.3.35)$$

$$F_{ey} = \pi^2 * E_{c.ef} * \frac{I_y}{L_{fy}^2} = \pi^2 * 812 * \frac{470960}{540^2} = 12944 \text{ kN} \quad (5.3.36)$$

$$M_{dyt} = N_d * (e_{ay} + e_{iy}) * \frac{F_{ey}}{F_{ey} - N_d} \quad (5.3.37)$$

$$= (13,23 + 17,78) * (1,8 + 0) * \frac{12944}{12944 - (13,23 + 17,78)} = 55,95 \text{ kN.cm}$$

$$\sigma N_d = \frac{N_d}{A} = \frac{(13,23 + 17,78)}{3362} = 0,009 \text{ kN.cm}^2 \quad (5.3.38)$$

$$\sigma M_{dyt} = \frac{M_{dyt}}{W_y} = \frac{55,95}{22974} = 0,002 \text{ kN.cm}^2 \quad (5.3.39)$$

$$Razão_{ye} = \frac{\sigma N_d}{f_{cd}} + \frac{\sigma M_{dyt}}{f_{cd}} = \frac{0,009}{1,2} + \frac{0,002}{1,2} = 1,0\% \quad (5.3.40)$$

Para a verificação da flexo compressão aplicou-se as equações (4.1.6) e (4.1.7), resultando em (5.3.44) e (5.3.45), respectivamente.

$$\sigma N_d = \frac{N_d}{A} = \frac{(13,23 + 17,78)}{3362} = 0,009 \text{ kN.cm}^2 \quad (5.3.41)$$

$$\sigma M_{dx} = \frac{M_{dx}}{W_x} = \frac{10,09}{45947} = 0,022 \text{ kN.cm}^2 \quad (5.3.42)$$

$$\sigma M_{dy} = \frac{M_{dy}}{W_y} = \frac{0}{22974} = 0 \text{ kN.cm}^2 \quad (5.3.43)$$

$$Razão_{fc} = \left(\frac{\sigma N_d}{f_{cd}} \right)^2 + \frac{\sigma M_{dx}}{f_{cd}} + k_M * \frac{\sigma M_{dy}}{f_{cd}} \quad (5.3.44)$$

$$= \left(\frac{0,009}{1,2} \right)^2 + \frac{0,022}{1,2} + 0,5 * \frac{0}{1,2} = 1,8\%$$

$$Razão_{fc} = \left(\frac{\sigma N_d}{f_{cd}} \right)^2 + k_M * \frac{\sigma M_{dx}}{f_{cd}} + \frac{\sigma M_{dy}}{f_{cd}} \quad (5.3.45)$$

$$= \left(\frac{0,009}{1,2} \right)^2 + 0,5 * \frac{0,022}{1,2} + \frac{0}{1,2} = 0,9\%$$

Para a verificação do cisalhamento aplicou-se a equação (4.2.2) e (4.2.1), resultando em (5.3.46) e (5.3.47), respectivamente.

$$\tau_{vd} = \frac{3V_{dy}}{2bh} = \frac{3 * 0,03}{2 * 41 * 81} = 0,003 \text{ kN/cm}^2 \quad (5.3.46)$$

$$Razão = \frac{\tau_{vd}}{f_{vd}} = \frac{0,003}{0,19} = 1,8\% \quad (5.3.47)$$

5.3.4 Tabuleiro

Na Tabela 63, são apresentados os esforços críticos do tabuleiro.

Tabela 63: Esforços nos elementos críticos - combinação (2)

Elemento	Esforços			
	V_{dy} (kN)	V_{dx} (cm)	M_{dx} (cm)	M_{dy} (kN.m)
Tabuleiro 20 cm	96	176	48	15,3

Considerando a Tabela 36 onde são apresentadas as propriedades da seção transversal e longitudinal do tabuleiro, e a Tabela 19 onde pode se obter as propriedades dos materiais para os elementos de MLCC, procedeu-se as verificações.

Para a verificação da flexão do eixo x, para o momento $M_{dx} = 48$ kN.m, aplicou-se a equação (2.4.29), resultando em (5.3.50) para compressão e (5.3.52) para tração. E para a flexão do eixo y, para o momento $M_{dy} = 15,3$ kN.m, aplicou-se (2.4.30), resultando em (5.3.51) para compressão e (5.3.53) para tração no eixo y.

$$\sigma_{mdx} = \frac{M_{dx}}{W_{0,liq}} = \frac{48}{5280} = 0,91 \frac{kN}{cm^2} \quad (5.3.48)$$

$$\sigma_{mdy} = \frac{M_{dy}}{W_{90,liq}} = \frac{15,3}{1387} = 1,10 \frac{kN}{cm^2} \quad (5.3.49)$$

$$Razão_{oc_x} = \frac{\sigma_{mdx}}{f_{cd}} = \frac{0,91}{1,414} = 64\% \quad (5.3.50)$$

$$Razão_{oc_y} = \frac{\sigma_{mdy}}{f_{cd}} = \frac{1,10}{1,414} = 78\% \quad (5.3.51)$$

$$Razão_{ot_x} = \frac{\sigma_{mdx}}{f_{td}} = \frac{0,91}{1,51} = 60\% \quad (5.3.52)$$

$$Razão_{ot_y} = \frac{\sigma_{mdy}}{f_{td}} = \frac{1,10}{1,51} = 73\% \quad (5.3.53)$$

Para a verificação do cisalhamento em relação ao eixo x, para os cortantes $V_{dx} = 176$ kN e $V_{dy} = 96$ kN, aplicou-se as equações (2.4.33) e (2.4.34), resultando em (5.3.56) e (5.3.57), respectivamente.

$$\tau_{v,dx} = \frac{V_{dx} * S_{0,liq}}{I_{0,liq} * b} = \frac{176 * 3400}{52800 * 100} = 0,113 \frac{kN}{cm^2} \quad (5.3.54)$$

$$\tau_{v,dy} = \frac{V_{dy} * S_{90,liq}}{I_{90,liq} * b} = \frac{96 * 1600}{13867 * 100} = 0,111 \frac{kN}{cm^2} \quad (5.3.55)$$

$$Razão_{\tau_{v,dx}} = \frac{\tau_{v,dx}}{f_{vd}} = \frac{0,113}{1,19} = 95\% \quad (5.3.56)$$

$$Razão_{\tau_{v,dy}} = \frac{\tau_{v,dy}}{f_{vd}} = \frac{0,111}{1,19} = 93\% \quad (5.3.57)$$

Para a verificação do cisalhamento em relação ao eixo y (*rolling shear*), para os cortantes $V_{dx} = 176$ kN e $V_{dy} = 96$ kN, aplicou-se as equações (2.4.37) e (2.4.38), resultando em (5.3.60) e (5.3.61), respectivamente.

$$\tau_{Rv,dx} = \frac{V_{dx} * S_{r0,liq}}{I_{0,liq} * b} = \frac{176 * 3200}{52800 * 100} = 0,107 \frac{kN}{cm^2} \quad (5.3.58)$$

$$\tau_{Rvdy} = \frac{V_{dy} * S_{r90,liq}}{I_{90,liq} * b} = \frac{96 * 1600}{13867 * 100} = 0,111 \frac{kN}{cm^2} \quad (5.3.59)$$

$$Razão_{\tau_{Rvdx}} = \frac{\tau_{Rvdx}}{f_{Rvd}} = \frac{0,107}{1,35} = 79\% \quad (5.3.60)$$

$$Razão_{\tau_{Rvdy}} = \frac{\tau_{Rvdy}}{f_{Rvd}} = \frac{0,111}{1,35} = 82\% \quad (5.3.61)$$

5.3.5 Cabos

5.3.5.1 Cabo de suspensão

A Figura 84 apresenta o elemento crítico para a verificação dos cabos de suspensão da ponte. Na Tabela 64, são apresentados os esforços críticos do cabo de suspensão.

Tabela 64: Esforços no elemento crítico – combinação (5)

Elemento	Seção	Esforços					
	Diâmetro (cm)	N_d (kN)	V_{dy} (kN)	V_{dx} (kN)	T_d (kN.m)	M_{dx} (kN.m)	M_{dy} (kN.m)
Cabo de Suspensão 45 mm (147)	4,5	277,12	0	0	0	0	0

Considerando-se as propriedades dos materiais para os elementos em cabo apresentadas na Tabela 20 e o diâmetro de 45 mm do cabo, verificou-se aplicando a equação (2.4.61), com os dados do catálogo $CRM = 1383,2$ kN e $FS = 4$, resultando em (5.3.62).

$$Razão = \frac{N_d * FS}{CRM \text{ Fabricante}} = \frac{277,12 * 4}{1383,2} = 80\% \quad (5.3.62)$$

5.3.5.2 Cabo de Contraventamento

Considerando-se as propriedades dos materiais para os elementos em cabo apresentadas na Tabela 20 e o diâmetro de 102 mm do cabo de contraventamento do arco, procedeu-se as verificações.

Para o cabo externo:

Para o cabo de contraventamento do arco aplicou-se a verificação do critério da resistência por meio da equação (4.4.2) para o esforço normal no arco $N_d = 1488,28$ kN, resultando em (5.3.64), que é a força necessária para prover estabilidade ao arco. A partir da análise da Figura 86 obtém-se o ângulo $\theta = 54,7^\circ$ que o cabo faz com a direção perpendicular ao arco, no ponto de contato do cabo com o arco. Com este ângulo calcula-se a força de tração no cabo T_d , equação (5.3.65), para absorver a força F_d . Por fim aplicou-se a equação (2.4.61), com os dados do catálogo $CRM = 5836,95$ kN e $FS = 4$, resultando em (5.3.66).

$$F_{1d} = \frac{N_d}{150} = \frac{1488,28}{150} = 9,9 \text{ kN} \quad (5.3.63)$$

$$F_d = \frac{2}{3} * n * F_{1d} = \frac{2}{3} * 2 * 9,9 = 13,2 \text{ kN} \quad (5.3.64)$$

$$T_d = \frac{F_d}{\cos(\theta)} = \frac{F_d}{\cos(54,7^\circ)} = 22,84 \text{ kN} \quad (5.3.65)$$

$$\text{Razão } A_c = \frac{T_d * FS}{CRM} = \frac{22,84 * 4}{5836,95} = 1,57\% \quad (5.3.66)$$

Com as propriedades dos materiais obtidas na Tabela 18 e Tabela 20, e com as propriedades das seções obtidas Tabela 35, realizou-se a verificação do critério da rigidez. Para a verificação do critério da rigidez, aplicou-se a equação (4.4.7), resultando em (5.3.71).

$$\alpha_m = 1 + \cos\left(\frac{\pi}{m}\right) = \alpha_m = 1 + \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) = 1 \quad (5.3.67)$$

$$k_{br,1,min} = 2\alpha_m \frac{\pi^2 E_{co,ef} I}{L_1^3} \quad (5.3.68)$$

$$= \frac{2 * 1 * \pi^2 * 8039 * 10^3 * 6826667 * 10^{-8}}{12,25^3} = 5892,94 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$k_{br} = \frac{2}{3} n K_{br,1,min} = \frac{2}{3} * 2 * 5892,94 = 7857,26 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (5.3.69)$$

$$A_c = K_{br} * \frac{L_c}{E * \cos^2(\theta)} \quad (5.3.70)$$

$$= 7857,26 * \frac{17,29}{100 * 10^6 * \cos^2(54,7^\circ)} * 10^4 = 40,68 \text{ cm}^2$$

$$\text{Razão } A_c = \frac{A_c}{A} = \frac{40,68}{42,66} = 95\% \quad (5.3.71)$$

Para o cabo interno:

Para o dimensionamento dos cabos internos de contraventamento são válidos os mesmos valores de F_d e K_{br} calculados em (5.3.64) e (5.3.69), respectivamente; a única coisa que muda é o ângulo $\theta = 62,3$. Com este ângulo calcula-se a força de tração no cabo T_d , equação (5.3.72), para absorver a força F_d . Por fim aplicou-se a equação (2.4.61), com os dados do catálogo $CRM = 5836,95 \text{ kN}$ e $FS = 4$, resultando em (5.3.73).

$$T_d = \frac{F_d}{\cos(\theta)} = \frac{13,2}{\cos(62,3)} = 28,4 \text{ kN} \quad (5.3.72)$$

$$\text{Razão } A_c = \frac{T_d * FS}{CRM} = \frac{28,4 * 4}{5836,95} = 17\% \quad (5.3.73)$$

Com as propriedades dos materiais obtidas na Tabela 18 e na Tabela 20, e com as propriedades das seções obtidas na Tabela 35, realizou-se a verificação do critério da rigidez. Para a verificação do critério da rigidez, aplicou-se a equação (4.4.7), resultando em (5.3.75).

$$A_c = K_{br} * \frac{L_c}{E * \cos^2(\theta)} \quad (5.3.74)$$

$$= 7857,26 * \frac{11,61}{100 * 10^6 * \cos^2(62,3^\circ)} * 10^4 = 42,22 \text{ cm}^2$$

$$\text{Razão } A_c = \frac{A_c}{A} = \frac{42,22}{42,66} = 99\% \quad (5.3.75)$$

5.4 ELS NBR 7190 (1997) – MODELO 97

Considerando-se o coeficiente de fluência, Tabela 15, dos elementos da classe de umidade 3 ($U = 85\%$) para a ação variável principal como ação de longa duração, e as propriedades da seção transversal dos elementos, apresentadas na Tabela 35 e na Tabela 36, procedeu-se as verificações.

5.4.1 Flecha Global

Para a verificação da flecha global, a flecha é obtida para a combinação dada em (3.5.10) e explicitada na Tabela 41, resultando em $u = 31 \text{ mm}$ (flecha total) e $u_g = 22 \text{ mm}$ (flecha devido apenas à carga permanente). A partir destes valores, aplicou-se a equação (3.5.11), resultando em (5.4.1). A flecha limite é obtida considerando-se o limite de $L/200$ estabelecido pela NBR 7190 (1997), resultando em (5.4.2). Como o resultado em (5.4.3) é inferior a 100%, a flecha global apresentada pelo modelo estrutural atendeu os critérios referentes ao ELS.

$$\begin{aligned} u_t &= u_g * (1 + \varphi_g) + (u - u_g) * (1 + \varphi_v) \\ &= 22 * (1 + 2) + (32 - 22) * (1 + 2) = 93 \text{ mm} \end{aligned} \quad (5.4.1)$$

$$u_{lim} = \frac{L}{200} = \frac{40000}{200} = 200 \text{ mm} \quad (5.4.2)$$

$$Razão = \frac{u_t}{u_{lim}} = \frac{93}{200} = 47\% \quad (5.4.3)$$

5.4.2 Flecha Transversina

Para a verificação da flecha na transversina, a flecha é obtida para a combinação dada em (3.5.10) e explicitada na Tabela 41, resultando em $u = 1,64 \text{ mm}$ (flecha total) e $u_g = 0,7 \text{ mm}$ (flecha devido apenas à carga permanente). A partir destes valores, aplicou-se a equação (3.5.11), resultando em (5.4.4). A flecha limite é obtida considerando o limite de $L/200$ estabelecido pela NBR 7190 (1997), resultando em (5.4.5). Como o resultado em (5.4.6) é inferior a 100%, a flecha da transversina apresentada pelo modelo estrutural atendeu os critérios referentes ao ELS.

$$\begin{aligned} u_t &= u_g * (1 + \varphi_g) + (u - u_g) * (1 + \varphi_v) \\ &= 0,7 * (1 + 2) + (1,64 - 0,7) * (1 + 2) = 4,92 \text{ mm} \end{aligned} \quad (5.4.4)$$

$$u_{lim} = \frac{L}{200} = \frac{5400}{200} = 27 \text{ mm} \quad (5.4.5)$$

$$Razão = \frac{u_t}{u_{lim}} = \frac{4,92}{27} = 18\% \quad (5.4.6)$$

5.4.3 Flecha Tabuleiro

Para a verificação da flecha do tabuleiro, a flecha é obtida para a combinação dada em (3.5.10) e explicitada na Tabela 41, resultando em $u = 0,47 \text{ mm}$ (flecha total) e $u_g =$

0,25 mm (flecha devido apenas à carga permanente). A partir destes valores, aplicou-se a equação (3.5.11), resultando em (5.4.7). A flecha limite é obtida considerando o limite de $L/200$ estabelecido pela NBR 7190 (1997), resultando em (5.4.8). Como o resultado em (5.4.9) é inferior a 100%, a flecha do tabuleiro apresentada pelo modelo estrutural atendeu os critérios referentes ao ELS.

$$u_t = u_g * (1 + \varphi_g) + (u - u_g) * (1 + \varphi_v) = 0,25 * (1 + 2) + (0,47 - 0,25) * (1 + 2) = 1,41 \text{ mm} \quad (5.4.7)$$

$$u_{lim} = \frac{L}{200} = \frac{2000}{200} = 10 \text{ mm} \quad (5.4.8)$$

$$\text{Razão} = \frac{u_t}{u_{lim}} = \frac{1,41}{10} = 14\% \quad (5.4.9)$$

5.5 ELS NBR 7190 (2022) – MODELO 22

Considerando-se o coeficiente de fluência, Tabela 16, para os elementos em MLC da classe de umidade 3 ($U = 85\%$), e as propriedades da seção transversal dos elementos, apresentadas na Tabela 35 e na Tabela 36, procedeu-se as verificações.

5.5.1 Flecha Global

Para a verificação da flecha global, a flecha é obtida para as combinações dadas em (3.5.12) e (3.5.13), resultando em $\delta_{inst} = 52 \text{ mm}$ (flecha instantânea) e $\delta_{fin} = 51 \text{ mm}$ (flecha final). Como no projeto da ponte não foi aplicado contraflecha, então $\delta_{net,fin} = 51 \text{ mm}$ (flecha líquida final). As flechas limite são obtidas considerando o limite de $L/300$, $L/150$ e $L/250$, para as flechas instantânea, final e líquida final, respectivamente, conforme estabelecido pela NBR 7190 (2022), resultando em (5.5.1), (5.5.2) e (5.5.3), respectivamente. Como os resultados em (5.5.4), (5.5.5) e (5.5.6) são inferiores a 100%, a flecha global apresentada pelo modelo estrutural atendeu os critérios referentes ao ELS.

$$\delta_{lim,inst} = \frac{L}{300} = \frac{40000}{300} = 133,33 \text{ mm} \quad (5.5.1)$$

$$\delta_{lim,fin} = \frac{L}{150} = \frac{40000}{150} = 260 \text{ mm} \quad (5.5.2)$$

$$\delta_{lim,líq,fin} = \frac{L}{250} = \frac{40000}{250} = 160 \text{ mm} \quad (5.5.3)$$

$$\text{Razão} = \frac{\delta_{inst}}{\delta_{lim,inst}} = \frac{52}{130} = 40\% \quad (5.5.4)$$

$$\text{Razão} = \frac{\delta_{fin}}{\delta_{lim,fin}} = \frac{51}{260} = 20\% \quad (5.5.5)$$

$$\text{Razão} = \frac{\delta_{fin}}{\delta_{lim,líq,fin}} = \frac{51}{160} = 32\% \quad (5.5.6)$$

5.5.2 Flecha Transversina

Para a verificação da flecha na transversina, a flecha é obtida para as combinações dadas em (3.5.12) e (3.5.13) e explicitada na Tabela 41, resultando em $\delta_{inst} = 2,6 \text{ mm}$ (flecha instantânea) e $\delta_{fin} = 1,8 \text{ mm}$ (flecha final). Como no projeto da ponte não foi aplicado contraflecha, então $\delta_{net,fin} = 1,8 \text{ mm}$ (flecha líquida final). As flechas limite são obtidas considerando o limite de $L/300$, $L/150$ e $L/250$, para as flechas instantânea, final e líquida final, respectivamente, conforme estabelecido pela NBR 7190 (2022), resultando em (5.5.10), (5.5.11) e (5.5.12), respectivamente. Como os resultados em (5.5.10), (5.5.11) e (5.5.12) são inferiores a 100%, a flecha da transversina apresentada pelo modelo estrutural atendeu os critérios referentes ao ELS.

$$\delta_{lim,inst} = \frac{L}{300} = \frac{5400}{300} = 18 \text{ mm} \quad (5.5.7)$$

$$\delta_{lim,fin} = \frac{L}{150} = \frac{5400}{150} = 26 \text{ mm} \quad (5.5.8)$$

$$\delta_{lim,lq,fin} = \frac{L}{250} = \frac{5400}{250} = 16 \text{ mm} \quad (5.5.9)$$

$$Razão = \frac{\delta_{inst}}{\delta_{lim,inst}} = \frac{2,6}{18} = 14\% \quad (5.5.10)$$

$$Razão = \frac{\delta_{fin}}{\delta_{lim,fin}} = \frac{1,8}{26} = 5\% \quad (5.5.11)$$

$$Razão = \frac{\delta_{fin}}{\delta_{lim,lq,fin}} = \frac{1,8}{16} = 8\% \quad (5.5.12)$$

5.5.3 Flecha Tabuleiro

Para a verificação da flecha no tabuleiro, a flecha é obtida para as combinações dadas em (3.5.12) e (3.5.13) e explicitada na Tabela 41, resultando em $\delta_{inst} = 0,55 \text{ mm}$ (flecha instantânea) e $\delta_{fin} = 0,39 \text{ mm}$ (flecha final). Como no projeto da ponte não foi aplicado contraflecha, então $\delta_{net,fin} = 0,39 \text{ mm}$ (flecha líquida final). As flechas limite são obtidas considerando o limite de $L/300$, $L/150$ e $L/250$, para as flechas instantânea, final e líquida final, respectivamente, conforme estabelecido pela NBR 7190 (2022), resultando em (5.5.13), (5.5.14) e (5.5.15), respectivamente. Como os resultados em (5.5.16), (5.5.17) e (5.5.18) são inferiores a 100%, a flecha da transversina apresentada pelo modelo estrutural atendeu os critérios referentes ao ELS.

$$\delta_{lim,inst} = \frac{L}{300} = \frac{2000}{300} = 6,6 \text{ mm} \quad (5.5.13)$$

$$\delta_{lim,fin} = \frac{L}{150} = \frac{2000}{150} = 13,3 \text{ mm} \quad (5.5.14)$$

$$\delta_{lim,lq,fin} = \frac{L}{250} = \frac{2000}{250} = 8 \text{ mm} \quad (5.5.15)$$

$$Razão = \frac{\delta_{inst}}{\delta_{lim,inst}} = \frac{0,55}{6,6} = 8\% \quad (5.5.16)$$

$$Razão = \frac{\delta_{fin}}{\delta_{lim,fin}} = \frac{0,39}{13,3} = 3\% \quad (5.5.17)$$

$$Razão = \frac{\delta_{fin}}{\delta_{lim,liq,fin}} = \frac{0,39}{8} = 5\% \quad (5.5.18)$$

5.6 ELS NBR 7190 (1997) – MODELO 97-2

Considerando-se o coeficiente de fluência, Tabela 15, dos elementos da classe de umidade 3 ($U = 85\%$) para a ação variável principal como ação de longa duração, e as propriedades da seção transversal dos elementos, apresentadas na Tabela 35 e na Tabela 36, procedeu-se as verificações.

5.6.1 Flecha Global

Para a verificação da flecha global, a flecha é obtida para a combinação dada em (3.5.10) e explicitada na Tabela 41, resultando em $u = 23 \text{ mm}$ (flecha total) e $u_g = 17 \text{ mm}$ (flecha devido apenas à carga permanente). A partir destes valores, aplicou-se a equação (3.5.11), resultando em (5.6.1). A flecha limite é obtida considerando o limite de $L/200$ estabelecido pela NBR 7190 (1997), resultando em (5.6.2). Como o resultado em (5.6.3) é inferior a 100%, a flecha global apresentada pelo modelo estrutural atendeu os critérios referentes ao ELS.

$$u_t = u_g * (1 + \varphi_g) + (u - u_g) * (1 + \varphi_v) \quad (5.6.1)$$

$$= 17 * (1 + 2) + (23 - 17) * (1 + 2) = 69 \text{ mm}$$

$$u_{lim} = \frac{L}{200} = \frac{40000}{200} = 200 \text{ mm} \quad (5.6.2)$$

$$Razão = \frac{u_t}{u_{lim}} = \frac{69}{200} = 35\% \quad (5.6.3)$$

5.6.2 Flecha Transversina

Para a verificação da flecha na transversina, a flecha é obtida para a combinação dada em (3.5.10) e explicitada na Tabela 41, resultando em $u = 0,64 \text{ mm}$ (flecha total) e $u_g = 0,3 \text{ mm}$ (flecha devido apenas à carga permanente). A partir destes valores, aplicou-se a equação (3.5.11), resultando em (5.6.4). A flecha limite é obtida considerando o limite de $L/200$ estabelecido pela NBR 7190 (1997), resultando em (5.6.5). Como o resultado em (5.6.6) é inferior a 100%, a flecha da transversina apresentada pelo modelo estrutural atendeu os critérios referentes ao ELS.

$$u_t = u_g * (1 + \varphi_g) + (u - u_g) * (1 + \varphi_v) \quad (5.6.4)$$

$$= 0,3 * (1 + 2) + (0,64 - 0,3) * (1 + 2) = 1,92 \text{ mm}$$

$$u_{lim} = \frac{L}{200} = \frac{5400}{200} = 27 \text{ mm} \quad (5.6.5)$$

$$Raz\tilde{a}o = \frac{u_t}{u_{lim}} = \frac{1,92}{27} = 7\% \quad (5.6.6)$$

5.6.3 Flecha Tabuleiro

Para a verificação da flecha da transversina, a flecha  obtida para a combinação dada em (3.5.10) e explicitada na Tabela 41, resultando em $u = 0,24 \text{ mm}$ (flecha total) e $u_g = 0,15 \text{ mm}$ (flecha devido apenas  carga permanente). A partir destes valores, aplicou-se a equação (3.5.11), resultando em (5.6.7). A flecha limite  obtida considerando o limite de $L/200$ estabelecido pela NBR 7190 (1997), resultando em (5.6.8). Como o resultado em (5.6.9)  inferior a 100%, a flecha do tabuleiro apresentada pelo modelo estrutural atendeu os critérios referentes ao ELS.

$$u_t = u_g * (1 + \varphi_g) + (u - u_g) * (1 + \varphi_v) \\ = 0,15 * (1 + 2) + (0,24 - 0,15) * (1 + 2) = 0,72 \text{ mm} \quad (5.6.7)$$

$$u_{lim} = \frac{L}{200} = \frac{2000}{200} = 10 \text{ mm} \quad (5.6.8)$$

$$Raz\tilde{a}o = \frac{u_t}{u_{lim}} = \frac{0,72}{10} = 7\% \quad (5.6.9)$$

6 COMPARAÇÕES E CONSTATAÇÕES

Neste capítulo é realizado um comparativo entre as versões da NBR 7190 (1997) e NBR 7190-1(2022) com relação às propriedades características, coeficientes de correção, relação entre propriedades, propriedades de dimensionamento, coeficientes de combinação, carregamentos. Também é realizado um comparativo entre as seções, esforços, razão de tensões e razão de deformações obtidas para o dimensionamento segundo ambas as versões da norma. Os subitens deste capítulo fornecem informações detalhadas sobre cada um desses aspectos, apresentando conceitos teóricos, equações e procedimentos relacionados.

A partir dos resultados expostos será realizado um cálculo da variação percentual do parâmetro analisado com a abordagem da nova norma em relação à sua versão anterior, por meio da equação (6.1) com o intuito de avaliar a influência de cada fator da nova versão da norma no dimensionamento deste projeto.

$$Variação = 100 * \frac{valor_{22} - valor_{97}}{valor_{97}} \quad (6.1)$$

6.1 PROPRIEDADES CARACTERÍSTICAS

Nesta seção, são apresentadas as propriedades características dos materiais utilizados na análise da estrutura, abordadas na seção 2.3.2 e 2.3.3 e sua variação conforme a equação (6.1). A Tabela 65 apresenta a comparação dos valores característicos para a classe C30 das coníferas, conforme a Tabela 17.

Tabela 65: Comparação dos valores característicos da classe C30 para Coníferas.

Parâmetro	Versão 1997	Versão 2022	Unid.	Varição
Flexão ($f_{m,k}$)	38,96	30	MPa	-23%
Tração paralela às fibras ($f_{t,k}$)	38,96	18	MPa	-54%
Compressão paralela às fibras ($f_{c,k}$)	30	23	MPa	-23%
Compressão perpendicular às fibras ($f_{cn,k}$)	7,5	2,7	MPa	-64%
Cisalhamento ($f_{v,k}$)	6	4	MPa	-33%
Modulo de elasticidade médio paralelo às fibras (E_m)	14,5	12	GPa	-17%
Densidade média (ρ_m)	500	460	Kg/m ³	-8%
Densidade aparente (ρ_{ap})	600	380	Kg/m ³	-37%

A Tabela 66 apresenta a comparação dos valores característicos para a espécie Angelim Araroba (*Vataireopsis araroba*), conforme a Tabela 19.

Tabela 66: Comparação entre valores característicos da espécie Angelim Araroba (*Vataireopsis araroba*).

Parâmetro	Versão 1997	Versão 2022	Unid.	Variação
Compressão paralela às fibras ($f_{c0,k}$)	50,5	40	MPa	-21%
Cisalhamento ($f_{v,k}$)	7,1	6	MPa	-15%
Modulo de elasticidade médio paralelo às fibras (E_{0m})	12,876	14,5	GPa	13%
Densidade aparente (ρ_{ap})	688	750	Kg/m ³	9%

Observou-se uma redução dos valores característicos para a classe C30 para coníferas que chegam a 64% e para os valores característicos da espécie Angelim Araroba, observa-se reduções e aumentos de até 20%.

6.2 COEFICIENTES APLICADOS SOBRE AS PROPRIEDADES

Nesta seção, são apresentados os coeficientes de correção aplicados nas análises estruturais, abordadas na seção 2.3.1 e sua variação conforme a equação (6.1). Esses coeficientes levam em consideração diversos fatores, como geometria, carregamento, condições de apoio e comportamento do material. A Tabela 67 apresenta a comparação dos coeficientes de correção, conforme a Tabela 4, Tabela 7, Tabela 9, Tabela 10, Tabela 11, Tabela 15 e Tabela 16.

Tabela 67: Comparação entre coeficientes de correção.

Parâmetro	Versão 1997	Versão 2022	Variação
Relação entre valores característicos e médios de resistência à compressão ($f_{c,k}/f_{c,m}$)	0,7	0,7	0%
Relação entre valores característicos e médios de resistência ao cisalhamento ($f_{v,k}/f_{v,m}$)	0,54	0,54	0%
Coefficiente de minoração da resistência à compressão (γ_{wc})	1,4	1,4	0%
Coefficiente de minoração da resistência à tração (γ_{wt})	1,8	1,8	0%
Coefficiente de minoração da resistência ao cisalhamento (γ_{wv})	1,8	1,8	0%
Coefficiente modificador ($k_{mod,1}$)	0,7	0,7	0%
Coefficiente modificador ($k_{mod,2}$)	0,8	0,8	0%
Coefficiente modificador para peças retas ($k_{mod,3}$)	1	0,95	-5%
Coefficiente modificador para peças curvas ($k_{mod,3}$)	0,99	0,94	-5%
Coefficiente de fluência (φ)	0,8	2	150%

Quanto ao coeficiente de fluência utilizado para este trabalho, observou-se um aumento de 150%, sendo considerado bastante expressivo. O $k_{mod,3}$ apresentou uma redução de 5% e os demais coeficientes de correção não apresentaram variação.

6.3 PROPRIEDADES DE DIMENSIONAMENTO

Nesta seção, são apresentadas as propriedades de dimensionamento dos materiais, que envolvem os valores observados nas seções anteriores desse capítulo e são abordadas nas seções 2.3.2 e 2.3.3 e sua variação conforme a equação (6.1). A Tabela 68 apresenta

a comparação dos valores de dimensionamento para os materiais da classe C30, conforme Tabela 18.

Tabela 68: Comparação entre valores de dimensionamento da classe C30 para Coníferas.

Parâmetro	Versão 1997	Versão 2022	Unidade	Variação
Tração paralela às fibras ($f_{t,d}$)	12,12	6,84	MPa	-44%
Compressão paralela às fibras ($f_{c,d}$)	12	8,74	MPa	-27%
Compressão perpendicular às fibras ($f_{cn,d}$)	3	1,01	MPa	-67%
Cisalhamento ($f_{v,d}$)	1,87	1,18	MPa	-36%
Modulo de elasticidade médio paralelo às fibras (E_m)	8,12	6,384	GPa	-21%
Densidade média (ρ_m)	500	460	Kg/m ³	-8%
Densidade aparente (ρ_{ap})	600	380	Kg/m ³	-37%

A Tabela 69 apresenta a comparação dos valores de dimensionamento para os materiais da espécie Angelim Araroba, conforme Tabela 19.

Tabela 69: Comparação entre valores de dimensionamento da espécie Angelim Araroba (*Vataireopsis araroba*)

Parâmetro	Versão 1997	Versão 2022	Unidade	Variação
Tração perpendicular às fibras ($f_{tn,d}$)	0,67	0,91	MPa	35%
Compressão paralela às fibras ($f_{c,d}$)	14,14	15,2	MPa	7%
Cisalhamento ($f_{v,d}$)	1,19	1,77	MPa	51%
Cisalhamento na camada transversal - <i>rolling shear</i> - (f_{Rvd})	1,35	1,82	MPa	35%
Modulo de elasticidade médio paralelo às fibras (E_m)	7,21	7,71	GPa	7%
Densidade aparente (ρ_{ap})	688	750	Kg/m ³	9%

Observou-se uma redução dos valores de dimensionamento para a classe C30 para coníferas, chegando a 51%, já em relação aos valores da espécie Angelim Araroba, nota-se um aumento para todos os casos, que atinge 67% em seu caso mais expressivo.

6.4 COEFICIENTES DE COMBINAÇÃO

Nesta seção, são discutidos os coeficientes de combinação utilizados na análise de cargas e esforços nas estruturas, abordados na seção 3.5 e sua variação conforme a equação (6.1). A Tabela 70 apresenta a comparação dos coeficientes de ações permanentes, conforme Tabela 37.

Tabela 70: Comparação entre coeficientes de combinação (γ_G) para ações permanentes.

Parâmetro (γ_G)	Versão 1997	Versão 2022	Variação
Combinação Normal	1,4	1,25	-11%
Combinação Especial ou de construção	1,3	1,15	-12%
Combinação Excepcional	1,2	1,1	-8%
Efeito Favoráveis	0,9	1	11%

A Tabela 71 apresenta a comparação dos coeficientes de ações variáveis, conforme Tabela 38.

Tabela 71: Comparação entre coeficientes de ações variáveis

Parâmetro (γ_Q)	Versão 1997	Versão 2022	Variação
Combinação Normal	1,4	1,5	7%
Combinação Especial ou de construção	1,2	1,3	8%
Combinação Excepcional	1	1	0%

A Tabela 72 apresenta a comparação dos fatores de combinação ψ_0 , conforme a Tabela 39.

Tabela 72: Comparação entre fatores de combinação ψ_0 .

Parâmetro (ψ_0)	Versão 1997	Versão 2022	Variação
Pressão dinâmica do vento	0,5	0,6	20%
Locais em que há predominância de pesos de equipamentos fixos, ou de elevadas concentrações de pessoas	0,7	0,7	0%
Pontes rodoviárias	0,6	0,7	17%

A Tabela 73 apresenta a comparação dos fatores de combinação ψ_1 , conforme Tabela 39.

Tabela 73: Comparação entre fatores de combinação ψ_1 .

Parâmetro (ψ_1)	Versão 1997	Versão 2022	Variação
Pressão dinâmica do vento	0,2	0,3	50%
Locais em que há predominância de pesos de equipamentos fixos, ou de elevadas concentrações de pessoas	0,6	0,6	0%
Pontes rodoviárias	0,4	0,5	25%

A Tabela 74 apresenta a comparação dos fatores de combinação ψ_2 , conforme Tabela 39.

Tabela 74: Comparação entre fatores de combinação ψ_2 .

Parâmetro (ψ_2)	Versão 1997	Versão 2022	Variação
Pressão dinâmica do vento	0	0	0%
Locais em que há predominância de pesos de equipamentos fixos, ou de elevadas concentrações de pessoas	0,4	0,4	0%
Pontes rodoviárias	0,2	0,3	50%

A Tabela 75 apresenta a comparação dos coeficientes aplicáveis à carga móvel, conforme descritos nos itens 3.5.1.3, 3.5.1.4, 3.5.1.5 e o coeficiente de redução que leva em conta a maior resistência da madeira sob a ação de cargas de curta duração, que pode ser aplicado caso esta seja a duração da ação variável principal.

Tabela 75: Comparação entre coeficientes devido a carga móvel.

Parâmetro	Versão 1997	Versão 2022	Variação
CIV	1,15	1,24	8%
CIA	1	1,25	25%
CNF	1	1,05	5%
Redução	0,75	0,75	0%

A Tabela 76 apresenta a comparação dos coeficientes de combinação para o ELU para elementos de madeira, conforme Tabela 40.

Tabela 76: Comparação entre coeficientes de combinação do ELU para elementos de madeira.

Parâmetro	Versão 1997	Versão 2022		Variação	
		Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal
PP ARCO	1,4	1,25	1,25	-11%	-11%
PP TIRANTES	1,4	1,25	1,25	-11%	-11%
PP TRANSVERSINAS	1,4	1,25	1,25	-11%	-11%
PP TABULEIRO	1,4	1,25	1,25	-11%	-11%
PP CONCRETO	1,4	1,25	1,25	-11%	-11%
PP ASFALTO	1,4	1,25	1,25	-11%	-11%
PP GUARDA RODAS	1,4	1,25	1,25	-11%	-11%
PP GUARDA CORPO	1,4	1,25	1,25	-11%	-11%
PP CONEXÕES	1,4	1,25	1,25	-11%	-11%
SC PEDESTRES	1,4	1,5	1,5	7%	7%
SC MULTIDÃO	1,21	1,46	1,74	21%	44%
VEÍCULO TIPO	1,21	1,46	1,74	21%	44%
FRENAGEM/ACELERAÇÃO	0,84	1,05	1,05	25%	25%
FH GUARDA CORPO	0,84	1,05	1,05	25%	25%
VENTO 0°	0,7	0,84	0,84	20%	20%

A Tabela 77 apresenta a comparação dos coeficientes de combinação para o ELU para elementos metálicos, conforme Tabela 40.

Tabela 77: Comparação entre coeficientes de combinação elementos de metálicos.

Parâmetro	Versão 1997	Versão 2022		Variação	
		Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal
PP ARCO	1,4	1,25	1,25	-11%	-11%
PP TIRANTES	1,4	1,25	1,25	-11%	-11%
PP TRANSVERSINAS	1,4	1,25	1,25	-11%	-11%
PP TABULEIRO	1,4	1,25	1,25	-11%	-11%
PP CONCRETO	1,4	1,25	1,25	-11%	-11%
PP ASFALTO	1,4	1,25	1,25	-11%	-11%
PP GUARDA RODAS	1,4	1,25	1,25	-11%	-11%
PP GUARDA CORPO	1,4	1,25	1,25	-11%	-11%
PP CONEXÕES	1,4	1,25	1,25	-11%	-11%
SC PEDESTRES	1,4	1,5	1,5	7%	7%
SC MULTIDÃO	1,61	1,95	2,33	21%	45%
VEÍCULO TIPO	1,61	1,95	2,33	21%	45%
FRENAGEM/ACELERAÇÃO	0,84	1,05	1,05	25%	25%

FH GUARDA CORPO	0,84	1,05	1,05	25%	25%
VENTO 0°	0,7	0,84	0,84	20%	20%

A Tabela 78 apresenta a comparação dos coeficientes de combinação para o ELS, conforme Tabela 41.

Tabela 78: Comparação entre coeficientes de combinação estado limite de serviço.

Parâmetro	Versão 1997	Versão 2022		Variação	
	Longa Duração	Instantânea	Quase Permanente	Instantânea	Quase Permanente
PP ARCO	1	1	1,8	0%	80%
PP TIRANTES	1	1	1,8	0%	80%
PP TRANSVERSINAS	1	1	1,8	0%	80%
PP TABULEIRO	1	1	1,8	0%	80%
PP CONCRETO	1	1	1,8	0%	80%
PP ASFALTO	1	1	1,8	0%	80%
PP GUARDA RODAS	1	1	1,8	0%	80%
PP GUARDA CORPO	1	1	1,8	0%	80%
PP CONEXÕES	1	1	1,8	0%	80%
SC PEDESTRES	0,2	1	0,54	400%	170%
SC MULTIDÃO	0,2	1	0,54	400%	170%
VEÍCULO TIPO	0,2	1	0,54	400%	170%
FRENAGEM/ACELERAÇÃO	0,2	0,5	0,54	150%	170%
FH GUARDA CORPO	0,2	0,5	0,54	150%	170%
VENTO 0°	0	0,3	0	30%	0%

Para as combinações do estado limite último observa-se uma redução dos coeficientes para cargas permanentes e um aumento para as cargas variáveis. Nas combinações de estado limite de serviço, houve um aumento dos coeficientes chegando a 400%.

6.5 CARREGAMENTO

A Tabela 79 apresenta a comparação dos carregamentos atribuídos para análise de esforços nas estruturas, abordados na seção 3.3 e sua variação conforme a equação (6.1).

Tabela 79: Comparação entre carregamentos.

Parâmetro	Versão 1997	Versão 2022	Unidade	Variação
MLC	5,88	4,51	kN/m ³	-23%
MLCC	6,75	7,35	kN/m ³	9%
Forças longitudinais	135	135	kN	0%
Vento	2	2	kN/m	0%
Força no guarda corpo	1	2	kN/m	100%

O carregamento referente ao peso próprio dos elementos em MLC e MLCC sofre redução, associada à densidade da MLC e da MLCC. A força acidental no guarda corpo apresentaram aumento.

6.6 SEÇÕES

Nesta seção, serão abordadas as comparações entre as seções transversais das estruturas resultante do dimensionamento segundo os critérios normativos de ambas as versões da norma. Salienta-se que no processo de dimensionamentos não buscou-se as tensões limites de dimensionamento (razões iguais a 1,0), o que resultariam em seções com dimensões “não reais” como 43,75cm. Mas buscou-se seções “reais” que atendessem aos critérios normativos. Sendo assim, embora seja feita uma comparação entre as seções esta comparação não tem como base uma mesma razão de tensão, o que seria uma comparação ideal.

A Tabela 80 apresenta a comparação entre as áreas das seções transversais atribuídas aos elementos para análise de esforços nas estruturas, abordados na seção 3.1 e sua variação conforme a equação (6.1). As dimensões apresentadas são referentes ao Modelo 97 e Modelo 22.

Tabela 80: Comparação entre as áreas das seções transversais.

Parâmetro	Versão 1997		Versão 2022		Variação (área)
	Dimensão (cm)	Área (cm ²)	Dimensão (cm)	Área (cm ²)	
Arco	70 x 140	9800	80 x 160	12800	31%
Transversinas	32,5 x 65	2112,5	41 x 82	3362	59%
Tabuleiro	16	3200	20	4000	25%
Contraventamento	32,5 x 65	2112,5	41 x 82	3362	59%
Cabos de Suspensão	4,2	13,85	4,5	15,9	15%
Cabos de Contraventamento	10,2	4,91	10,2	4,91	0%

Em geral, para atender aos critérios normativos, as seções da NBR 7190 (2022) apresentaram aumento em relação à NBR 7190 (1997), chegando a 59% em seu caso crítico, sendo o aumento esperado, devido a diminuição das propriedades resistentes da classe C30 e ao aumento nas combinações do carregamento do veículo tipo.

Observa-se que a menor variação ocorre no tabuleiro. Para justificar essa menor variação da seção pode-se estabelecer uma conexão com o aumento dos valores das propriedades resistentes da espécie Angelim Araroba.

6.7 COMPARAÇÃO FINAL

6.7.1 Esforços

Neste tópico é apresentado uma comparação entre os esforços obtidos pelo Modelo 97-2 e Modelo 22, que possuem mesmas seções transversais para os elementos, e se consolida como um resumo da influência conjunta de todas as variações percentuais

nos parâmetros e metodologias, previamente apresentadas, utilizadas para o dimensionamento das seções.

A Tabela 81 apresenta a comparação dos esforços do arco, abordados nas seções 5.2.1 e 5.3.1. A Tabela 82 apresenta a comparação dos esforços da transversina, abordados nas seções 5.2.2 e 5.3.2. A Tabela 83 apresenta a comparação dos esforços do contraventamento, abordados nas seções 5.2.3 e 5.3.3. A Tabela 84 apresenta a comparação dos esforços do tabuleiro, abordados nas seções 5.2.4 e 5.3.4. A Tabela 85 apresenta a comparação dos esforços do cabo de suspensão, abordados nas seções 5.2.5.1 e 5.3.5.1. Todas as variações foram calculadas mediante a aplicação da equação (6.1).

Tabela 81: Comparação entre os esforços no arco.

Esforço	Versão 1997	Versão 2022	Variação
N_d (kN)	1652,4	1570,3	-5%
V_{dy} (kN)	379,2	376,3	-1%
M_{dx} (kNm)	1906,15	1970,6	3%

Tabela 82: Comparação entre os esforços na transversina.

Esforço	Versão 1997	Versão 2022	Variação
V_{dy} (kN)	174,81	227,8	30%
M_{dx} (kNm)	249,97	339,28	36%

Tabela 83: Comparação entre os esforços no contraventamento.

Esforço	Versão 1997	Versão 2022	Variação
N_d (kN)	17,78	23,5	32%
V_{dy} (kN)	7,47	5,12	-31%
M_{dx} (kNm)	10,09	6,91	-32%

Tabela 84: Comparação entre os esforços no tabuleiro.

Esforço	Versão 1997	Versão 2022	Variação
V_{dx} (kN)	176	196	11%
V_{dy} (kN)	96	119	24%
M_{dx} (kNm)	48	60,5	26%
M_{dy} (kNm)	15,3	20	31%

Tabela 85: Comparação entre esforços no cabo de suspensão.

Esforço	Versão 1997	Versão 2022	Variação
N_d (kN)	277,12	312,31	13%

Para os esforços obtidos as variações mais relevantes ocorreram na transversina, no contraventamento e no tabuleiro. Na transversina e no tabuleiro, tem-se a atuação direta do trem tipo, que sofreu grande aumento em seu valor de combinação. Quanto ao contraventamento, a variação pode ser dada em função da redução dos coeficientes de carga permanente.

6.7.2 Razão de Tensões / Esforços

Neste tópico é apresentado uma comparação entre a razão de tensões / esforços obtidos pelo Modelo 22 e Modelo 97-2, abordados nas seções 5.2 e 5.3 e sua variação conforme a equação (6.1). Com a razão de tensões pode-se obter uma análise mais realista da variação resultante da mudança das normas, visto que condensa todo o escopo apresentado até este ponto do trabalho.

A Tabela 86 apresenta a comparação dos esforços do arco, abordados nas seções 5.2.1 e 5.3.1. A Tabela 87 apresenta a comparação dos esforços da transversina, abordados nas seções 5.2.2 e 5.3.2. A Tabela 88 apresenta a comparação dos esforços do contraventamento, abordados nas seções 5.2.3 e 5.3.3. A Tabela 89 apresenta a comparação dos esforços do tabuleiro, abordados nas seções 5.2.4 e 5.3.4.

Tabela 86: Comparação entre razões de tensão no arco.

Parâmetro	Versão 1997	Versão 2022	Variação
Estabilidade eixo x	66%	73%	11%
Estabilidade eixo y	14%	53%	279%
Flexocompressão x	48%	53%	10%
Flexocompressão y	25%	38%	52%
Cisalhamento	24%	38%	54%

Tabela 87: Comparação entre razões de tensão na transversina.

Parâmetro	Versão 1997	Versão 2022	Variação
Flexão	45%	85%	89%
Cisalhamento	42%	86%	105%

Tabela 88: Comparação entre razões de tensão no contraventamento.

Parâmetro	Versão 1997	Versão 2022	Variação
Estabilidade eixo y	0,9%	2,3%	130%
Flexocompressão x	1,8%	1,3%	-28%
Flexocompressão y	0,9%	0,9%	0%
Cisalhamento	1,8%	1,9%	6%

Tabela 89: Comparação entre razões de tensão no tabuleiro.

Parâmetro	Versão 1997	Versão 2022	Variação
Flexão eixo x	64%	75%	17%
Flexão eixo y	78%	95%	22%
Cisalhamento (flexão eixo x)	95%	71%	-25%
Cisalhamento (flexão eixo y)	93%	78%	-16%
Cisalhamento camada transversal (flexão eixo x)	79%	84%	6%
Cisalhamento camada transversal (flexão eixo y)	82%	97%	18%

Quanto as razões de tensão, observa-se que a estabilidade continua sendo determinante para o dimensionamento do arco. Entretanto a alteração na metodologia de

cálculo e as alterações nos coeficientes de combinação podem ter causado aumento das razões em relação à NBR 7190 (1997).

Assim como no arco, nas transversinas e no contraventamento, a alteração na metodologia de cálculo e nos coeficientes de combinação podem ter causado aumento das razões em relação à NBR 7190 (1997).

Para o tabuleiro, observa-se aumentos e reduções de até 25%, com grande influência da metodologia de cálculo específica para o material e também o aumento dos coeficientes das cargas variáveis.

6.7.3 Deformações

A Tabela 90 apresenta a comparação entre as deformações obtidos pelo Modelo 97-2 e Modelo 22. Destaca-se que as versões apresentam distintas formas de cálculo para a verificação do estado limite de deformações, sendo assim, para fins comparativos adotou-se o maior valor obtido para cada um dos parâmetros.

Tabela 90: Comparação entre as flechas.

Parâmetro	Versão 1997	Versão 2022	Variação
Flecha global (mm)	69	52	-25%
Flecha transversina (mm)	1,92	2,6	35%
Flecha tabuleiro (mm)	0,72	0,55	-24%

Em relação as flechas, observa-se redução em relação a flecha global e do tabuleiro, entretanto, observa-se aumento para a flecha da transversina, sendo assim, a alteração da metodologia de cálculo influenciou no resultado final, assim como a alteração dos coeficientes.

6.8 CONSTATAÇÃO TENSÃO CISALHANTE ROLLING SHEAR

No processo de dimensionamento dos elementos estruturais, a depender do esforço envolvido, uma prática muito comum consiste em aumentar as seções com o objetivo de se atingir uma determinada capacidade resistente. Todavia constatou-se que essa abordagem pode não funcionar devido ao comportamento não linear da resistência ao cisalhamento transversal (*rolling shear*) dos painéis de MLCC.

A partir da tabela 3.13 de Borgstrom (2019), que define a propriedade de seções de um painel de MLCC de 5 lâminas, elaborou-se a tabela presente no apêndice D1, onde consta os momentos de inércia I_x e I_y , os momentos estáticos líquidos S_{Rx} e S_{Ry} , bem como as tensões cisalhantes resistentes da camada transversal (*rolling shear*) para a

espessura h_{MLCC} crescente do painel, bem como diferentes layouts das lâminas. A partir das informações desta tabela elaborou-se o Gráfico 1, o Gráfico 2 e o Gráfico 3.

O Gráfico 1 mostra o momento de inércia líquido em x e em y em relação à espessura do painel de MLCC. Observa-se que o momento de inércia líquido resistente aumenta com o aumento da espessura, porém, em uma escala reduzida e de modo errático. Observa-se também que nas transições de espessura ocorre redução mais significativa do momento estático líquido em x e y. Também se observa que o momento de inércia líquido em y aumenta a uma taxa muito lenta.

O Gráfico 2 apresenta o momento estático líquido em x e em y em relação à espessura do painel de MLCC. Observa-se que o momento estático líquido resistente em x aumenta com o aumento da espessura, entretanto, para o eixo y, observa-se uma escala reduzida e de modo errático. Observa-se também que nas transições de espessura ocorre redução mais significativa do momento estático líquido em x e y.

O Gráfico 3 mostra a tensão solicitante devido ao cortante para as lâminas transversais aos eixos x e y em relação à espessura do painel de MLCC. Nesse caso, a resistência ao cisalhamento na camada transversal apresenta um comportamento errático não linear, com uma tendência decrescente.

Portanto, é importante ressaltar que para o uso de painéis de MLCC, deve-se estar ciente de que a tensão de cisalhamento transversal possivelmente irá ser a tensão crítica para o dimensionamento do tabuleiro. Sendo assim, deve-se avaliar tanto a espessura quanto a geometria do painel a ser utilizado, a fim de se obter êxito no dimensionamento.

Gráfico 1: Momento de inércia líquido em x e em y em relação a espessura do MLCC.

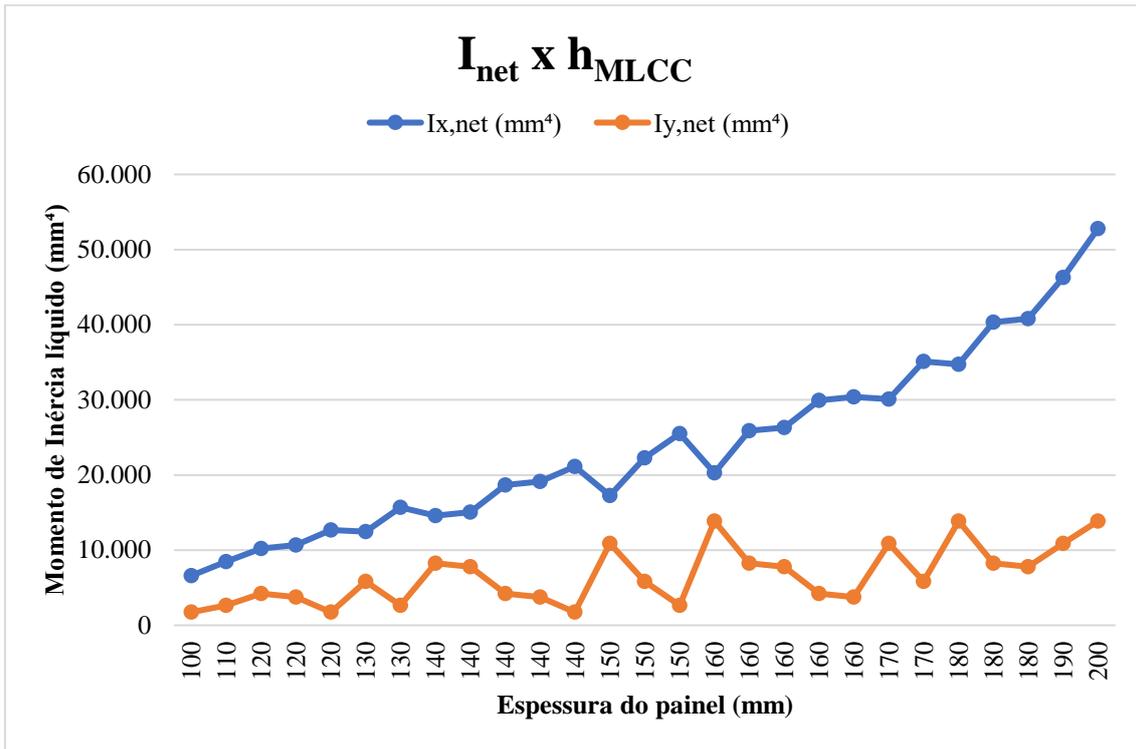


Gráfico 2: Momento estático líquido em x e em y em relação a espessura do MLCC.

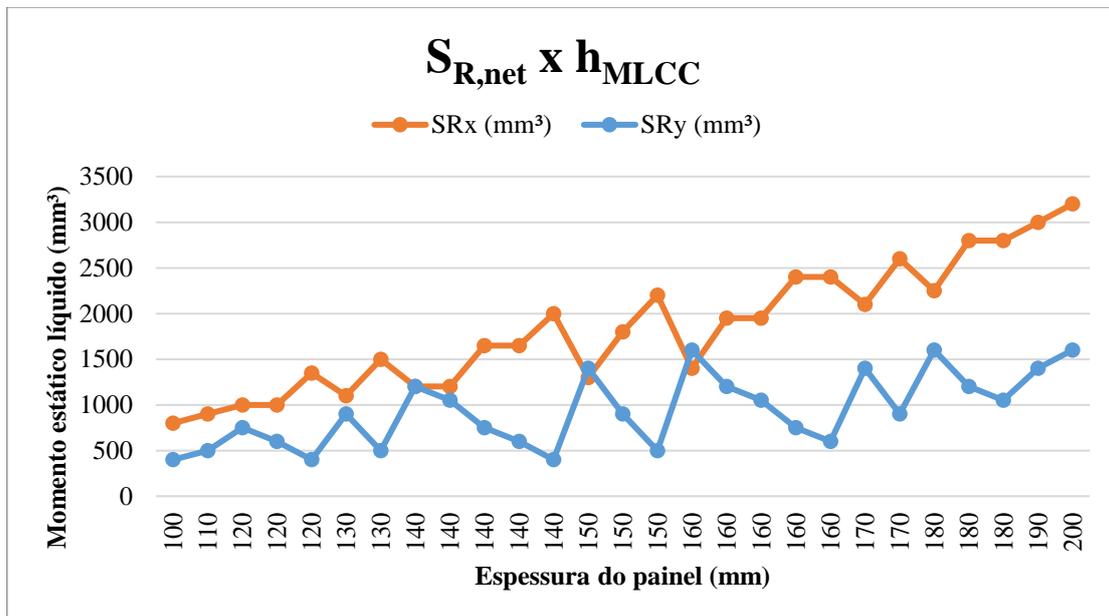
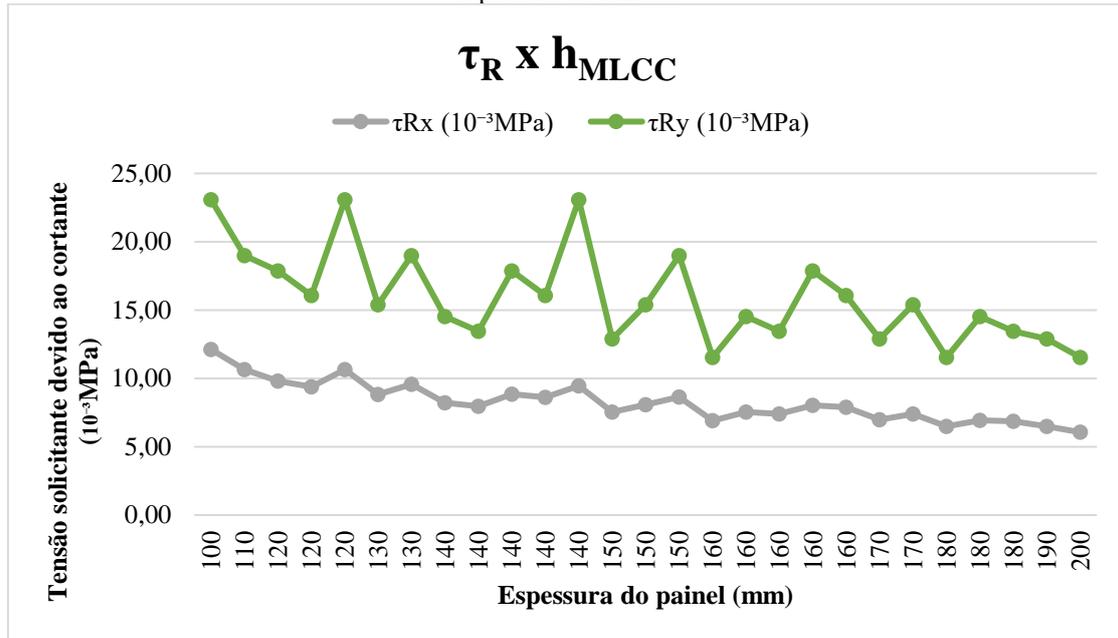


Gráfico 3: Tensão solicitante devido ao cortante para as lâminas transversais aos eixos x e y em relação a espessura do MLCC.



7 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou o desenvolvimento do projeto estrutural de uma ponte em arco com estrutura de madeira. Verificou-se que é viável a construção da ponte atendendo às condições estabelecidas pelas normas. A escassez de informações acerca dos materiais MLC e MLCC utilizados em catálogos e normas brasileiras é um ponto a se destacar, pois representou um desafio significativo no processo de projeto, exigindo uma abordagem mais ampla e a busca por informações complementares em fontes internacionais.

Com base nos resultados e constatações obtidos no capítulo 6, conclui-se que a nova versão da NBR 7190 (2022) introduziu importantes mudanças e atualizações que contribuem para um dimensionamento mais preciso e atualizado. Essas modificações podem resultar em seções mais eficientes, melhor distribuição dos esforços e maior segurança estrutural. Contudo, na análise estrutural apresentada neste trabalho, conduziu a seções mais robustas.

É importante ressaltar que a adoção da nova norma exige uma atualização dos conhecimentos e práticas de dimensionamento por parte dos projetistas e engenheiros envolvidos. A compreensão das diferenças entre as versões da norma e a aplicação correta de seus critérios e diretrizes são fundamentais para garantir a conformidade e a segurança das estruturas projetadas.

Dessa forma, a realização deste estudo comparativo contribui para a disseminação do conhecimento atualizado sobre a norma de dimensionamento de estruturas de madeira e possibilita a aplicação adequada da versão mais recente da NBR 7190 em projetos futuros, promovendo um avanço na qualidade e segurança das construções em madeira no contexto atual.

O estudo realizado sobre o cisalhamento na camada transversal evidenciou a importância de considerar o impacto do *Rolling Shear* no dimensionamento de painéis de MLCC. Os resultados obtidos fornecem informações relevantes para os projetos que utilizem o material, permitindo uma abordagem mais precisa e eficiente no dimensionamento. A compreensão dessas características e comportamentos é essencial para fazer uso da madeira laminada colada cruzada em obras de engenharia.

Ao longo do trabalho foram detalhados todos os cálculos e métodos utilizados para a produção deste trabalho, criando assim uma referência robusta para projetos similares ou que utilizem dos mesmos materiais. Salienta-se que o Brasil atualmente não

apresenta capacidade de produção de madeira para suprir as necessidades do mercado, caso a madeira se tornasse o material estrutural mais utilizado para construções. Todavia, através da disseminação de informações como as apresentadas neste trabalho, espera-se incentivar a adoção da madeira como material estrutural em obras de grande porte e fomentar a utilização consciente e eficiente da madeira, contribuindo para um setor de construção mais sustentável e inovador. E acredita-se que assim gradativamente aumentando-se a demanda, a produção de madeira também irá aumentar.

O projeto da ponte em arco afirmou a competência do corpo docente e qualidade da instituição de formação do autor, possibilitando a execução do complexo trabalho ainda em sua graduação. Aprimorando seu senso crítico e explorando softwares importantes para a carreira de um engenheiro civil.

A partir do desenvolvimento do trabalho, foi possível aprimorar os conceitos aprendidos ao longo do curso, visto que se trata de um projeto multidisciplinar. Além disso o estudo sobre propriedades da madeira permitiu o aprofundamento do conhecimento do autor sobre o material e o estudo sobre o sistema estrutural em arco permitiu a ampliação do conhecimento do autor sobre este tipo de sistema.

7.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Por fim, propõe-se como sugestão para trabalhos futuros:

- Dimensionamento das fundações e ligações, bem como o detalhamento do projeto apresentado;
- Análise comparativa do desempenho estrutural de pontes em arco com diferentes materiais, como concreto armado, aço e outros tipos de madeira;
- Investigação das técnicas de inspeção e monitoramento estrutural de pontes em arco de madeira;
- Análise da sustentabilidade ambiental, comparando seu ciclo de vida, emissões de carbono e consumo de recursos naturais com outros materiais de construção;
- Investigação das técnicas de pré-fabricação e montagem de elementos estruturais de madeira para a construção dos elementos apresentados neste trabalho, visando a redução de prazos e custos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR 6120**. Cargas para o cálculo de estruturas de edificações: procedimento. 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR 6123**. Forças devidas ao vento em edificações. 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR 7190:1997**. Projeto de estruturas de madeira.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR 7190:2022**. Projeto de estruturas de madeira - parte 1: critérios de dimensionamento.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR 7188**. Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas. 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR 8681**. Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. 2003.
- BLASS, H. J. et al. **Timber Engineering: STEP 1**. Basis of Design. Material Properties, Structural Components and Joints, 1995.
- BORGSTRÖM, Eric; FRÖBEL, Johan. **The CLT handbook**. Svenskt Trä—Swedish Wood: Stockholm, Sweden, 2019.
- CARDOSO, D.B.O.S.; Ramos, G.; Lima, H.C. **Vataireopsis in Flora e Funga do Brasil**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB19223>>. Acesso em: 12 mar. 2023
- CERALDI, Carla; ERMOLLI, Ennio Russo. **Timber arch bridges: a design by Leonardo**. Barcelona, Spain, 2004.
- CIMAF. **Manual técnico de cabos**. São Paulo, 2009. 105p.
- COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **Eurocode 5**. Design of timber structures. 1993.
- CROCETTI, Roberto. **Timber Structures for Large-Span Structures**. Prague, Czech Republic, 2016.
- CTBUH. Disponível em: <https://www.skyscrapercenter.com/building/mjostarnet/26866>. Acesso em: 15 jun. 23.
- DA CRUZ, Diego Botelho. Projeto: **Passarela de Madeira em Arco com Tabuleiro Inferior**. São Carlos, 2016.
- DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **Manual de projetos de obras de arte especiais**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1996.
- EL DEBS, M. K.; TAKEYA, T. **Pontes de Concreto**. São Carlos, USP – Universidade São Paulo, 2009. Notas de aula.

- FUTURE ARCHITECTURE. Disponível em: <https://futurearchitectureplatform.org/projects/0523b46b-ffc4-433e-aa24-1728468f346f/>. Acesso em: 11 fev. 23
- ITALIA.IT. Disponível em: <<https://www.italia.it/en/aosta-valley/point-saint-martin-roman-bridge#:~:text=The%20Pont%2DSaint%2DMartin%20is,that%20developed%20around%20the%20bridge>>. Acesso em: 1 dez. 2022
- CALIL JR, C. et al. **Manual de projeto e construção de pontes de madeira**. São Carlos: Suprema, 2006.
- NICKERSON, Robert. **Safety appraisal of suspension bridge main cables**. Maryland, EUA, 1998.
- GODONOU, Patrice. **Design of timber structures** – Volume 1. Swedish Wood: Stockholm, Sweden, 2022.
- STUCTVILLE. Disponível em: <https://structville.com/2017/06/manual-structural-analysis-of-three-hinged-arch-structures.html>. Acesso em: 30 de nov. 2022
- TÉCHNE. Disponível em: <https://revistatechne.com.br/edicao/292/>. Acesso em: 11 de fev. 2023
- PFEIL, W; PFEIL, M. **Estruturas de madeira**. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2003.
- WESTERN WOOD STRUCTURES. **Timber bridges**. Disponível em: <<http://www.westernwoodstructures.com/>>. Acesso em: 30 de nov. 2022.
- WOOD SOLUTIONS. Disponível em: <https://www.woodsolutions.com.au/case-studies/nappan-marsh-bridge>. Acesso em: 30 de nov. 2023
- YANG, Yan et al. **Traditional construction technology of China timber arch bridges**. 構造工学論文集 A, v. 58, n. 0, 2012.

APÊNDICE A1

Modelo 97					Modelo 97				
Nó	Carregamento básico	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)	Nó	Carregamento básico	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)
35	PP Concreto	82,76	0,00	97,01	95	PP Concreto	82,76	0,00	97,01
35	PP Asfalto	74,91	0,00	87,80	95	PP Asfalto	74,91	0,00	87,80
35	PP Conexões	1,99	0,00	2,33	95	PP Conexões	1,99	0,00	2,33
35	PP Guarda Rodas	86,70	0,00	101,62	95	PP Guarda Rodas	86,70	0,00	101,62
35	PP Guarda Corpo	0,00	0,00	0,00	95	PP Guarda Corpo	0,00	0,00	0,00
35	SC Pedestres	70,94	0,00	83,15	95	SC Pedestres	70,94	0,00	83,15
35	Veículo tipo	162,81	0,00	211,03	95	Veículo tipo	162,81	0,00	211,03
35	SC Multidão	141,87	0,00	166,30	95	SC Multidão	141,87	0,00	166,30
35	Vento 0°	0,00	0,00	0,00	95	Vento 0°	0,00	0,00	0,00
35	F.H. Guarda corpo	0,00	0,00	0,00	95	F.H. Guarda corpo	0,00	0,00	0,00
35	Forças Long.	0,00	0,00	0,00	95	Forças Long.	0,00	0,00	0,00
35	DEAD	227,54	0,00	286,55	95	DEAD	227,54	0,00	286,55
40	PP Concreto	-82,76	0,00	97,01	99	PP Concreto	-82,76	0,00	97,01
40	PP Asfalto	-74,91	0,00	87,80	99	PP Asfalto	-74,91	0,00	87,80
40	PP Conexões	-1,99	0,00	2,33	99	PP Conexões	-1,99	0,00	2,33
40	PP Guarda Rodas	-86,70	0,00	101,62	99	PP Guarda Rodas	-86,70	0,00	101,62
40	PP Guarda Corpo	0,00	0,00	0,00	99	PP Guarda Corpo	0,00	0,00	0,00
40	SC Pedestres	-70,94	0,00	83,15	99	SC Pedestres	-70,94	0,00	83,15
40	Veículo tipo	0,00	0,00	211,03	99	Veículo tipo	0,00	0,00	211,03
40	SC Multidão	-141,87	0,00	166,30	99	SC Multidão	-141,87	0,00	166,30
40	Vento 0°	0,00	0,00	0,00	99	Vento 0°	0,00	0,00	0,00
40	F.H. Guarda corpo	0,00	0,00	0,00	99	F.H. Guarda corpo	0,00	0,00	0,00
40	Forças Long.	0,00	0,00	0,00	99	Forças Long.	0,00	0,00	0,00
40	DEAD	-227,54	0,00	286,55	99	DEAD	-227,54	0,00	286,55

APÊNDICE A2

Modelo 22					Modelo 22				
Nó	Carregamento básico	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)	Nó	Carregamento básico	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)
35	PP Concreto	83,29	0,00	97,53	95	PP Concreto	83,29	0,00	97,53
35	PP Asfalto	75,39	0,00	88,28	95	PP Asfalto	75,39	0,00	88,28
35	PP Conexões	2,00	0,00	2,34	95	PP Conexões	2,00	0,00	2,34
35	PP Guarda Rodas	87,25	0,00	102,18	95	PP Guarda Rodas	87,25	0,00	102,18
35	PP Guarda Corpo	0,00	0,00	0,00	95	PP Guarda Corpo	0,00	0,00	0,00
35	SC Pedestres	71,39	0,00	83,60	95	SC Pedestres	71,39	0,00	83,60
35	Veículo tipo	165,56	0,00	208,94	95	Veículo tipo	165,56	0,00	208,94
35	SC Multidão	142,78	0,00	167,20	95	SC Multidão	142,78	0,00	167,20
35	Vento 0°	0,00	0,00	0,00	95	Vento 0°	0,00	0,00	0,00
35	F.H. Guarda corpo	0,00	0,00	0,00	95	F.H. Guarda corpo	0,00	0,00	0,00
35	Forças Long.	0,00	0,00	0,00	95	Forças Long.	0,00	0,00	0,00
35	DEAD	258,74	0,00	322,39	95	DEAD	258,74	0,00	322,39
40	PP Concreto	-83,29	0,00	97,53	99	PP Concreto	-83,29	0,00	97,53
40	PP Asfalto	-75,39	0,00	88,28	99	PP Asfalto	-75,39	0,00	88,28
40	PP Conexões	-2,00	0,00	2,34	99	PP Conexões	-2,00	0,00	2,34
40	PP Guarda Rodas	-87,25	0,00	102,18	99	PP Guarda Rodas	-87,25	0,00	102,18
40	PP Guarda Corpo	0,00	0,00	0,00	99	PP Guarda Corpo	0,00	0,00	0,00
40	SC Pedestres	-71,39	0,00	83,60	99	SC Pedestres	-71,39	0,00	83,60
40	Veículo tipo	0,00	0,00	208,94	99	Veículo tipo	0,00	0,00	208,94
40	SC Multidão	-142,78	0,00	167,20	99	SC Multidão	-142,78	0,00	167,20
40	Vento 0°	0,00	0,00	0,00	99	Vento 0°	0,00	0,00	0,00
40	F.H. Guarda corpo	0,00	0,00	0,00	99	F.H. Guarda corpo	0,00	0,00	0,00
40	Forças Long.	0,00	0,00	0,00	99	Forças Long.	0,00	0,00	0,00
40	DEAD	-258,74	0,00	322,39	99	DEAD	-258,74	0,00	322,39

APÊNDICE A3

Modelo 97-2					Modelo 97-2				
Nó	Carregamento básico	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)	Nó	Carregamento básico	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)
35	PP Concreto	83,58	0,00	97,82	95	PP Concreto	83,58	0,00	97,82
35	PP Asfalto	75,65	0,00	88,54	95	PP Asfalto	75,65	0,00	88,54
35	PP Conexões	2,01	0,00	2,35	95	PP Conexões	2,01	0,00	2,35
35	PP Guarda Rodas	87,56	0,00	102,48	95	PP Guarda Rodas	87,56	0,00	102,48
35	PP Guarda Corpo	0,00	0,00	0,00	95	PP Guarda Corpo	0,00	0,00	0,00
35	SC Pedestres	71,64	0,00	83,85	95	SC Pedestres	71,64	0,00	83,85
35	Veículo tipo	166,85	0,00	208,09	95	Veículo tipo	166,85	0,00	208,09
35	SC Multidão	143,28	0,00	167,69	95	SC Multidão	143,28	0,00	167,69
35	Vento 0°	0,00	0,00	0,00	95	Vento 0°	0,00	0,00	0,00
35	F.H. Guarda corpo	0,00	0,00	0,00	95	F.H. Guarda corpo	0,00	0,00	0,00
35	Forças Long.	0,00	0,00	0,00	95	Forças Long.	0,00	0,00	0,00
35	DEAD	307,81	0,00	386,07	95	DEAD	307,81	0,00	386,07
40	PP Concreto	-83,58	0,00	97,82	99	PP Concreto	-83,58	0,00	97,82
40	PP Asfalto	-75,65	0,00	88,54	99	PP Asfalto	-75,65	0,00	88,54
40	PP Conexões	-2,01	0,00	2,35	99	PP Conexões	-2,01	0,00	2,35
40	PP Guarda Rodas	-87,56	0,00	102,48	99	PP Guarda Rodas	-87,56	0,00	102,48
40	PP Guarda Corpo	0,00	0,00	0,00	99	PP Guarda Corpo	0,00	0,00	0,00
40	SC Pedestres	-71,64	0,00	83,85	99	SC Pedestres	-71,64	0,00	83,85
40	Veículo tipo	0,00	0,00	208,09	99	Veículo tipo	0,00	0,00	208,09
40	SC Multidão	-143,28	0,00	167,69	99	SC Multidão	-143,28	0,00	167,69
40	Vento 0°	0,00	0,00	0,00	99	Vento 0°	0,00	0,00	0,00
40	F.H. Guarda corpo	0,00	0,00	0,00	99	F.H. Guarda corpo	0,00	0,00	0,00
40	Forças Long.	0,00	0,00	0,00	99	Forças Long.	0,00	0,00	0,00
40	DEAD	-307,81	0,00	386,07	99	DEAD	-307,81	0,00	386,07

APÊNDICE B1

Modelo 97				
Nó	Carregamento básico	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)
35	Combinação (5)	1244,76	0,00	1518,77
35	Combinação (6)	1124,26	0,00	1369,54
35	Combinação (9)	549,01	0,00	667,41
40	Combinação (5)	-987,20	0,00	1518,77
40	Combinação (6)	-931,09	0,00	1369,54
40	Combinação (9)	-516,45	0,00	667,41
95	Combinação (5)	1244,76	0,01	1518,77
95	Combinação (6)	1124,26	0,00	1369,54
95	Combinação (9)	549,01	0,00	667,41
99	Combinação (5)	-987,20	0,01	1518,77
99	Combinação (6)	-931,09	0,00	1369,54
99	Combinação (9)	-516,45	0,00	667,41

APÊNDICE B2

Modelo 22				
Nó	Carregamento básico	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)
35	Combinação (1)	1341,69	0,00	1624,75
35	Combinação (2)	1458,86	0,00	1767,68
35	Combinação (3)	1190,60	0,00	1440,44
35	Combinação (4)	1276,94	0,00	1545,76
35	Combinação (7)	886,40	0,00	1072,44
35	Combinação (8)	1117,06	0,00	1351,13
40	Combinação (1)	-1018,84	0,00	1624,75
40	Combinação (2)	-1073,10	0,00	1767,68
40	Combinação (3)	-948,88	0,00	1440,44
40	Combinação (4)	-988,86	0,00	1545,76
40	Combinação (7)	-720,84	0,00	1072,44
40	Combinação (8)	-1027,66	0,00	1351,13
95	Combinação (1)	1341,69	0,00	1624,75
95	Combinação (2)	1458,86	0,01	1767,68
95	Combinação (3)	1190,60	0,00	1440,44
95	Combinação (4)	1276,94	0,00	1545,76
95	Combinação (7)	886,40	0,00	1072,44
95	Combinação (8)	1117,06	0,00	1351,13
99	Combinação (1)	-1018,84	0,00	1624,75
99	Combinação (2)	-1073,10	0,01	1767,68
99	Combinação (3)	-948,88	0,00	1440,44
99	Combinação (4)	-988,86	0,00	1545,76
99	Combinação (7)	-720,84	0,00	1072,44
99	Combinação (8)	-1027,66	0,00	1351,13

APÊNDICE B3

Modelo 97-2				
Nó	Carregamento básico	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)
35	Combinação (5)	1370,14	0,00	1660,02
35	Combinação (6)	1247,49	0,00	1511,40
35	Combinação (9)	632,95	0,00	769,18
40	Combinação (5)	-1106,19	0,00	1660,02
40	Combinação (6)	-1049,53	0,00	1511,40
40	Combinação (9)	-599,58	0,00	769,18
95	Combinação (5)	1370,14	0,00	1660,02
95	Combinação (6)	1247,49	0,00	1511,40
95	Combinação (9)	632,95	0,00	769,18
99	Combinação (5)	-1106,19	0,00	1660,02
99	Combinação (6)	-1049,53	0,00	1511,40
99	Combinação (9)	-599,58	0,00	769,18

APÊNDICE C1

Modelo 97			
Carregamento básico	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)
DEAD	0,00	0,00	1,08
PP Concreto	0,00	0,00	1,25
PP Asfalto	0,00	0,00	1,13
PP Guarda rodas	0,00	0,00	1,31
PP Guarda corpo	0,00	0,00	0,00
PP Conexões	0,00	0,00	0,03
SC Pedestres	0,00	0,00	1,07
SC Multidão	0,00	0,00	2,14
Veículo tipo	0,00	0,00	21,08
Forças Long.	-16,07	0,00	0,00
F.H. Guarda corpo	0,00	0,00	0,00
Vento 0°	0,00	0,00	0,00
Combinação (5)	-13,50	0,00	44,93
Combinação (6)	-13,50	0,00	35,75
Combinação (9)	-3,21	0,00	9,65

APÊNDICE C2

Modelo 22			
Carregamento básico	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)
DEAD	0,00	0,00	1,35
PP Concreto	0,00	0,00	1,25
PP Asfalto	0,00	0,00	1,13
PP Guarda rodas	0,00	0,00	1,31
PP Guarda corpo	0,00	0,00	0,00
PP Conexões	0,00	0,00	0,03
SC Pedestres	0,00	0,00	1,07
SC Multidão	0,00	0,00	2,14
Veículo tipo	0,00	0,00	21,08
Forças Long.	-16,07	0,00	0,00
F.H. Guarda corpo	0,00	0,00	0,00
Vento 0°	0,00	0,00	0,00
Combinação (1)	-16,88	0,00	53,21
Combinação (2)	-16,88	0,00	62,03
Combinação (3)	-16,88	0,00	41,83
Combinação (4)	-16,88	0,00	48,33
Combinação (7)	-8,04	0,00	29,35
Combinação (8)	-8,68	0,00	22,22

APÊNDICE C3

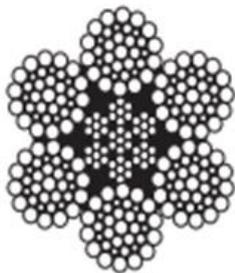
Modelo 97-2			
Carregamento básico	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)
DEAD	0,00	0,00	1,35
PP Concreto	0,00	0,00	1,25
PP Asfalto	0,00	0,00	1,13
PP Guarda rodas	0,00	0,00	1,31
PP Guarda corpo	0,00	0,00	0,00
PP Conexões	0,00	0,00	0,03
SC Pedestres	0,00	0,00	1,07
SC Multidão	0,00	0,00	2,14
Veículo tipo	0,00	0,00	20,65
Forças Long.	-16,07	0,00	0,00
F.H. Guarda corpo	0,00	0,00	0,00
Vento 0°	0,00	0,00	0,00
Combinação (5)	-13,50	0,00	44,63
Combinação (6)	-13,50	0,00	35,62
Combinação (9)	-3,21	0,00	9,83

APÊNDICE D1

h_{MLCC} (mm)	Layout ($t_1/t_2/t_3/t_4/t_5$)	$I_{x,liq}$ (mm^4)	$S_{Rx,liq}$ (mm^3)	τ_{Rx} ($10^{-3}MPa$)	$I_{y,liq}$ (mm^4)	$S_{Ry,liq}$ (mm^3)	τ_{Ry} ($10^{-3}MPa$)
100	20/20/20/20/20	6600	800	12,12	1733	400	23,08
110	20/20/30/20/20	8458	900	10,64	2633	500	18,99
120	20/30/20/30/20	10200	1000	9,80	4200	750	17,86
120	20/20/40/20/20	10667	1000	9,37	3733	600	16,07
120	30/20/20/20/30	12667	1350	10,66	1733	400	23,08
130	20/30/30/30/20	12458	1100	8,83	5850	900	15,38
130	30/20/30/20/30	15675	1500	9,57	2633	500	18,99
140	20/40/20/40/20	14600	1200	8,22	8267	1200	14,52
140	20/30/40/30/20	15067	1200	7,96	7800	1050	13,46
140	30/30/20/30/30	18667	1650	8,84	4200	750	17,86
140	30/20/40/20/30	19133	1650	8,62	3733	600	16,07
140	40/20/20/20/40	21133	2000	9,46	1733	400	23,08
150	20/40/30/40/20	17258	1300	7,53	10867	1400	12,88
150	30/30/30/30/30	22275	1800	8,08	5850	900	15,38
150	40/20/30/20/40	25492	2200	8,63	2633	500	18,99
160	20/40/40/40/20	20267	1400	6,91	13867	1600	11,54
160	30/40/20/40/30	25867	1950	7,54	8267	1200	14,52
160	30/30/40/30/30	26333	1950	7,41	7800	1050	13,46
160	40/30/20/30/40	29933	2400	8,02	4200	750	17,86
160	40/20/40/20/40	30400	2400	7,89	3733	600	16,07
170	30/40/30/40/30	30075	2100	6,98	10867	1400	12,88
170	40/30/30/30/40	35092	2600	7,41	5850	900	15,38
180	30/40/40/40/30	34733	2250	6,48	13867	1600	11,54
180	40/40/20/40/40	40333	2800	6,94	8267	1200	14,52
180	40/30/40/30/40	40800	2800	6,86	7800	1050	13,46
190	40/40/30/40/40	46292	3000	6,48	10867	1400	12,88
200	40/40/40/40/40	52800	3200	6,06	13867	1600	11,54

ANEXO A

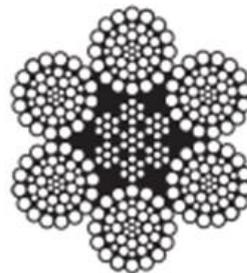
9.9 Cabo de aço classe 6x36 - Alma de aço



6x36 Warrington-Seale
1+7+(7+7)+14



6x41 Warrington-Seale
1+8+(8+8)+16



6x47 Warrington-Seale
1+6/8+(8+8)+16

Diâmetro		Massa Aprox. (kg/m)	Carga de Ruptura Mínima (tf)		
mm	pol.		IPS	EIPS	EEIPS
6,4	1/4"	0,173	2,70	3,10	-
8,0	5/16"	0,266	4,15	4,79	-
9,5	3/8"	0,399	5,96	6,86	-
11,5	7/16"	0,538	8,10	9,30	-
13,0	1/2"	0,695	10,50	12,10	-
14,5	9/16"	0,879	13,20	15,20	-
16,0	5/8"	1,044	16,20	18,70	-
19,0	3/4"	1,520	23,40	26,80	-
22,0	7/8"	2,073	31,80	36,10	-
26,0	1"	2,610	41,50	47,00	-
29,0	1.1/8"	3,456	52,50	59,00	-
32,0	1.1/4"	4,230	64,80	72,60	-
35,0	1.3/8"	5,086	78,40	87,20	-
38,0	1.1/2"	5,918	93,30	103,30	-
42,0	1.5/8"	7,368	-	122,00	-
45,0	1.3/4"	8,387	-	141,00	-
52,0	2"	11,159	-	183,70	-
57,2	2.1/4"	13,821	-	232,50	-
63,5	2.1/2"	16,980	-	274,00	301,00
69,9	2.3/4"	19,166	-	333,10	360,00
76,2	3"	24,549	-	389,00	437,20
85,7	3.3/8"	29,744	-	487,00	529,00
95,3	3.3/4"	37,606	-	585,00	640,00
102,0	4"	44,000	-	595,00	647,00
108,0	4.1/4"	46,919	-	667,00	725,10

ANEXO B1

Tabela 8 - Classes de resistência das coníferas

Coníferas (Valores na condição-padrão de referência U = 12%)					
Classes	f_{cdk} MPa	f_{vk} MPa	$E_{cd,m}$ MPa	¹⁾ $\rho_{bas,m}$ kg/m ³	$\rho_{aparente}$ kg/m ³
C 20	20	4	3 500	400	500
C 25	25	5	8 500	450	550
C 30	30	6	14 500	500	600

¹⁾ Como definida em 6.1.2.

ANEXO B2

Tabela 3 – Classes de resistência definidas em ensaios de peças estruturais

		Coníferas												Folhosas							
Símbolo		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	D18	D24	D30	D35	D40	D50	D60	D70
Propriedades de resistência MPa																					
Flexão	$f_{b,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50	18	24	30	35	40	50	60	70
Tração paralela	$f_{t,0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30	11	14	18	21	24	30	36	42
Tração perpendicular	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Compressão paralela	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29	18	21	23	25	26	29	32	34
Compressão perpendicular	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2	7,5	7,8	8,0	8,1	8,3	9,3	11	13,5
Cisalhamento	$f_{v,k}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	3,4	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,5	5,0
Propriedades de rigidez GPa																					
Módulo de elasticidade a 0° médio	$E_{0,m}$	7	8	9	9,5	10	11	12	12	13	14	15	16	9,5	10	11	12	13	14	17	20
Módulo de elasticidade a 0° característico	$E_{0,05}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10	11	8	8,5	9,2	10	11	12	14	16,8
Módulo de elasticidade a 90° médio	$E_{90,m}$	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	1,1	1,33
Módulo de elasticidade transversal médio	G_m	0,4	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	1,1	1,25
Densidade kg/m ³																					
Densidade característica	ρ_k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460	475	485	530	540	560	620	700	900
Densidade média	ρ_m	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550	570	580	640	650	660	750	840	1080
Nota 1		Valores obtidos conforme a ABNT NBR 7190-4.																			
Nota 2		Valores referentes ao teor de umidade igual a 12 %																			

ANEXO C1

Tabela E.1 - Valores médios de madeiras dicotiledóneas nativas e de florestamento

Nome comum (dicotiledóneas)	Nome científico	$\rho_{ap}^{(12\%)}$ ¹⁾ kg/m ³	$f_{c0}^{(2)}$ MPa	$f_{t0}^{(3)}$ MPa	$f_{t50}^{(4)}$ MPa	$f_v^{(5)}$ MPa	$E_{c0}^{(6)}$ MPa	$n^{(7)}$ n
Angelim araroba	<i>Vataireopsis araroba</i>	688	50,5	69,2	3,1	7,1	12 876	15
Angelim ferro	<i>Hymenolobium spp</i>	1 170	79,5	117,8	3,7	11,8	20 827	20
Angelim pedra	<i>Hymenolobium petraeum</i>	694	59,8	75,5	3,5	8,8	12 912	39
Angelim pedra verdadeiro	<i>Dinizia excelsa</i>	1 170	76,7	104,9	4,8	11,3	16 694	12
Branquiho	<i>Terminalia spp</i>	803	48,1	87,9	3,2	9,8	13 481	10
Cafearana	<i>Andira spp</i>	677	59,1	79,7	3,0	5,9	14 098	11
Canafistula	<i>Cassia ferruginea</i>	871	52,0	84,9	6,2	11,1	14 613	12
Casca grossa	<i>Vochysia spp</i>	801	56,0	120,2	4,1	8,2	16 224	31
Castelo	<i>Gossypiospermum praecox</i>	759	54,8	99,5	7,5	12,8	11 105	12
Cedro amargo	<i>Cedrella odorata</i>	504	39,0	58,1	3,0	6,1	9 839	21
Cedro doce	<i>Cedrella spp</i>	500	31,5	71,4	3,0	5,6	8 058	10
Champagne	<i>Dipterys odorata</i>	1 090	93,2	133,5	2,9	10,7	23 002	12
Cupiúba	<i>Goupia glabra</i>	838	54,4	62,1	3,3	10,4	13 627	33
Catúba	<i>Qualea paraensis</i>	1 221	83,8	86,2	3,3	11,1	19 426	13
E. Alba	<i>Eucalyptus alba</i>	705	47,3	69,4	4,6	9,5	13 409	24
E. Camaldulensis	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	899	48,0	78,1	4,6	9,0	13 286	18
E. Citriodora	<i>Eucalyptus citriodora</i>	999	62,0	123,6	3,9	10,7	18 421	68
E. Cloeziana	<i>Eucalyptus cloeziana</i>	822	51,8	90,8	4,0	10,5	13 963	21
E. Dunnii	<i>Eucalyptus dunnii</i>	690	48,9	139,2	6,9	9,8	18 029	15
E. Grandis	<i>Eucalyptus grandis</i>	640	40,3	70,2	2,6	7,0	12 813	103
E. Maculata	<i>Eucalyptus maculata</i>	931	63,5	115,6	4,1	10,6	18 099	53
E. Maidene	<i>Eucalyptus maidene</i>	924	48,3	83,7	4,8	10,3	14 431	10
E. Microcorys	<i>Eucalyptus microcorys</i>	929	54,9	118,6	4,5	10,3	16 782	31
E. Paniculata	<i>Eucalyptus paniculata</i>	1 087	72,7	147,4	4,7	12,4	19 881	29
E. Propinqua	<i>Eucalyptus propinqua</i>	952	51,6	89,1	4,7	9,7	15 561	63
E. Punctata	<i>Eucalyptus punctata</i>	948	78,5	125,6	6,0	12,9	19 360	70

¹⁾ $\rho_{ap}^{(12\%)}$ é a massa específica aparente a 12% de umidade.
²⁾ f_{c0} é a resistência à compressão paralela às fibras.
³⁾ f_{t0} é a resistência à tração paralela às fibras.
⁴⁾ f_{t50} é a resistência à tração normal às fibras.
⁵⁾ f_v é a resistência ao cisalhamento.
⁶⁾ E_{c0} é o módulo de elasticidade longitudinal obtido no ensaio de compressão paralela às fibras.
⁷⁾ n é o número de corpos-de-prova ensaiados.

NOTAS

1 As propriedades de resistência e rigidez apresentadas neste anexo foram determinadas pelos ensaios realizados no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeiras (LaMEM) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo.
2 Coeficiente de variação para resistências a solicitações normais: $\delta = 18\%$.
3 Coeficiente de variação para resistências a solicitações tangenciais: $\delta = 28\%$.

ANEXO C2

Tabela 2 – Classes de resistência de espécies de florestas nativas definidas em ensaios de corpos de prova isentos de defeitos

Classes	f_{c0k} MPa	$f_{v0,k}$ MPa	$E_{c0,med}$ MPa	Densidade a 12 % kg/m ³
D20	20	4	10 000	500
D30	30	5	12 000	625
D40	40	6	14 500	750
D50	50	7	16 500	850
D60	60	8	19 500	1 000

NOTA 1 Os valores desta Tabela foram obtidos de acordo com a ABNT NBR 7190-3.

NOTA 2 Valores referentes ao teor de umidade igual a 12 %.

NOTA 3 Os valores das classes de resistência para espécies nativas estão disponíveis na ABNT NBR 7190-3:2022, Tabela A.1.