

# **ANÁLISE DE PONTES DE MADEIRA PROTENDIDAS TRANSVERSALMENTE FORMADAS POR VIGAS-T**

**NÍVEA MARA PEREIRA ALVES**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Estruturas

**ORIENTADOR** : Prof. Dr. Antonio Alves Dias

**São Carlos**

**2002**

À minha família, em especial à tia Nilda  
e Nilza, pelo apoio, incentivo e confiança.

## AGRADECIMENTOS

Ao professor Antonio Alves Dias, que sempre se mostrou um orientador amigo, compreensivo e dedicado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pela bolsa de estudo concedida.

Ao meu esposo e amigo Luciano Jorge (Jorginho), que sempre me incentivou a crescer profissionalmente e esteve comigo nos momentos difíceis.

Ao professor Rocco, pelas palavras amigas nos momentos de incertezas e esclarecimentos técnicos que me auxiliaram na elaboração deste trabalho.

Ao professor Calil, que se mostrou atencioso às minhas dúvidas e na obtenção de material bibliográfico.

Aos colegas, professores e funcionários do Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira (LaMEM), pela colaboração em minhas atividades de mestrado.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b><i>i</i></b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b><i>iv</i></b>
<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS</b>	<b><i>vi</i></b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	<b><i>vii</i></b>
<b>RESUMO</b>	<b><i>xi</i></b>
<b>ABSTRACT</b>	<b><i>xii</i></b>
<b>1- INTRODUÇÃO</b>	<b><i>1</i></b>
<b>1.1- Objetivos</b>	<b><i>2</i></b>
<b>1.2- Justificativa</b>	<b><i>3</i></b>
<b>2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b><i>4</i></b>
<b>2.1- Introdução</b>	<b><i>4</i></b>
<b>2.2- Tabuleiros com seção transversal de altura constante</b>	<b><i>5</i></b>
2.2.1- Sistema de protensão	<i>6</i>
2.2.2- Tensões de protensão	<i>7</i>
2.2.3- Parâmetros elásticos	<i>10</i>
2.2.4- Perda de protensão	<i>11</i>
2.2.5- Juntas de topo	<i>13</i>
2.2.6- Modelos de cálculo	<i>14</i>
2.2.7- Derivações do sistema	<i>16</i>
<b>2.3- Tabuleiros formados por vigas de seção transversal T</b>	<b><i>19</i></b>
2.3.1- Construção pioneira	<i>19</i>
2.3.2- Variações construtivas do sistema T	<i>23</i>
2.3.3- Ensaio de outros protótipos	<i>28</i>
2.3.4- Método WVU	<i>31</i>
<b>2.4- Conclusões a respeito da revisão bibliográfica</b>	<b><i>33</i></b>
<b>3- ANÁLISE NUMÉRICA DO SISTEMA T</b>	<b><i>35</i></b>

<b>3.1- Condições da análise numérica</b>	<b>35</b>
3.1.1- Madeira utilizada	35
3.1.2- Características das pontes	37
<b>3.2- Procedimento de cálculo</b>	<b>38</b>
3.2.1- Dados de entrada	41
3.2.2- Cálculo do módulo de elasticidade na direção transversal das lâminas do tabuleiro $E_T$	41
3.2.3- Cálculo do número mínimo de nervuras ( $n_{\min}$ )	42
3.2.4- Cálculo da largura efetiva da mesa de uma viga-T interna ( $b_e$ )	43
3.2.5- Cálculo do fator de distribuição da carga ( $W_f$ )	46
3.2.6- Determinação do valor de cálculo do momento fletor total ( $M_{d_T}$ )	47
3.2.7- Determinação do valor de cálculo do esforço cortante total ( $V_{d_T}$ )	49
3.2.8- Verificações	50
3.2.9- Cálculo do volume de madeira	53
<b>3.3-Descrição e resultados da análise numérica</b>	<b>54</b>
3.3.1- Dimensionamento das pontes formadas por vigas-T	54
3.3.2- Influência da altura do tabuleiro e da largura das nervuras na altura $D$	63
3.3.3- Influência da espécie de madeira do tabuleiro na altura $D$	66
3.3.4- Influência da espécie de madeira das nervuras na altura $D$	73
<b>3.4-Discussões sobre a análise numérica</b>	<b>80</b>
<b>3.5- Exemplo do método de cálculo</b>	<b>82</b>
<b>4- EXPERIMENTAÇÃO DO MODELO REDUZIDO</b>	<b>83</b>
<b>4.1- Características do modelo reduzido</b>	<b>83</b>
4.1.1- Caracterização das nervuras	84
4.1.2- Caracterização das lâminas do tabuleiro	86
4.1.3- Classificação das nervuras e das lâminas do tabuleiro	88
<b>4.2- Montagem do modelo</b>	<b>88</b>
4.2.1- Distribuição das nervuras e das lâminas do tabuleiro	88
4.2.2- Apoios do modelo	91
4.2.3- Sistema de protensão	92

4.2.4- Dispositivos utilizados na experimentação	92
4.2.4.1- Dispositivos para aplicação das forças	92
4.2.4.2- Equipamentos utilizados para medir deslocamentos	93
4.2.5- Formas de aplicação das forças	93
<b>4.3- Resultados obtidos e análises</b>	<b>95</b>
4.3.1- Resultados	96
4.3.2- Análise da rigidez à flexão longitudinal do modelo	101
4.3.3- Análise do fator de distribuição da carga ( $W_f$ )	104
<b>4- CONCLUSÕES</b>	<b>107</b>
<b>6- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>109</b>

APÊNDICE 1 - Programa para o cálculo e o dimensionamento de pontes de madeira protendidas transversalmente formadas por vigas-T

## LISTA DE FIGURAS

<i>FIGURA 1 - Ponte de madeira com vigas-T (OKIMOTO, 1997)</i>	1
<i>FIGURA 2- Planta e seção transversal de tabuleiro laminado protendido</i>	6
<i>FIGURA 3- Elevação de tabuleiro laminado protendido</i>	6
<i>FIGURA 4 - Sistema de Ancoragem</i>	7
<i>FIGURA 5 - Curvas Finais das Relações Elásticas para as madeira Pinus Elliottii e Eucalipto Citriodora (OKIMOTO, 1997)</i>	8
<i>FIGURA 6 - Transferência das cargas de roda</i>	9
<i>FIGURA 7 - Perda de Protensão e Sistemas de Retensão</i>	13
<i>FIGURA 8 - Tabuleiro com seção transversal de altura constante</i>	16
<i>FIGURA 9 - Tabuleiro de altura constante com peças em MLC</i>	16
<i>FIGURA 10 - Sistema sanduíche</i>	17
<i>FIGURA 11 - Tabuleiro formado por vigas-T</i>	17
<i>FIGURA 12 - Treliças longitudinais protendidas transversalmente.</i>	18
<i>FIGURA 13 - Tabuleiro com seção caixão</i>	18
<i>FIGURA 14 - Tabuleiro transversal com protensão longitudinal</i>	19
<i>FIGURA 15 - Dimensões da Ponte "Barlow Drive"</i>	20
<i>FIGURA 16 - Modelo ensaiado por DICKSON &amp; GANGARAO (1990)</i>	20
<i>FIGURA 17 - Localização da linha neutra da viga-T central do modelo</i>	21
<i>FIGURA 18 - Ponte "Barlow Drive"</i>	22
<i>FIGURA 19 - Dimensões da Ponte "Camp Arrowhead"</i>	24
<i>FIGURA 20 - Ponte "Camp Arrowhead"</i>	25
<i>FIGURA 21 - Pontes com Vigas-T de LVL</i>	27
<i>FIGURA 22 - Condição de carregamento A</i>	28
<i>FIGURA 23 - Condição de carregamento B</i>	29
<i>FIGURA 24 - Modelo com três nervuras sob força estática na nervura interna e externa</i>	30
<i>FIGURA 25 - Modelo com quatro nervuras sob força estática na nervura interna e externa</i>	30
<i>FIGURA 26 - Distribuição de tensão não-linear de uma viga-T isolada</i>	32
<i>FIGURA 27 - Ponte com uma faixa de tráfego</i>	38

<i>FIGURA 28 - Ponte com duas faixas de tráfego</i>	38
<i>FIGURA 29 - Número mínimo de nervuras</i>	39
<i>FIGURA 30 - Número máximo de nervuras</i>	39
<i>FIGURA 31 - Fluxograma do método de cálculo</i>	40
<i>FIGURA 32 - Desenho esquemático de uma ponte formada por vigas-T</i>	41
<i>FIGURA 33 - Viga-T interna efetiva</i>	44
<i>FIGURA 34 - Viga-T interna transformada</i>	45
<i>FIGURA 35 - Viga-T externa efetiva</i>	45
<i>FIGURA 36 - Viga-T externa transformada</i>	46
<i>FIGURA 37 - Viga-T interna solicitada pela carga móvel</i>	48
<i>FIGURA 38 - Viga-T interna solicitada pela carga permanente</i>	49
<i>FIGURA 39 - Viga-T interna solicitada pela carga móvel</i>	50
<i>FIGURA 40 - Viga-T interna solicitada pela carga móvel</i>	52
<i>FIGURA 41 - Gráficos <math>D \times L</math> para pontes com 1 faixa de tráfego</i>	57
<i>FIGURA 42 - Gráficos <math>V \times L</math> para pontes com 1 faixa de tráfego</i>	58
<i>FIGURA 43 - Gráficos <math>D \times L</math> para pontes com 2 faixas de tráfego</i>	61
<i>FIGURA 44 - Gráficos <math>V \times L</math> para pontes com 2 faixas de tráfego</i>	62
<i>FIGURA 45 - Gráficos <math>D \times B_w</math> e <math>D \times t</math> para pontes com 1 e 2 faixas de tráfego</i>	65
<i>FIGURA 46 - Gráficos <math>D \times n</math> para pontes com 1 e 2 faixas de tráfego</i>	71
<i>FIGURA 47 - Gráficos <math>V \times n</math> para pontes com 1 e 2 faixas de tráfego</i>	72
<i>FIGURA 48 - Gráficos <math>D \times n</math> para pontes com 1 e 2 faixas de tráfego</i>	78
<i>FIGURA 49 - Gráficos <math>V \times n</math> para pontes com 1 e 2 faixas de tráfego</i>	79
<i>FIGURA 50 - Dimensões das nervuras para pontes com 1 e 2 faixas de tráfego</i>	81
<i>FIGURA 51 - Altura do tabuleiro em função do espaçamento entre nervuras</i>	82
<i>FIGURA 52 - Dimensões do modelo reduzido</i>	84
<i>FIGURA 53 - Ensaio de caracterização das nervuras</i>	84
<i>FIGURA 54 - Ensaio de caracterização das lâminas do tabuleiro</i>	86
<i>FIGURA 55 - Distribuição das nervuras no modelo reduzido</i>	89
<i>FIGURA 56 - Conjunto de lâminas formado por quatro peças</i>	89
<i>FIGURA 57 - Distribuição dos conjuntos de lâminas no modelo reduzido</i>	91
<i>FIGURA 58 - Detalhe do apoio do modelo</i>	91
<i>FIGURA 59 - Disposição das células de carga</i>	92



<i>FIGURA 60 - Medida dos deslocamentos verticais no meio do vão das nervuras</i>	<i>93</i>
<i>FIGURA 61 - Força uniformemente distribuída</i>	<i>94</i>
<i>FIGURA 62 - Simulação de um eixo centrado</i>	<i>94</i>
<i>FIGURA 63 - Simulação de um eixo não centrado</i>	<i>95</i>
<i>FIGURA 64 - Gráficos <math>d \times P</math> para os carregamentos correspondentes</i>	<i>100</i>
<i>FIGURA 65 - Linhas elásticas transversais para os carregamentos correspondentes</i>	<i>101</i>
<hr/>	
<i>FIGURA 66 - Vigas-T transformadas</i>	<i>103</i>

## LISTA DE TABELAS

<i>TABELA 1 - Valores de projeto para o fator de redução da rigidez longitudinal (OKIMOTO, 1997)</i>	14
<i>TABELA 2 - Tensões e deslocamentos máximos da porção do tabuleiro entre as nervuras 3 e 4</i>	26
<i>TABELA 3 - Tensões e deslocamentos máximos das nervuras 3 e 4</i>	26
<i>TABELA 4 - Dimensões e detalhes da pontes (RITTER et al, 1996)</i>	28
<i>TABELA 5 - Classes de resistência para coníferas (NBR 7190/97)</i>	37
<i>TABELA 6 - Classes de resistência para dicotiledôneas (NBR 7190/97)</i>	37
<i>TABELA 7 - Alturas das nervuras D para pontes com 1 faixa de tráfego</i>	55
<i>TABELA 8 - Volumes de madeiras V para pontes com 1 faixa de tráfego</i>	56
<i>TABELA 9 - Alturas das nervuras D para pontes com 2 faixas de tráfego</i>	59
<i>TABELA 10 - Volumes de madeiras V para pontes com 2 faixas de tráfego</i>	60
<i>TABELA 11 - Alturas D para pontes com 1 faixa de tráfego (<math>B_w</math>, t, D em cm)</i>	63
<i>TABELA 12 - Alturas D para pontes com 2 faixas de tráfego (<math>B_w</math>, t, D em cm)</i>	64
<i>TABELA 13 - Alturas das nervuras D para pontes com 1 faixa de tráfego</i>	67
<i>TABELA 14 - Volumes de madeiras V para pontes com 1 faixa de tráfego</i>	68
<i>TABELA 15 - Alturas das nervuras D para pontes com 2 faixas de tráfego</i>	69
<i>TABELA 16 - Volumes de madeiras V para pontes com 2 faixas de tráfego</i>	70
<i>TABELA 17 - Alturas das nervuras D para pontes com 1 faixa de tráfego</i>	74
<i>TABELA 18 - Volumes de madeiras V para pontes com 1 faixa de tráfego</i>	75
<i>TABELA 19 - Alturas das nervuras D para pontes com 2 faixas de tráfego</i>	76
<i>TABELA 20 - Volume de madeira V para pontes com 2 faixas de tráfego</i>	77
<i>TABELA 21 - Módulos de elasticidade na direção longitudinal <math>E_{L,n}</math> das nervuras</i>	85
<i>TABELA 22 - Módulos de elasticidade na direção longitudinal das lâminas do tabuleiro <math>E_{L,t}</math></i>	87
<i>TABELA 23 - Distribuição final das nervuras</i>	88
<i>TABELA 24 - Distribuição final das lâminas do tabuleiro</i>	90
<i>TABELA 25 - Força uniformemente distribuída – (I)</i>	96
<i>TABELA 26 - Carregamento de um eixo com a roda externa na nervura 1 – (II)</i>	97
<i>TABELA 27 - Carregamento de um eixo com a roda externa na nervura 2 – (III)</i>	97

*TABELA 28 - Carregamento de um eixo com a roda externa na nervura 5 – (IV) \_ 98*

*TABELA 29 - Carregamento de um eixo com a roda externa na nervura 6 – (V) \_\_ 98*

*TABELA 30 - Carregamento centrado de um eixo – (VI)\_\_\_\_\_ 99*

*TABELA 31 - Valores geométricos, efetivos e transformados das nervuras e abas 103*

## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
LVL	Lâminas de pequena espessura coladas com as fibras orientadas na mesma direção (Laminated Veneer Lumber)
MLC	Madeira laminada colada
NBR	Norma Brasileira Registrada
OHBDC	Ontario Highway Bridge Design Code
USDA	United States Department of Agriculture
WVU	West Virginia University

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	Largura de contato do pneu
$A_{gr}$	Área do guarda-rodas
$A_n$	Área da nervura
$A_t$	Área do tabuleiro entre duas nervuras
$A_{asf}$	Área do revestimento asfáltico sobre uma seção do tabuleiro
$A_{bal}$	Área da aba de uma viga-T interna
$A_{balx}$	Área da aba de uma viga-T externa
$b$	Largura da ponte
$b_e$	Largura efetiva da mesa de uma viga-T interna
$b_{eti}$	Largura efetiva transformada da mesa de uma viga-T interna
$b_l$	Comprimento efetivo do pneu
$b_t$	Largura efetiva transformada da aba de uma viga-T interna
$b_{tex}$	Largura efetiva transformada da aba de uma viga-T externa
$B$	Largura da aba de uma viga-T
$B_e$	Rigidez à flexão longitudinal de uma viga-T externa
$B_E$	Largura efetiva da aba de uma viga-T
$B_w$	Largura da nervura
$c$	Distância da linha neutra até a parte tracionada ou comprimida da viga-T
$c_{asf}$	Espessura da capa asfáltica
$C_{bj}$	Fator de redução da rigidez longitudinal
$C_0$	Coeficiente de deslocamento de uma viga-T externa
$D$	Altura da nervura
$D_T$	Rigidez à flexão transversal do tabuleiro
$E_{c0,ef}$	Módulo de elasticidade longitudinal efetivo na compressão paralela às fibras
$E_{c0,m}$	Módulo de elasticidade longitudinal médio na compressão paralela às fibras
$E_{L,n}$	Módulo de elasticidade na direção longitudinal da nervura
$E_{L,t}$	Módulo de elasticidade na direção longitudinal das lâminas do tabuleiro
$E_T$	Módulo de elasticidade na direção transversal do tabuleiro

$f_{c0,k}$	Resistência característica da madeira à compressão paralela às fibras
$f_{c0,d}$	Resistência de cálculo da madeira à compressão paralela às fibras
$f_{c90,k}$	Resistência característica da madeira à compressão perpendicular às fibras
$f_{c90,d}$	Resistência de cálculo da madeira à compressão perpendicular às fibras
$f_{t0,k}$	Resistência característica da madeira à tração paralela às fibras
$f_{t0,d}$	Resistência de cálculo da madeira à tração paralela às fibras
$f_{v0,k}$	Resistência característica ao cisalhamento paralelo às fibras
$f_{v0,d}$	Resistência de cálculo ao cisalhamento paralelo às fibras
$f_y$	Tensão de escoamento do aço
$G_{LT}$	Módulo de elasticidade transversal do tabuleiro
$I_i, I_{ex}$	Momento de inércia da viga-T interna e externa, respectivamente
$I_{transformada}$	Momento de inércia da viga-T transformada
$K_{mod}$	Coefficiente de modificação considerando influências não cobertas por $\gamma_w$
$K_\delta, K_\sigma$	Coefficiente de regressão do deslocamento e da tensão, respectivamente
$l_b$	Comprimento da barra de protensão
$L$	Vão da ponte
$M_{m\acute{a}x.cm}$	Momento fletor máximo devido à carga móvel em função da força concentrada de projeto $P_d$
$M_{m\acute{a}x.cp}$	Momento fletor máximo devido à carga permanente total
$M_{m\acute{a}x.m}$	Momento fletor máximo devido à carga móvel
$Md_T$	Valor de cálculo do momento fletor total
$M_R$	Razão Modular
$M_S$	Momento estático
$n$	Número de nervuras
$N_L$	Número de faixas de tráfego
$p$	Força uniformemente distribuída na faixa ocupada pelo veículo-tipo
$P$	Carga do eixo traseiro do veículo-tipo
$P_{cN}$	Força concentrada aplicada no ensaio de caracterização das nervuras
$P_{cT}$	Força concentrada aplicada no ensaio de caracterização das lâminas do tabuleiro
$P_d$	Força concentrada de projeto

$P_e$	Força concentrada que produz um momento equivalente ao momento máximo devido à carga móvel
$P_{nt}$	Carga permanente total suportada por uma nervura interna
$P_{asf}$	Peso-próprio do revestimento asfáltico sobre uma seção do tabuleiro, linearmente distribuído ao longo do vão
$P_b$	Peso-próprio de uma barra de protensão
$P_{bp}$	Peso-próprio das barras de protensão, linearmente distribuído ao longo do vão
$P_i$	Parcela de carga absorvida por cada nervura do modelo
$P_{i,máx}$	Parcela de carga máxima absorvida por cada nervura do modelo
$P_n$	Peso-próprio da nervura, linearmente distribuído ao longo do vão
$P_t$	Peso-próprio do tabuleiro entre duas nervuras, linearmente distribuído ao longo do vão
$s$	Espaçamento entre as barras de protensão
$S$	Espaçamento entre nervuras
$t$	Altura do tabuleiro
$V$	Esforço cortante devido ao funcionamento
$V_{cp}$	Esforço cortante devido à carga permanente
$V_{crc}$	Esforço cortante devido às cargas de rodas concentradas, sem distribuição de carga
$V_{crd}$	Esforço cortante devido às cargas de rodas distribuídas
$V_{cm}$	Esforço cortante devido à carga móvel
$V_{res}$	Esforço cortante resistente
$Vd_T$	Valor de cálculo do esforço cortante total
$W_f$	Fator de distribuição da carga
$x$	Distância entre o apoio e a primeira carga de eixo P
$x'$	Duas vezes a altura da nervura
$y_{bal}$	Localização da linha neutra da aba
$y_n$	Localização da linha neutra da nervura
$y_i, y_{ex}$	Localização da linha neutra da viga-T interna e externa, respectivamente
$\alpha$	Coeficiente para pontes rodoviárias com revestimento de concreto asfáltico

$\delta_{cm}$	Deslocamento devido à carga móvel
$\delta_{cp}$	Deslocamento devido à carga permanente
$\delta_T$	Deslocamento total devido à carga permanente e à carga móvel
$\delta_{cN}$	Deslocamento da nervura medido no ensaio de caracterização
$\delta_{cT}$	Deslocamento da lâmina do tabuleiro medido no ensaio de caracterização
$\phi$	Impacto vertical
$\phi_b$	Diâmetro da barra de protensão
$\gamma_{asf}$	Peso específico do asfalto
$\gamma_{Gi}$	Coefficiente de ponderação das ações permanentes
$\gamma_{Qi}$	Coefficiente de ponderação das ações variáveis
$\gamma_w$	Coefficiente de minoração das propriedades da madeira
$\lambda$	Relação entre a largura e o vão da ponte
$\mu_s$	Coefficiente de atrito estático
$\rho$	Densidade aparente
$\sigma_t, \sigma_c$	Tensão de tração e compressão paralela às fibras, respectivamente
$\sigma_N$	Tensão de protensão no tabuleiro
$\tau$	Tensão de cisalhamento
$\psi$	Fator de combinação e de utilização para cargas móveis em pontes rodoviárias



## RESUMO

ALVES, N. M. P. (2002). *Análise de pontes de madeira protendidas transversalmente formadas por vigas-T*. São Carlos, 2002. 110p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Neste trabalho é estudada uma variação do sistema estrutural de ponte de madeira com tabuleiro laminado protendido, em que a seção transversal é formada por vigas-T. As nervuras destas vigas são de madeira laminada colada e o tabuleiro de madeira serrada. São analisadas pontes da classe 30, com uma ou duas faixas de tráfego, dimensionando-se os elementos estruturais para diversas situações de projeto, e avaliando-se as influências das espécies e classes de resistência das madeiras e dos fatores geométricos (largura da nervura, altura do tabuleiro e espaçamento entre nervuras) na altura das nervuras. O procedimento de cálculo utilizado no dimensionamento das pontes de madeira formadas por vigas-T baseia-se no método WVU. Para o desenvolvimento deste trabalho, o método foi adaptado aos critérios da Associação Brasileira de Normas Técnicas, “NBR 7188/84 - Cargas Móveis em Pontes Rodoviárias e Passarelas de Pedestres” e “NBR 7190/97 - Projeto de Estruturas de Madeira”, e programado em software MATHCAD©. Os resultados obtidos indicam que não existe influência significativa na altura da nervura, ao se utilizar madeira da classe C 30 ou C 40 no tabuleiro, ou ao se variar a altura do tabuleiro de 15 até 25 cm. O modelo teórico é avaliado experimentalmente, por meio de modelo reduzido na escala geométrica de 1:5, obtendo-se boa concordância entre os valores experimentais e os teóricos.

**PALAVRAS-CHAVE:** pontes de madeira, protensão transversal, vigas-T.

## ABSTRACT

ALVES, N. M. P. (2002). *Analysis of Transversely Stressed Timber Bridges composed of T-Beams*. São Carlos, 2002. 110p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

In this work it is studied a variation of the structural system of timber bridge with transversely laminated deck, in which the transversal section is composed of T-beams. The stringers of those beams are made of glued laminated timber and the deck of sawed timber. Bridges of class 30 are analyzed, with one or two traffic lanes, where the structural elements are designed for different project situations, and evaluated the influences of specimens and wood classes and geometric factors (width of stringer, depth of deck and spacing of stringers) in the depth of stringers. The calculus procedure used in the design of the timber bridges composed of T-beams is based on the WVU Method. To the development of this work, the method was adapted to the criteria of the Brazilian standards “NBR 7188/84 – Live Loads in Highway Bridges and Pedestrian Bridges” and “NBR 7190/97 – Project of Timber Structures” and programmed in MATHCAD© software. The results obtained show that there is no significant influence in the depth of stringer, either by using wood class C 30 or C 40, or by varying the height of the deck from 15 to 25 cm. The theoretical model is evaluated experimentally, by means of a reduced model at 1:5 geometric scale, being obtained well agreement between experimental and theoretical values.

**KEYWORDS:** timber bridges, transversal stress, T-beams.

## 1- INTRODUÇÃO

O sistema estrutural de pontes de madeira com tabuleiro protendido se originou no Canadá, em 1976, como uma forma de recuperar tabuleiros pregados, que apresentavam problemas de delaminação. O bom desempenho estrutural dos tabuleiros recuperados com esta técnica incentivou a sua aplicação na construção de novas pontes.

O sistema laminado protendido consiste em peças de madeira posicionadas ao longo do vão, umas adjacentes às outras, e protendidas transversalmente por barras ou cabos de aço de alta resistência. Esta protensão transversal permite que o esforço cortante vertical seja transmitido lateralmente entre as lâminas, por meio do atrito. Com isto, o sistema comporta-se como uma placa ortotrópica capaz de distribuir lateralmente as cargas dos veículos e de resistir à flexão transversal.

Os tabuleiros protendidos com seção transversal constituído por peças de mesma altura são os mais utilizados para vãos menores que 10 m. Devido à necessidade de se construir pontes para vencer vãos maiores, foram estudadas derivações deste sistema, utilizando formas estruturais mais eficientes para a seção transversal (sistema T, sistema sanduíche, seção caixão e outras). O sistema T, mostrado na figura 1, consiste na introdução de vigas intermediárias com maiores dimensões no tabuleiro.

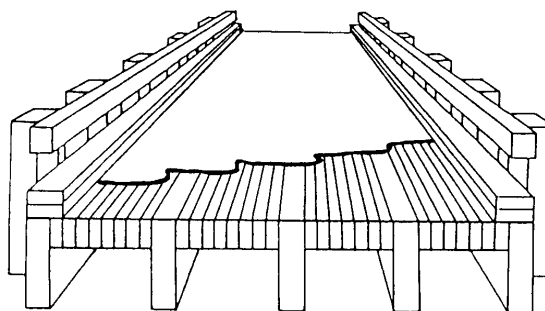


FIGURA 1 - Ponte de madeira com vigas-T (OKIMOTO, 1997)

Neste trabalho são avaliadas as pontes formadas por vigas-T, utilizando nervuras de madeira laminada colada (MLC) e tabuleiro de madeira serrada. Inicialmente, é apresentada uma revisão bibliográfica a respeito das pontes de madeira protendidas, incluindo a variação que utiliza vigas-T, contendo os aspectos mais importantes relacionados a este sistema estrutural. Posteriormente, são efetuados os dimensionamentos destas pontes, para diversas situações de projeto, seguindo o procedimento de cálculo baseado no método WVU (Método desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Civil da West Virginia University e apresentado por DAVALOS & SALIM (1992)) para o sistema T das pontes de madeira protendidas transversalmente, e um estudo para verificar a influência das espécies e classes de resistência das madeiras e das variações dos fatores geométricos na altura das nervuras. Por último, é realizado o ensaio de um modelo reduzido de ponte formada por vigas-T, para se avaliar o modelo teórico utilizado no dimensionamento destas pontes.

Para o desenvolvimento deste trabalho, o método WVU foi adaptado aos critérios da Associação Brasileira de Normas Técnicas, “NBR 7188/84 - Cargas Móveis em Pontes Rodoviárias e Passarelas de Pedestres” e “NBR 7190/97 - Projeto de Estruturas de Madeira”, e programado em software MATHCAD®.

## 1.1- Objetivos

O objetivo deste trabalho é:

- determinar as dimensões efetivas das pontes de madeira protendidas transversalmente formadas por vigas-T (altura do tabuleiro, altura e largura da nervura, espaçamento entre nervuras), conhecendo-se o vão, a largura e a classe da ponte, as espécies e as classes de resistência das madeiras;
- verificar como a altura da nervura é influenciada pelas espécies e classes de resistência das madeiras, e pela altura do tabuleiro e largura da nervura;
- e avaliar o modelo teórico utilizado no dimensionamento destas pontes, por meio do ensaio de um modelo reduzido de ponte formada por vigas-T.

## 1.2- Justificativa

Como o Brasil possui grandes áreas com potencialidade para o reflorestamento, uma solução possível para interligar bairros e regiões carentes de pontes em estradas vicinais é a construção de pontes de madeira de pequenos vãos para as vias secundárias ou rurais, utilizando espécies de reflorestamento.

Alguns estudos já foram desenvolvidos no Brasil para as pontes pretendidas de madeira com tabuleiros de altura constante, notadamente os trabalhos de PRATA (1994) e OKIMOTO (1997). No entanto, devido à necessidade de superar a limitação apresentada pelos vãos destas pontes, da ordem de 10 m, propõe-se a análise teórica e experimental das pontes pretendidas de madeira formadas por vigas-T.

## **2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1- Introdução**

“A evolução da utilização do concreto armado e do aço na construção das pontes tem acompanhado a história do homem na idade moderna. A tecnologia da madeira também tem alcançado alto nível, mas sua utilização é muito menos freqüente” (HELLMEISTER, 1978). No entanto, a madeira é renovável, tem grande potencial de resistência e durabilidade, tornando-a um bom material para a construção de pontes em estradas vicinais. Sendo o Brasil um país de grandes reservas florestais e de grande potencialidade para o reflorestamento, a construção de pontes de madeira é economicamente viável.

As pontes em estrutura de madeira para pequenos e médios vãos são amplamente utilizadas em estradas vicinais nos E.U.A. e Canadá, principalmente com a utilização de MLC. Um dos sistemas estruturais interessantes recentemente desenvolvidos, foi o sistema estrutural de pontes de tabuleiro laminado protendido, que se originou no Canadá, na região de Ontário, em 1976, como um método de recuperar tabuleiros laminados pregados, que se encontravam deteriorados por falha na laminação. O sistema laminado pregado consiste em vigas de madeira serrada posicionadas ao longo do vão, umas adjacentes às outras, e conectadas por pregos. Devido à solicitação dinâmica da ponte e às condições químicas (o sal utilizado para descongelar a superfície de tráfego das pontes atacava os elementos de aço das conexões) impostas ao sistema, surgiram diversos problemas que comprometiam o desempenho e a função para os quais foram projetados. Um dos problemas encontrados foi a delaminação dos tabuleiros pregados que corresponde à perda da continuidade transversal do tabuleiro por separação das peças e, como a funcionalidade estrutural deste sistema depende da capacidade de distribuição das

ações da roda entre as lâminas adjacentes, apenas as vigas imediatamente abaixo das rodas eram solicitadas. Apesar desta deficiência estrutural, a madeira estava em perfeitas condições e, deste modo, a solução aplicada foi a implementação de um novo sistema de transferência das ações pela utilização de barras posicionadas transversalmente ao tabuleiro. Estas barras são submetidas a um tensionamento que comprime as vigas de madeira fazendo com que surjam propriedades de resistência e elasticidade na direção transversal. Com força de protensão adequada, previne-se que as laminas se separem nas faces de contato na parte inferior das fibras quando as forças são aplicadas perpendicularmente ao plano do tabuleiro. Como resultado, a ponte voltou a operar com a capacidade de tráfego prevista em projeto, demonstrando a grande eficácia estrutural deste novo sistema. Este fato gerou estudos para aplicação do sistema protendido em projetos de novas construções (OKIMOTO, 1997).

## 2.2- Tabuleiros com seção transversal de altura constante

A seguir são apresentadas as informações relacionadas ao sistema estrutural de pontes com tabuleiro de altura constante e que são utilizadas para o sistema T das pontes de madeira protendidas transversalmente. Estas informações referem-se ao sistema de protensão, à tensão de protensão, aos parâmetros elásticos, à perda de protensão e às juntas de topo. Além disto, são mostrados os modelos de cálculo e as derivações do sistema protendido transversalmente.

As figuras 2 e 3 apresentam um desenho esquemático das pontes protendidas com seção transversal de altura constante.

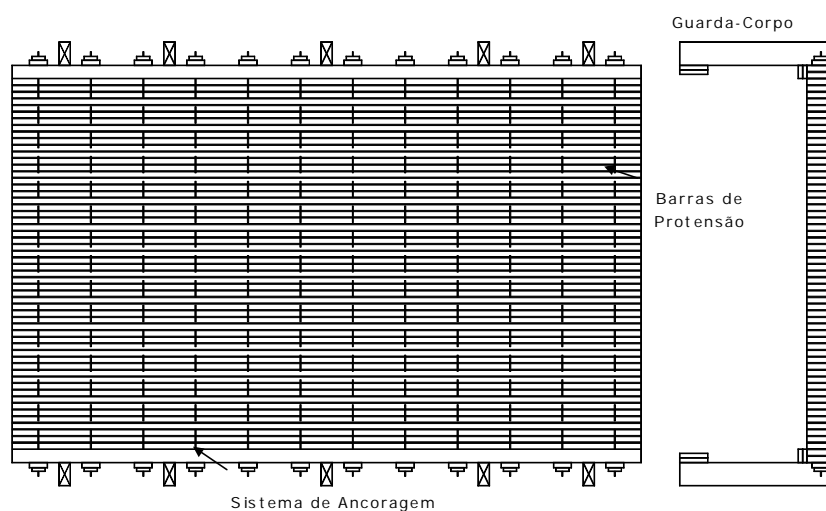


FIGURA 2- Planta e seção transversal de tabuleiro laminado protendido  
(OKIMOTO, 1997)

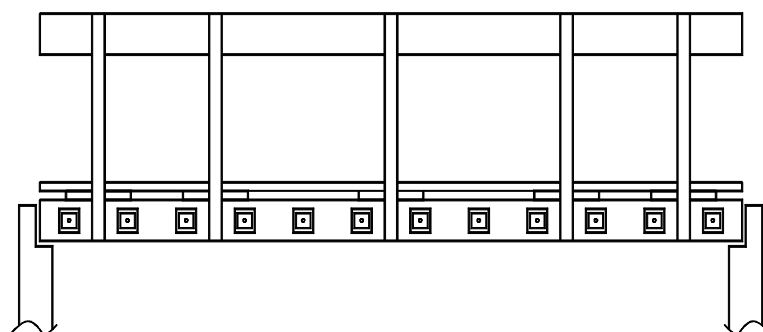


FIGURA 3- Elevação de tabuleiro laminado protendido  
(OKIMOTO, 1997)

### 2.2.1- Sistema de protensão

Segundo OKIMOTO (1997), o sistema de protensão dos tabuleiros de altura constante pode ser constituído por cabos ou barras de aço de alta resistência, com diâmetros nominais entre 15 mm e 32 mm. Estas barras são tensionadas usando cilindros hidráulicos e ancoradas por um conjunto de porca sextavada, placa de ancoragem e placa de distribuição de aço comum que estão nas vigas de madeira externas, conforme mostrado na figura 4.



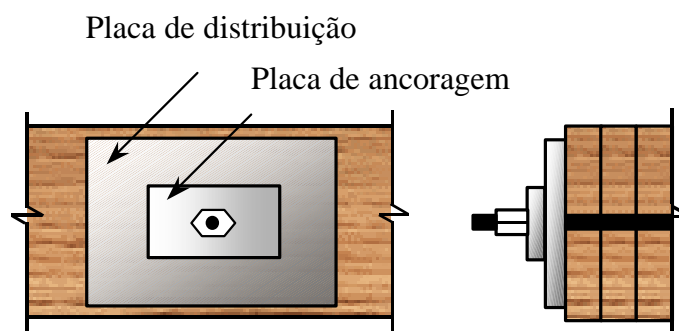


FIGURA 4 - Sistema de Ancoragem

### 2.2.2- Tensões de protensão

Para estabelecer a tensão de protensão adequada para as espécies de madeira nacionais, OKIMOTO (1997) ensaiou à flexão e à torção, placas de *Pinus Elliottii* (*Pinus elliotii* var. *elliottii*) e Eucalipto Citriodora (*Eucalyptus citriodora*) sob as tensões 0,3; 0,5; 0,7; 0,8 e 0,9 MPa. Deste modo, os parâmetros elásticos destes tabuleiros [módulo de elasticidade na direção transversal ( $E_T$ ) e módulo de elasticidade transversal ( $G_{LT}$ )] foram obtidos em função do módulo de elasticidade na direção longitudinal ( $E_L$ ). A aplicação da protensão igual a 0,3 MPa não apresentou resultados satisfatórios para as placas de Eucalipto Citriodora, pois não desenvolveu atrito suficiente e ocorreram deslizamentos entre as lâminas. A aplicação dos demais valores está representada na figura 5.

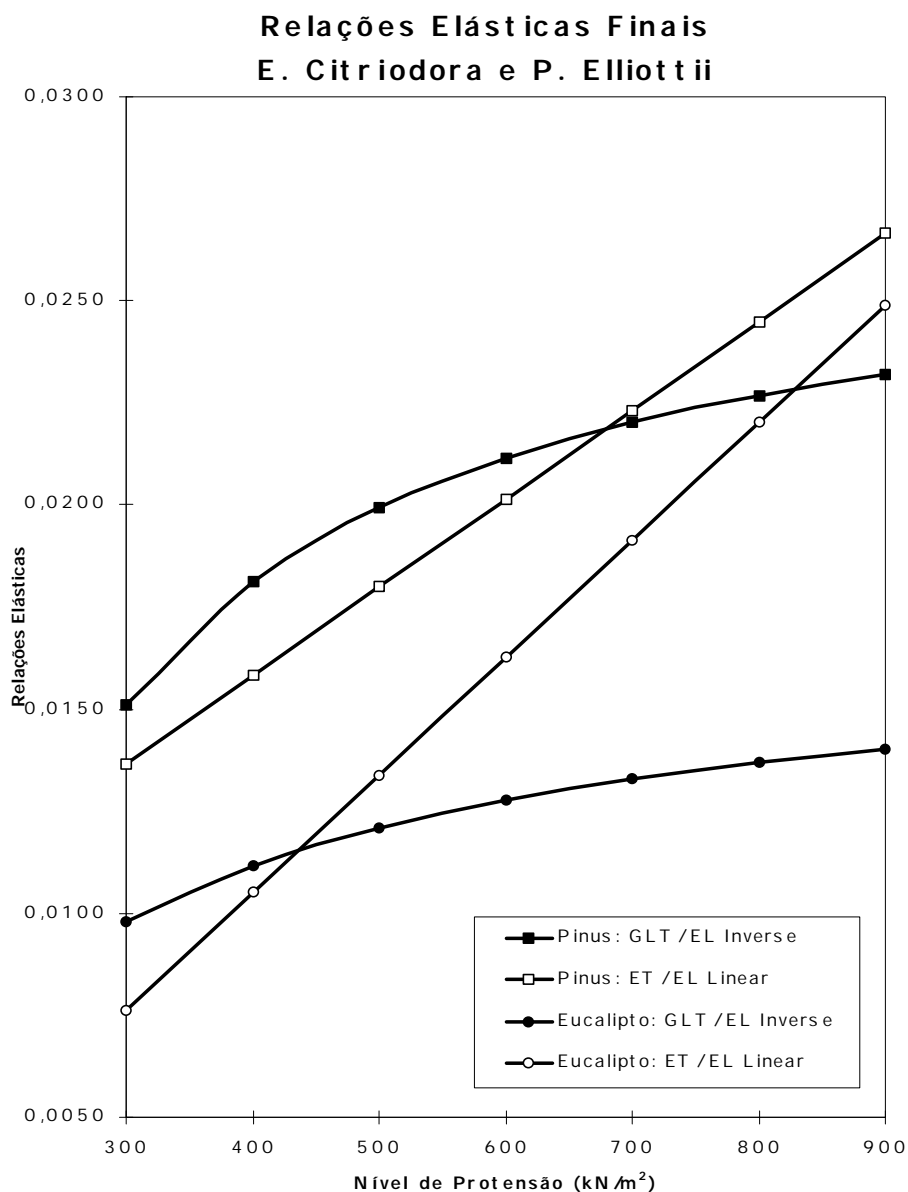


FIGURA 5 - Curvas Finais das Relações Elásticas para as madeiras Pinus Elliottii e Eucalipto Citriodora (OKIMOTO, 1997)

A análise da figura 5 permite verificar:

- que tensões maiores que 0,7 MPa não ocasionam aumentos significativos nos valores de  $G_{LT}$ ;
- a tendência de estabilização dos valores de  $G_{LT}$  para as tensões maiores que 0,9 MPa.

Sabendo assim, que a protensão deve ser maior que 0,3 MPa e pode ser menor ou igual a 0,9 MPa, o autor recomenda 0,7 MPa para qualquer classe de resistência da madeira definida de acordo com a NBR 7190/97.

No entanto, há autores que sugerem tensões de protensão menores. De acordo com GANGARAO & LATHEEF (1991), a pesquisa realizada na University of Wisconsin e na West Virginia University indica que a tensão de protensão adequada para prevenir deslizamento vertical e separação das laminações dos tabuleiros protendidos é igual a 0,34 MPa.

Segundo CREWS (1998), o fator mais crítico para o projeto e a manutenção dos sistemas protendidos transversalmente é alcançar e manter a força de protensão adequada entre as lâminas, de tal modo que a atuação como placa ortotrópica seja mantida e o tabuleiro resista efetivamente às cargas aplicadas. Estas cargas são distribuídas lateralmente sobre uma largura de distribuição ( $D_w$ ) do tabuleiro (Figura 6) e transmitidas aos apoios. Os ensaios e monitoramento de campo na Austrália e nos E.U.A. demonstraram que os tabuleiros protendidos de seção constante comportam-se de modo elástico-linear quando a protensão mínima no tabuleiro é mantida (aproximadamente 0,5 MPa para “softwoods” ou madeiras moles e 0,7 MPa para “hardwoods” ou madeiras duras).

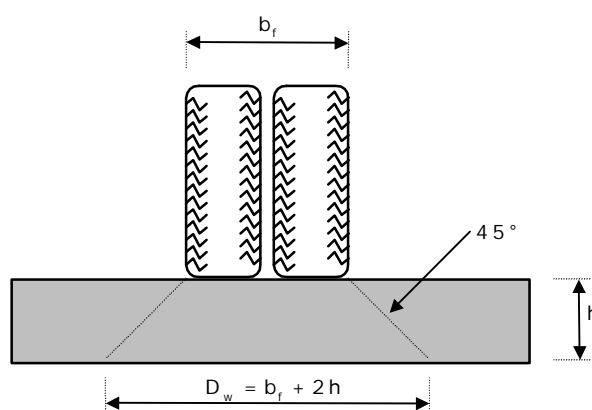


FIGURA 6 - Transferência das cargas de roda  
(OKIMOTO, 1997)

### 2.2.3- Parâmetros elásticos

PRATA (1994) ensaiou duas placas de Eucalipto Citriodora sob tensão de protensão igual a 1,4 MPa com o objetivo de determinar os parâmetros elásticos das placas, visando a utilização desta madeira nas pontes protendidas. Estes ensaios permitiram determinar que os parâmetros elásticos destas foram:  $E_T = 3,6\%.E_L$  e  $G_{LT} = 4,9\%.E_L$ .

Com o objetivo de estudar o comportamento estrutural das pontes protendidas de madeira com seção transversal de altura constante e pequenos vãos, OKIMOTO (1997) ensaiou em laboratório placas de Pinus Elliottii (Classe C 25 - Conífera) e Eucalipto Citriodora (Classe C 40 - Dicotiledônea) submetidas à flexão longitudinal para a determinação do  $E_L$ , à torção a  $0^\circ$  para a determinação do  $G_{LT}$  e à torção a  $\pm 45^\circ$  para a determinação do  $E_T$ . O ângulo especificado é entre os eixos principais geométricos e os eixos de ortotropia elástica. As relações elásticas obtidas em função da tensão de protensão  $\sigma_N$  foram:

Para a madeira classe C 25:

$$\frac{E_T}{E_L} = 0,0000216 \cdot \sigma_N + 0,00715 \quad (1)$$

$$\frac{G_{LT}}{E_L} = 0,02731989 - 3,75205953 \cdot (\sigma_N)^{-1} + 26,60058663 \cdot (\sigma_N)^{-2} \quad (2)$$

Para a madeira classe C 40:

$$\frac{E_T}{E_L} = 0,00002878 \cdot \sigma_N - 0,001008 \quad (3)$$

$$\frac{G_{LT}}{E_L} = 0,01683333 - 2,74 \cdot (\sigma_N)^{-1} + 186,66666667 \cdot (\sigma_N)^{-2} \quad (4)$$

Substituindo-se a protensão  $\sigma_N = 700 \text{ kN/m}^2$  estabelecida por OKIMOTO (1997) nas equações 1 a 4, obtêm-se as relações elásticas dadas nas equações 5 a 8:

Para a madeira classe C 25:

$$\frac{E_T}{E_L} = 0,0223 \quad (5)$$

$$\frac{G_{LT}}{E_L} = 0,0220 \quad (6)$$

Para a madeira classe C 40:

$$\frac{E_T}{E_L} = 0,0191 \quad (7)$$

$$\frac{G_{LT}}{E_L} = 0,0133 \quad (8)$$

Além das equações (1), (2), (3) e (4), OKIMOTO (2000)<sup>1</sup> desenvolveu equações genéricas para os parâmetros elásticos:

$$\frac{E_T}{E_L} = 0,0183673 - [2,0395 \cdot 10^{-5} \cdot \rho] + \sigma_N \cdot (1,17275 \cdot 10^{-5} + 1,795 \cdot 10^{-8} \cdot \rho) \quad (9)$$

$$\frac{G_{LT}}{E_L} = 0,042401 - [2,758850 \cdot 10^{-5} \cdot \rho] - \frac{(5,891866 - 4,078686 \cdot 10^{-3} \cdot \rho)}{\sigma_N} \quad (10)$$

onde:

$\rho$  = densidade aparente em  $\text{kg/m}^3$

#### 2.2.4- Perda de protensão

Os principais fatores que influem na perda de protensão são a perda de umidade, a fluência (deformação ao longo do tempo sob tensão constante) e a relaxação da madeira (diminuição da tensão ao longo do tempo sob deformação constante). É recomendado, portanto, que a tensão de protensão aplicada seja

---

<sup>1</sup> OKIMOTO, F. S. (2000). (USP. Escola de Engenharia de São Carlos. LaMEM). *Comunicação pessoal.*

superior à tensão de projeto, que é a tensão mínima necessária para garantir o bom funcionamento do sistema.

Segundo GANGARAO & LATHEEF (1991), os tabuleiros de madeira devem ser protendidos três vezes para estabilizar as forças de protensão na madeira e conseqüentemente minimizar a perda destas forças ao longo do tempo. Se o tabuleiro for protendido somente uma vez, ocorrerá uma perda de protensão de 80% ou mais, em um curto intervalo de tempo.

Uma ponte protendida com tabuleiro de madeira laminada funciona de acordo com as condições previstas em projeto, desde que seja mantida uma tensão de protensão suficiente entre as lâminas de madeira. Como a tensão de protensão diminui ao longo do tempo devido às características naturais da madeira (perda de umidade, fluência e relaxamento), aumenta-se a tensão aplicada no momento da montagem para compensar esta perda. Nestas condições, RITTER (1992) sugere que a protensão inicial seja 2,5 vezes o valor de projeto e que haja no mínimo 2 retensões com o mesmo valor da protensão inicial. O comportamento da ponte submetida à protensão e à retensão (Figura 7) mostra que se o tabuleiro for protendido apenas uma vez durante a construção, a perda final será maior que 80% e a protensão atuante estará em torno de 20% da inicial, que é inferior à tensão mínima exigida. No caso de haver duas retensões (uma após 3 dias, e a outra após 8 semanas), a perda final será pouco maior que 20% e a tensão final superior à tensão mínima exigida. E, quando houver três retensões, (uma após 2 dias, outra após 5 dias e a última após 8 semanas) a perda final não ultrapassará 10% e a tensão final será superior à tensão mínima exigida. Como se sabe, a madeira expande-se quando ganha umidade, e retrai-se quando perde, ocasionando os efeitos de ganho e perda de protensão, respectivamente. No entanto, com ensaios de laboratório e monitoramento periódico de pontes instaladas em diferentes condições ambientais, observou-se que as mudanças na tensão de protensão foram mínimas quando as lâminas de madeira já se encontravam secas no período da construção, mas foram maiores quando esta madeira secou com a ponte em serviço. Concluiu-se então, que os efeitos do ganho e da perda de protensão devidos à umidade não são importantes quando a madeira se encontra seca no momento da montagem da ponte.

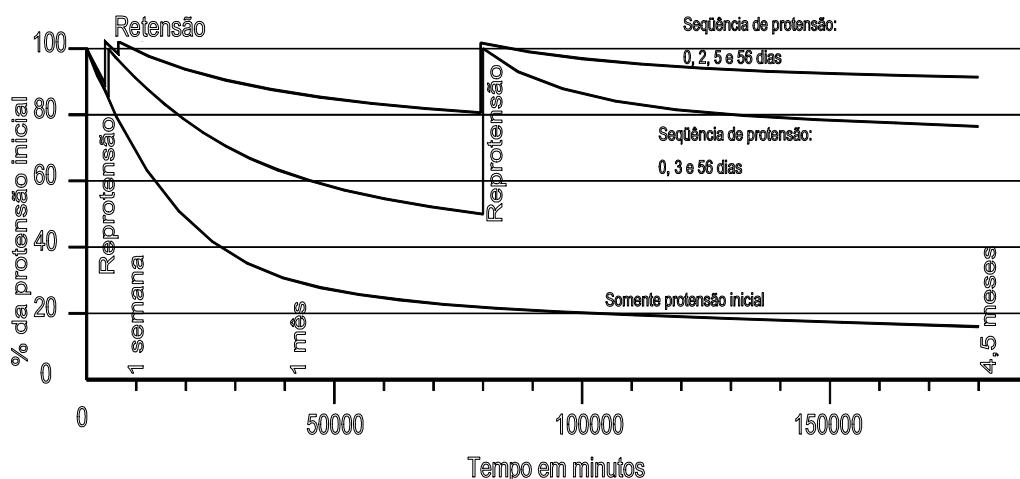


FIGURA 7 - Perda de Protensão e Sistemas de Retenção  
(TAYLOR e CSAGOLY, 1979 *apud* RITTER, 1992)

Segundo CREWS (1998), as normas da OHBDC assumem que as perdas totais de protensão no tabuleiro não excedem 60% durante sua vida útil. Porém, resultados de ensaios indicam que, quando a tensão de protensão cai para 50 a 60% da tensão de projeto, há uma queda significativa na rigidez transversal e na resistência ao atrito interlaminar. Para evitar este efeito, a protensão deve ser aplicada de modo que as perdas não tornem a tensão de protensão efetiva inferior à de projeto.

#### 2.2.5- Juntas de topo

O sistema de pontes protendidas transversalmente com tabuleiro de altura constante utiliza peças de madeira serrada. Estas peças geralmente possuem largura igual a 5 cm, altura de 20 a 40 cm e comprimento máximo em torno de 6 m. Assim, quando o vão livre da ponte for superior a 6 m, serão utilizadas juntas de topo no tabuleiro. Como consequência, o projeto e a construção destas pontes tornam-se viáveis, sem afetar drasticamente as propriedades de resistência e rigidez da estrutura. Em OKIMOTO (1997), o efeito da presença e a frequência de juntas de topo na rigidez longitudinal do tabuleiro foram verificados em ensaios de modelo reduzido. Para cada tensão de protensão, foram obtidas as equações para os valores de  $C_{bj}$  (fator de redução da rigidez longitudinal do tabuleiro) em função da frequência de juntas (J):

Para  $\sigma_N = 300 \text{ kN/m}^2$

$$C_{bj} = 1,06117 - 0,93587 \cdot J^{-1} + 0,2732 \cdot J^{-2} \quad (11)$$

Para  $\sigma_N = 700 \text{ kN/m}^2$

$$C_{bj} = 1,06367 - 0,78911 \cdot J^{-1} + 0,17204 \cdot J^{-2} \quad (12)$$

Os valores de  $C_{bj}$  em função da frequência de juntas estão apresentados na tabela 1. Como as diferenças entre estes valores para as tensões estudadas não são significativas, adota-se os valores obtidos para  $\sigma_N = 300 \text{ kN/m}^2$ , independente da tensão de projeto. De acordo com o autor, a frequência ideal das juntas de topo é a cada 4 lâminas, ou seja,  $C_{bj} = 0,84$ .

TABELA 1 - Valores de projeto para o fator de redução da rigidez longitudinal  
(OKIMOTO, 1997)

Frequência de Juntas	Fator $C_{bj}$		Disposições mínimas
	$\sigma_N=300 \text{ kN/m}^2$	$\sigma_N=700 \text{ kN/m}^2$	
cada 4	0,84	0,88	Juntas alinhadas a cada 4 vigas  Distância entre juntas de vigas adjacentes $\geq 1,20 \text{ m}$
cada 5	0,88	0,91	
cada 6	0,91	0,94	
cada 7	0,93	0,95	
cada 8	0,95	0,97	
cada 9	0,96	0,98	
cada 10	0,97	0,99	
sem juntas	1,00	1,00	

#### 2.2.6- Modelos de cálculo

De acordo com a bibliografia consultada, existem diversas maneiras de se abordar o cálculo das pontes protendidas transversalmente. Algumas são direcionadas para o dimensionamento, outras para a avaliação de resultados experimentais em trabalhos de pesquisa.



CREWS (1998) aponta três métodos para a modelagem de tabuleiros protendidos de altura constante:

- Modelo de placa ortotrópica: para se analisar o tabuleiro como placa ortotrópica, deve-se conhecer as três propriedades elásticas do material: módulo de elasticidade na direção longitudinal  $E_L$ , módulo de elasticidade na direção transversal  $E_T$  e módulo de elasticidade transversal  $G_{LT}$ . Este modelo é melhor utilizado como ferramenta de pesquisa, por ser computacionalmente intensivo.

- Modelo de grelha: para se analisar o tabuleiro como grelha, também se deve conhecer  $E_L$ ,  $E_T$  e  $G_{LT}$ . Este modelo calcula com precisão os deslocamentos, as deformações e os momentos longitudinais do tabuleiro; no entanto, não fornece vantagem significativa para o projeto por ser mais complicado que o modelo de viga modificada.

- Modelo de viga modificada: para se analisar o tabuleiro como viga modificada, deve-se conhecer o módulo de elasticidade na direção longitudinal das lâminas de madeira  $E_L$  e a largura de distribuição  $D_w$  da viga. Na determinação de  $D_w$ , os resultados obtidos em ensaios de protótipos de tabuleiros utilizando carregamentos referentes aos estados limites últimos e de utilização realizados na Austrália foram comparados com a largura de distribuição estimada na edição de 1993 do OHBDC. Por fim, estes resultados foram calibrados com aqueles obtidos em ensaios de protótipos de tabuleiros utilizando carregamentos referentes ao estado limite de utilização realizados nos E.U.A. Este modelo de viga, apesar de simples, calcula os deslocamentos e a capacidade última de resistência do tabuleiro. É o modelo de cálculo mais indicado para a finalidade de projeto.

### 2.2.7- Derivações do sistema

Além do sistema com tabuleiro de altura constante, constituído por peças de madeira serrada dispostas longitudinalmente ao sentido do tráfego (Figura 8), foram estudadas outras aplicações para o sistema protendido transversalmente.

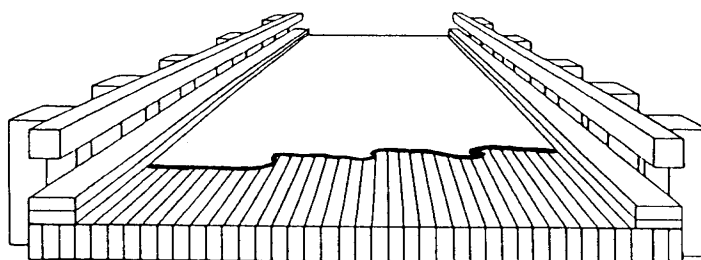


FIGURA 8 - Tabuleiro com seção transversal de altura constante  
(OKIMOTO, 1997)

A figura 9 mostra uma variação direta deste sistema, utilizando-se peças de MLC. Estas peças são constituídas de madeira serrada de menores dimensões, as quais possibilitam o alcance de maiores vãos.

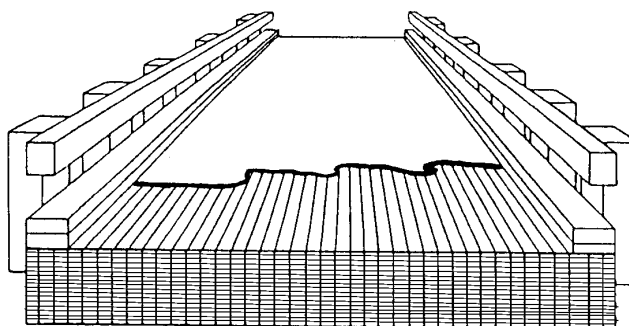


FIGURA 9 - Tabuleiro de altura constante com peças em MLC  
(OKIMOTO, 1997)

O sistema tipo sanduíche é constituído por peças de madeira serrada de diferentes tamanhos, que são colocadas de modo a criar um mecanismo de travamento entre si (Figura 10). Este sistema utiliza duas linhas de protensão, uma para cada camada.

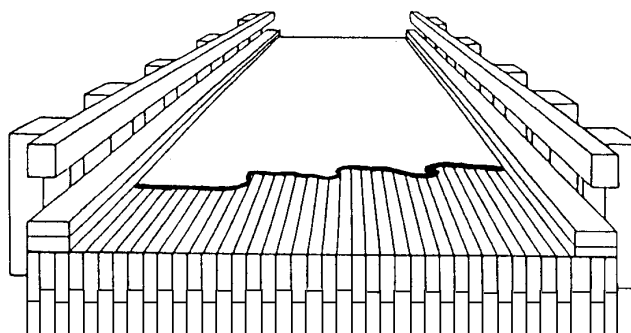


FIGURA 10 - Sistema sanduíche  
(OKIMOTO, 1997)

Uma das variações do tabuleiro de altura constante é obtida com a introdução de vigas intermediárias de maior altura (Figura 11). Neste sistema, denominado ponte protendida formada por vigas-T, o tabuleiro é constituído por peças de madeira serrada e as nervuras constituídas de madeira serrada, MLC ou LVL (lâminas de pequena espessura coladas com as fibras orientadas na mesma direção).

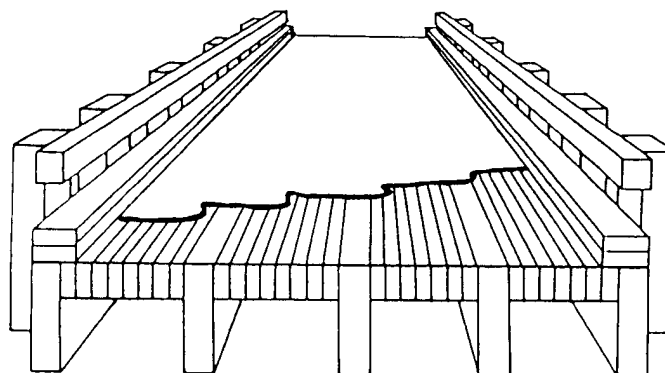


FIGURA 11 - Tabuleiro formado por vigas-T  
(OKIMOTO, 1997)

Outras possíveis variações são: treliças longitudinais protendidas transversalmente, tabuleiro com seção caixão e tabuleiro transversal com protensão longitudinal. No primeiro caso, as treliças são posicionadas ao longo do vão, dispostas continuamente uma ao lado da outra ou espaçadas (Figura 12). Neste sistema, a protensão é aplicada no tabuleiro e nos banzos superiores.

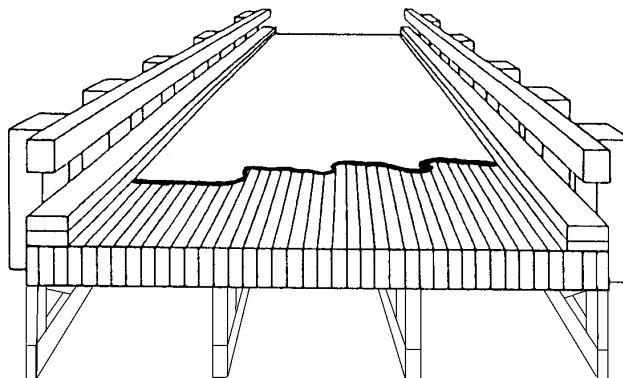


FIGURA 12 - Treliças longitudinais protendidas transversalmente.  
(OKIMOTO, 1997)

Na seção caixão, apresentada na figura 13, as nervuras são constituídas de peças de madeira serrada, MLC, madeira compensada ou viga treliçada. Este sistema necessita de duas linhas de protensão, uma para cada tabuleiro.

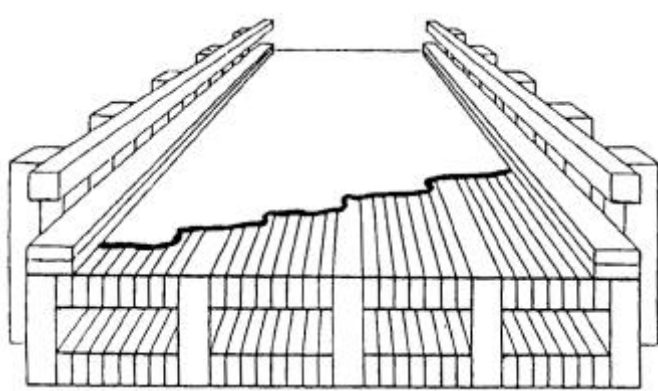


FIGURA 13 - Tabuleiro com seção caixão  
(OKIMOTO, 1997)

Por último, tem-se o sistema com tabuleiro protendido longitudinalmente, constituído por peças de madeira serrada dispostas transversalmente (Figura 14). Neste sistema, devem existir elementos de rigidez posicionados como vigas.

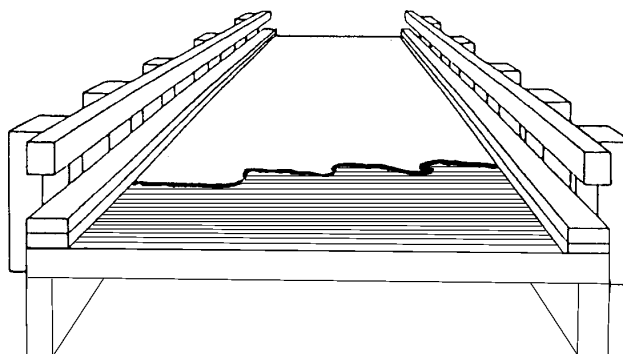


FIGURA 14 - Tabuleiro transversal com protensão longitudinal  
(OKIMOTO, 1997)

### 2.3- Tabuleiros formados por vigas de seção transversal T

A seguir são apresentadas as informações relacionadas ao sistema T das pontes de madeira protendidas transversalmente. Estas informações referem-se à construção pioneira, às variações do sistema construtivo, aos ensaios de outros protótipos e ao método WVU.

#### 2.3.1- Construção pioneira

Segundo TAYLOR & RITTER (1990), o sistema T das pontes de madeira protendidas transversalmente foi desenvolvido e testado em 1988 por DICKSON & GANGARAO (1990) da West Virginia University, onde foram realizados ensaios de modelo em laboratório e a construção do primeiro protótipo formado por vigas-T. Este protótipo, denominado ponte “Barlow Drive” (Figura 15), foi construído em Spencer, com 22,3 m de vão e 5,3 m de largura, possuindo seis nervuras de LVL com seção transversal igual a 15,0 x 114,0 cm mais uma viga central constituída por duas peças com dimensões transversais 11,0 x 114,0 cm cada uma.

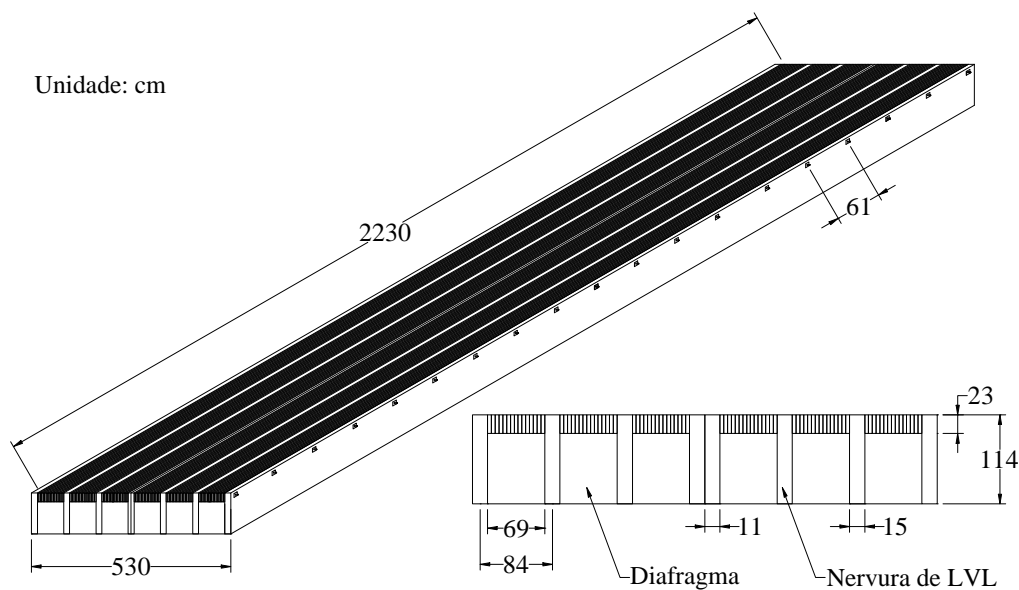


FIGURA 15 - Dimensões da Ponte “Barlow Drive”

Por se tratar de uma construção pioneira, foi desenvolvido um programa de ensaios em um modelo construído com 4,9 m de vão e 1,65 m de largura, possuindo três nervuras longitudinais com seção transversal igual a 9,0 x 46,0 cm e altura do tabuleiro igual a 14 cm (Figura 16). Este modelo não foi construído em escala, mas o espaçamento entre as nervuras foi mantido igual ao da escala real.

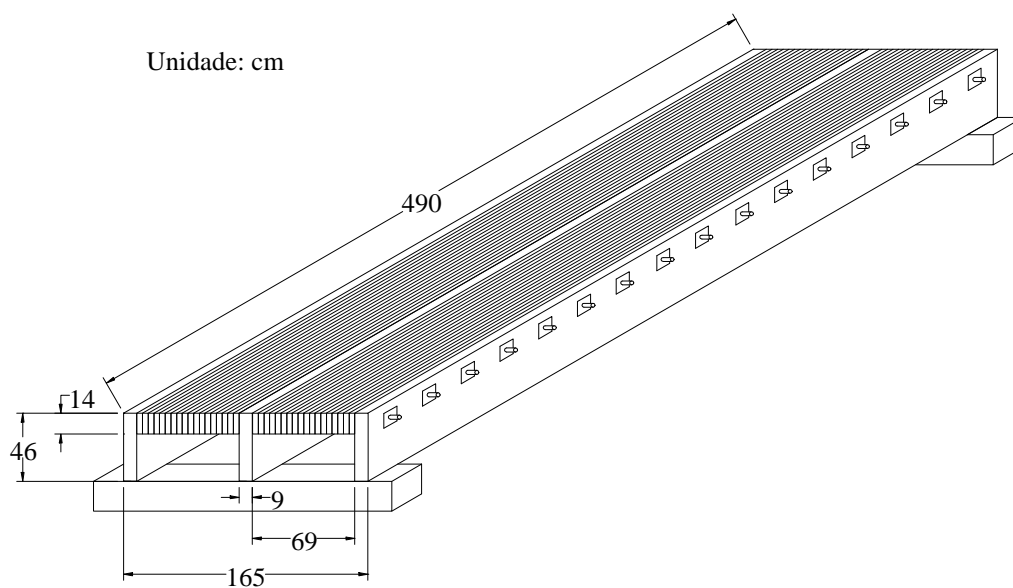


FIGURA 16 - Modelo ensaiado por DICKSON & GANGARAO (1990)

Estes ensaios foram realizados com os objetivos de:

- determinar experimentalmente a posição da linha neutra e verificar a composição do sistema T. Este ensaio consistiu em medir a deformação no topo e na parte inferior da viga-T, e os resultados indicaram composição total da viga-T central, ou seja, a linha neutra obtida experimentalmente praticamente coincidiu com a obtida teoricamente (Figura 17);

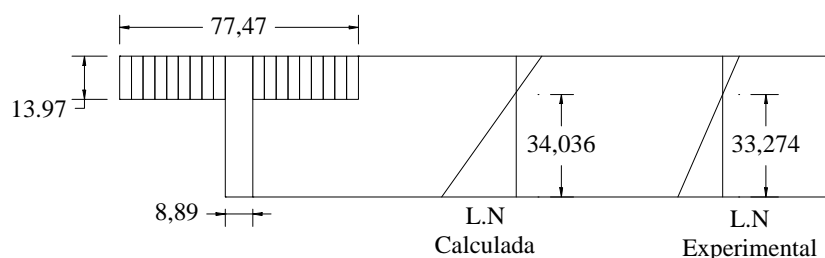


FIGURA 17 - Localização da linha neutra da viga-T central do modelo

- determinar a tensão de protensão necessária para impedir o deslizamento entre as lâminas adjacentes e a abertura destas lâminas no lado tracionado do tabuleiro. De acordo com os resultados, estimou-se que a tensão de protensão é igual a 12% da resistência à compressão admissível da madeira. Estes resultados obtidos também mostraram que o comportamento entre a força aplicada e o deslocamento do tabuleiro foi não-linear e que houve uma perda de quase 50% da tensão de protensão no período de 32 dias. No entanto, não foi possível estabelecer as parcelas devidas à deformação lenta da madeira e à perda de umidade ocorrida no tabuleiro do modelo, mas enfatizou-se a importância da manutenção da tensão de protensão;

- determinar a distribuição lateral das cargas quando a nervura central estiver carregada. De acordo com os resultados, a força aplicada à nervura diretamente carregada foi aproximadamente 2/3 da carga total.

A ponte foi construída em duas partes, sendo cada uma protendida temporariamente por barras de aço colocadas a cada dois furos. Estas estruturas foram transportadas para Charleston, na Virgínia do oeste, onde cada metade foi erguida por um guindaste de 1.400 kN e posicionada definitivamente sobre os apoios

com o auxílio de outro guindaste de 800 kN. A protensão transversal da estrutura consistiu inicialmente em colocar barras de aço, atravessando a largura total da ponte, nos furos que ficaram vazios e posteriormente usar barras com o mesmo comprimento para substituir as temporárias. Na fase de acabamento, os guarda-corpos foram instalados e a superfície de rolamento pavimentada com concreto asfáltico. A figura 18 apresenta a ponte “Barlow Drive” já finalizada.



FIGURA 18 - Ponte "Barlow Drive"  
(USDA Forest Service, 1995)

Esta ponte foi monitorada durante um período de seis meses, obtendo-se os seguintes resultados principais:

- o deslocamento máximo da nervura ocorreu na viga externa ( $\delta_{\text{máx}} = 2,13 \text{ cm}$ ), com valor mais baixo que o esperado ( $\delta_{\text{esperado}} = L/865$  ou  $2,58 \text{ cm}$ ). Esta rigidez imprevista foi devido à contribuição das duas nervuras centrais, do guarda-rodas e do guarda-corpo. Neste ensaio, a roda de um veículo-tipo de 231 kN ficou encostada no guarda-rodas da ponte;
- o deslocamento máximo do tabuleiro foi igual a 0,51 cm, não sendo observado nenhum deslizamento vertical entre as lâminas. Neste ensaio, uma carga de roda de



40 kN foi posicionada no ponto médio da porção do tabuleiro entre duas nervuras adjacentes;

- esta ponte foi protendida inicialmente com valor igual a 1,02 MPa e retensionada duas vezes (a primeira após 8 dias e a segunda após 50 dias) com o mesmo valor da protensão inicial. De acordo com os resultados, houve uma perda da tensão de protensão de aproximadamente 50% após 5 meses de sua construção e uma perda de quase 32% após 12 meses de sua construção. Esta perda de protensão menor foi devido a um extenso período de chuva antes das medições, que ocasionou ganho de umidade e expansão da madeira;

- a umidade da ponte variou entre 18 e 40%, sendo que a maior variação ocorreu na parte superior das nervuras. A umidade do tabuleiro foi aproximadamente 22%.

O alto custo da estrutura, aproximadamente US\$ 850/m<sup>2</sup>, foi devido à fabricação e transporte das vigas de LVL para o local de construção, ao aluguel dos guindastes, à mão-de-obra com a instalação e também ao projeto conservativo da ponte, que por se tratar de uma construção pioneira, não havia diretrizes a seguir.

### 2.3.2- Variações construtivas do sistema T

A seguir estão apresentadas duas possíveis variações construtivas do sistema T das pontes de madeira protendidas transversalmente. Estas variações se referem ao sistema modular T e à utilização do LVL nas pontes de madeira.

Segundo DAVALOS, SALIM & DICKSON (1993), o sistema T modular foi desenvolvido com o objetivo de superar as dificuldades na montagem de pontes protendidas formadas por vigas-T e, conseqüentemente, reduzir o custo total da estrutura. Com o novo sistema modular, é possível que uma ponte seja montada in loco em apenas 1 dia, enquanto que a montagem descrita para a ponte "Barlow Drive" exige de 3 a 4 semanas. Como exemplo de aplicação do novo sistema, os

autores citam a ponte “Camp Arrowhead”, projetada de acordo com o método WVU e formada por 5 módulos que se estendem ao longo de 18,9 m de vão (Figura 19).

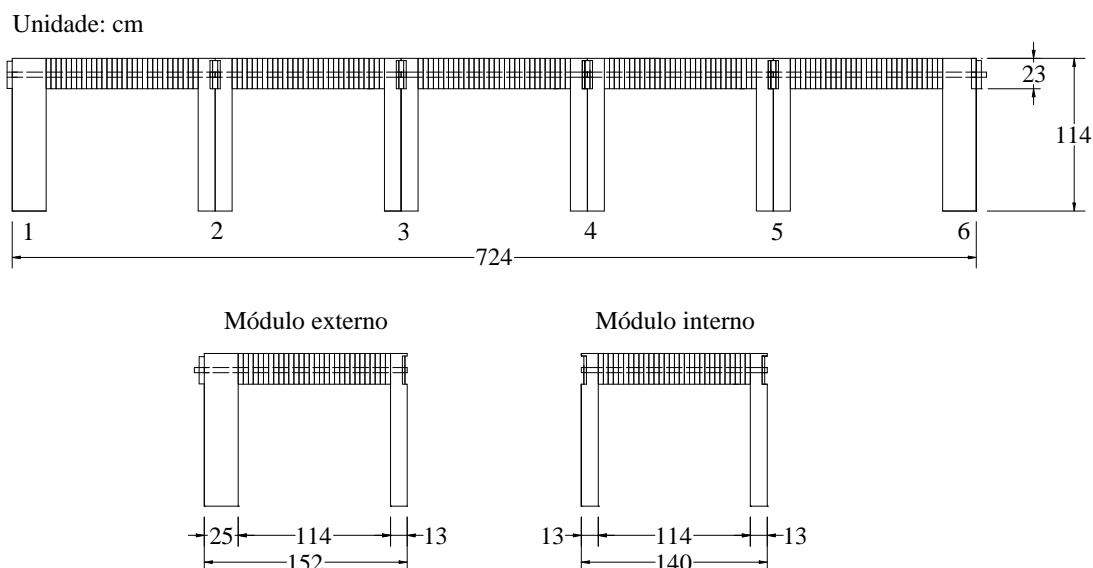


FIGURA 19 - Dimensões da Ponte "Camp Arrowhead"

Na construção desta ponte, cada módulo foi protendido por barras de aço temporárias colocadas a cada 61 cm e por outras barras permanentes colocadas a cada 183 cm. No pátio de construção, os guarda-corpos e os guarda-rodas foram instalados nos módulos externos e todas as barras de protensão tracionadas três vezes para minimizar as perdas ao longo do tempo. Os módulos foram transportados para Cabell County, na Virgínia do oeste, erguidos por guindaste e posicionados definitivamente sobre os apoios. As barras de aço a cada 61 cm foram substituídas por outras que atravessaram a largura total da ponte e as barras a cada 183 cm retensionadas. Na fase de acabamento, a ponte foi fixada aos apoios e a superfície de rolamento pavimentada com concreto asfáltico. A figura 20 apresenta a ponte “Camp Arrowhead” já finalizada.



FIGURA 20 - Ponte "Camp Arrowhead"  
(USDA Forest Service, 1995)

Esta ponte foi monitorada durante um período de quatro meses e os resultados dos ensaios (Tabela 2 e Tabela 3) foram comparados com aqueles obtidos pelos métodos dos elementos finitos e do WVU. Nos ensaios para determinar o deslocamento máximo da nervura, um veículo-tipo de 231 kN foi posicionado na faixa de tráfego a jusante da ponte, e depois posicionado na faixa de tráfego a montante. Estes dois casos foram usados para simular o carregamento assimétrico, e, por superposição, simular o carregamento simétrico da ponte. Nos ensaios para determinar o deslocamento máximo do tabuleiro, uma carga de roda de 40 kN foi posicionada no ponto médio da porção do tabuleiro entre as nervuras 3 e 4.

TABELA 2 - Tensões e deslocamentos máximos da porção do tabuleiro entre as nervuras 3 e 4

	Dados de Campo	Elementos finitos	Método WVU
Tensão máx.(MPa)	0,324	0,315	0,381
Deslocamento máx. (cm)	0,214	0,209	0,211

TABELA 3 - Tensões e deslocamentos máximos das nervuras 3 e 4

	Dados de Campo		Elementos finitos	Método WVU
	Nervura 3	Nervura 4		
Tensão máx.(MPa)	5,01	5,27	5,72	6,47
Deslocamento máx. (cm)	2,06	2,06	2,10	2,53

Os autores concluíram que:

- a nova técnica de construção em módulos, além de mais eficiente, facilita a fabricação e o transporte da ponte, reduz os esforços com a mão-de-obra e a instalação e aumenta, significativamente, o controle de qualidade;
- o método WVU é um método simples e suficientemente preciso para prever as tensões e os deslocamentos dos sistemas T, podendo ser utilizado como ferramenta de cálculo no projeto destas pontes.

O custo total da estrutura, incluindo projeto, fabricação do tabuleiro e das vigas, transporte e mão de obra com a instalação, foi aproximadamente US\$ 570/m<sup>2</sup>.

Segundo RITTER et al (1996), o LVL é feito de folhas de madeira obtidas através de corte por rotação e coladas com adesivos impermeáveis, com as fibras orientadas na mesma direção. Geralmente, a espessura das folhas de madeira é de 2,5 a 6,4 mm e, como há pequenas frestas nestas folhas, o resultado é a penetração total de preservativos de madeira. Por ser um material manufaturado, pode ser produzido em variedades de tamanhos e formas. O LVL não é um material novo, ele originou

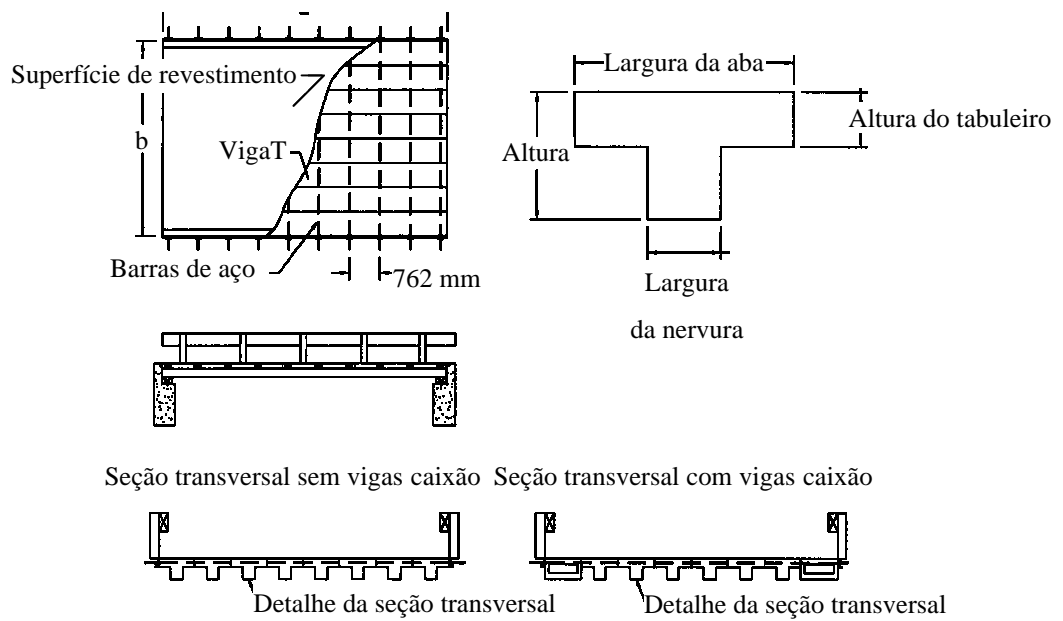


FIGURA 21 - Pontes com Vigas -T de LVL

(RITTER et al, 1996)

TABELA 4 - Dimensões e detalhes da pontes (RITTER et al, 1996)

Nome da Ponte	Vão da Ponte (m)	Largura da Ponte (m)	Altura da Nervura (cm)	Viga Caixaõ nas laterais
Mill Creek	9,1	7,3	40,6	sim
Pett Creek	11,6	8,5	50,8	sim
Kenally Creek	9,9	5,2	45,7	não
Franklin Road	13,41	11,0	71,1	sim
Wardwell	8,5	11,43	40,6	sim
South Canal	7,92	4,88	35,6	não

### 2.3.3- Ensaio de outros protótipos

GANGARAO & LATHEEF (1991) apresentam análises experimentais e teóricas de sistemas com diversas seções transversais (seção bulbo T, seção caixa e seção formada por vigas-T). Nos ensaios, os modelos reduzidos em sistema T são submetidos a duas condições de carregamento, A e B (Figuras 22 e 23), sendo que a condição A foi aplicada para modelos com diafragmas e nervuras de LVL, e a condição B para modelos com e sem diafragmas e nervuras de MLC.

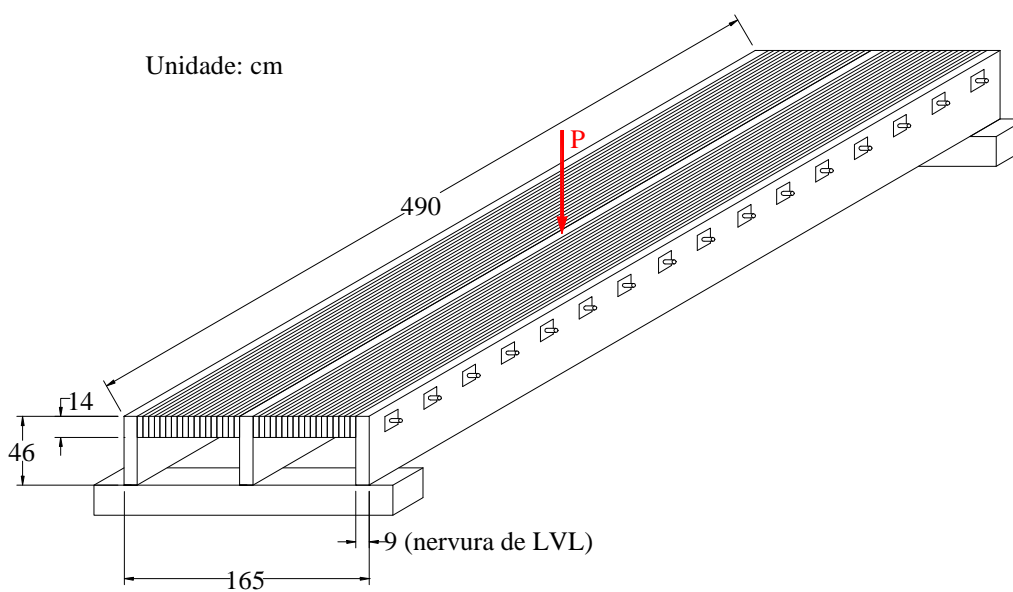


FIGURA 22 - Condição de carregamento A

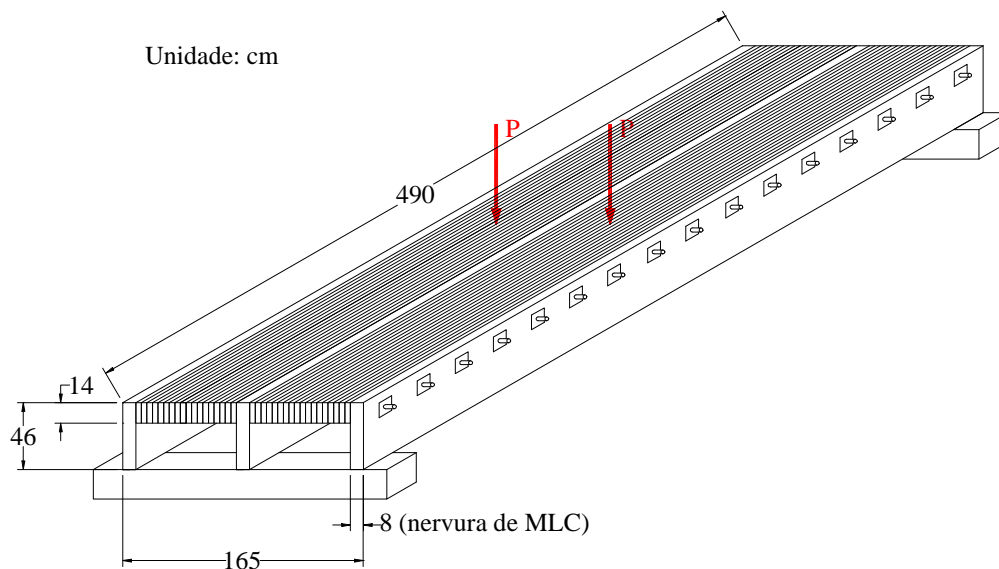


FIGURA 23 - Condição de carregamento B

Com estes ensaios, os autores concluíram que:

- não foram observados deslizamento vertical, nem separação na direção transversal das lâminas de madeira. Também não foi observada falha devida ao cisalhamento no tabuleiro e nas nervuras;
- para a condição de carregamento B, a força aplicada à nervura central foi aproximadamente 50% da carga total para modelos sem diafragmas e 42% para modelos com diafragmas. No entanto, estas porcentagens podem ser maiores para sistemas T que tenham mais de três nervuras;
- os ensaios à flexão com forças no regime elástico-linear indicaram composição total da viga-T central.

BARGER Jr. et al (1993) também apresentam análises experimentais e teóricas de sistemas com seção transversal formada por vigas-T e seção caixão, com o objetivo de entender a rigidez transversal e a variação da distribuição lateral da carga destes sistemas. Nos ensaios, cada modelo reduzido em sistema T com três e quatro nervuras foi submetido a duas tensões de protensão: 0,345 MPa e 0,690 MPa

e as nervuras interna e externa foram solicitadas por forças variando de 0 até 35,59 kN (Figuras 24 e 25).

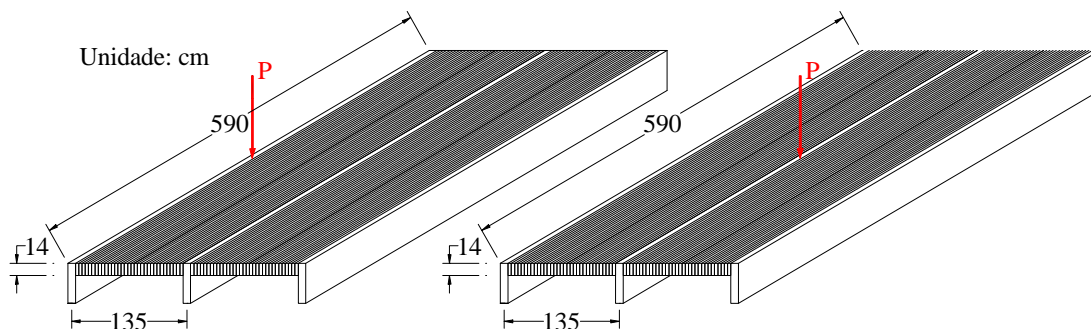


FIGURA 24 - Modelo com três nervuras sob força estática na nervura interna e externa

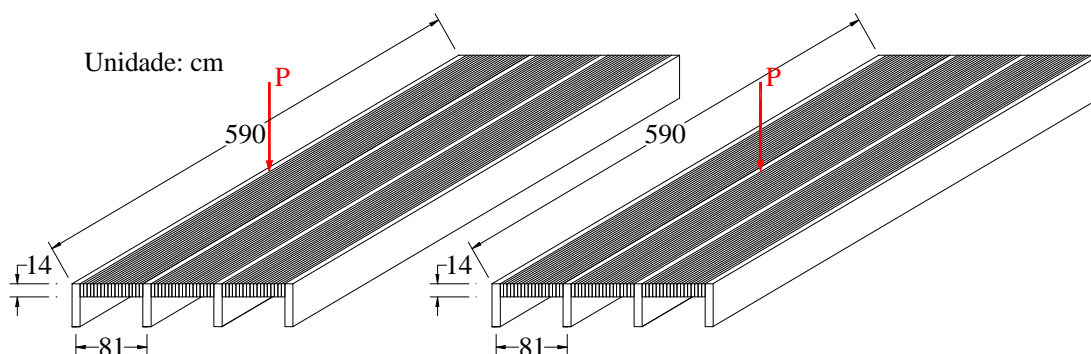


FIGURA 25 - Modelo com quatro nervuras sob força estática na nervura interna e externa

Com estes ensaios, os autores concluíram que:

- os ensaios para determinar o deslocamento das nervuras internas indicaram que o sistema T com três nervuras é mais flexível que o sistema T com quatro nervuras;
- os ensaios para determinar a deformação das nervuras internas indicaram que o sistema T é mais flexível quando submetido a uma tensão de protensão igual a 0,345 MPa que a uma tensão de protensão igual a 0,690 MPa;



- os ensaios para determinar a deformação devida à compressão na face superior do tabuleiro indicaram que a distribuição não uniforme desta deformação é devida à menor capacidade dos tabuleiros protendidos de transmitir lateralmente o esforço cortante vertical entre as lâminas. Este fenômeno, denominado cisalhamento retardado, é responsável pela redução da largura da mesa de uma viga-T;
- uma nervura externa diretamente carregada absorve uma parcela de carga maior que uma nervura interna diretamente carregada. Desta forma, uma nervura externa é mais flexível que uma nervura interna.

#### 2.3.4- Método WVU

DAVALOS & SALIM (1992) apresentam o método WVU para o sistema T das pontes de madeira protendidas transversalmente. Este método de dimensionamento, baseado no fator de distribuição da carga  $W_f$  e na largura efetiva da mesa de uma viga-T interna  $b_e$ , reduz o projeto do sistema T ao de uma viga-T. Esta viga é analisada usando-se as equações de flexão simples, considerando-se os efeitos globais [deslocamentos e tensões (de flexão e de cisalhamento) longitudinais máximos devidos à carga permanente e à carga móvel] e os efeitos locais [deslocamentos e tensões (de flexão e de cisalhamento) transversais máximos devidos à carga de roda aplicada na seção do tabuleiro entre duas nervuras adjacentes].

A distribuição da tensão de compressão na largura real da aba de uma viga-T é não-linear (Figura 26). Assim, com o objetivo de simplificar o cálculo dos deslocamentos e das tensões máximas desta viga, DAVALOS & SALIM (1993) desenvolveram uma equação de regressão para calcular a largura efetiva da aba  $B_E$  na qual se considera a distribuição de tensão constante e equivalente à distribuição real de tensão.

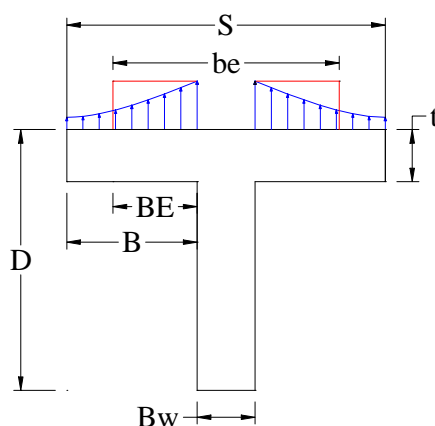


FIGURA 26 - Distribuição de tensão não-linear de uma viga-T isolada

Inicialmente, foi desenvolvida uma equação para se determinar a largura  $B_E$  de uma viga-T isolada, admitindo-se a força resultante de tração na nervura igual à força resultante de compressão na mesa (Equação 13).

$$B_E = \frac{1}{2} \cdot \left[ \frac{B_w \cdot (D - t)}{2 \cdot t} \cdot \left( \frac{\sigma_{yt} + \sigma_{yc}}{(\sigma_{yc})_{\text{máx}}} \right) - B_w \right] \quad (13)$$

onde:

$\sigma_{yc}$  = tensão de compressão máxima na nervura da viga-T

$\sigma_{yt}$  = tensão de tração máxima na nervura da viga-T

$(\sigma_{yc})_{\text{máx}}$  = tensão de compressão máxima na aba da viga-T

Posteriormente, as variáveis que têm influência significativa na largura  $B_E$  (altura do tabuleiro  $t$ , altura da nervura  $D$ , espaçamento entre nervuras  $S$ , vão da ponte  $L$ , razão entre o módulo de elasticidade na direção longitudinal da nervura e o módulo de elasticidade na direção longitudinal das lâminas do tabuleiro  $E_{L,n}/E_{L,t}$ ) foram combinadas entre si e as tensões, necessárias para se obter  $B_E$  a partir de (13), calculadas pelo método dos elementos finitos. Com os valores de  $B_E$ , realizou-se um estudo paramétrico para se determinar as melhores combinações adimensionais entre as variáveis citadas. Com isto, foram identificadas as equações de regressão que possibilitam escrever as relações  $B_E/B$  em função das melhores combinações obtidas:  $L/B$ ,  $D/t$  e  $E_{L,n}/E_{L,t}$ . Estas variáveis foram selecionadas por um processo de eliminação regressiva, com nível de significância igual a 10%. Finalmente, a equação

de regressão foi obtida com os dados dos 125 modelos, analisados via elementos finitos, ajustados a uma linha reta (Equação 14).

$$B_E = B \cdot \left[ 0,4586 + \frac{1}{198} \cdot \left( \frac{L}{B} \right) \cdot \left( \frac{D-t}{t} \right) \cdot \left( \frac{E_{L,n}}{E_{L,t}} \right) \right] \quad (14)$$

onde:

B = largura da aba de uma viga-T

Os autores concluíram que:

- a largura  $B_E$  é proporcional à força aplicada;

- a largura  $B_E$  é menor ou igual a B quando  $\left( \frac{L}{B} \right) \cdot \left( \frac{D-t}{t} \right) \cdot \left( \frac{E_{L,n}}{E_{L,t}} \right)$  é menor ou igual a

106;

- a equação de regressão deve ser aplicada a sistemas T com vãos simplesmente apoiados de até 30 m.

## 2.4- Conclusões a respeito da revisão bibliográfica

A análise da bibliografia permitiu a obtenção das seguintes conclusões principais:

- O sistema de madeira protendido transversalmente formado por vigas-T é interessante para a construção de pontes, tendo sido aceito como uma alternativa para aumentar o vão das pontes com seção transversal de altura constante. Esta aceitação pode ser observada pelo número expressivo de pontes construídas no Canadá e Estados Unidos utilizando este sistema.

- O método WVU é simples em relação aos modelos de placa e de grelha, e suficientemente preciso para prever as tensões e os deslocamentos das pontes de madeira protendidas transversalmente formadas por vigas-T.
  
- As nervuras destas pontes devem ser constituídas por peças de grandes seções e comprimentos, havendo a opção de construí-las com MLC ou LVL. No entanto, o LVL não é fabricado no Brasil, tornando-se viável a MLC. Para o tabuleiro, que pode ser constituído por peças com pequenas dimensões, é mais vantajosa a utilização de madeira serrada.
  
- Com base nas recomendações de OKIMOTO (1997), a tensão de projeto utilizada é igual a 0,7 MPa, os parâmetros elásticos são calculados pelas equações (9) e (10) e o fator de redução da rigidez longitudinal  $C_{bj}$  calculado pela equação (11).

### **3- ANÁLISE NUMÉRICA DO SISTEMA T**

O procedimento de cálculo utilizado para a análise numérica do sistema T das pontes de madeira baseia-se no método WVU para o dimensionamento da altura e largura das nervuras, da altura do tabuleiro e do espaçamento entre nervuras. Para o desenvolvimento deste trabalho, o método WVU foi adaptado aos critérios da Associação Brasileira de Normas Técnicas, “NBR 7188/84 - Cargas Móveis em Pontes Rodoviárias e Passarelas de Pedestres” e “NBR 7190/97 - Projeto de Estruturas de Madeira”, e programado em software MATHCAD©.

Este estudo é conduzido a partir da definição preliminar do vão, da largura e classe da ponte, das espécies e classes de resistência das madeiras utilizadas para as nervuras e o tabuleiro. São analisadas diversas configurações de pontes, variando-se a altura do tabuleiro, a largura das nervuras, o número de nervuras e determinando-se a altura das mesmas para cada configuração.

#### **3.1- Condições da análise numérica**

A seguir são apresentadas as informações relacionadas às condições da análise numérica. Estas informações referem-se à madeira utilizada e às características das pontes estudadas.

##### **3.1.1- Madeira utilizada**

No Brasil, a madeira é utilizada com frequência para múltiplas finalidades, mas devido ao processo de extração irracional, grandes áreas são derrubadas para o aproveitamento de poucas espécies de interesse comercial.

O reflorestamento é uma atividade que utiliza racionalmente a madeira na solução de problemas relacionados a coberturas (residenciais, comerciais, industriais), cimbramentos (para estruturas de concreto armado e protendido), transposição de obstáculos (pontes, viadutos, passarelas para pedestres), armazenamento (silos verticais e horizontais); na fabricação de componentes para a edificação, como painéis divisórios, portas, forros, pisos; nas indústrias de papel, lápis, embalagens; nos meios de transportes (barcos, carroçaria, vagões de trem), entre outros, e a opção prioritária brasileira envolve dois gêneros: *Pinus* e *Eucalyptus*. As principais vantagens da madeira oriunda do reflorestamento sobre as madeiras nativas são:

- as áreas e as explorações controladas, com períodos de corte predefinidos, e definição de áreas e espécies de acordo com o tipo de uso;
- as espécies mais utilizadas têm se adaptado às diferentes situações de clima e solo;
- os altos níveis de produtividade em decorrência do desenvolvimento de melhores práticas silviculturais, uso de sementes melhoradas, técnicas na produção de mudas e adequada fertilização.

Neste contexto, as madeiras de reflorestamento utilizadas nas simulações numéricas foram as espécies e as classes de resistência das madeiras comercialmente disponíveis, ou seja, nervuras de MLC de variedades *Pinus* ou *Eucalipto Grandis*, ambos Classe C 30, e tabuleiros de madeira serrada de variedades de *Pinus* Classe C 30 ou de *Eucalipto* Classes C 30 e C 40.

O *Eucalipto Grandis* combina as vantagens de ter resistência e densidade médias, ou seja, é suficientemente poroso e permeável para admitir uma boa colagem.

As tabelas 5 e 6 apresentam as classes de resistência correspondentes às coníferas e às dicotiledôneas.

TABELA 5 - Classes de resistência para coníferas (NBR 7190/97)

Coníferas				
CLASSE	$f_{c0,k}$ (MPa)	$f_{v0,k}$ (MPa)	$E_{c0,m}$ (MPa)	$\rho_{aparente}$ (kg/m <sup>3</sup> )
C 20	20	4	3500	500
C 25	25	5	8500	550
C 30	30	6	14500	600

TABELA 6 - Classes de resistência para dicotiledôneas (NBR 7190/97)

Dicotiledôneas				
CLASSE	$f_{c0,k}$ (MPa)	$f_{v0,k}$ (MPa)	$E_{c0,m}$ (MPa)	$\rho_{aparente}$ (kg/m <sup>3</sup> )
C 20	20	4	9500	650
C 30	30	5	14500	800
C 40	40	6	19500	950
C 60	60	8	24500	1000

### 3.1.2- Características das pontes

As pontes analisadas numericamente são da classe 30, por se tratar do emprego mais comum das pontes de madeira protendidas.

Os vãos utilizados para a análise destas pontes foram iguais a 10, 15, 20 e 25 m. O limite inferior é escolhido porque para vãos menores que 10 m empregam-se pontes com seção transversal de altura constante e o limite superior é o vão máximo empregado para as pontes de madeira formadas por vigas-T. Estas pontes têm uma ou duas faixas de tráfego, de larguras iguais a 5,5 e 10,0 m respectivamente.

As figuras 27 e 28 apresentam os desenhos esquemáticos de uma ponte com 5 nervuras e uma faixa de tráfego e de uma ponte com 9 nervuras e duas faixas de tráfego.

Unidade: cm

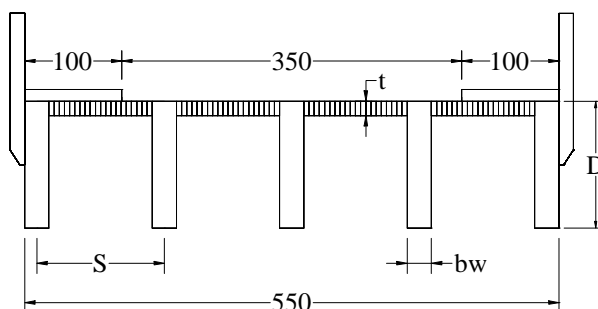


FIGURA 27 - Ponte com uma faixa de tráfego

Unidade: cm

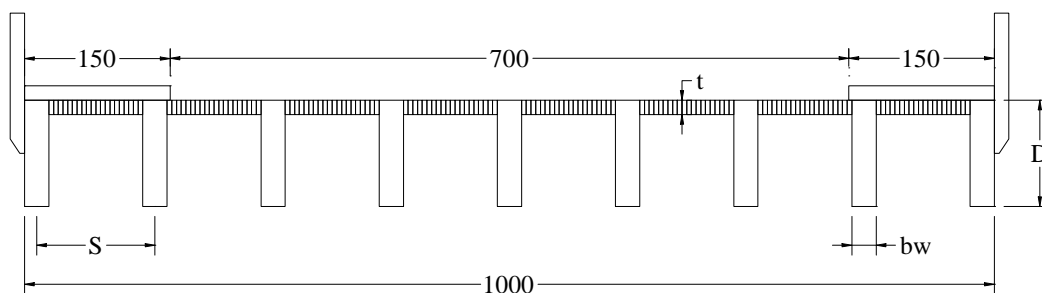


FIGURA 28 - Ponte com duas faixas de tráfego

Com relação às dimensões dos elementos estruturais, foram adotadas larguras das nervuras e alturas dos tabuleiros iguais a 15, 20 e 25 cm. As dimensões menores que 15 cm tornam a seção transversal delgada em relação à altura da nervura, e as dimensões maiores que 25 cm dificultam a obtenção das peças de madeira serrada.

O espaçamento mínimo entre duas nervuras deve ser maior ou igual a 70 cm, resultando em um número máximo de nervuras igual a 8 para pontes com uma faixa de tráfego e 14 para pontes com duas faixas de tráfego. O espaçamento máximo deve ser menor ou igual a 200 cm, resultando em um número mínimo de nervuras igual a 8 para ponte com uma faixa de tráfego e 14 para ponte com duas faixas de tráfego.

### 3.2- Procedimento de cálculo

Neste tópico está descrito e exemplificado o procedimento de cálculo



utilizado no dimensionamento das pontes de madeira formadas por vigas-T.

Após a definição do vão, da largura e da classe da ponte, das espécies e das classes de resistência das madeiras utilizadas para as nervuras e o tabuleiro, é calculado o módulo de elasticidade na direção transversal do tabuleiro.

O número mínimo de nervuras é determinado, segundo DAVALOS et al (1993), em função do deslocamento máximo da porção do tabuleiro entre duas nervuras adjacentes, sob a ação da carga de uma roda (Figura 29). Segundo GANGARAO & RAJU (1992), este deslocamento deve ser menor ou igual a 0,5 cm para que não ocorra fissuração do pavimento asfáltico, sendo este o limite utilizado no presente trabalho. Deste modo, o espaçamento máximo entre nervuras deve ser menor ou igual a 2,0 m para que apenas uma roda se posicione entre duas nervuras.

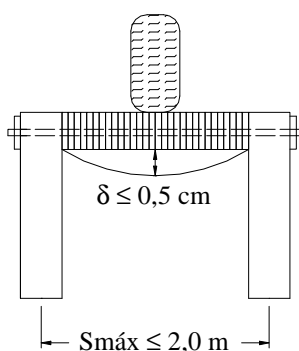


FIGURA 29 - Número mínimo de nervuras

O número máximo de nervuras é determinado, de modo que o espaçamento mínimo entre nervuras seja maior ou igual a 0,7 m (Figura 30). Este valor foi definido como premissa do trabalho, pois os espaçamentos menores que 0,7 m conduzem ao tabuleiro com altura constante.

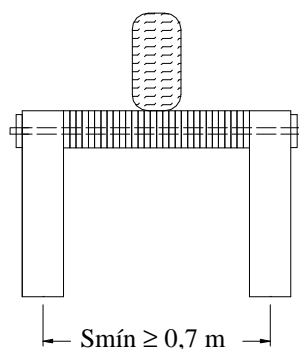


FIGURA 30 - Número máximo de nervuras

Após a determinação do número de nervuras, são feitas as verificações dos efeitos localizados no tabuleiro e os cálculos da largura efetiva da mesa de uma viga-T interna e do fator de distribuição da carga, que determina a parcela da carga transmitida para a nervura mais solicitada. A partir de então, o projeto do sistema T resume-se ao dimensionamento de uma viga-T. Com as equações de flexão simples, são calculados os momentos fletores e os esforços cortantes máximos devidos às ações permanentes e variáveis, e verificados os estados limites últimos e de utilização correspondentes. Por último, calcula-se o volume de madeira do tabuleiro e das nervuras, para efeito de comparação.

O fluxograma do método de cálculo proposto está apresentado figura 31.

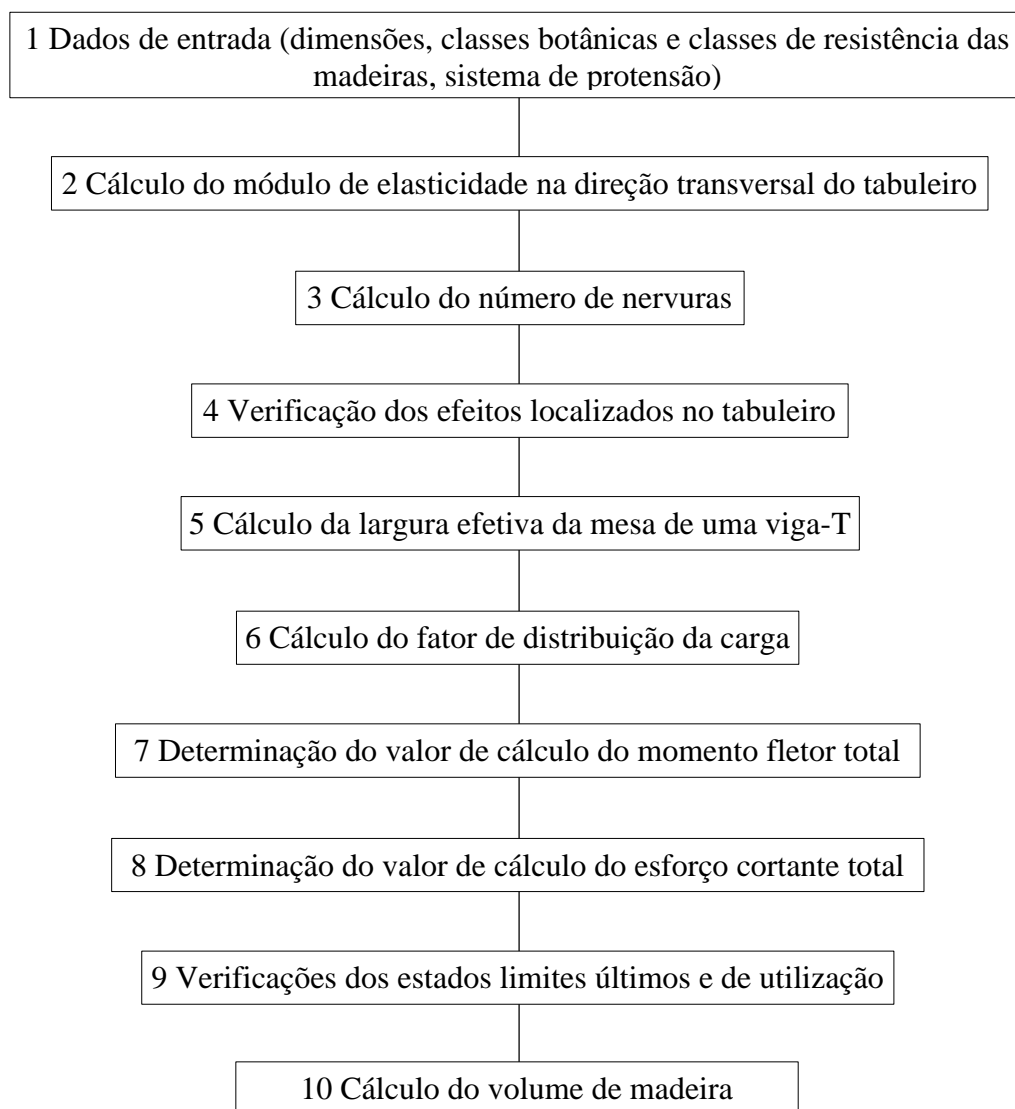


FIGURA 31 - Fluxograma do método de cálculo

### 3.2.1- Dados de entrada

A figura 32 apresenta o desenho esquemático de uma ponte formada por vigas-T, apresentando os parâmetros geométricos utilizados no cálculo:

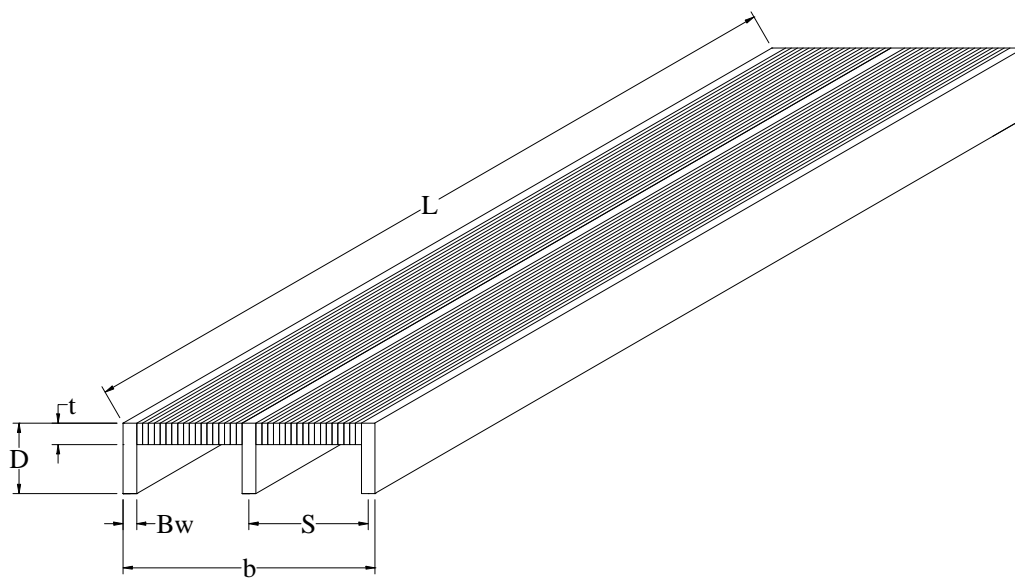


FIGURA 32 - Desenho esquemático de uma ponte formada por vigas-T

onde:

$L$  = vão da ponte

$b$  = largura da ponte

$t$  = altura do tabuleiro

$D$  = altura da nervura

$B_w$  = largura da nervura

$S$  = espaçamento entre nervuras

### 3.2.2- Cálculo do módulo de elasticidade na direção transversal das lâminas do tabuleiro $E_T$

O parâmetro elástico  $E_T$  é calculado a partir da relação dada por OKIMOTO (2000):

$$\frac{E_T}{E_{L,t}} = 0,018367 - [2,0395 \cdot 10^{-5} \cdot \rho] + \sigma_N \cdot (1,1728 \cdot 10^{-5} + 1,795 \cdot 10^{-8} \cdot \rho) \quad (15)$$

onde:

$E_{L,t}$  = módulo de elasticidade na direção longitudinal das lâminas do tabuleiro

$\rho$  = densidade aparente da madeira do tabuleiro

$\sigma_N$  = tensão de protensão no tabuleiro

### 3.2.3- Cálculo do número mínimo de nervuras ( $n_{\min}$ )

O número mínimo de nervuras é calculado de modo que o deslocamento da porção do tabuleiro entre duas nervuras adjacentes seja menor ou igual a 0,5 cm. Com o número de nervuras mínimo, tem-se o espaçamento máximo entre nervuras.

O espaçamento máximo entre nervuras  $S_{\max}$  é calculado pela equação 16:

$$\delta = \frac{P \cdot (S_{\max})^3}{4 \cdot K_{\delta} \cdot E_T \cdot t^4} = 0,5 \quad (16)$$

sendo:

$$K_{\delta} = -10,9 + 7,8 \cdot \left( \frac{S_{\max}}{t} \right) + 0,27 \cdot \left( \frac{E_{L,t}}{E_T} \right) \quad (17)$$

onde:

$K_{\delta}$  = parâmetro empírico para o deslocamento que considera a largura resistente do tabuleiro

$P$  = carga do eixo do veículo-tipo classe 30 (100 kN)

O número de nervuras inicial  $n_{\text{inicial}}$  é calculado a partir do  $S_{\max}$ :

$$n_{\text{inicial}} = 1 + \frac{b - B_w}{S_{\max}} \quad (18)$$

O número de nervuras mínimo  $n_{\text{mín}}$  é o primeiro inteiro maior ou igual a  $n_{\text{inicial}}$ . Em função de  $n_{\text{mín}}$  é calculado o espaçamento  $S$ :

$$S = \frac{b - B_W}{n - 1} \quad (19)$$

Na seqüência, calcula-se a tensão máxima  $\sigma_{\text{máx,d}}$  pela equação 20:

$$\sigma_{\text{máx,d}} = 1,4 \cdot \left( \frac{3 \cdot P \cdot S}{2 \cdot K_\sigma \cdot t^3} + \sigma_N \right) \leq f_{c90,d} \quad (20)$$

sendo:

$$K_\sigma = 3 + 3,1 \cdot \left( \frac{S}{t} \right) + 0,15 \cdot \left( \frac{E_{L,t}}{E_T} \right) \quad (21)$$

onde:

$K_\sigma$  = parâmetro empírico para a tensão que considera a largura resistente do tabuleiro

Esta tensão deve ser menor ou igual à resistência de cálculo da madeira do tabuleiro à compressão perpendicular às fibras  $f_{c90,d}$ . Caso esta condição não seja atendida, aumenta-se o número de nervuras.

### 3.2.4- Cálculo da largura efetiva da mesa de uma viga-T interna ( $b_e$ )

A largura efetiva da aba  $B_E$  é calculada pela equação 22:

$$B_E = B \cdot \left[ 0,4586 + \frac{1}{198} \cdot \left( \frac{L}{B} \right) \cdot \left( \frac{D-t}{t} \right) \cdot \left( \frac{E_{L,n}}{E_{L,t}} \right) \right] \quad (22)$$

sendo:

$$B = 0,5 \cdot (S - B_W) \quad (23)$$

onde:

$B$  = largura da aba de uma viga-T

$E_{L,n}$  = módulo de elasticidade na direção longitudinal da nervura

A largura efetiva da mesa  $b_e$  é o menor valor entre os dados abaixo:

$$b_e = 2,0 \cdot B_E + B_W \quad (24)$$

$$b_e = S \quad (25)$$

$$b_e = \frac{L}{8} \quad (26)$$

A figura 33 apresenta os parâmetros geométricos de uma viga-T interna.

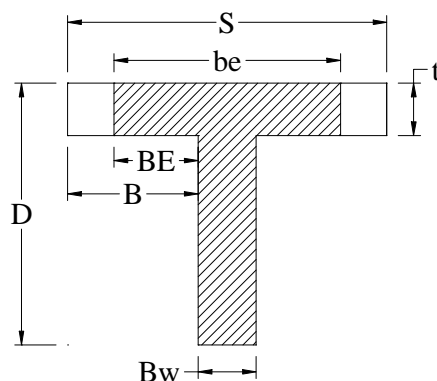


FIGURA 33 - Viga-T interna efetiva

No caso de espécies de madeiras diferentes no tabuleiro e na nervura, deve-se efetuar uma transformação da viga-T, tomando como base o módulo de elasticidade na direção longitudinal da nervura:

$$b_t = \frac{E_{L,t}}{E_{L,n}} \cdot (b_e - B_W) \quad (27)$$

sendo:

$$b_{eti} = (b_t + B_W) \quad (28)$$

onde:

$b_{eti}$  = largura efetiva transformada da mesa de uma viga-T interna

$b_t$  = largura efetiva transformada da aba de uma viga-T interna

A figura 34 apresenta os parâmetros geométricos de uma viga-T interna transformada.

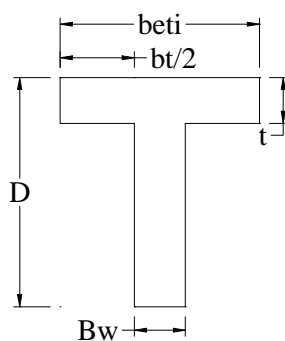


FIGURA 34 - Viga-T interna transformada

O momento de inércia da viga-T interna  $I_i$  é calculado pela equação 29:

$$I_i = \left[ \frac{B_w \cdot D^3}{12} + A_n \cdot (y_i - y_n)^2 \right] + 2 \cdot \left[ \frac{\frac{b_t}{2} \cdot t^3}{12} + A_{bal} \cdot (y_i - y_{bal})^2 \right] \quad (29)$$

onde:

$A_{bal}$  = área da aba de uma viga-T interna

$A_n$  = área da nervura

$y_{bal}$  = localização da linha neutra da aba

$y_i$  = localização da linha neutra da viga-T interna

$y_n$  = localização da linha neutra da nervura

A figura 35 apresenta os parâmetros geométricos de uma viga-T externa efetiva.

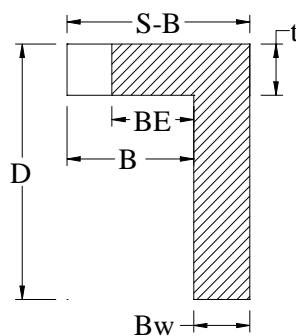


FIGURA 35 - Viga-T externa efetiva

A viga-T é transformada tomando como base o módulo de elasticidade na direção longitudinal da nervura:

$$b_{\text{tex}} = \frac{E_{L,t}}{E_{L,n}} \cdot B_E \quad (30)$$

onde:

$b_{\text{tex}}$  = largura efetiva transformada da aba de uma viga-T externa

A figura 36 apresenta os parâmetros geométricos de uma viga-T externa transformada.

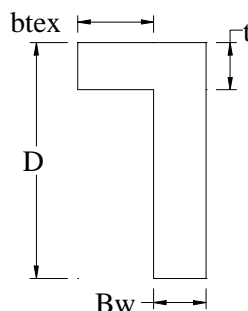


FIGURA 36 - Viga-T externa transformada

O momento de inércia da viga-T externa  $I_{\text{ex}}$  é calculado pela equação 31:

$$I_{\text{ex}} = \left[ \frac{B_w \cdot D^3}{12} + A_n \cdot (y_{\text{ex}} - y_n)^2 \right] + \left[ \frac{b_{\text{tex}} \cdot t^3}{12} + A_{\text{balx}} \cdot (y_{\text{ex}} - y_{\text{bal}})^2 \right] \quad (31)$$

onde:

$A_{\text{balx}}$  = área da aba de uma viga-T externa

$y_{\text{ex}}$  = localização da linha neutra da viga-T externa

### 3.2.5- Cálculo do fator de distribuição da carga ( $W_f$ )



O fator  $W_f$ , calculado pela equação 32, indica a porcentagem da carga móvel posicionada na faixa ocupada pelo veículo-tipo que é absorvida pela nervura mais solicitada de uma ponte com duas faixas de tráfego:

$$W_f = \frac{1 + C_0}{n \cdot C_0 + \frac{2}{\pi} \cdot (n - 1)} \quad (32)$$

sendo:

$$C_0 = \frac{(b - B_w)}{\pi} \cdot \frac{D_T}{B_e} \cdot \frac{[8 \cdot (\lambda)^2 + 1]}{(\lambda)^4} \quad (33)$$

$$D_T = E_T \cdot \frac{t^3}{12} \quad (34)$$

$$\lambda = \frac{(b - B_w)}{L} \quad (35)$$

$$B_e = E_{L,n} \cdot I_{ex} \quad (36)$$

onde:

$B_e$  = rigidez à flexão longitudinal de uma viga-T externa

$C_0$  = coeficiente de deslocamento de uma viga-T externa

$D_T$  = rigidez à flexão transversal do tabuleiro

$\lambda$  = relação entre a largura e o vão da ponte

Para pontes com uma faixa de tráfego, o fator  $W_f$  é multiplicado por 1,6 (DAVALOS, GANGARAO & SALIM 1993).

### 3.2.6- Determinação do valor de cálculo do momento fletor total ( $Md_T$ )

O valor de cálculo do momento fletor total  $Md_T$  é a soma dos momentos devidos à carga permanente  $M_{máx.cp}$  e à carga móvel  $M_{máx.cm}$ :

$$Md_T = \gamma_G \cdot M_{máx.cp} + \gamma_Q \cdot M_{máx.cm} + 0,75 \cdot \gamma_Q \cdot [(\phi - 1) \cdot M_{máx.cm}] \quad (37)$$

sendo:

$$\phi = 1 + \left( \frac{\alpha}{40 + L} \right) \quad (38)$$

onde:

$\alpha$  = coeficiente para pontes rodoviárias com revestimento de concreto asfáltico

$\phi$  = coeficiente de impacto

$\gamma_G$  = coeficiente de ponderação para estados limites últimos (ações permanentes de grande variabilidade)

$\gamma_Q$  = coeficiente de ponderação para estados limites últimos (ações variáveis)

a- O momento fletor máximo devido à carga móvel  $M_{\text{máx.cm}}$ , em função da força concentrada de projeto  $P_d$ , é calculado pela equação 39 (Figura 37):

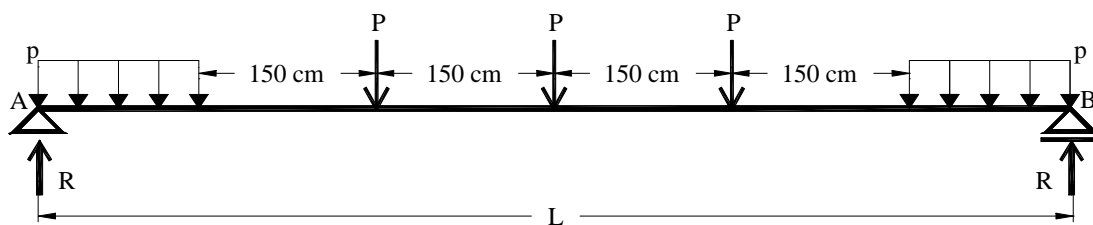


FIGURA 37 - Viga-T interna solicitada pela carga móvel

$$M_{\text{máx.cm}} = \left( \frac{P_d \cdot L}{4} \right) \quad (39)$$

sendo:

$$P_d = N_L \cdot W_f \cdot P_e \quad (40)$$

$$P_e = \frac{4 \cdot M_{\text{máx.m}}}{L} \quad (41)$$

onde:

$M_{\text{máx.m}}$  = momento fletor máximo devido à carga móvel

$N_L$  = número de faixas de tráfego

$p$  = força uniformemente distribuída na faixa ocupada pelo veículo-tipo ( $5 \cdot 10^{-3}$  MPa)

$P$  = carga do eixo do veículo-tipo classe 30 (100 kN)

$P_e$  = força concentrada, posicionada no ponto médio do vão, que produz um momento equivalente ao  $M_{\text{máx.m}}$

$P_d$  = força concentrada de projeto

b- Momento fletor máximo devido à carga permanente total  $M_{\text{máx.cp}}$  é calculado pela equação 42 (Figura 38):

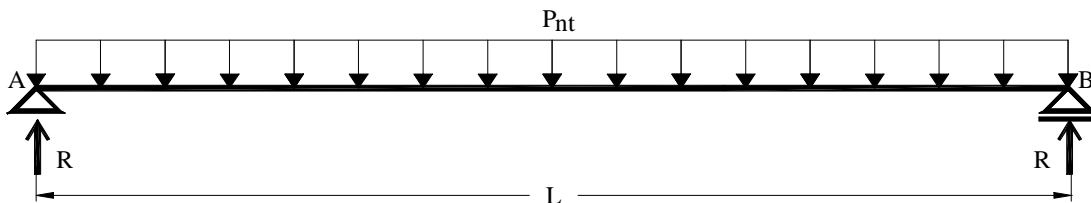


FIGURA 38 - Viga-T interna solicitada pela carga permanente

$$M_{\text{máx.cp}} = \frac{P_{\text{nt}} \cdot L^2}{8} \quad (42)$$

A carga permanente total  $P_{\text{nt}}$  é a soma dos pesos-próprios das barras de protensão  $P_{\text{bp}}$ , da nervura  $P_{\text{n}}$ , da porção do tabuleiro entre duas nervuras  $P_{\text{t}}$  e do revestimento asfáltico sobre uma seção do tabuleiro  $P_{\text{asf}}$ . Os pesos-próprios citados estão linearmente distribuídos ao longo do vão:

$$P_{\text{nt}} = P_{\text{bp}} + P_{\text{n}} + P_{\text{t}} + P_{\text{asf}} \quad (43)$$

sendo:

$$P_{\text{bp}} = \frac{P_{\text{b}}}{s \cdot n} \quad (44)$$

$$P_{\text{n}} = (9,81 \cdot \rho \cdot A_{\text{n}}) \quad (45)$$

$$P_{\text{t}} = (9,81 \cdot \rho \cdot A_{\text{t}}) \quad (46)$$

$$P_{\text{asf}} = \gamma_{\text{asf}} \cdot A_{\text{asf}} \quad (47)$$

onde:

$A_{\text{t}}$  = área do tabuleiro entre duas nervuras

$A_{\text{asf}}$  = área do revestimento asfáltico sobre uma seção do tabuleiro

$P_{\text{b}}$  = peso-próprio de uma barra de protensão

$\gamma_{\text{asf}}$  = peso específico do asfalto

### 3.2.7- Determinação do valor de cálculo do esforço cortante total ( $V_{\text{dT}}$ )

O valor de cálculo do esforço cortante total  $V_{dT}$  é a soma dos esforços cortantes devidos à carga permanente  $V_{cp}$  e à carga móvel  $V_{cm}$ , calculados na distância  $x' = 2 \cdot D$  do apoio (Figura 39):

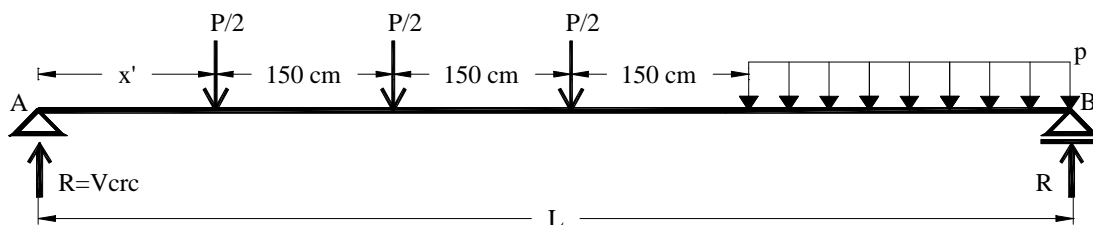


FIGURA 39 - Viga-T interna solicitada pela carga móvel

$$V_{dT} = \gamma_G \cdot V_{cp} + \gamma_Q \cdot V_{cm} + 0,75 \cdot \gamma_Q \cdot [(\phi - 1) \cdot V_{cm}] \quad (48)$$

sendo:

$$V_{cp} = \frac{P_{nt}}{2} \cdot (L - 2 \cdot x') \quad (49)$$

$$V_{cm} = \frac{1}{2} \cdot (0,6 \cdot V_{crc} + V_{crd}) \quad (50)$$

$$V_{crd} = N_L \cdot W_f \cdot V_{crc} \quad (51)$$

onde:

$D$  = altura da nervura

$V_{cm}$  = esforço cortante devido à carga móvel

$V_{cp}$  = esforço cortante devido à carga permanente

$V_{crc}$  = esforço cortante na distância  $x$  devido às cargas de rodas concentradas, sem distribuição de carga

$V_{crd}$  = esforço cortante na distância  $x$  devido às cargas de rodas distribuídas

$x'$  = duas vezes a altura da nervura

### 3.2.8- Verificações

a- Verificação da viga-T, considerando-se a teoria elementar de vigas

a.1- Verificação das tensões normais

Os valores de cálculo das tensões de tração e compressão paralelas às fibras da viga-T  $\sigma$  são calculados pela equação 52:

$$\sigma = \frac{Md_T \cdot c}{I_i} \quad (52)$$

onde:

$c$  = distância da linha neutra até a parte tracionada ou comprimida de uma viga-T

As tensões de tração e compressão  $\sigma$  devem ser menores ou iguais à resistência de cálculo da madeira da nervura à tração na flexão  $f_{t0,d}$  e à resistência de cálculo da madeira do tabuleiro à compressão paralela às fibras  $f_{c0,d}$ , respectivamente.

#### a.2- Verificação das tensões de cisalhamento

O valor de cálculo da tensão de cisalhamento da viga-T  $\tau$  é calculado pela equação 53:

$$\tau = \frac{M_S \cdot Vd_T}{B_w \cdot I} \quad (53)$$

A tensão de cisalhamento  $\tau$  deve ser menor ou igual à resistência de cálculo da madeira da nervura ao cisalhamento paralelo às fibras  $f_{v0,d}$ .

#### a.3- Verificação dos deslocamentos

O deslocamento total  $\delta_T$  é a soma dos deslocamentos devidos à carga permanente  $\delta_{cp}$  e à carga móvel  $\delta_{cm}$ :

$$\delta_T = \delta_{cp} + \psi_2 \cdot \delta_{cm} \quad (54)$$

a.3.1- O deslocamento devido à carga móvel é a soma dos deslocamentos devidos ao veículo-tipo e à força uniformemente distribuída na faixa ocupada por este veículo (Figura 40):

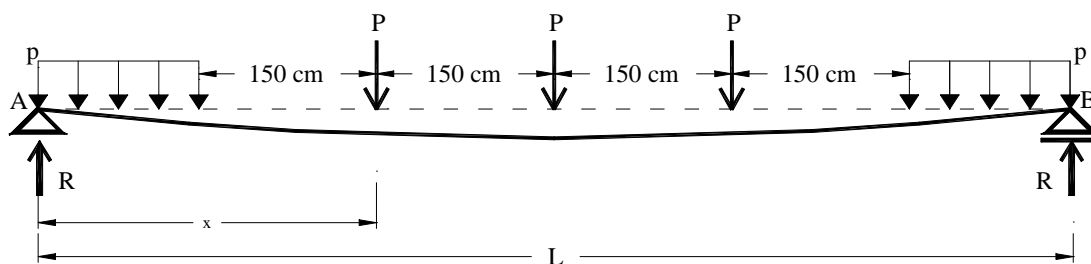


FIGURA 40 - Viga-T interna solicitada pela carga móvel

$$\delta_{cm} = \delta_{cm1} + \delta_{cm2} \quad (55)$$

sendo:

$$\delta_{cm1} = \frac{P_{\delta} \cdot L^3}{48 \cdot E_{L,n} \cdot I_i} + \frac{P_{\delta} \cdot x}{24 \cdot E_{L,n} \cdot I_i} \cdot (3 \cdot L^2 - 4 \cdot x^2) \quad (56)$$

$$\delta_{cm2} = 2 \cdot \left\{ \frac{p \cdot 300 \cdot z^2}{24 \cdot L \cdot E_{L,n} \cdot I_i} \cdot \left[ -z^2 \cdot L + 2 \cdot L^3 + z^2 \cdot \frac{L}{2} - \frac{3}{2} \cdot L^3 + 2 \cdot \left( \frac{L}{2} \right)^3 \right] \right\} \quad (57)$$

$$P_{\delta} = N_L \cdot W_f \cdot P \quad (58)$$

$$z = \frac{(L - 600)}{2} \quad (59)$$

$$x = z + 150 \quad (60)$$

onde:

$P_{\delta}$  = carga de eixo P modificada pelo fator de distribuição  $W_f$  e pelo número de faixas de tráfego  $N_L$

$x$  = distância entre o apoio e a primeira carga de eixo P

a.3.2- O deslocamento devido à carga permanente é calculado pela equação 61:

$$\delta_{cp} = \frac{5 \cdot P_{nt} \cdot L^4}{384 \cdot E_{L,n} \cdot I_i} \quad (61)$$

onde:

$\psi_2$  = fator de combinação e de utilização para cargas móveis em pontes rodoviárias

O deslocamento total  $\delta_T$  deve ser menor ou igual a  $L/200$

b- Verificação do puncionamento no tabuleiro

O esforço cortante devido ao puncionamento, calculado pela equação 62, é a força que provoca o deslizamento relativo entre as lâminas do tabuleiro:

$$V = \frac{P}{2 \cdot S} \cdot \left( S - \frac{a + B_w}{2} \right) \quad (62)$$

onde:

a = largura de contato do pneu

b<sub>l</sub> = comprimento efetivo do pneu

O esforço cortante resistente é calculado pela equação 63:

$$V_{res} = \sigma_N \cdot b_l \cdot t \cdot \mu_s \quad (63)$$

onde:

μ<sub>s</sub> = coeficiente de atrito estático igual a 0,35

O esforço cortante V deve ser menor ou igual ao esforço cortante resistente V<sub>res</sub>.

### 3.2.9- Cálculo do volume de madeira

a- O volume de madeira laminada colada das nervuras V<sub>nervura</sub> é calculado pela equação 64:

$$V_{nervura} = n \cdot (B_w \cdot D \cdot L) \quad (64)$$

b- O volume de madeira serrada do tabuleiro V<sub>tabuleiro</sub> é calculado pela equação 65:

$$V_{tabuleiro} = [b - (n \cdot B_w)] \cdot t \cdot L \quad (65)$$

### 3.3-Descrição e resultados da análise numérica

A seguir são descritos os métodos das análises efetuadas numericamente e apresentados os resultados correspondentes. Estas análises referem-se ao dimensionamento das pontes formadas com vigas-T; ao estudo das influências da altura do tabuleiro e da largura das nervuras, e da espécie de madeira do tabuleiro e das nervuras na altura  $D$ .

As pontes formadas com vigas-T foram dimensionadas para vãos  $L$  iguais a 10, 15, 20 e 25 m, larguras  $b$  iguais a 5,5 (1 faixa de tráfego) e 10,0 m (2 faixas de tráfego), larguras das nervuras  $B_w$  e alturas dos tabuleiros  $t$  iguais a 15, 20 e 25 cm e número de nervuras  $n$  variando de 4 até 8 (1 faixa de tráfego) e de 7 até 14 (2 faixas de tráfego), conforme descrito no item 3.1.2.

O estudo das influências da altura do tabuleiro e da largura das nervuras, da espécie de madeira do tabuleiro e das nervuras na altura  $D$  foram realizados a partir dos resultados numéricos do dimensionamento de pontes com os mesmos parâmetros supracitados, porém fixando-se o vão  $L$  em 15 m.

#### 3.3.1- Dimensionamento das pontes formadas por vigas-T

Com o objetivo de se conhecer as dimensões das seções transversais das pontes formadas com vigas-T, as alturas  $D$  foram calculadas considerando-se a madeira Classe C 30 - Conífera para as nervuras e o tabuleiro, e as combinações das variações de  $L$ ,  $b$ ,  $B_w$ ,  $t$ , e  $n$ , conforme descritos no item 3.3.

Com os resultados obtidos, foram montadas as tabelas 7 e 8, que apresentam, respectivamente, as alturas das nervuras e os volume totais de madeira para a ponte com 1 faixa de tráfego. Estes resultados também podem ser visualizados nas figuras 41 e 42.

Os resultados referentes às pontes com 2 faixas de tráfego são apresentados nas tabelas 10 e 11 e nas figuras 43 e 44.



TABELA 7 - Alturas das nervuras D para pontes com 1 faixa de tráfego  
( $B_w$ , t, D em cm)

n	VÃOS DAS PONTES															
	$L = 10 m$			$L = 15 m$			$L = 20 m$			$L = 25 m$						
4	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25
	t				t				t				t			
	15	-	-	-	15	-	-	-	15	-	-	-	15	-	-	-
	20	145	128	117	20	192	170	154	20	241	213	193	20	289	256	233
25	145	128	116	25	192	169	153	25	239	210	191	25	286	252	229	
5	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25
	t				t				t				t			
	15	126	112	102	15	171	151	138	15	215	191	174	15	260	231	211
	20	126	112	102	20	169	150	136	20	212	188	171	20	255	226	206
25	126	112	102	25	168	148	135	25	210	185	168	25	251	222	202	
6	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25
	t				t				t				t			
	15	114	101	92	15	155	138	126	15	196	174	159	15	237	211	193
	20	114	101	92	20	154	136	124	20	193	171	156	20	232	206	188
25	114	101	92	25	152	134	122	25	190	168	153	25	227	201	183	
7	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25
	t				t				t				t			
	15	106	94	85	15	144	128	117	15	182	162	148	15	220	196	179
	20	105	93	85	20	142	126	115	20	178	158	144	20	214	190	174
25	105	93	85	25	140	124	113	25	175	155	141	25	209	185	169	
8	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25
	t				t				t				t			
	15	99	88	80	15	135	120	110	15	170	152	139	15	206	184	169
	20	98	87	79	20	133	118	108	20	166	148	135	20	200	178	164
25	98	86	79	25	131	116	105	25	163	144	132	25	195	173	159	

TABELA 8 - Volumes de madeiras V para pontes com 1 faixa de tráfego  
( $B_w$ , t em cm, V em  $m^3$ )

n	VÃOS DAS PONTES															
	$L = 10 m$			$L = 15 m$			$L = 20 m$			$L = 25 m$						
4	$B_w$ t	15	20	25	$B_w$ t	15	20	25	$B_w$ t	15	20	25	$B_w$ t	15	20	25
	15	-	-	-	15	-	-	-	15	-	-	-	15	-	-	-
	20	19	20	21	20	32	35	37	20	49	53	57	20	68	75	81
	25	21	22	23	25	36	38	40	25	53	57	61	25	74	80	85
5	$B_w$ t	15	20	25	$B_w$ t	15	20	25	$B_w$ t	15	20	25	$B_w$ t	15	20	25
	15	17	18	19	15	30	33	35	15	47	52	56	15	67	75	82
	20	19	20	21	20	33	36	38	20	51	56	60	20	72	79	86
	25	21	22	23	25	37	39	41	25	55	60	63	25	77	84	90
6	$B_w$ t	15	20	25	$B_w$ t	15	20	25	$B_w$ t	15	20	25	$B_w$ t	15	20	25
	15	17	19	20	15	31	35	37	15	49	55	60	15	71	79	87
	20	19	21	22	20	35	37	40	20	53	58	63	20	75	83	91
	25	22	23	24	25	38	40	42	25	57	62	66	25	80	87	94
7	$B_w$ t	15	20	25	$B_w$ t	15	20	25	$B_w$ t	15	20	25	$B_w$ t	15	20	25
	15	18	19	21	15	33	36	39	15	52	58	63	15	74	84	92
	20	20	21	22	20	36	39	41	20	55	61	65	20	78	87	95
	25	22	23	24	25	39	41	44	25	59	64	68	25	83	90	97
8	$B_w$ t	15	20	25	$B_w$ t	15	20	25	$B_w$ t	15	20	25	$B_w$ t	15	20	25
	15	18	20	21	15	34	38	41	15	54	60	66	15	78	88	98
	20	20	22	23	20	37	40	43	20	57	63	68	20	82	91	100
	25	23	24	25	25	40	42	45	25	61	66	70	25	85	94	101

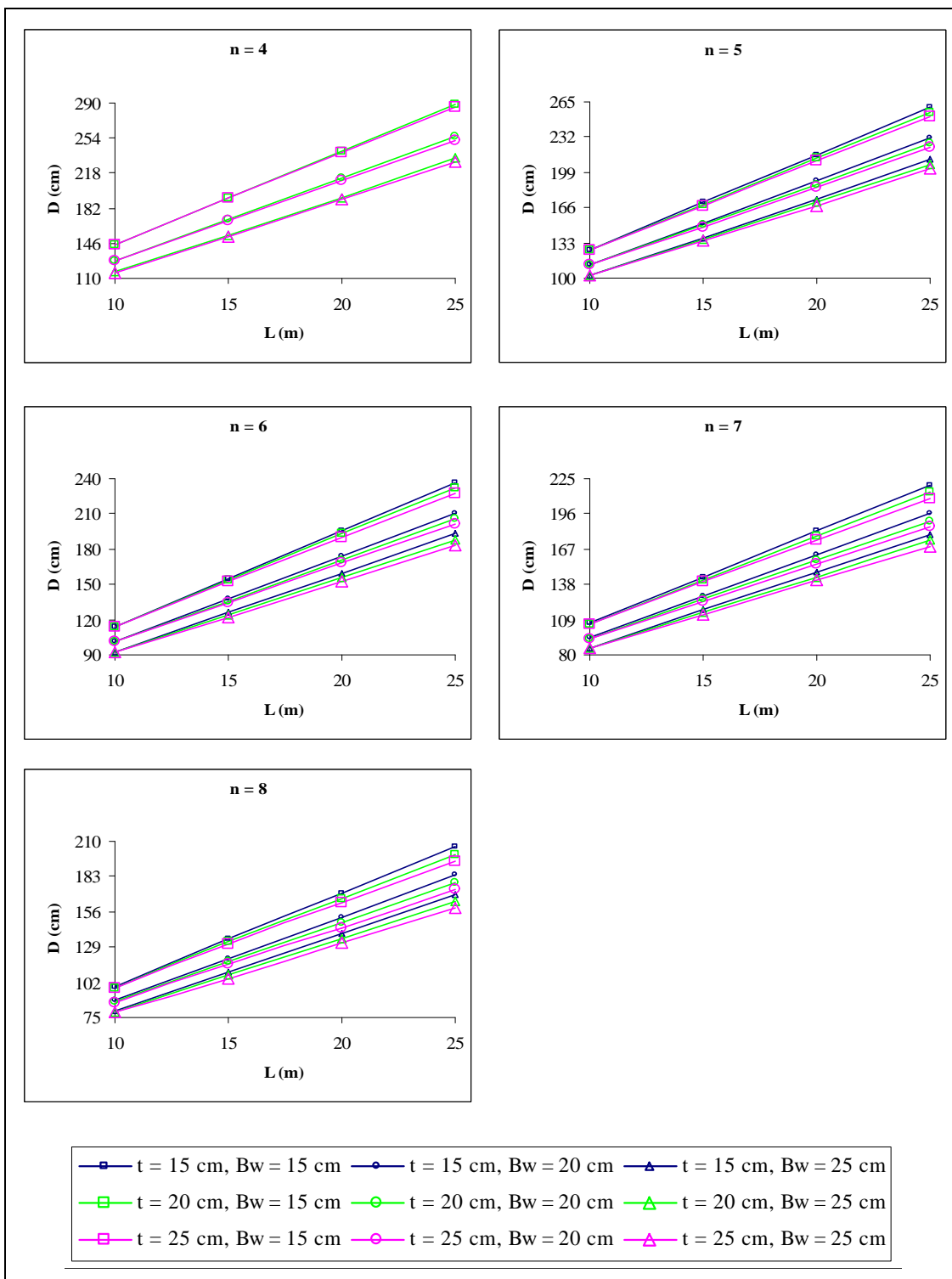


FIGURA 41 - Gráficos D x L para pontes com 1 faixa de tráfego

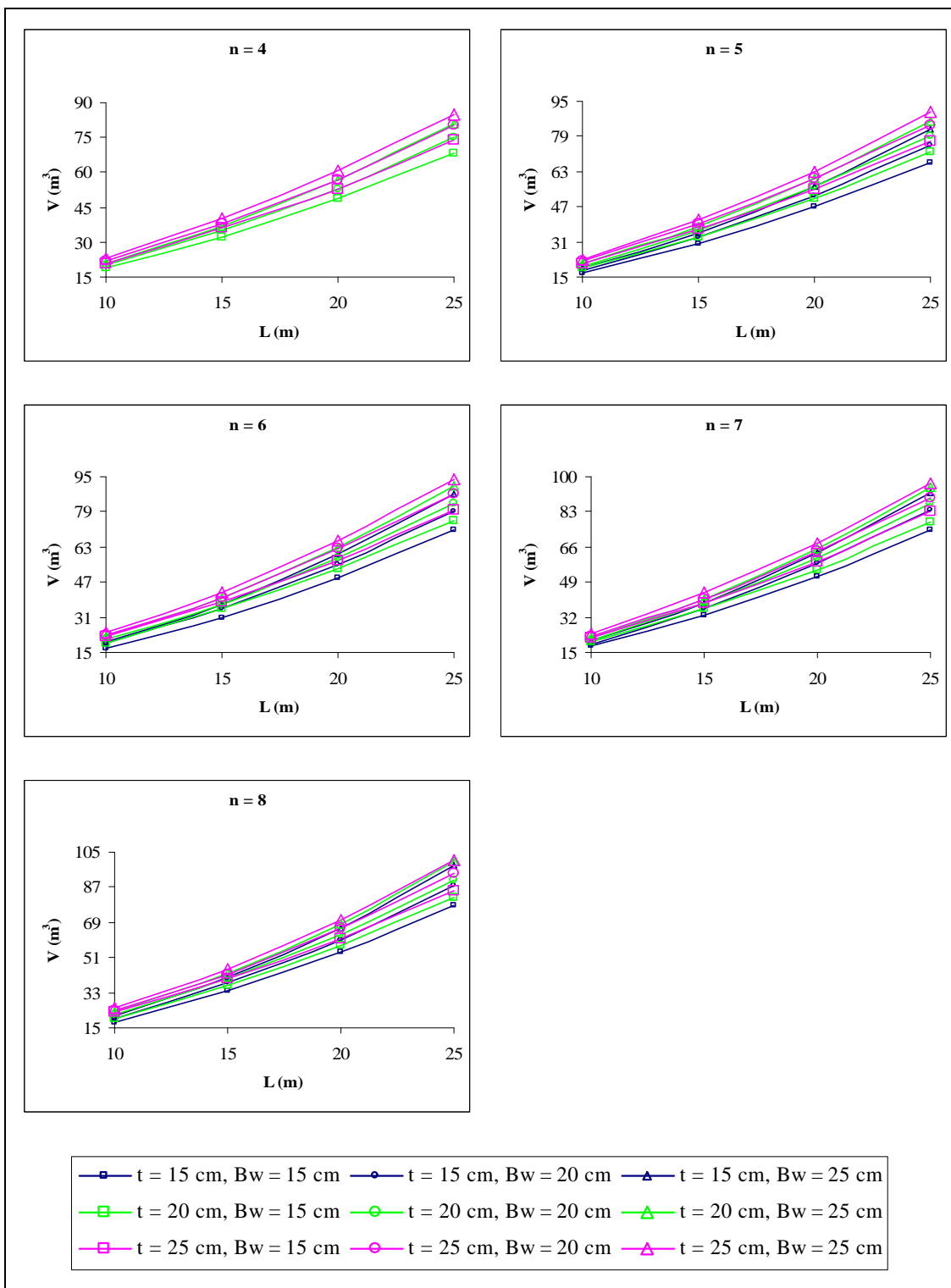


FIGURA 42 - Gráficos V x L para pontes com 1 faixa de tráfego

TABELA 9 - Alturas das nervuras D para pontes com 2 faixas de tráfego  
( $B_w$ ,  $t$ ,  $D$  em cm)

n	VÃOS DAS PONTES																
	$L = 10 m$			$L = 15 m$			$L = 20 m$			$L = 25 m$							
7	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	
	t	15	-	-	-	15	-	-	-	15	-	-	-	15	-	-	-
		20	118	104	95	20	157	139	127	20	198	175	160	20	239	212	194
		25	119	105	96	25	158	140	128	25	198	176	160	25	239	212	193
8	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	
	t	15	-	-	-	15	-	-	-	15	-	-	-	15	-	-	-
		20	110	97	89	20	147	130	119	20	185	164	150	20	224	199	182
		25	111	98	89	25	148	131	119	25	186	164	150	25	224	198	181
9	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	
	t	15	102	90	83	15	139	123	113	15	176	156	143	15	213	190	174
		20	103	92	84	20	139	123	112	20	175	155	142	20	212	188	173
		25	104	92	84	25	139	123	112	25	175	155	142	25	211	188	172
10	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	
	t	15	97	86	78	15	132	117	107	15	168	149	136	15	203	181	166
		20	98	87	79	20	132	117	107	20	167	149	135	20	202	180	165
		25	99	88	80	25	132	117	107	25	167	148	135	25	201	179	164
11	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	
	t	15	93	82	75	15	127	112	103	15	160	143	131	15	195	174	160
		20	93	83	76	20	126	112	102	20	159	142	130	20	193	172	158
		25	94	84	76	25	127	112	102	25	159	141	129	25	192	171	157
12	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	
	t	15	89	79	72	15	122	108	99	15	154	138	126	15	188	168	154
		20	89	80	73	20	121	108	99	20	153	136	125	20	186	166	152
		25	90	80	73	25	121	108	98	25	153	136	124	25	185	165	151
13	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	
	t	15	86	76	70	15	117	104	96	15	149	133	122	15	181	162	149
		20	86	77	70	20	117	104	95	20	148	132	121	20	179	160	147
		25	87	77	70	25	117	104	95	25	147	131	120	25	178	159	146
14	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	
	t	15	83	74	67	15	114	101	93	15	144	129	118	15	176	157	145
		20	83	74	68	20	113	101	92	20	143	128	117	20	174	155	143
		25	84	74	68	25	113	100	92	25	142	127	116	25	172	154	141

TABELA 10 - Volumes de madeiras V para pontes com 2 faixas de tráfego  
( $B_w$ , t em cm, V em  $m^3$ )

n	VÃOS DAS PONTES															
	$L = 10 m$			$L = 15 m$			$L = 20 m$			$L = 25 m$						
7	$\begin{matrix} B_w \\ t \end{matrix}$	15	20	25	$\begin{matrix} B_w \\ t \end{matrix}$	15	20	25	$\begin{matrix} B_w \\ t \end{matrix}$	15	20	25	$\begin{matrix} B_w \\ t \end{matrix}$	15	20	25
	15	-	-	-	15	-	-	-	15	-	-	-	15	-	-	-
	20	30	32	33	20	52	55	58	20	77	83	89	20	107	117	126
	25	35	36	37	25	58	62	65	25	86	92	97	25	119	128	136
8	$\begin{matrix} B_w \\ t \end{matrix}$	15	20	25	$\begin{matrix} B_w \\ t \end{matrix}$	15	20	25	$\begin{matrix} B_w \\ t \end{matrix}$	15	20	25	$\begin{matrix} B_w \\ t \end{matrix}$	15	20	25
	15	-	-	-	15	-	-	-	15	-	-	-	15	-	-	-
	20	31	32	34	20	53	56	60	20	80	86	92	20	111	122	131
	25	35	37	38	25	60	63	66	25	89	94	100	25	122	132	141
9	$\begin{matrix} B_w \\ t \end{matrix}$	15	20	25	$\begin{matrix} B_w \\ t \end{matrix}$	15	20	25	$\begin{matrix} B_w \\ t \end{matrix}$	15	20	25	$\begin{matrix} B_w \\ t \end{matrix}$	15	20	25
	15	27	29	30	15	48	52	56	15	73	81	88	15	104	116	127
	20	31	33	34	20	54	58	61	20	82	89	95	20	115	126	136
	25	36	37	38	25	61	64	67	25	91	97	103	25	125	136	145
10	$\begin{matrix} B_w \\ t \end{matrix}$	15	20	25	$\begin{matrix} B_w \\ t \end{matrix}$	15	20	25	$\begin{matrix} B_w \\ t \end{matrix}$	15	20	25	$\begin{matrix} B_w \\ t \end{matrix}$	15	20	25
	15	27	29	31	15	49	53	57	15	76	84	91	15	108	121	132
	20	32	33	35	20	55	59	63	20	84	92	98	20	118	130	141
	25	36	38	39	25	62	65	68	25	93	99	105	25	129	140	149
11	$\begin{matrix} B_w \\ t \end{matrix}$	15	20	25	$\begin{matrix} B_w \\ t \end{matrix}$	15	20	25	$\begin{matrix} B_w \\ t \end{matrix}$	15	20	25	$\begin{matrix} B_w \\ t \end{matrix}$	15	20	25
	15	28	30	32	15	50	55	59	15	78	86	94	15	112	125	137
	20	32	34	35	20	56	60	64	20	86	94	101	20	121	134	145
	25	36	38	39	25	63	66	69	25	94	101	107	25	131	143	153
12	$\begin{matrix} B_w \\ t \end{matrix}$	15	20	25	$\begin{matrix} B_w \\ t \end{matrix}$	15	20	25	$\begin{matrix} B_w \\ t \end{matrix}$	15	20	25	$\begin{matrix} B_w \\ t \end{matrix}$	15	20	25
	15	28	30	32	15	51	56	60	15	80	89	97	15	115	129	142
	20	32	34	36	20	57	62	66	20	88	96	103	20	125	138	149
	25	37	38	39	25	63	67	70	25	96	103	109	25	135	147	157
13	$\begin{matrix} B_w \\ t \end{matrix}$	15	20	25	$\begin{matrix} B_w \\ t \end{matrix}$	15	20	25	$\begin{matrix} B_w \\ t \end{matrix}$	15	20	25	$\begin{matrix} B_w \\ t \end{matrix}$	15	20	25
	15	29	31	33	15	52	57	62	15	82	91	100	15	118	133	146
	20	33	35	36	20	58	63	67	20	90	98	106	20	128	141	153
	25	37	39	40	25	64	68	72	25	98	105	112	25	137	150	161
14	$\begin{matrix} B_w \\ t \end{matrix}$	15	20	25	$\begin{matrix} B_w \\ t \end{matrix}$	15	20	25	$\begin{matrix} B_w \\ t \end{matrix}$	15	20	25	$\begin{matrix} B_w \\ t \end{matrix}$	15	20	25
	15	29	32	33	15	54	59	63	15	84	94	102	15	122	137	151
	20	33	35	37	20	59	64	68	20	92	100	108	20	131	145	158
	25	37	39	40	25	65	69	73	25	99	107	114	25	140	153	164

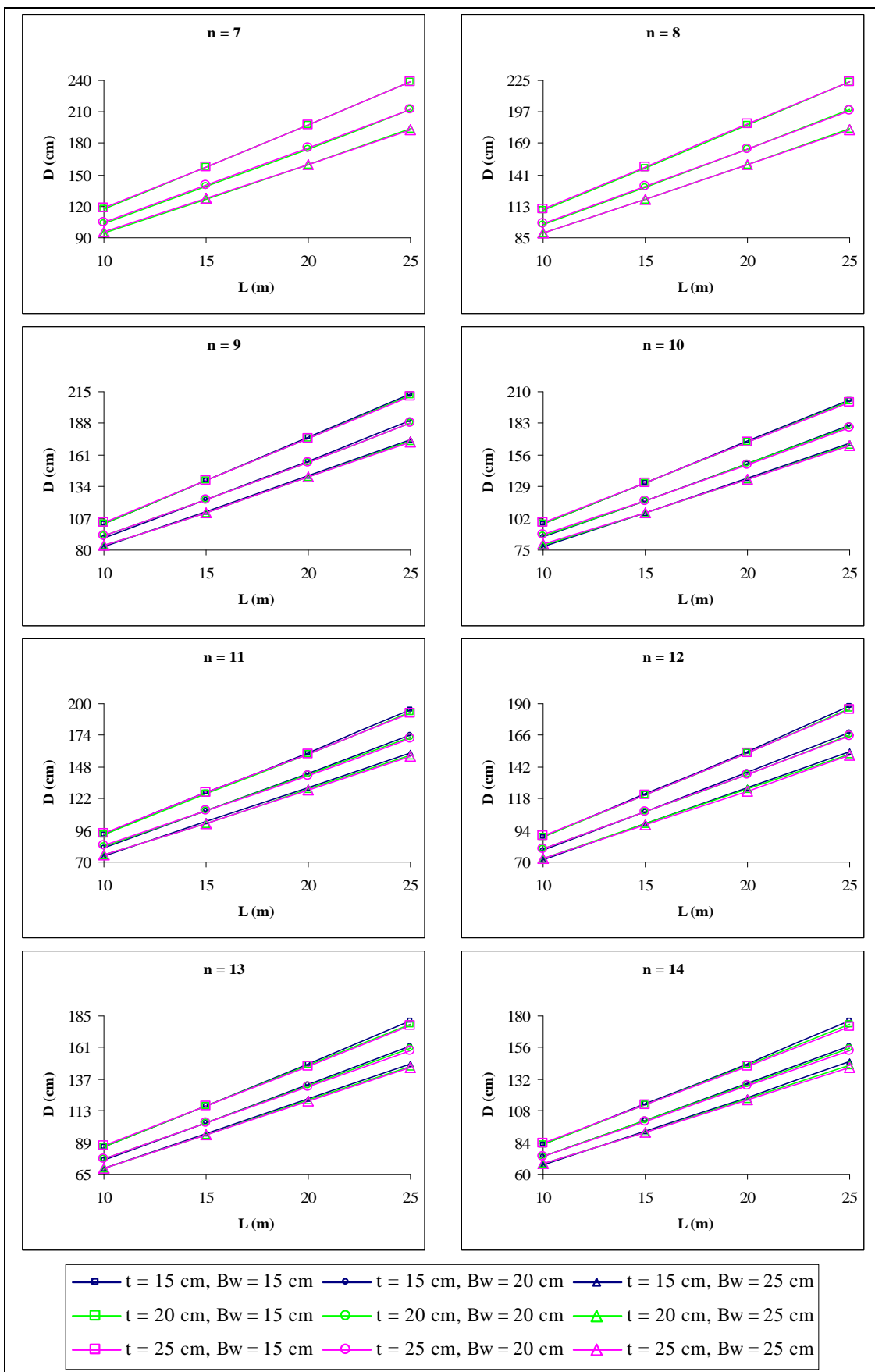


FIGURA 43 - Gráficos D x L para pontes com 2 faixas de tráfego

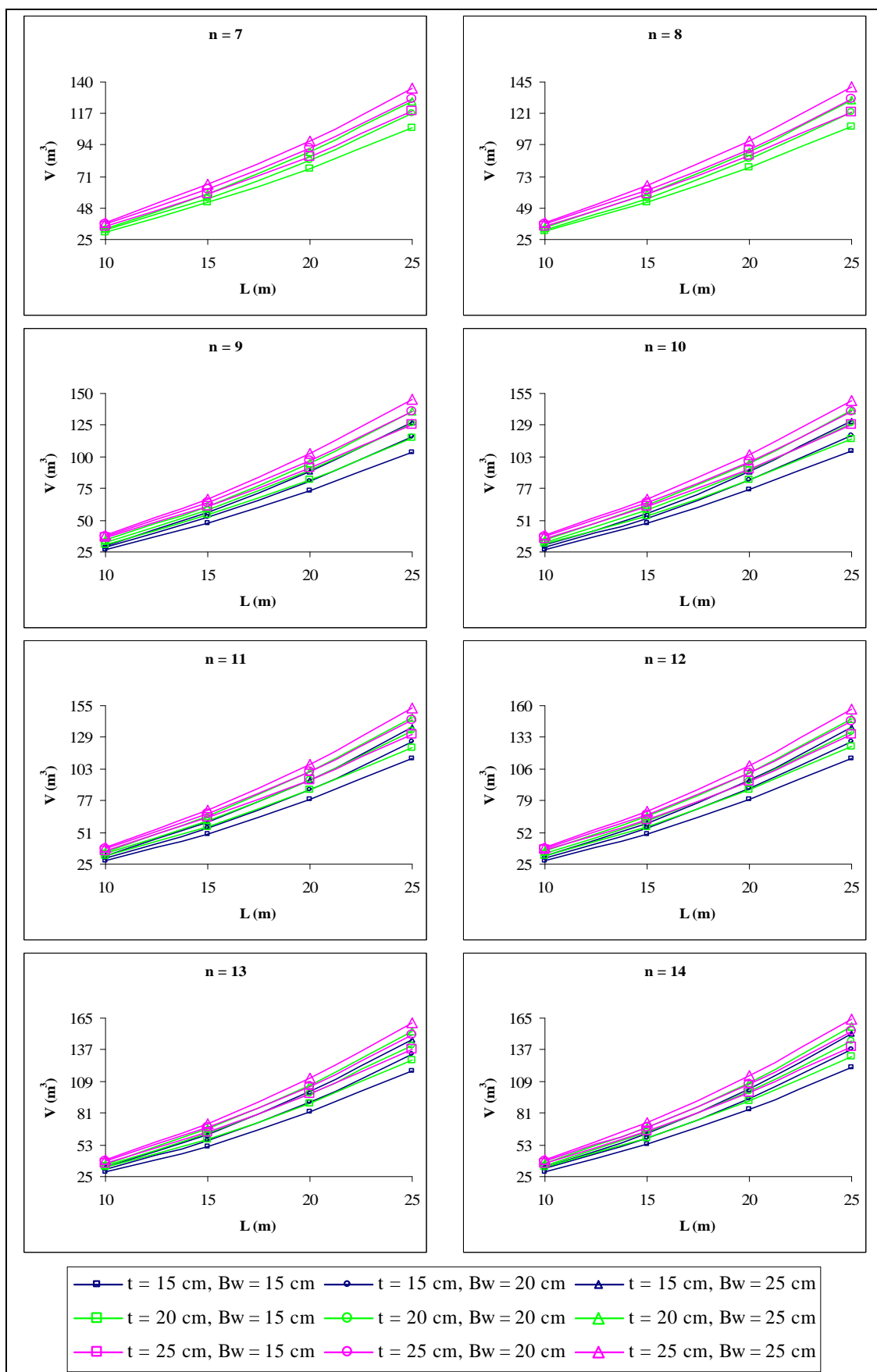


FIGURA 44 - Gráficos V x L para pontes com 2 faixas de tráfego



### 3.3.2- Influência da altura do tabuleiro e da largura das nervuras na altura D

Com o objetivo de se verificar a influência da largura  $B_w$  e da altura  $t$  na altura  $D$ , estas alturas foram calculadas para pontes com as mesmas características (largura da ponte, número de nervuras e madeira Classe C 30 - Conífera para as nervuras e o tabuleiro), e então comparadas inicialmente fixando-se a largura  $B_w$  e variando-se a altura  $t$  e, posteriormente, fixando-se a altura  $t$  e variando-se a largura  $B_w$ .

Com os resultados obtidos, foram montadas as tabelas 11 e 12, que apresentam, respectivamente, as alturas das nervuras para as pontes com 1 e 2 faixas de tráfego. Estes resultados também podem ser visualizados na figura 45.

TABELA 11 - Alturas D para pontes com 1 faixa de tráfego ( $B_w$ ,  $t$ ,  $D$  em cm)

n	TABULEIRO E NERVURAS CLASSE C 30 (CONÍFERA)			
	$B_w \backslash t$	15	20	25
4	$B_w \backslash t$	15	20	25
	15	-	-	-
	20	192	170	154
	25	192	169	153
5	$B_w \backslash t$	15	20	25
	15	171	151	138
	20	169	150	136
	25	168	148	135
6	$B_w \backslash t$	15	20	25
	15	155	138	126
	20	154	136	124
	25	152	134	122
7	$B_w \backslash t$	15	20	25
	15	144	128	117
	20	142	126	115
	25	140	124	113
8	$B_w \backslash t$	15	20	25
	15	135	120	110
	20	133	118	108
	25	131	116	105

TABELA 12 - Alturas D para pontes com 2 faixas de tráfego ( $B_w$ , t, D em cm)

n	<i>TABULEIRO E NERVURAS CLASSE C 30 (CONÍFERA)</i>			
	$B_w$ t	15	20	25
7	$B_w$ t	15	20	25
	15	-	-	-
	20 25	157 158	139 140	127 128
8	$B_w$ t	15	20	25
	15	-	-	-
	20 25	147 148	130 131	119 119
9	$B_w$ t	15	20	25
	15	139	123	113
	20 25	139 139	123 123	112 112
10	$B_w$ t	15	20	25
	15	132	117	107
	20 25	132 132	117 117	107 107
11	$B_w$ t	15	20	25
	15	127	112	103
	20 25	126 127	112 112	102 102
12	$B_w$ t	15	20	25
	15	122	108	99
	20 25	121 121	108 108	99 98
13	$B_w$ t	15	20	25
	15	117	104	96
	20 25	117 117	104 104	95 95
14	$B_w$ t	15	20	25
	15	114	101	93
	20 25	113 113	101 100	92 92

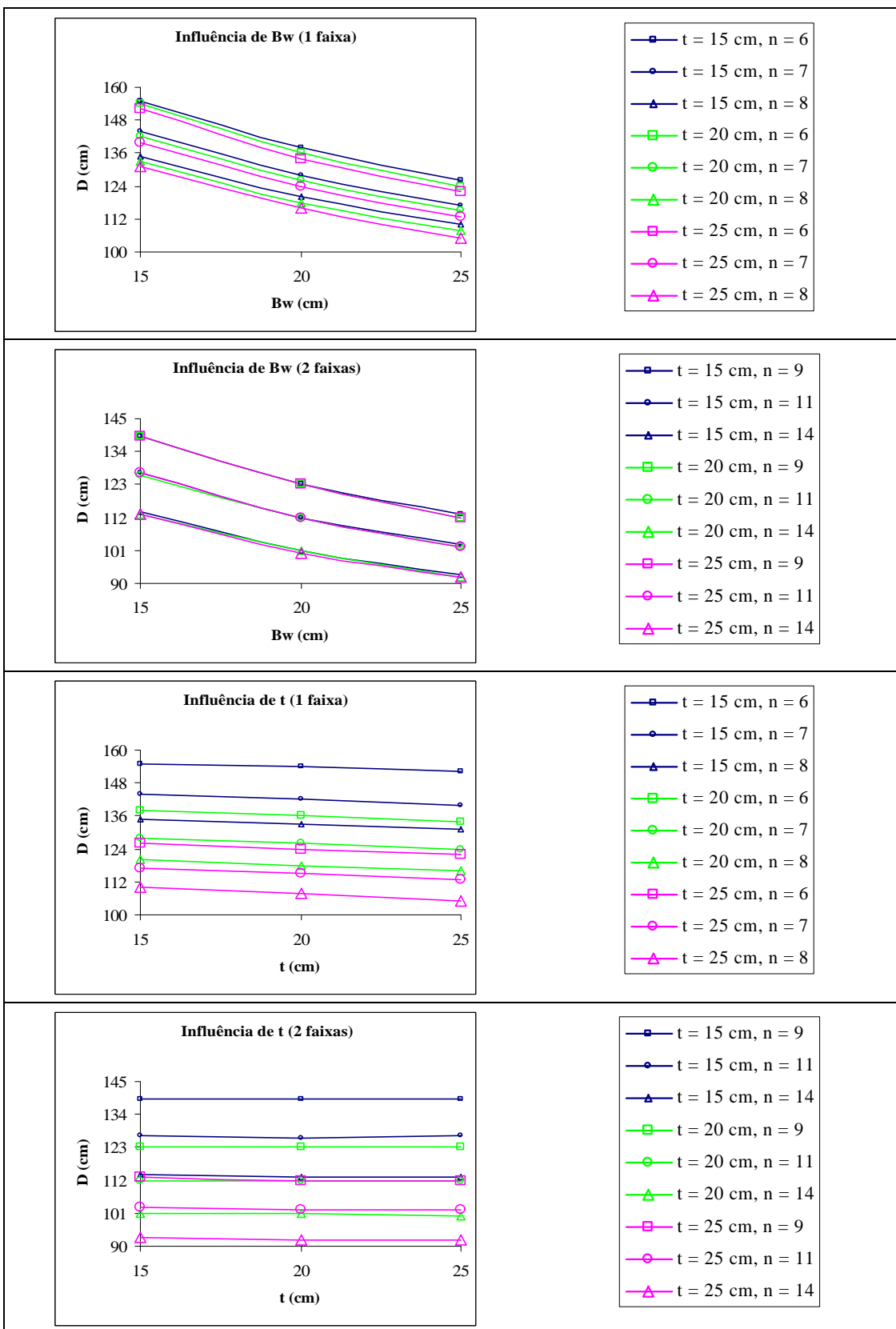


FIGURA 45 - Gráficos D x B<sub>w</sub> e D x t para pontes com 1 e 2 faixas de tráfego

### 3.3.3- Influência da espécie de madeira do tabuleiro na altura D

Com o objetivo de se verificar a influência da espécie de madeira do tabuleiro na altura D, estas alturas foram calculadas para pontes com as mesmas características (largura da ponte, largura das nervuras, altura do tabuleiro, número de nervuras e madeira Classe C 30 - Conífera para as nervuras), e então comparadas entre si, mudando-se apenas a madeira do tabuleiro (Classe C 30 - Conífera, Classe C 30 - Dicotiledônea e Classe C 40 - Dicotiledônea).

Com os resultados obtidos, foram montadas as tabelas 13 e 14, que apresentam, respectivamente, as alturas das nervuras e os volume totais de madeiras para a ponte com 1 faixa de tráfego. Os resultados referentes às pontes com 2 faixas de tráfego são apresentados nas tabelas 15 e 16.

Estes resultados também podem ser visualizados nas figuras 46 e 47.

TABELA 13 - Alturas das nervuras D para pontes com 1 faixa de tráfego  
( $B_w$ , t, D em cm)

n	<i>CLASSES DE RESISTÊNCIA DAS MADEIRAS DO TABULEIRO</i>											
	<i>CLASSE C 30 (CONÍFERA)</i>				<i>CLASSE C 30 (DICOTILEDÔNEA)</i>				<i>CLASSE C 40 (DICOTILEDÔNEA)</i>			
4	$B_w$ t	15	20	25	$B_w$ t	15	20	25	$B_w$ t	15	20	25
	15	-	-	-	15	-	-	-	15	-	-	-
	20	192	170	154	20	194	171	155	20	192	169	153
	25	192	169	153	25	194	171	155	25	192	170	154
5	$B_w$ t	15	20	25	$B_w$ t	15	20	25	$B_w$ t	15	20	25
	15	171	151	138	15	172	152	139	15	169	149	136
	20	169	150	136	20	171	151	137	20	168	148	135
	25	168	148	135	25	170	150	136	25	168	148	135
6	$B_w$ t	15	20	25	$B_w$ t	15	20	25	$B_w$ t	15	20	25
	15	155	138	126	15	156	139	127	15	153	136	124
	20	154	136	124	20	155	137	125	20	152	135	123
	25	152	134	122	25	154	136	124	25	152	134	121
7	$B_w$ t	15	20	25	$B_w$ t	15	20	25	$B_w$ t	15	20	25
	15	144	128	117	15	145	129	117	15	142	126	115
	20	142	126	115	20	143	127	116	20	141	124	113
	25	140	124	113	25	142	125	114	25	139	123	112
8	$B_w$ t	15	20	25	$B_w$ t	15	20	25	$B_w$ t	15	20	25
	15	135	120	110	15	136	121	110	15	133	118	108
	20	133	118	108	20	134	119	108	20	131	116	106
	25	131	116	105	25	132	117	107	25	130	115	104

TABELA 14 - Volumes de madeiras V para pontes com 1 faixa de tráfego  
( $B_w$ , t em cm, V em  $m^3$ )

n	<i>CLASSES DE RESISTÊNCIA DAS MADEIRAS DO TABULEIRO</i>											
	<i>CLASSE C 30 (CONÍFERA)</i>				<i>CLASSE C 30 (DICOTILEDÔNEA)</i>				<i>CLASSE C 40 (DICOTILEDÔNEA)</i>			
4	$B_w$ t	15	20	25	$B_w$ t	15	20	25	$B_w$ t	15	20	25
	15	-	-	-	15	-	-	-	15	-	-	-
	20	32	35	37	20	32	35	37	20	32	34	36
	25	36	38	40	25	36	38	40	25	36	38	40
5	$B_w$ t	15	20	25	$B_w$ t	15	20	25	$B_w$ t	15	20	25
	15	30	33	35	15	30	33	36	15	30	32	35
	20	33	36	38	20	33	36	38	20	33	36	38
	25	37	39	41	25	37	39	41	25	37	39	41
6	$B_w$ t	15	20	25	$B_w$ t	15	20	25	$B_w$ t	15	20	25
	15	31	35	37	15	31	35	38	15	31	34	37
	20	35	37	40	20	35	38	40	20	34	37	40
	25	38	40	42	25	38	41	43	25	38	40	42
7	$B_w$ t	15	20	25	$B_w$ t	15	20	25	$B_w$ t	15	20	25
	15	33	36	39	15	33	36	39	15	32	36	39
	20	36	39	41	20	36	39	42	20	36	38	41
	25	39	41	44	25	39	42	44	25	39	41	43
8	$B_w$ t	15	20	25	$B_w$ t	15	20	25	$B_w$ t	15	20	25
	15	34	38	41	15	34	38	41	15	34	37	40
	20	37	40	43	20	37	40	43	20	36	40	42
	25	40	42	45	25	40	43	45	25	40	42	44

TABELA 15 - Alturas das nervuras D para pontes com 2 faixas de tráfego  
( $B_w$ , t, D em cm)

n	<i>CLASSES DE RESISTÊNCIA DAS MADEIRAS DO TABULEIRO</i>												
	<i>CLASSE C 30 (CONÍFERA)</i>				<i>CLASSE C 30 (DICOTILEDÔNEA)</i>				<i>CLASSE C 40 (DICOTILEDÔNEA)</i>				
7	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	
	t	15	-	-	-	15	-	-	-	15	-	-	-
		20	157	139	127	20	159	141	128	20	158	140	127
		25	158	140	128	25	160	142	129	25	160	142	129
8	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	
	t	15	-	-	-	15	-	-	-	15	-	-	-
		20	147	130	119	20	149	132	120	20	147	130	119
		25	148	131	119	25	150	132	121	25	149	132	120
9	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	
	t	15	139	123	113	15	140	124	113	15	138	122	111
		20	139	123	112	20	140	124	113	20	139	123	112
		25	139	123	112	25	141	125	114	25	140	124	113
10	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	
	t	15	132	117	107	15	133	118	108	15	131	116	106
		20	132	117	107	20	134	118	108	20	132	117	106
		25	132	117	107	25	134	119	108	25	133	118	107
11	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	
	t	15	127	112	103	15	128	113	104	15	126	111	102
		20	126	112	102	20	128	113	103	20	126	112	102
		25	127	112	102	25	128	114	104	25	127	112	102
12	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	
	t	15	122	108	99	15	123	109	100	15	121	107	98
		20	121	108	99	20	123	109	99	20	121	107	98
		25	121	108	98	25	123	109	99	25	122	108	98
13	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	
	t	15	117	104	96	15	118	105	96	15	116	103	95
		20	117	104	95	20	118	105	96	20	117	103	94
		25	117	104	95	25	118	105	96	25	117	104	94
14	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	
	t	15	114	101	93	15	114	102	93	15	112	100	92
		20	113	101	92	20	114	102	93	20	113	100	92
		25	113	100	92	25	114	102	93	25	113	100	91

TABELA 16 - Volumes de madeiras V para pontes com 2 faixas de tráfego  
( $B_w$ , t em cm, V em  $m^3$ )

n	<i>CLASSES DE RESISTÊNCIA DAS MADEIRAS DO TABULEIRO</i>											
	<i>CLASSE C 30 (CONÍFERA)</i>				<i>CLASSE C 30 (DICOTILEDÔNEA)</i>				<i>CLASSE C 40 (DICOTILEDÔNEA)</i>			
7	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25
	t				t				t			
	15	-	-	-	15	-	-	-	15	-	-	-
	20	52	55	58	20	52	55	58	20	52	55	58
25	58	62	65	25	59	62	65	25	59	62	65	
8	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25
	t				t				t			
	15	-	-	-	15	-	-	-	15	-	-	-
	20	53	56	60	20	53	57	60	20	53	56	60
25	60	63	66	25	60	63	66	25	60	63	66	
9	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25
	t				t				t			
	15	48	52	56	15	48	52	56	15	47	51	55
	20	54	58	61	20	54	58	61	20	54	58	61
25	61	64	67	25	61	65	68	25	61	64	67	
10	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25
	t				t				t			
	15	49	53	57	15	49	53	57	15	49	53	57
	20	55	59	63	20	56	59	63	20	55	59	62
25	62	65	68	25	62	66	69	25	62	65	68	
11	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25
	t				t				t			
	15	50	55	59	15	50	55	59	15	50	54	58
	20	56	60	64	20	57	61	64	20	56	60	64
25	63	66	69	25	63	67	70	25	63	66	69	
12	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25
	t				t				t			
	15	51	56	60	15	52	56	61	15	51	56	60
	20	57	62	66	20	58	62	66	20	57	61	65
25	63	67	70	25	64	68	71	25	64	67	70	
13	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25
	t				t				t			
	15	52	57	62	15	53	58	62	15	52	57	62
	20	58	63	67	20	59	63	67	20	58	62	66
25	64	68	72	25	65	69	72	25	64	68	71	
14	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25
	t				t				t			
	15	54	59	63	15	54	59	63	15	53	58	63
	20	59	64	68	20	60	64	68	20	59	64	68
25	65	69	73	25	66	70	73	25	65	69	72	



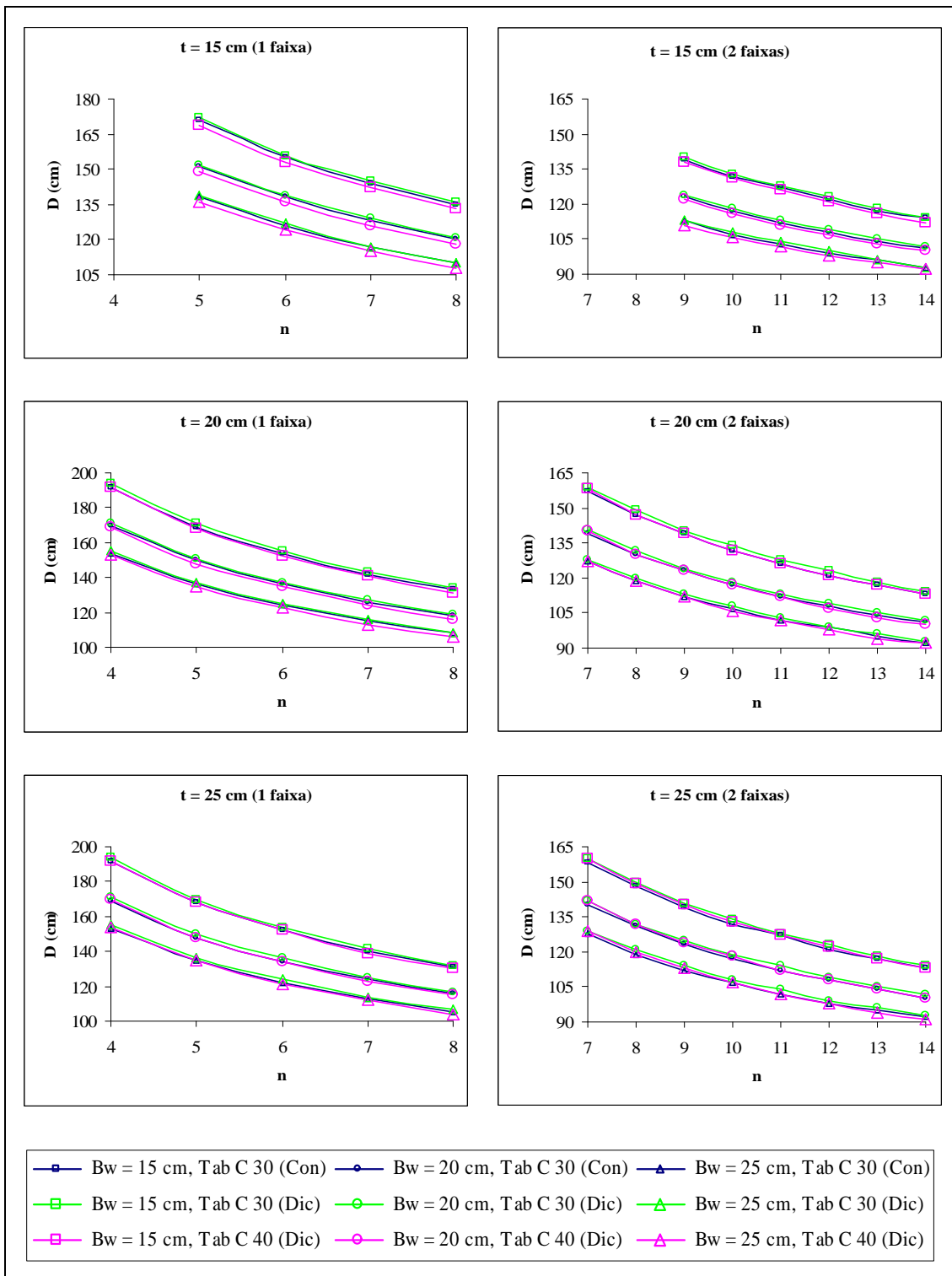


FIGURA 46 - Gráficos D x n para pontes com 1 e 2 faixas de tráfego

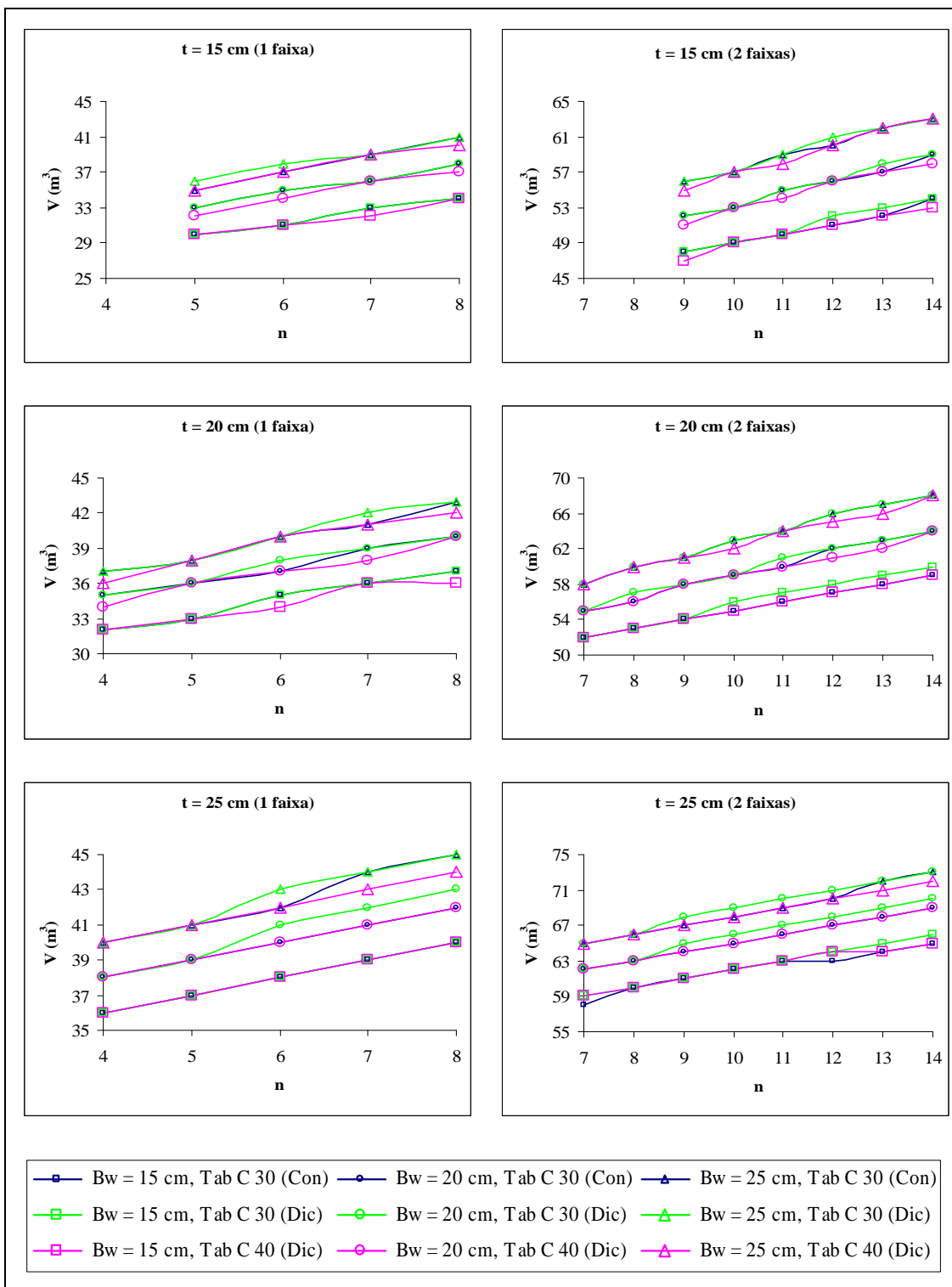


FIGURA 47 - Gráficos V x n para pontes com 1 e 2 faixas de tráfego

### 3.3.4- Influência da espécie de madeira das nervuras na altura D

Com o objetivo de se verificar a influência da espécie de madeira das nervuras na altura D, estas alturas foram calculadas para pontes com as mesmas características (largura, largura das nervuras, altura do tabuleiro, número de nervuras e madeira Classe C 30 - Conífera para o tabuleiro), e então comparadas entre si, mudando-se apenas a madeira das nervuras (Classe C 30 - Conífera e Classe C 30 - Dicotiledônea).

Com os resultados obtidos, foram montadas as tabelas 17 e 18, que apresentam, respectivamente, as alturas das nervuras e os volume totais de madeiras para a ponte com 1 faixa de tráfego. Os resultados referentes às pontes com 2 faixas de tráfego são apresentados nas tabelas 19 e 20.

Estes resultados também podem ser visualizados nas figuras 48 a 49.

TABELA 17 - Alturas das nervuras D para pontes com 1 faixa de tráfego  
( $B_w$ , t, D em cm)

n	<i>CLASSES DE RESISTÊNCIA DAS MADEIRAS DAS NERVURAS</i>							
	<i>CLASSE C 30 (CONÍFERA)</i>				<i>CLASSE C 30 (DICOTILEDÔNEA)</i>			
4	$B_w$ \ t	15	20	25	$B_w$ \ t	15	20	25
	15	-	-	-	15	-	-	-
	20	192	170	154	20	194	171	156
	25	192	169	153	25	193	170	155
5	$B_w$ \ t	15	20	25	$B_w$ \ t	15	20	25
	15	171	151	138	15	172	153	140
	20	169	150	136	20	171	151	138
	25	168	148	135	25	170	150	136
6	$B_w$ \ t	15	20	25	$B_w$ \ t	15	20	25
	15	155	138	126	15	157	139	127
	20	154	136	124	20	155	138	126
	25	152	134	122	25	154	136	124
7	$B_w$ \ t	15	20	25	$B_w$ \ t	15	20	25
	15	144	128	117	15	145	129	118
	20	142	126	115	20	143	127	116
	25	140	124	113	25	142	126	115
8	$B_w$ \ t	15	20	25	$B_w$ \ t	15	20	25
	15	135	120	110	15	136	122	111
	20	133	118	108	20	134	119	109
	25	131	116	105	25	132	117	107

TABELA 18 - Volumes de madeiras V para pontes com 1 faixa de tráfego  
( $B_w$ , t em cm, V em  $m^3$ )

n	<i>CLASSES DE RESISTÊNCIA DAS MADEIRAS DAS NERVURAS</i>							
	<i>CLASSE C 30 (CONÍFERA)</i>				<i>CLASSE C 30 (DICOTILEDÔNEA)</i>			
4	$\begin{matrix} B_w \\ t \end{matrix}$	15	20	25	$\begin{matrix} B_w \\ t \end{matrix}$	15	20	25
	15	-	-	-	15	-	-	-
	20	32	35	37	20	32	35	37
	25	36	38	40	25	36	38	40
5	$\begin{matrix} B_w \\ t \end{matrix}$	15	20	25	$\begin{matrix} B_w \\ t \end{matrix}$	15	20	25
	15	30	33	35	15	30	33	36
	20	33	36	38	20	33	36	39
	25	37	39	41	25	37	39	41
6	$\begin{matrix} B_w \\ t \end{matrix}$	15	20	25	$\begin{matrix} B_w \\ t \end{matrix}$	15	20	25
	15	31	35	37	15	32	35	38
	20	35	37	40	20	35	38	40
	25	38	40	42	25	38	41	43
7	$\begin{matrix} B_w \\ t \end{matrix}$	15	20	25	$\begin{matrix} B_w \\ t \end{matrix}$	15	20	25
	15	33	36	39	15	33	36	39
	20	36	39	41	20	36	39	42
	25	39	41	44	25	39	42	44
8	$\begin{matrix} B_w \\ t \end{matrix}$	15	20	25	$\begin{matrix} B_w \\ t \end{matrix}$	15	20	25
	15	34	38	41	15	34	38	41
	20	37	40	43	20	37	40	43
	25	40	42	45	25	40	43	45

TABELA 19 - Alturas das nervuras D para pontes com 2 faixas de tráfego  
( $B_w$ , t, D em cm)

n	<i>CLASSES DE RESISTÊNCIA DAS MADEIRAS DAS NERVURAS</i>							
	<i>CLASSE C 30 (CONÍFERA)</i>				<i>CLASSE C 30 (DICOTILEDÔNEA)</i>			
7	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25
	t				t			
	15	-	-	-	15	-	-	-
	20	157	139	127	20	159	140	128
25	158	140	128	25	159	141	129	
8	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25
	t				t			
	15	-	-	-	15	-	-	-
	20	147	130	119	20	149	132	120
25	148	131	119	25	149	132	121	
9	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25
	t				t			
	15	139	123	113	15	140	125	114
	20	139	123	112	20	140	125	114
25	139	123	112	25	141	125	114	
10	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25
	t				t			
	15	132	117	107	15	134	119	109
	20	132	117	107	20	134	119	109
25	132	117	107	25	134	119	108	
11	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25
	t				t			
	15	127	112	103	15	128	114	104
	20	126	112	102	20	128	114	104
25	127	112	102	25	128	114	104	
12	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25
	t				t			
	15	122	108	99	15	123	110	101
	20	121	108	99	20	123	109	100
25	121	108	98	25	123	109	100	
13	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25
	t				t			
	15	117	104	96	15	119	106	97
	20	117	104	95	20	118	106	97
25	117	104	95	25	118	105	96	
14	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25
	t				t			
	15	114	101	93	15	115	103	94
	20	113	101	92	20	115	102	94
25	113	100	92	25	114	102	93	

TABELA 20 - Volume de madeira V para pontes com 2 faixas de tráfego  
( $B_w$ , t em cm, V em  $m^3$ )

n	<i>CLASSES DE RESISTÊNCIA DAS MADEIRAS DAS NERVURAS</i>							
	<i>CLASSE C 30 (CONÍFERA)</i>				<i>CLASSE C 30 (DICOTILEDÔNEA)</i>			
7	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25
	t				t			
	15	-	-	-	15	-	-	-
	20	52	55	58	20	52	55	58
	25	58	62	65	25	59	62	65
8	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25
	t				t			
	15	-	-	-	15	-	-	-
	20	53	56	60	20	53	57	60
	25	60	63	66	25	60	63	66
9	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25
	t				t			
	15	48	52	56	15	48	52	56
	20	54	58	61	20	54	58	62
	25	61	64	67	25	61	65	68
10	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25
	t				t			
	15	49	53	57	15	49	54	58
	20	55	59	63	20	56	60	63
	25	62	65	68	25	62	66	69
11	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25
	t				t			
	15	50	55	59	15	50	55	59
	20	56	60	64	20	57	61	65
	25	63	66	69	25	63	67	70
12	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25
	t				t			
	15	51	56	60	15	52	57	61
	20	57	62	66	20	58	62	66
	25	63	67	70	25	64	68	71
13	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25
	t				t			
	15	52	57	62	15	53	58	62
	20	58	63	67	20	59	64	68
	25	64	68	72	25	65	69	72
14	$B_w$	15	20	25	$B_w$	15	20	25
	t				t			
	15	54	59	63	15	54	59	64
	20	59	64	68	20	60	64	69
	25	65	69	73	25	66	70	73

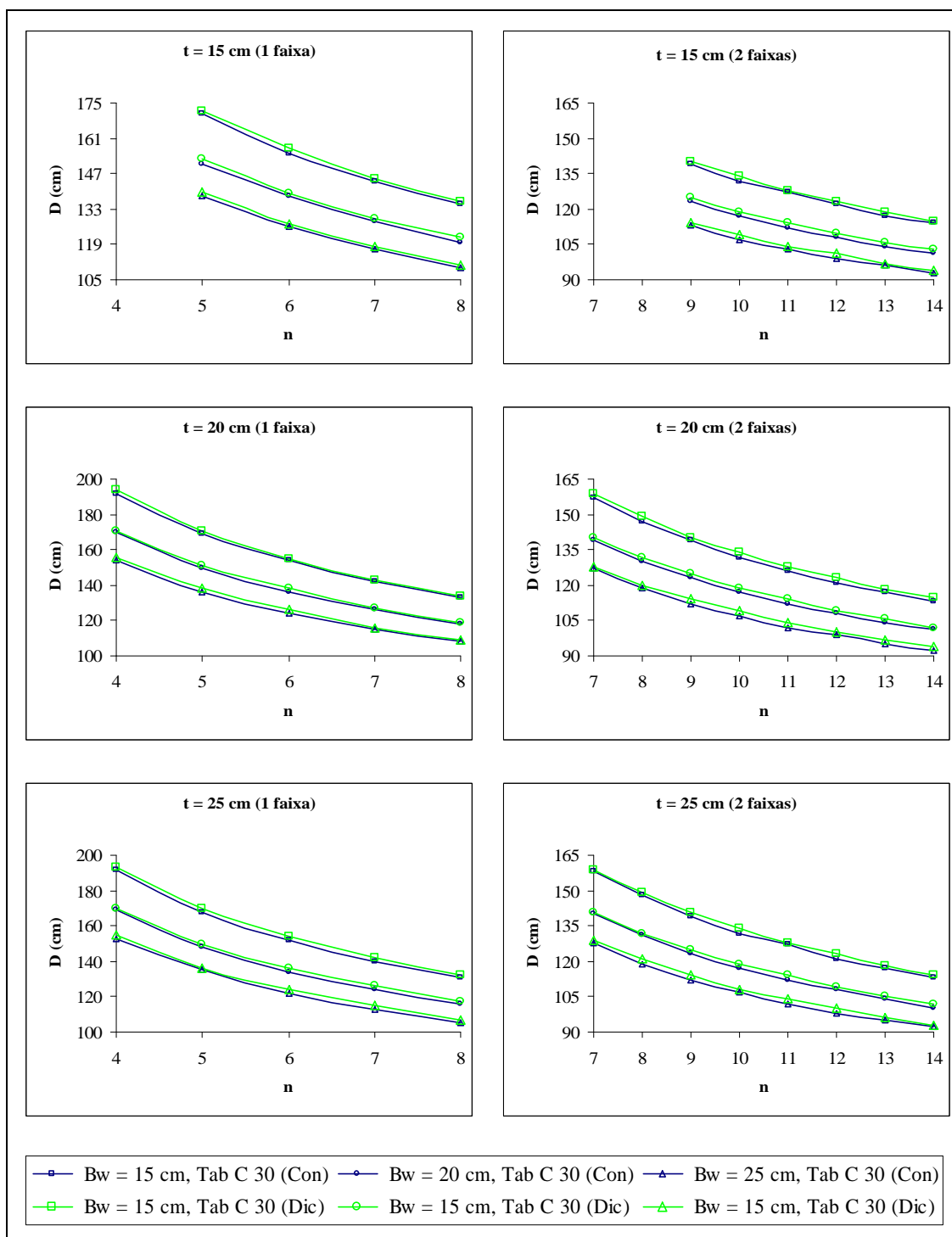


FIGURA 48 - Gráficos  $D \times n$  para pontes com 1 e 2 faixas de tráfego



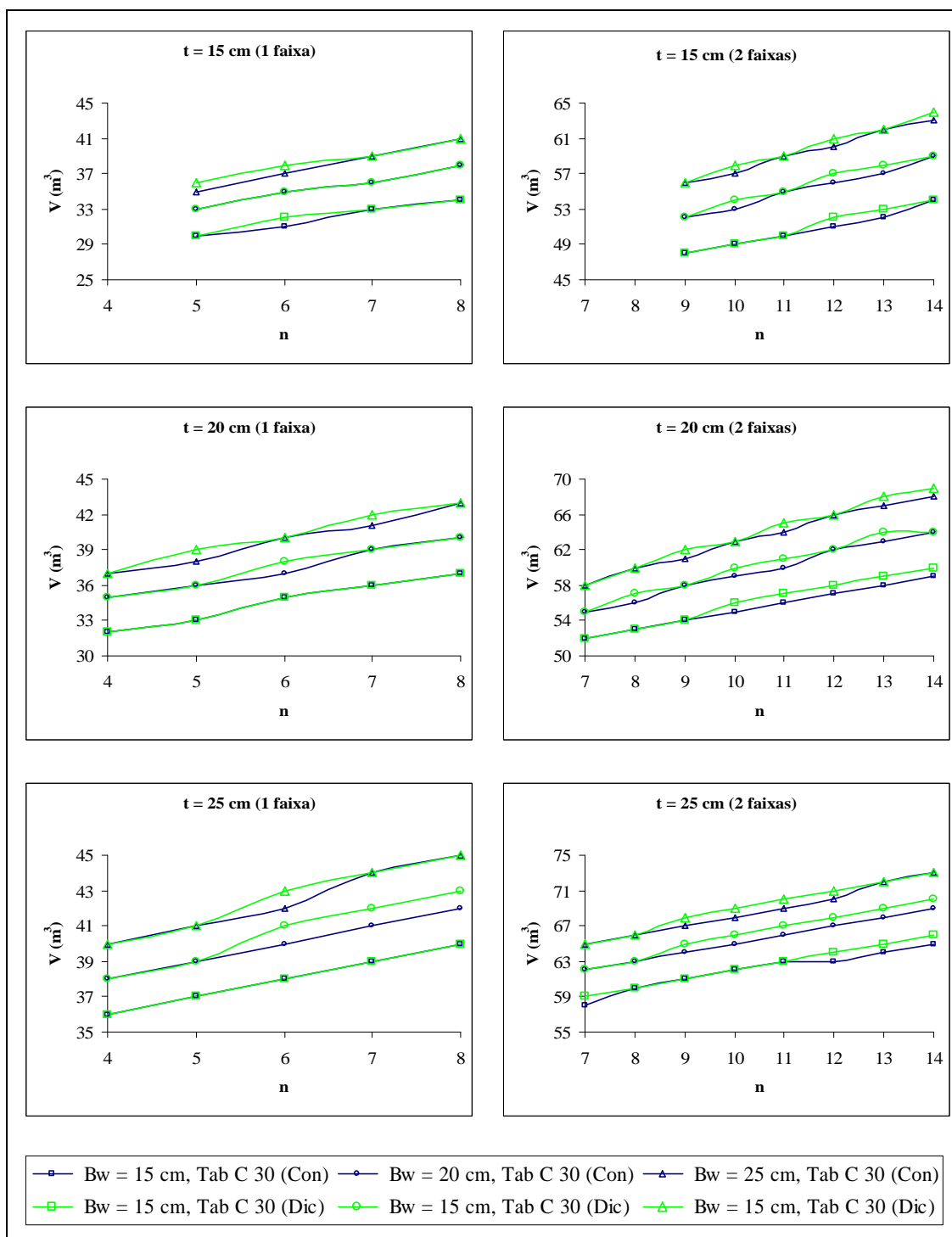


FIGURA 49 - Gráficos V x n para pontes com 1 e 2 faixas de tráfego

### 3.4-Discussões sobre a análise numérica

No processo de dimensionamento das nervuras, o fator limitante foi o estado limite último de tração nas fibras inferiores das nervuras, para todas as situações analisadas. O critério estipulado pela NBR 7190/97, para o estado limite de utilização, conduz a resultados distintos dos que eram obtidos anteriormente à implantação desta norma, quando se observava que o fator limitante era o deslocamento vertical da estrutura. Deste modo, podem-se esperar reduções significativas na altura das nervuras ao se utilizar resistências de cálculo à tração superiores às empregadas neste trabalho, por meio de critérios de dimensionamento que permitam considerar a maior resistência à tração da madeira.

No processo de avaliação da influência dos fatores geométricos, observa-se que a variação da altura do tabuleiro de 15 a 25 cm conduz a reduções de, no máximo, 3% para a altura das nervuras, e que a variação da largura das nervuras de 15 a 25 cm conduz a reduções de, no máximo, 12% para a altura das mesmas.

Em relação à influência da madeira do tabuleiro (conífera C 30 ou dicotiledônea C 30 ou C 40) na altura das nervuras, observa-se uma ligeira vantagem para as coníferas quando são comparadas espécies de madeira com a mesma resistência à compressão paralela às fibras e o mesmo módulo de elasticidade na direção longitudinal (Classe C 30). Isto ocorre porque a distribuição lateral das cargas é mais favorável (menor  $W_f$ ) devido ao efeito da protensão na rigidez à flexão transversal ser mais eficiente para madeiras de menor densidade. Deste modo, ocorre uma diminuição de, no máximo, 2% para a altura das nervuras. A utilização de espécies de madeira com maior módulo de elasticidade na direção longitudinal (Classe C 40) conduz a uma diminuição de, no máximo, 3% para a altura das nervuras.

Dentro das premissas estabelecidas neste trabalho, os gráficos apresentados na figura 51 possibilitam visualizar, com boa aproximação, as dimensões necessárias para as nervuras, variando-se a sua quantidade e o vão da ponte. Estes gráficos foram elaborados fixando-se a altura do tabuleiro ( $t = 20$  cm) e a classe de resistência da madeira (Classe C 30 - Conífera).

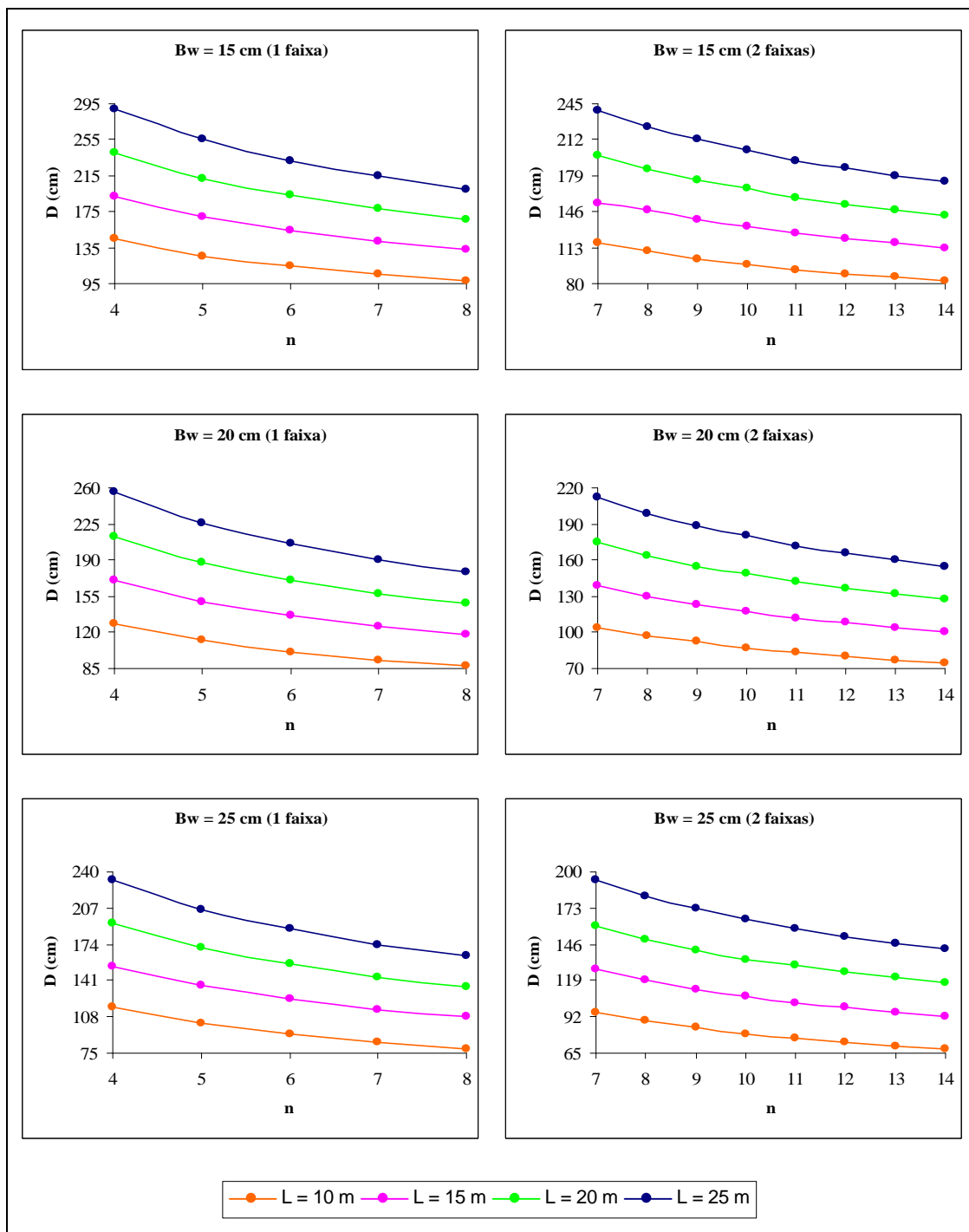


FIGURA 50 - Dimensões das nervuras para pontes com 1 e 2 faixas de tráfego

As alturas mínimas do tabuleiro, para espaçamento entre nervuras variando de 70 até 200 cm, podem ser visualizadas na figura 51 para as três classes de resistência das madeiras analisadas. Estas alturas foram determinadas em função do deslocamento vertical da porção do tabuleiro entre duas nervuras adjacentes, sob a ação da carga de uma roda na posição mais desfavorável (0,5 cm).

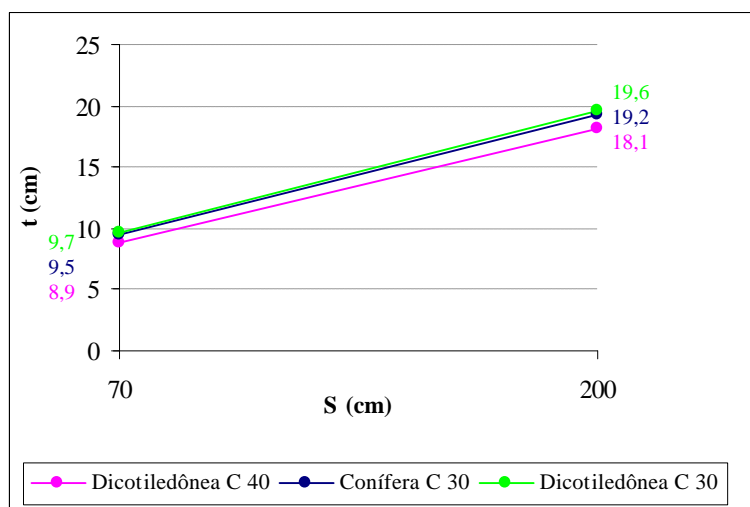


FIGURA 51 - Altura do tabuleiro em função do espaçamento entre nervuras

Finalizando, deve ser considerado que as estruturas mais eficientes, em termos de consumo de madeira, são aquelas que apresentam nervuras com maior altura. Entretanto, devido ao custo de fabricação da madeira laminada colada ser muito superior ao da madeira serrada utilizada no tabuleiro, a definição da geometria mais eficiente depende da análise de custos e da possível limitação na altura das vigas laminadas.

### 3.5- Exemplo do método de cálculo

No apêndice 1 está apresentado um exemplo do procedimento de cálculo, programado em MATHCAD®, para uma ponte com 2 m de vão e 1,1 m de largura (1 faixa de tráfego).

## 4- EXPERIMENTAÇÃO DO MODELO REDUZIDO

Neste capítulo está descrito o ensaio estático de um modelo reduzido de ponte formada por vigas-T. Estes ensaios foram realizados com o objetivo de se avaliar o modelo teórico utilizado no dimensionamento destas pontes, principalmente quanto à comparação entre as rigidezes à flexão longitudinal experimental e teórica da seção transversal e ao fator de distribuição da carga ( $W_f$ ).

### 4.1- Características do modelo reduzido

A estrutura avaliada é uma ponte classe 30 com comprimento  $L$  igual a 10 m, uma faixa de tráfego com largura  $b$  igual a 5,5 m e madeira classe C 30 (conífera) para as nervuras e o tabuleiro. O dimensionamento utilizando o procedimento de cálculo baseado no método WVU conduziu a uma ponte formada por 6 nervuras com largura  $B_w$  igual a 25 cm, altura  $D$  igual a 100 cm e espaçamento entre os eixos igual a 105 cm, e tabuleiro com 80 lâminas de espessura igual a 5 cm e altura  $t$  igual a 25 cm.

A análise experimental desta ponte foi efetuada por meio de um modelo reduzido na escala 1:5, cujas dimensões estão apresentadas na figura 52.

Este modelo foi construído utilizando a espécie *Pinus Hondurensis* (*Pinus caribaea var. hondurensis*) para as nervuras e a espécie *Pinus Taeda* (*Pinus taeda*) para as lâminas do tabuleiro.

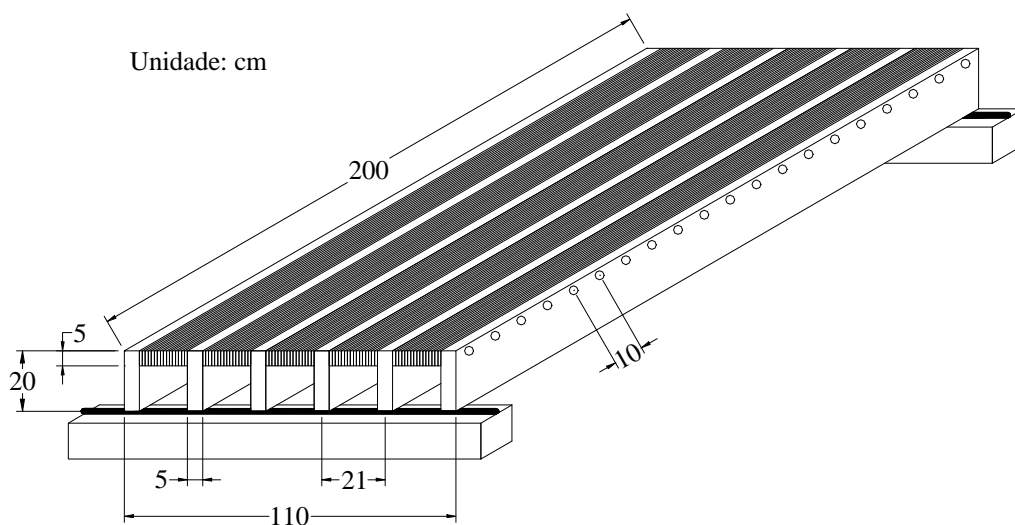


FIGURA 52 - Dimensões do modelo reduzido

#### 4.1.1- Caracterização das nervuras

O módulo de elasticidade de cada nervura, cujas dimensões nominais são 5x20x200 cm, foi determinado experimentalmente por meio de ensaio à flexão. Este ensaio foi realizado aplicando-se uma força concentrada no meio do vão, conforme mostrado na figura 53.

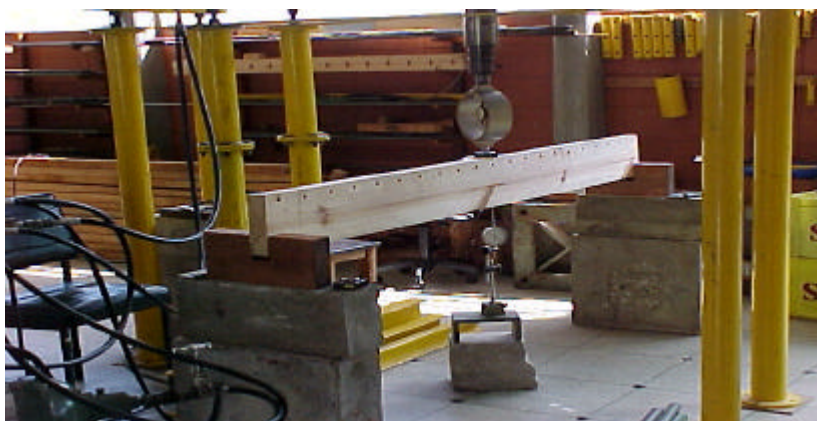


FIGURA 53 - Ensaio de caracterização das nervuras

O deslocamento vertical no meio do vão da peça  $\delta_{cN}$  foi medido a cada incremento de 0,916 kN na força aplicada  $P_{cN}$  (10 leituras de 0 até 8,244 kN), por meio de relógio comparador marca MITUTOYO (resolução de 0,01 mm e curso de

50 mm). Os ensaios foram realizados com uma repetição para cada nervura, e o módulo de elasticidade da mesma  $E_{L,n}$  foi calculado pela equação 66, substituindo-se o coeficiente angular  $k$  na equação 67:

$$E_{L,n} = \frac{k \cdot L^3}{48 \cdot I} \quad (66)$$

sendo:

$$E_{L,n} = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot \delta \cdot I} \quad (67)$$

$$k = \frac{P}{\delta} \quad (68)$$

O coeficiente  $k$  foi obtido a partir da regressão linear do conjunto de pontos  $(P_{cN}, \delta_{cN})$ .

onde:

$I$  = momento de inércia da nervura

$L$  = vão da nervura (200 cm)

$P$  = força concentrada aplicada no meio do vão da nervura

$\delta$  = deslocamento vertical no meio do vão da nervura

Os valores iniciais não foram considerados na regressão linear para evitar as interferências dos baixos valores de força.

Os valores de  $E_{L,n}$  estão apresentados na tabela 21.

TABELA 21 - Módulos de elasticidade na direção longitudinal  $E_{L,n}$  das nervuras

Nervura	$E_{L,n}$ (MPa)
A	6523
B	7744
C	5236
D	7216
E	6940
F	5172

#### 4.1.2- Caracterização das lâminas do tabuleiro

O módulo de elasticidade de cada lâmina, cujas dimensões nominais são 1x5x200 cm, foi determinado experimentalmente por meio de ensaio à flexão. Este ensaio foi realizado aplicando-se uma força concentrada no meio do vão, conforme mostrado na figura 54.

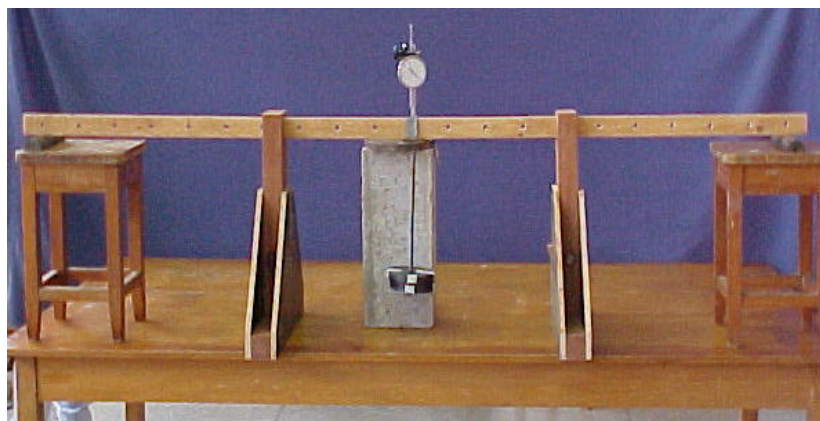


FIGURA 54 - Ensaio de caracterização das lâminas do tabuleiro

O deslocamento vertical no meio do vão da peça  $\delta_{cT}$  foi medido a cada incremento de 15 N na força aplicada  $P_{cT}$  (3 leituras de 5 até 35 N), por meio de relógio comparador marca MITUTOYO ( resolução de 0,01 mm e curso de 50 mm).

Os ensaios foram realizados com uma repetição para cada lâmina, e o módulo de elasticidade da mesma  $E_{L,t}$  foi calculado no intervalo 5 - 35 N, substituindo-se P por  $\Delta P$  e  $\delta$  por  $\Delta \delta$  na equação abaixo:

$$E_{L,t} = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot \delta \cdot I} \quad (69)$$

onde:

I = momento de inércia da lâmina

L = vão da lâmina

P = força concentrada aplicada no meio do vão da lâmina

$\delta$  = deslocamento vertical no meio do vão da lâmina



Os deslocamentos medidos para as forças iguais a 5 N, 20 N e 35 N permitiram verificar a linearidade entre a força aplicada e o deslocamento medido, no intervalo utilizado para o cálculo do módulo de elasticidade.

Os valores de  $E_{L,t}$  estão apresentados na tabela 22.

TABELA 22 - Módulos de elasticidade na direção longitudinal das lâminas do tabuleiro  $E_{L,t}$

N° da lâmina	$E_{L,t}$ (MPa)	N° da lâmina	$E_{L,t}$ (MPa)	N° da lâmina	$E_{L,t}$ (MPa)	N° da lâmina	$E_{L,t}$ (MPa)
1	10123	21	9418	41	7611	61	7768
2	7067	22	7370	42	9099	62	9746
3	7778	23	11606	43	10318	63	9282
4	5490	24	7656	44	8283	64	7048
5	7890	25	8781	45	9974	65	9480
6	8829	26	10154	46	8726	66	8238
7	9795	27	7363	47	7661	67	8702
8	7624	28	7506	48	9429	68	6424
9	6168	29	8379	49	11866	69	10254
10	9992	30	6797	50	10617	70	10690
11	6416	31	6986	51	8450	71	12242
12	7034	32	8848	52	10558	72	11315
13	7608	33	8328	53	9021	73	8080
14	7054	34	6661	54	12483	74	6400
15	8106	35	9373	55	9856	75	7326
16	9547	36	6946	56	11984	76	7571
17	7394	37	7557	57	12291	77	10514
18	7099	38	7523	58	8904	78	6507
19	6693	39	7842	59	6106	79	8938
20	8533	40	11510	60	7939	80	6374

#### 4.1.3- Classificação das nervuras e das lâminas do tabuleiro

As classes de resistência das nervuras e das lâminas foram determinadas experimentalmente por meio de ensaio de compressão paralela às fibras.

Os resultados indicaram que as nervuras e as lâminas do tabuleiro pertencem à classe C 30 (conífera).

#### 4.2- Montagem do modelo

A seguir são descritas as etapas realizadas na montagem do modelo. Estas etapas referem-se à distribuição das nervuras e das lâminas do tabuleiro, aos apoios do modelo, ao sistema de protensão, aos dispositivos utilizados na experimentação e às formas de aplicação das forças.

##### 4.2.1- Distribuição das nervuras e das lâminas do tabuleiro

A distribuição adequada das nervuras e das lâminas do tabuleiro tem como objetivo uniformizar a rigidez longitudinal do modelo.

As nervuras foram distribuídas o mais simetricamente possível em relação ao eixo longitudinal do modelo reduzido, posicionando-se externamente as nervuras com os módulos de elasticidade  $E_{L,n}$  maiores (Tabela 23 e Figura 55).

TABELA 23 - Distribuição final das nervuras

Nervura (numeração inicial)	Nervura (numeração definitiva)	Módulo de elasticidade $E_{L,n}$ (MPa)
B	1	7744
A	2	6523
C	3	5236
F	4	5172
E	5	6940
D	6	7216

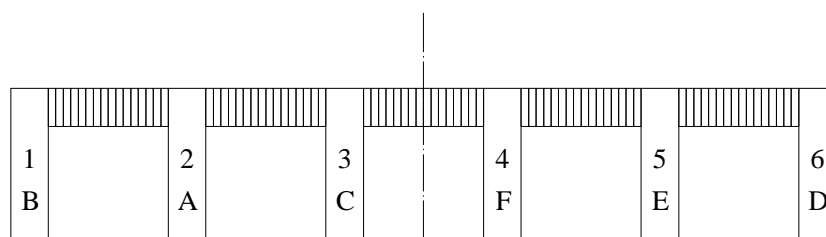


FIGURA 55 - Distribuição das nervuras no modelo reduzido

A distribuição das lâminas do tabuleiro se fez em conjuntos de 4 peças (Figura 56), de modo que as médias dos módulos de elasticidade na direção longitudinal de cada conjunto fossem próximas entre si e também próximas da média do módulo de elasticidade de todas as lâminas.

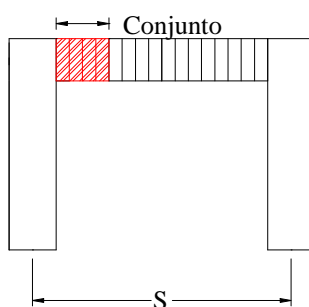


FIGURA 56 - Conjunto de lâminas formado por quatro peças

Neste contexto, define-se o procedimento para a distribuição das lâminas:

- Inicialmente, os módulos de elasticidade das lâminas do tabuleiro  $E_{L,t}$  foram colocados em ordem crescente e divididos em 4 grupos (1º grupo: 1ª à 20ª lâmina, 2º grupo: 21ª à 40ª lâmina, 3º grupo: 41ª à 60ª lâmina e 4º grupo: 61ª à 80ª lâmina).
- Posteriormente, foram formados conjuntos de 4 peças, sendo que a primeira peça pertencia ao 1º grupo, a segunda peça pertencia ao 3º grupo, a terceira peça pertencia ao 2º grupo e a quarta peça pertencia ao 4º grupo. Em resumo, cada conjunto foi formado seguindo a regra  $(i, 61 - i, 20 + i, 81 - i)$ , com  $i$  variando de 1 até 20 (Tabela 24 e Figura 57).

TABELA 24 - Distribuição final das lâminas do tabuleiro

Conj.	Nº da lâmina	E <sub>L,t</sub> (MPa)	E <sub>L,tmédio</sub> (MPa)	Conj.	Nº da lâmina	E <sub>L,t</sub> (MPa)	E <sub>L,tmédio</sub> (MPa)
1	4	5490	8771	11	30	6797	8480
	62	9746			58	8904	
	22	7370			47	7661	
	54	12483			52	10558	
2	59	6106	8834	12	36	6946	8517
	16	9547			32	8848	
	17	7394			61	7765	
	57	12291			77	10514	
3	9	6168	8848	13	31	6986	8478
	65	9480			6	8829	
	28	7506			3	7778	
	71	12242			43	10318	
4	80	6374	8827	14	12	7034	8477
	48	9429			25	8781	
	38	7523			39	7842	
	56	11984			69	10254	
5	74	6400	8811	15	64	7048	8454
	21	9418			46	8726	
	37	7557			5	7890	
	49	11866			26	10154	
6	11	6416	8743	16	14	7054	8454
	35	9373			67	8702	
	76	7571			60	7939	
	23	11606			1	10123	
7	68	6424	8706	17	2	7067	8418
	63	9282			20	8533	
	13	7608			73	8080	
	40	11510			10	9992	
8	78	6507	8634	18	18	7099	8407
	42	9099			51	8450	
	41	7611			15	8106	
	72	11315			45	9974	
9	34	6661	8499	19	75	7326	8450
	53	9021			29	8379	
	8	7624			66	8238	
	70	10690			55	9856	
10	19	6693	8477	20	27	7363	8442
	79	8938			33	8328	
	24	7656			44	8283	
	50	10618			7	9795	
						Média	8586
						Desvio Padrão	16,350

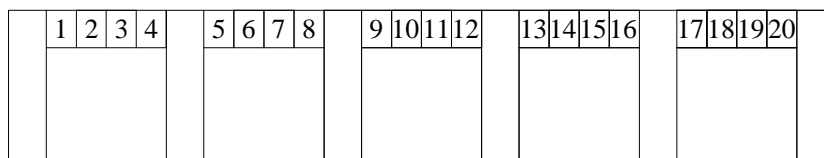


FIGURA 57 - Distribuição dos conjuntos de lâminas no modelo reduzido

- Por último, as médias dos módulos de elasticidade de cada conjunto foram calculadas e comparadas entre si e com a média do módulo de elasticidade de todas as lâminas. Com estes valores pôde-se verificar se o procedimento usado para distribuir as lâminas do tabuleiro é adequado.

As médias dos módulos de elasticidade na direção longitudinal de cada conjunto estão próximas entre si e também próximas da média do módulo de elasticidade de todas as lâminas (desvio/média = 0,2%). Deste modo, conclui-se que o procedimento usado para distribuir as lâminas do tabuleiro é adequado.

#### 4.2.2- Apoios do modelo

O modelo reduzido foi apoiado sobre um sistema composto de perfis metálicos e roletes de aço montados sobre a laje de reação. Estes roletes permitem a rotação no ponto de apoio e não impedem o deslocamento horizontal do modelo (Figura 58).



FIGURA 58 - Detalhe do apoio do modelo

#### 4.2.3- Sistema de protensão

O sistema de protensão foi constituído por 21 barras de aço espaçadas 10 cm entre si e com diâmetros nominais igual a 9,5 mm.

Para a aplicação da força de protensão no modelo, as barras de aço foram tensionadas pelo rosqueamento manual das porcas sextavadas e então ancoradas por um conjunto de placa de ancoragem de aço comum e bloco de distribuição de madeira. Para estabelecer a tensão de protensão no tabuleiro igual a 0,7 MPa, cada barra estava tensionada de modo a aplicar uma força de 3,5 kN em uma área de 50 cm<sup>2</sup> (distância entre as barras igual a 10 cm e altura do tabuleiro igual a 5 cm).

O controle da força de protensão foi feito por meio de 11 células de cargas dispostas em barras alternadas (Figura 59), utilizando-se um indicador de deformações do modelo KYOWA SM – 60B (precisão de  $5 \times 10^{-6}$ ) acoplado a uma caixa comutadora para 24 pontos modelo KYOWA SS24R. As células de carga foram previamente calibradas, ou seja, uma força igual a 3,5 kN foi aplicada para se conhecer a leitura da deformação correspondente.



FIGURA 59 - Disposição das células de carga

#### 4.2.4- Dispositivos utilizados na experimentação

##### 4.2.4.1- Dispositivos para aplicação das forças

A aplicação das forças no modelo foi feita com um cilindro hidráulico por intermédio de perfis “I” e chapas de aço.

As forças aplicadas foram medidas com um anel dinamométrico (capacidade nominal de 50 kN), fixado na extremidade do cilindro hidráulico (capacidade nominal de 100 kN), e distribuídas para duas chapas de aço através de um perfil “I” metálico. Cada chapa possui uma área de 32 cm<sup>2</sup> equivalente à área de contato de uma roda do veículo-tipo classe 30 e um espaçamento entre as mesmas de 40 cm equivalente à distância entre os centros destas rodas.

#### 4.2.4.2- Equipamentos utilizados para medir deslocamentos

Os deslocamentos verticais das nervuras foram medidos por intermédio de transdutores (LVDT) modelo HP DCDT 500 (precisão de 0,001 mm e amplitude igual a  $\pm 12,7$  mm), e registrados por uma unidade de aquisição de dados modelo HP 3497A acoplada ao micro computador modelo HP 9825T.

Os transdutores foram instalados em 6 pontos do modelo reduzido, possibilitando que os deslocamentos verticais fossem medidos no ponto médio do vão de cada nervura (Figura 60).

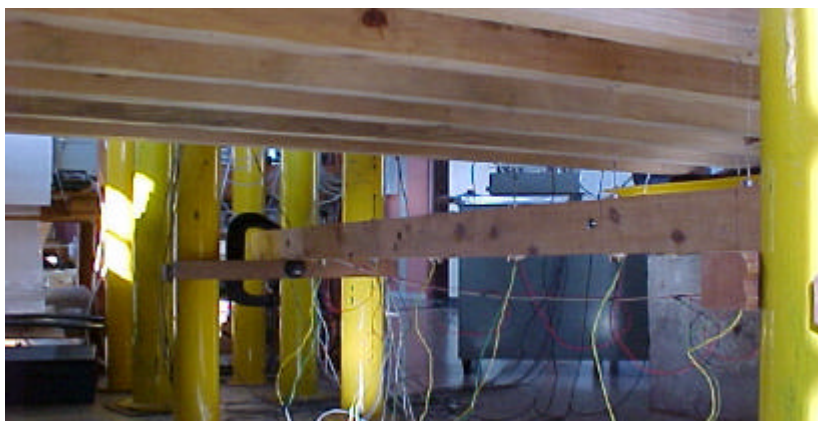


FIGURA 60 - Medida dos deslocamentos verticais no meio do vão das nervuras

#### 4.2.5- Formas de aplicação das forças

Com o objetivo de se obter a rigidez efetiva do modelo, foi realizado um ensaio preliminar aplicando-se uma força no meio do vão do modelo e distribuída ao longo da largura (Figura 61).

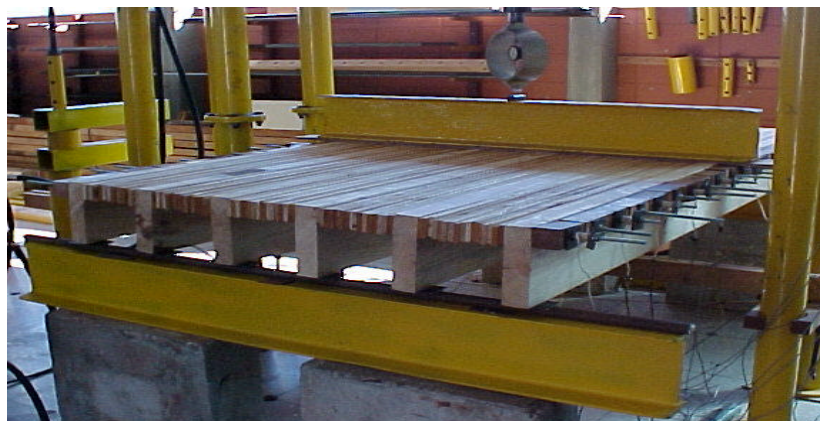


FIGURA 61 - Força uniformemente distribuída

Posteriormente, os ensaios foram realizados simulando a atuação de um eixo do veículo-tipo. Para isto, foram aplicadas duas forças concentradas no meio do vão do modelo e em várias posições ao longo de sua largura (Figura 62).

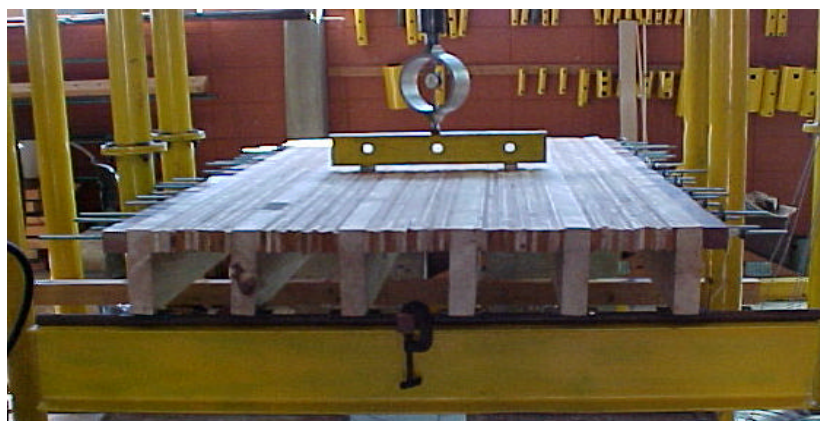


FIGURA 62 - Simulação de um eixo centrado

Para a aplicação das cargas não centradas, optou-se pela utilização de uma viga bi-apoiada devido à impossibilidade de se deslocar lateralmente o cilindro hidráulico (Figura 63).



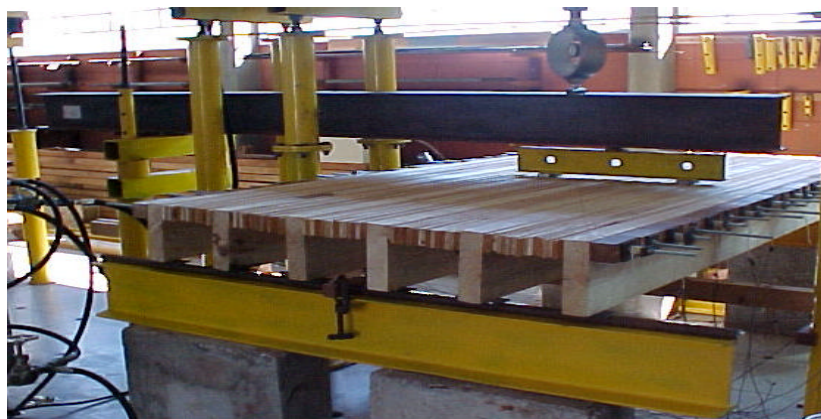


FIGURA 63 - Simulação de um eixo não centrado

Em cada ensaio, os deslocamentos verticais foram medidos a cada incremento de 4,58 kN na força aplicada, até o valor máximo de 45,8 kN para o carregamento distribuído; 4,25 na força aplicada, até o valor máximo de 34 kN para o carregamento de um eixo com a roda externa na nervura 2 ou 5; 3,84 na força aplicada, até o valor máximo de 23 kN para o carregamento centrado de um eixo e o carregamento de um eixo com a roda externa na nervura 1 ou 6. Todos os ensaios foram realizados com uma repetição para cada carregamento.

Para se ter noção da magnitude da força aplicada no modelo em relação à carga móvel, foram determinados os momentos fletores no meio do vão da estrutura real, acrescidos do efeito do impacto, devidos ao carregamento móvel na faixa ocupada pelo veículo-tipo  $M_{\text{real}} = 78120 \text{ kN.cm}$  e ao carregamento móvel em toda a largura da ponte  $M_{\text{real}} = 81995 \text{ kN.cm}$ .

Os momentos fletores equivalentes no modelo, em termos de se obter tensões normais da mesma magnitude, são determinados dividindo-se os momentos fletores na estrutura real pelo cubo do fator de redução de escala ( $M_{\text{modelo}} = M_{\text{real}}/5^3$ ), sendo  $M_{\text{modelo}} = 625 \text{ kN.cm}$  e  $M_{\text{modelo}} = 656 \text{ kN.cm}$ . Estes momentos são provocados por forças concentradas iguais a 12,5 kN e 13,12 kN, respectivamente.

### 4.3- Resultados obtidos e análises

A seguir são apresentados os resultados experimentais dos ensaios estáticos do modelo reduzido de ponte com seção-T e as análises numéricas correspondentes.

Estes resultados são a média dos valores observados no primeiro ciclo de leituras e na sua repetição. É importante salientar que não ocorreram diferenças significativas entre os valores do primeiro ciclo em relação aos da repetição.

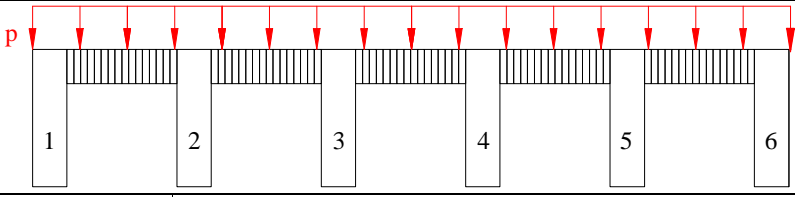
#### 4.3.1- Resultados

Para cada carregamento, foi efetuada a regressão linear entre as forças aplicadas e os deslocamentos correspondentes, obtendo-se a equação abaixo:

$$\delta(\text{mm}) = a + b \cdot P(\text{kN}) \quad (70)$$

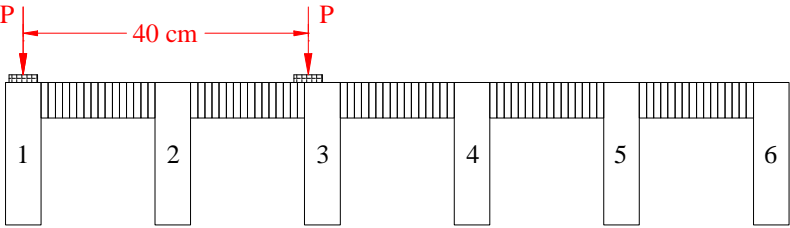
As tabelas 25 a 30 apresentam os resultados obtidos para todos os ensaios, os valores das constantes a e b e o coeficiente de correlação obtidos em cada regressão.

TABELA 25 - Força uniformemente distribuída – (I)



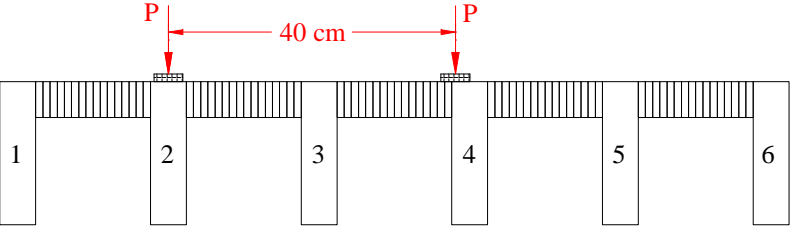
Força aplicada p.b (kN)	Deslocamentos no meio do modelo					
	$\delta_1$ (mm)	$\delta_2$ (mm)	$\delta_3$ (mm)	$\delta_4$ (mm)	$\delta_5$ (mm)	$\delta_6$ (mm)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4,58	0,79	0,54	0,38	0,64	0,61	0,35
9,16	1,17	0,92	0,73	1,01	0,96	0,66
13,74	1,55	1,30	1,07	1,38	1,30	0,98
18,32	1,93	1,68	1,42	1,76	1,65	1,29
22,90	2,31	2,06	1,77	2,13	2,00	1,60
27,48	2,68	2,44	2,11	2,50	2,34	1,92
32,03	3,06	2,82	2,46	2,87	2,69	2,23
36,64	3,44	3,20	2,80	3,24	3,04	2,55
41,22	3,82	3,58	3,15	3,62	3,38	2,86
45,80	4,20	3,96	3,49	3,99	3,73	3,18
Resultados obtidos nas regressões						
a (mm)	0,4133	0,1600	0,0367	0,2667	0,2640	0,0333
b (mm/kN)	0,0826	0,0830	0,0755	0,0813	0,0757	0,0686
$r^2$ (%)	99,99	100	99,99	99,99	99,99	99,99
Momento fletor máximo no meio do vão do modelo = 2290 kN.cm						

TABELA 26 - Carregamento de um eixo com a roda externa na nervura 1 – (II)



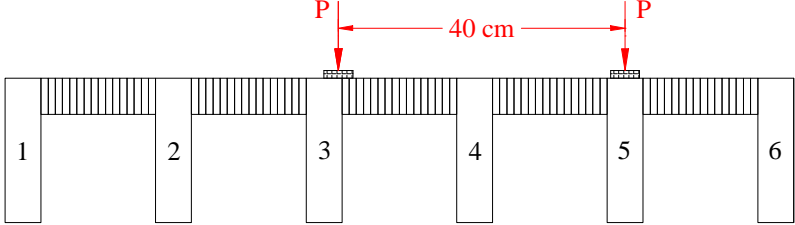
Força aplicada 2P (kN)	Deslocamento no meio do vão do modelo					
	$\delta_1$ (mm)	$\delta_2$ (mm)	$\delta_3$ (mm)	$\delta_4$ (mm)	$\delta_5$ (mm)	$\delta_6$ (mm)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3,84	1,10	0,65	0,59	0,34	0,12	0,05
7,68	1,83	1,13	1,08	0,55	0,13	-0,04
11,52	2,56	1,60	1,57	0,76	0,15	-0,12
15,36	3,29	2,08	2,07	0,97	0,17	-0,20
19,20	4,02	2,56	2,56	1,18	0,19	-0,29
23,00	4,75	3,04	3,05	1,39	0,20	-0,37
Resultados obtidos nas regressões						
a (mm)	0,3675	0,1697	0,0943	0,1293	0,0999	0,1316
b (mm/kN)	0,1904	0,1246	0,1285	0,0548	0,0045	-0,0218
$r^2$ (%)	100	100	100	100	98,92	99,97
Momento fletor máximo no meio do vão do modelo = 1150 kN.cm						

TABELA 27 - Carregamento de um eixo com a roda externa na nervura 2 – (III)



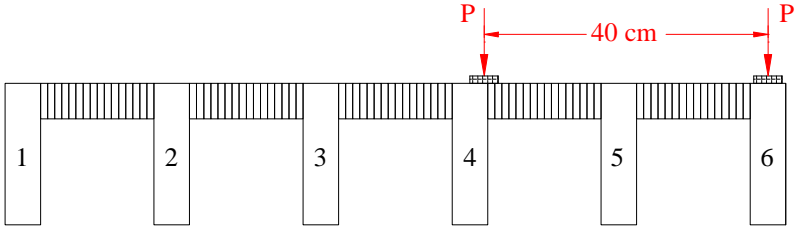
Força aplicada 2P (kN)	Deslocamento no meio do vão do modelo					
	$\delta_1$ (mm)	$\delta_2$ (mm)	$\delta_3$ (mm)	$\delta_4$ (mm)	$\delta_5$ (mm)	$\delta_6$ (mm)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4,25	0,54	0,79	0,59	0,71	0,35	0,11
8,50	0,77	1,42	1,05	1,22	0,55	0,05
12,75	1,01	2,06	1,51	1,74	0,75	-0,01
17,00	1,24	2,69	1,96	2,25	0,96	-0,07
21,25	1,48	3,32	2,42	2,77	1,16	-0,14
25,50	1,72	3,95	2,87	3,28	1,36	-0,20
29,75	1,95	4,58	3,33	3,80	1,56	-0,26
34,00	2,19	5,21	3,79	4,31	1,76	-0,32
Resultados obtidos nas regressões						
a (mm)	0,3007	0,1611	0,1361	0,1936	0,1482	0,1736
b (mm/kN)	0,0555	0,1486	0,1074	0,1211	0,0475	-0,0146
$r^2$ (%)	100	100	100	100	100	99,97
Momento fletor máximo no meio do vão do modelo = 1700 kN.cm						

TABELA 28 - Carregamento de um eixo com a roda externa na nervura 5 – (IV)



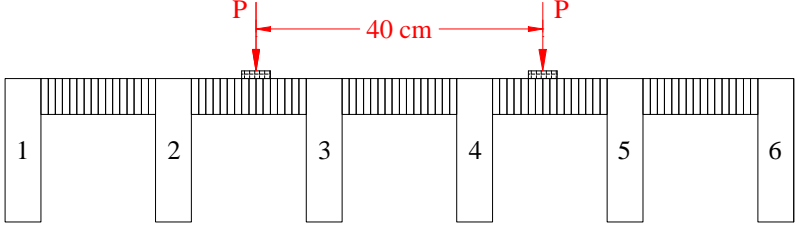
Força aplicada 2P (kN)	Deslocamento no meio do vão do modelo					
	$\delta_1$ (mm)	$\delta_2$ (mm)	$\delta_3$ (mm)	$\delta_4$ (mm)	$\delta_5$ (mm)	$\delta_6$ (mm)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4,25	-0,01	0,28	0,69	0,73	0,66	0,20
8,50	-0,14	0,46	1,21	1,21	1,21	0,40
12,75	-0,26	0,65	1,74	1,69	1,77	0,61
17,00	-0,39	0,84	2,27	2,17	2,33	0,81
21,25	-0,52	1,03	2,80	2,65	2,89	1,01
25,50	-0,64	1,22	3,32	3,12	3,44	1,21
29,75	-0,77	1,41	3,85	3,60	4,00	1,41
34,00	-0,90	1,60	4,38	4,08	4,56	1,61
Resultados obtidos nas regressões						
a (mm)	0,1168	0,085	0,1593	0,2543	0,0993	0,0011
b (mm/kN)	-0,0298	0,0445	0,1241	0,1125	0,1311	0,0474
$r^2$ (%)	100	100	100	100	100	100
Momento fletor máximo no meio do vão do modelo = 1700 kN.cm						

TABELA 29 - Carregamento de um eixo com a roda externa na nervura 6 – (V)



Força aplicada 2P (kN)	Deslocamento no meio do vão do modelo					
	$\delta_1$ (mm)	$\delta_2$ (mm)	$\delta_3$ (mm)	$\delta_4$ (mm)	$\delta_5$ (mm)	$\delta_6$ (mm)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3,84	-0,10	0,04	0,30	0,69	0,53	0,79
7,68	-0,36	0,07	0,50	1,19	0,90	1,42
11,52	-0,61	0,11	0,70	1,68	1,28	2,06
15,36	-0,87	0,13	0,90	2,18	1,66	2,69
19,20	-1,12	0,17	1,09	2,67	2,04	3,32
23,00	-1,37	0,19	1,29	3,16	2,42	3,95
Resultados obtidos nas regressões						
a (mm)	0,1516	0,0112	0,1040	0,1976	0,1454	0,1565
b (mm/kN)	-0,0662	0,0080	0,0516	0,1288	0,0987	0,1649
$r^2$ (%)	100	99,24	100	100	100	100
Momento fletor máximo no meio do vão do modelo = 1150 kN.cm						

TABELA 30 - Carregamento centrado de um eixo – (VI)



Força aplicada 2P (kN)	Deslocamento no meio do vão do modelo					
	$\delta_1$ (mm)	$\delta_2$ (mm)	$\delta_3$ (mm)	$\delta_4$ (mm)	$\delta_5$ (mm)	$\delta_6$ (mm)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3,84	0,25	0,67	0,71	0,73	0,60	0,17
7,68	0,30	1,15	1,30	1,29	1,03	0,23
11,52	0,36	1,62	1,89	1,86	1,46	0,29
15,36	0,41	2,10	2,48	2,42	1,89	0,35
19,20	0,46	2,58	3,07	2,98	2,33	0,41
23,00	0,52	3,05	3,66	3,55	2,76	0,47
Resultados obtidos nas regressões						
a (mm)	0,1952	0,1930	0,1180	0,1654	0,1638	0,1098
b (mm/kN)	0,0140	0,1242	0,1539	0,1470	0,1127	0,0156
$r^2$ (%)	99,91	100	100	100	100	100
Momento fletor máximo no meio do vão do modelo = 1150 kN.cm						

Para uma melhor visualização dos resultados experimentais obtidos, são apresentados para todas as situações de carregamento, os gráficos que relacionam deslocamentos das nervuras versus forças aplicadas (Figura 64) e as linhas elásticas transversais correspondentes às forças máximas aplicadas de cada carregamento (Figura 65).

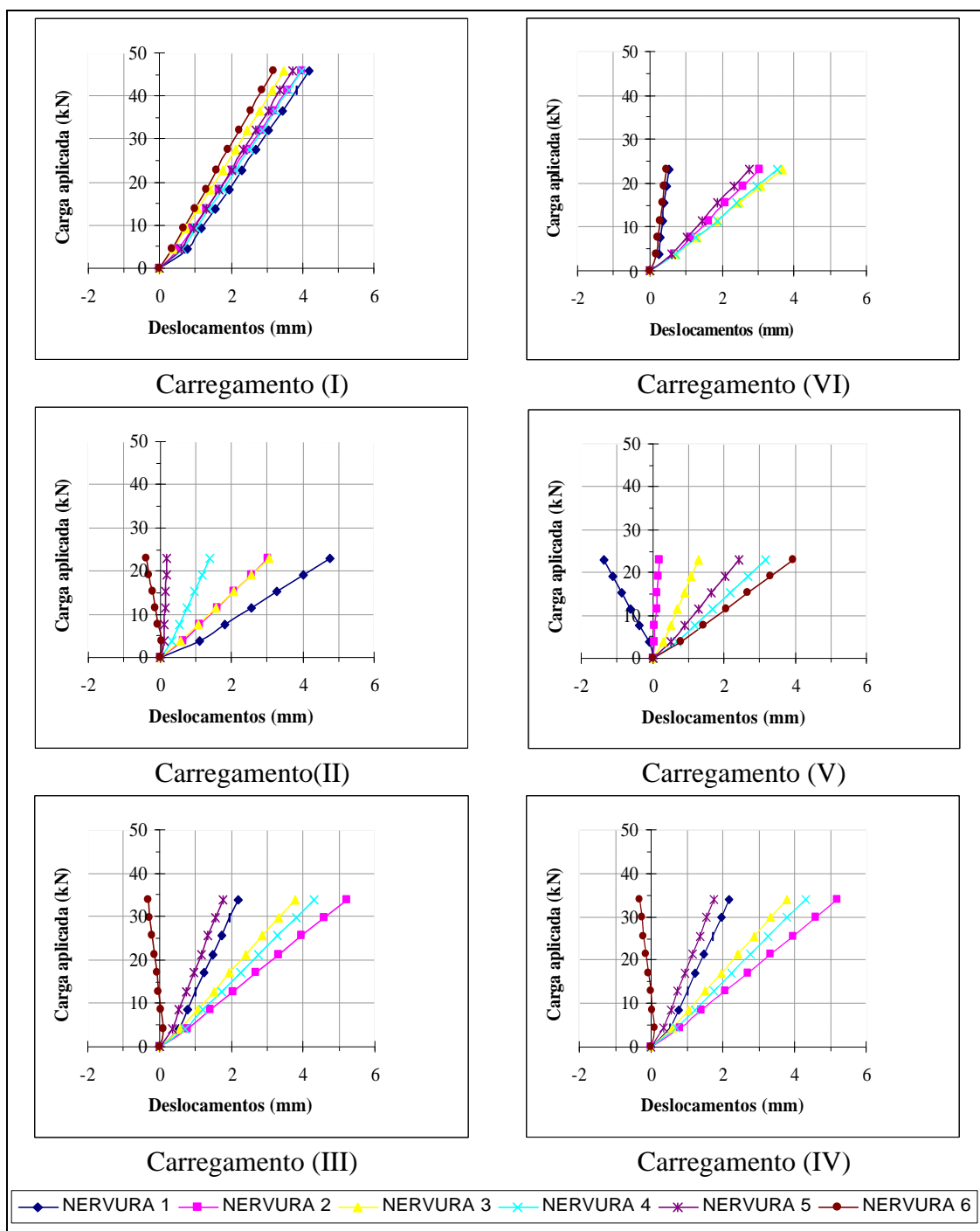


FIGURA 64 - Gráficos  $\delta \times P$  para os carregamentos correspondentes

Os gráficos apresentadas acima permitem observar que o modelo reduzido comportou-se de modo elástico-linear.

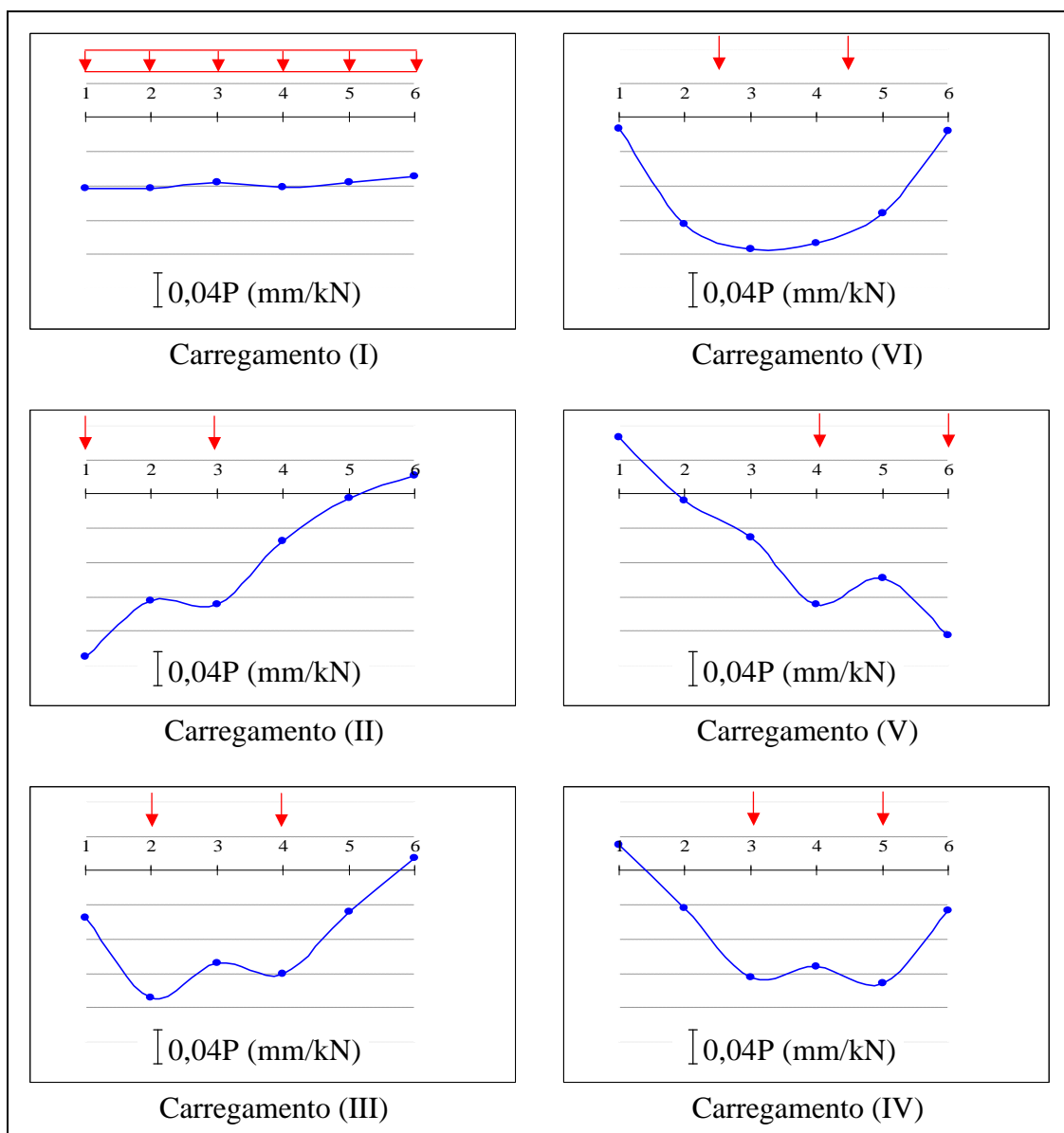


FIGURA 65 - Linhas elásticas transversais para os carregamentos correspondentes

#### 4.3.2- Análise da rigidez à flexão longitudinal do modelo

Este item apresenta a comparação entre as rigidezes à flexão longitudinal experimental e teórica (método WVU) do modelo.

A rigidez à flexão longitudinal experimental  $(E \cdot I)_{\text{experimental}}$  foi calculada com base nos resultados do carregamento em que a força é uniformemente distribuída no meio do vão e ao longo da largura do modelo. Para este carregamento,

não há influência da rigidez à flexão transversal e a ponte se comporta como um conjunto de vigas longitudinais. Então:

$$(E \cdot I)_{\text{experimental}} = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot \delta} \quad (71)$$

onde:

L = vão do modelo reduzido (200 cm)

P = força total aplicada no meio do vão do modelo reduzido

$\delta$  = deslocamento no meio do vão do modelo reduzido para a força uniformemente distribuída

A relação  $P/\delta$  foi tomada como o inverso da média dos valores “b” apresentados na tabela 25:

$$\frac{P}{\delta} = 128,56 \text{ kN/cm}$$

Substituindo este valor na equação 71 tem-se:

$$(E \cdot I)_{\text{experimental}} = \frac{128,56 \cdot 200^3}{48} = 21.426.667 \text{ kN.cm}^2$$

A rigidez à flexão longitudinal teórica  $(E \cdot I)_{\text{teórica}}$  foi calculada a partir da soma dos momentos de inércia transformados das vigas do modelo reduzido.

Inicialmente, as larguras efetivas das abas de cada viga-T do modelo foram determinadas de acordo com o método WVU, seguindo o procedimento de cálculo apresentado no item 3.2.4.

Posteriormente, a seção transversal do modelo foi uniformizada adotando-se um valor único para o módulo de elasticidade na direção longitudinal das nervuras e das lâminas do tabuleiro ( $E_{\text{adotado}} = 1000 \text{ kN/cm}^2$ ), e as larguras transformadas das nervuras e das abas foram determinadas seguindo o procedimento de cálculo apresentado no item 3.2.4.



Por último, foram determinados os momentos de inércia, para cada uma destas vigas, em relação ao eixo horizontal que passa pelo CG da seção transformada total do modelo.

A tabela 31 e a figura 66 apresentam as dimensões das vigas-T transformadas:

TABELA 31 - Valores geométricos, efetivos e transformados das nervuras e abas

Vigas Externas	Valores Geométricos		Valores Efetivos		Valores Transformados		
	B <sub>w</sub> (cm)	B (cm)	B <sub>w</sub> (cm)	B <sub>E</sub> (cm)	B <sub>w,transformado</sub> (cm)	b <sub>tex</sub> (cm)	I <sub>transformado</sub> (cm <sup>4</sup> )
1	5	8	5	6,34	3,87	5,58	3793
6	5	8	5	6,26	3,61	5,29	3548
Vigas Internas	B <sub>w</sub> (cm)	B (cm)	B <sub>w</sub> (cm)	B <sub>E</sub> (cm)	B <sub>w,transformado</sub> (cm)	b <sub>t/2</sub> (cm)	I <sub>transformado</sub> (cm <sup>4</sup> )
2	5	8	5	5,91	3,26	6,84	3912
3	5	8	5	5,52	2,62	6,05	3242
4	5	8	5	5,52	2,59	5,98	3204
5	5	8	5	6,16	3,47	6,93	4093

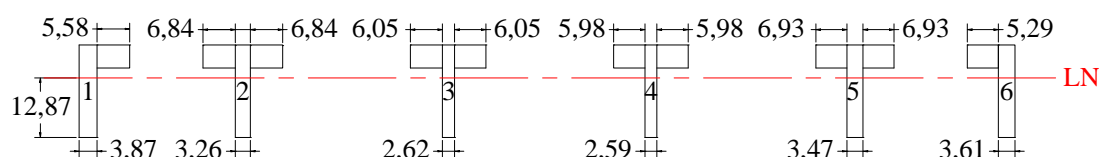


FIGURA 66 - Vigas-T transformadas

A rigidez à flexão longitudinal da seção transversal transformada é dada por:

$$I_{\text{transformada}} = \sum [I_i + A_i \cdot (y_{\text{CG}} - y_i)^2] = (21792 + 258) = 22050 \text{ cm}^4$$

$$(E \cdot I)_{\text{transformada}} = 1000 \cdot 22050 = 22.050.000 \text{ kN.cm}^2$$

Comparando o valor teórico com o experimental, observa-se que este é cerca de 97 % do valor do primeiro, indicando uma composição da seção transversal com uma eficiência praticamente equivalente à prevista pelo método WVU.

#### 4.3.3- Análise do fator de distribuição da carga ( $W_f$ )

Este item apresenta a comparação entre os fatores de distribuição da carga experimental e teórica (método WVU) do modelo.

Para o cálculo do fator  $W_f$  experimental do modelo, determinou-se a parcela de carga absorvida por cada nervura ( $P_i$ ) quando foram aplicados os carregamentos em que a roda do eixo ficou sobre uma das nervuras externas. Estes carregamentos são as situações mais desfavoráveis em termos de distribuição transversal das cargas.

No cálculo de  $P_i$  foi feita uma simplificação na qual admitiu-se que cada nervura absorveu uma parcela de carga proporcional ao produto do deslocamento desta nervura por sua rigidez à flexão.

Deste modo,  $W_f$  experimental foi determinado pela relação entre a parcela de carga máxima ( $P_{i,máx}$ ) e o somatório das parcelas de carga ( $\sum P_i$ ) de cada nervura:

$$W_f = \frac{P_{i,máx}}{\sum P_i} \quad (72)$$

sendo:

$$P_i = \frac{48 \cdot \delta_i \cdot E_{adotado} \cdot I_{i,transformada}}{L^3} \quad (73)$$

Substituindo  $P_i$  na equação 72 tem-se:

$$W_f = \frac{I_{i,transformada} \cdot \delta_i}{\sum (I_{i,transformada} \cdot \delta_i)} \quad (74)$$

onde:

$I_{i,transformada}$  = momento de inércia da viga-T  $i$  transformada, sendo  $i = 1, 2, \dots, 6$

$\delta_i$  = deslocamento no meio do vão da nervura  $i$ , sendo  $i = 1, 2, \dots, 6$

Inicialmente, calculou-se o fator ( $W_{f1}$ ) com os resultados apresentados na tabela 26, caso em que a roda ficou sobre a nervura externa 1:

$$W_{f1} = \frac{I_{1,transformada} \cdot \delta_1}{\sum (I_{i,transformada} \cdot \delta_i)} = \frac{3793 \cdot 0,475}{4376} \cdot 100 = 41 \%$$

Posteriormente, calculou-se o fator ( $W_{f6}$ ) com os resultados apresentados na tabela 29, caso em que a roda ficou sobre a nervura externa 6:

$$W_{f6} = \frac{I_{6,transformada} \cdot \delta_6}{\sum (I_{i,transformada} \cdot \delta_i)} = \frac{3548 \cdot 0,395}{3377} \cdot 100 = 41 \%$$

E, finalmente, calculou-se o fator de distribuição da carga ( $W_f$ ):

$$W_f = \frac{W_{f1} + W_{f6}}{2} \Rightarrow W_f = 41 \%$$

O fator  $W_f$  teórico do modelo foi determinado de acordo com o método WVU, seguindo o procedimento de cálculo apresentado no item 3.2.5, conforme descrito abaixo:

$$W_f = \frac{1 + C_0}{n \cdot C_0 + \frac{2}{\pi} \cdot (n - 1)} \quad (75)$$

sendo:

$$C_0 = \frac{(b - B_w)}{\pi} \cdot \frac{D_T}{B_e} \cdot \frac{[8 \cdot (\lambda)^2 + 1]}{(\lambda)^4} \quad (76)$$

$$D_T = E_T \cdot \frac{t^3}{12} \quad (77)$$

$$\lambda = \frac{(b - B_w)}{L} \quad (78)$$

$$B_e = E_{L,n} \cdot I_{ex} \quad (79)$$

Calculando, tem-se que:

$$D_T = 18,78 \cdot \frac{5^3}{12} = 196 \text{ kN.cm}$$

$$\lambda = \frac{(110 - 5)}{200} = 0,525$$

$$B_e = 647,2 \cdot 5814 = 3.762.821 \text{ kN.cm}^2$$

$$C_0 = \frac{(110-5)}{\pi} \cdot \frac{196}{3.762.821} \cdot \frac{[8 \cdot (0,525)^2 + 1]}{(0,525)^4} = 0,0734$$

$$W_f = \frac{1 + 0,0734}{6 \cdot 0,0734 + \frac{2}{\pi} \cdot (6-1)} \cdot 1,6 = 47 \%$$

Comparando o valor teórico com o experimental, observa-se que este ( $W_f = 41 \%$ ) é ligeiramente menor que o obtido pelo método WVU ( $W_f = 47 \%$ ), indicando que a parcela de carga absorvida pela nervura mais solicitada do modelo é menor que a parcela de carga determinada pelo método WVU.

## 4- CONCLUSÕES

O desenvolvimento do sistema T das pontes de madeira protendidas transversalmente surgiu devido à necessidade de se construir pontes que vencessem vãos maiores que os alcançados pelas pontes com tabuleiros protendidos de altura constante. O procedimento de cálculo, utilizado na determinação das dimensões efetivas das pontes formadas por vigas-T, possibilitou efetuar a análise numérica destas pontes para diversas situações de projeto.

Estas pontes classe 30 foram dimensionadas para vãos iguais a 10, 15, 20 e 25 m, larguras iguais a 5,5 (1 faixa de tráfego) e 10,0 m (2 faixas de tráfego), larguras das nervuras e alturas dos tabuleiros iguais a 15, 20 e 25 cm, número de nervuras variando de 4 até 8 (1 faixa de tráfego) e de 7 até 14 (2 faixas de tráfego), e espaçamento entre nervuras variando de 70 até 200 cm.

A partir das discussões desenvolvidas ao longo do trabalho, conclui-se que:

- No processo de dimensionamento das nervuras realizado na análise numérica, o fator limitante foi o estado limite último de tração nas fibras inferiores das nervuras, para todas as situações analisadas. Deste modo, podem-se esperar reduções significativas na altura das nervuras ao se utilizar resistências de cálculo à tração superiores às empregadas neste trabalho, por meio de critérios de dimensionamento que permitam considerar a maior resistência à tração da madeira.
  
- A altura do tabuleiro não influencia de maneira significativa na altura das nervuras, pois a variação da altura do tabuleiro de 15 a 25 cm conduz a reduções de, no máximo, 3% para a altura das nervuras.

- A largura das nervuras influencia de maneira significativa na altura das mesmas, pois a variação desta largura de 15 a 25 cm conduz a reduções de, no máximo, 12% para a sua altura.
  
- Em relação ao tabuleiro, observa-se que a utilização de madeira conífera C 30 ou dicotiledônea C 30 ou C 40 não influencia de maneira significativa na altura das nervuras. Para as madeiras classe C 30, que apresentam o mesmo módulo de elasticidade na direção longitudinal, observa-se uma melhor distribuição transversal das cargas para as coníferas devido à protensão transversal proporcionar um maior módulo de elasticidade na direção transversal para estas madeiras; para as madeiras classe C 40, que apresentam maior módulo de elasticidade na direção longitudinal, observa-se uma diminuição de, no máximo, 3% para a altura das nervuras.
  
- Na análise experimental do modelo foram obtidos valores para a rigidez à flexão longitudinal e para o fator de distribuição da carga muito próximos dos valores teóricos determinados pelo método WVU, indicando que o método possibilita um dimensionamento adequado para as pontes de madeira protendidas transversalmente formadas por vigas-T.

## 6- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). *NBR 7188 - Cargas Móveis em Pontes Rodoviárias e Passarelas de Pedestres*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1997). *NBR 7190 - Projeto de Estruturas em Madeira*. Rio de Janeiro.
- BARGER JR., L. S.; LOPEZ-ANIDO, R.; GANGARAO, H. V. S. (1993). *Experimental Evaluation of Stressed Timber Bridge Systems*. In: TRANSPORTATION RESEARCH RECORD, TRB, n.1426. Washington, D.C. National Research Council, p.57-61.
- CREWS, K. (1998). *International Guidelines for Design of Stress Laminated Timber Bridge Decks*. World Conference on Timber Engineering-WCTE, 5., artigo 4, v.1. Swiss Federal, editado por J. Natterer e J.-L. Sandoz. Lausanne-Suíça.
- DAVALOS, J. F; SALIM, H. A. (1992). *Design of Stress-Laminated T-System Timber Bridges*. National Hardwood Timber Bridge Conference 1992, Timber Bridge Information Resource Center–TBIRC, USDA-FS-Northeastern Area.
- DAVALOS, J. F; SALIM, H. A. (1993). Effective Flange Width for Stress-Laminated T-Systems Timber Bridges. *Journal of the Structural Engineering*, v.119, n.3, p.938-953.
- DAVALOS, J. F.; SALIM, H. A.; DICKSON, B. (1993). *Development and Field Testing of the Camp Arrowhead Modular Stress-Laminated T-System Timber Bridge*. Annual Meeting, TRB, 72., National Research Council, Washington, D.C., n.93-0663.
- DIAS, A. A. (1998). Tabuleiros de Pontes de Madeira Protendidos Transversalmente com Seção Transversal T. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E

- ESTRUTURAS DE MADEIRA, 4., São Carlos, 1998. *Anais*. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, 1998, v.2, p.325-334.
- DICKSON, B.; GANGARAO, H. V. S. (1990). *Development and Testing of an Experimental Stressed-Timber T-Beam Bridge*. In: TRANSPORTATION RESEARCH RECORD, TRB, National Research Council, Washington, D.C., v.2, n.1275, p.67-75.
- GANGARAO, H. V. S.; LATHEEF, I. (1991). *System Innovation and Experimental Evaluation of Stressed-Timber Bridges*. In: INTERNATIONAL TIMBER ENGINEERING CONFERENCE, Trada, London, U.K., 1991. *Proceedings*. v.3, p.3327-3334.
- GANGARAO, H. V. S.; RAJU, P. R. (1992). *Transverse Wheel Load Distribution for Deck-Stringer Bridges*. In: NSF WORKSHOP ON BRIDGE ENGINEERING RESEARCH IN PROGRESS, 3., La Jolla, CA, 1992. *Proceedings*. University of CA, p.109-112.
- OKIMOTO, F. S. (1997). *Pontes Protendidas de Madeira: parâmetros elásticos para o projeto*. São Carlos. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- PRATA, D. G. (1994). *Sistemas Estruturais para Pontes de Madeira*. São Carlos. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- RITTER, M. A. (1992). *Timber Bridges: Design, Construction, Inspection, and Maintenance*. U.S. Department of Agriculture Forest Service, Washington, D.C.
- RITTER, M.; LEE, P. H.; KAINZ, J.; MEYER, C. (1996). *An Evaluation of Stress-Laminated T-Beam Bridges Constructed of Laminated Veneer Lumber*. In: NATIONAL CONFERENCE ON WOOD TRANSPORTATION STRUCTURES. U.S. Department of Agriculture Forest Service, p.92-103.
- TAYLOR, R.; RITTER, M. (1990). *Development of Longer Span Wood Bridges*. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SHORT AND MEDIUM SPAN BRIDGES, Toronto, Canadá, 1990. *Proceedings*. v.2, p.391-492.
- USDA (1995), Forest Service, Modern Timber Bridges of West Virginia. Volume 1. Editor Barry Dickson, Constructed Facilities Center, West Virginia University, U.S.A.



**APÊNDICE 1 - PROGRAMA PARA O CÁLCULO E O  
DIMENSIONAMENTO DE PONTES DE MADEIRA  
PROTENDIDAS TRANSVERSALMENTE FORMADAS POR  
VIGAS-T**

## Projeto de Ponte Protendida de Madeira - Classe 30

1) Dados (Unidades: cm, kg, kN)

### 1.1 Do Projeto

\*Vão.....  $L_p := 200$  cm Estrutura bi-apoiada

\*Largura .....  $b := 110$  cm (Uma faixa de tráfego, dois passeios)

\*Altura do tabuleiro .....  $t := 5$  cm

Índice de variável .....  $k := 0, 1.. 2$

Largura da nervura, k .....  $B_w := \begin{pmatrix} 3 \\ 4 \\ 5 \end{pmatrix}$  cm

\*Número de faixas de tráfego.....  $N_L := 1$

\*Largura de contato do pneu.....  $a := 8$  cm

\* $C_{bj}$  .....  $C_{bj} := 1$

Comprimento efetivo do pneu.....  $b_l := 30$  cm

Carga de Roda do eixo traseiro.....  $P := 2$  kN

Carga uniformemente distribuída ao longo da faixa de tráfego.....  $p := 5 \cdot 10^{-4}$  kN/cm<sup>2</sup>

Nível de protensão no tabuleiro.....  $\sigma_N := 700 \cdot 10^{-4}$  kN/cm<sup>2</sup>

Coefficiente de atrito estático.....  $\mu_S := 0.35$

Proteção: Madeira tratada com creosoto

Capa asfáltica.....  $c_{asf} := 1$  cm       $\gamma_{asf} := 24 \cdot 10^{-6}$  kN/cm<sup>3</sup>

Coefficiente  
para pontes rodoviárias  
com revestimento de  
concreto asfáltico .....  $\alpha := 12$

Fator de combinação e de  
utilização para cargas móveis  
em pontes rodoviárias.....  $\psi_2 := 0.2$

## 1.2 Da Madeira

Classe: C20, C25, C30 (Coníferas)

Classe: C20, C30, C40, C60 (Dicotiledôneas)

Umidade: estável em 12% (Padrão NBR 7190/86).

Caso<sub>1</sub> := "Tabuleiro de coníferas e nervuras de dicotiledoneas"

Caso<sub>2</sub> := "Tabuleiro e nervuras de dicotiledoneas"

Caso<sub>3</sub> := "Tabuleiro e nervuras de coníferas"

Caso<sub>4</sub> := "Tabuleiro de dicotiledoneas e nervuras de coníferas"

\* Caso := Caso<sub>3</sub>

\* C<sub>tabuleiro</sub> := "C30"

\* C<sub>nervura</sub> := "C30"

### 1.3 Do Sistema de Protensão

#### 1.3.1 Barras

Sistema comercial Dywidag

Aço ST 85/105:  $f_{yST} := 85 \text{ kN/cm}^2$

Diâmetro .....  $\phi_b := 0.9525 \text{ cm}$  (duplofiletado)

Comprimento.....  $l_b := b + 6$        $l_b = 116 \text{ cm}$

Peso de 1 barra.....  $P_b := 77 \cdot 10^{-6} \cdot \left[ \pi \cdot \left( \frac{\phi_b}{2} \right)^2 \cdot l_b \right]$        $P_b = 0.0064 \text{ kN}$

Espaçamento  
entre as barras.....  $s := \frac{f_{yST}}{1.1 \cdot 2.5 \cdot \sigma_{N \cdot t}} \cdot \left[ \pi \cdot \left( \frac{\phi_b}{2} \right)^2 \right]$        $s = 62.9271 \text{ cm}$

### 2) Especificação dos dados da madeira para as classes utilizadas

Obs:  $f_{c0.k}$ ,  $f_{v0.k}$  e  $E_{c0.m}$  ( $\text{kN/cm}^2$ )  
 $\rho$  ( $\text{kg/cm}^3$ )

#### DADOS CONÍFERAS

	$f_{c0.k}$	$f_{v0.k}$	$\rho_1$	$E_{c0.m}$	
$D_{con} :=$	2	0.4	$500 \cdot 10^{-6}$	350	Classe C 20
	2.5	0.5	$550 \cdot 10^{-6}$	850	Classe C 25
	3	0.6	$600 \cdot 10^{-6}$	1450	Classe C 30

#### DADOS DICOTILEDÔNEAS

	$f_{c0.k}$	$f_{v0.k}$	$\rho_2$	$E_{c0.m}$	
$D_{dic} :=$	2	0.4	$650 \cdot 10^{-6}$	950	Classe C 20
	3	0.5	$800 \cdot 10^{-6}$	1450	Classe C 30
	4	0.6	$950 \cdot 10^{-6}$	1950	Classe C 40
	6	0.8	$1000 \cdot 10^{-6}$	2450	Classe C 60

$$i := 0..2 \quad f_{c0.k1_i} := D_{con_{i,0}}$$

$$f_{v0.k1_i} := D_{con_{i,1}}$$

$$f_{c90.k1_i} := 0.25 \cdot D_{con_{i,0}}$$

$$f_{t0.k1_i} := \frac{D_{con_{i,0}}}{0.77}$$

$$\rho_{1_i} := D_{con_{i,2}}$$

$$E_{c0.m1_i} := D_{con_{i,3}}$$

$$j := 0..3 \quad f_{c0.k2_j} := D_{dic_{j,0}}$$

$$f_{v0.k2_j} := D_{dic_{j,1}}$$

$$f_{c90.k2_j} := 0.25 \cdot D_{dic_{j,0}}$$

$$f_{t0.k2_j} := \frac{D_{dic_{j,0}}}{0.77}$$

$$\rho_{2_j} := D_{dic_{j,2}}$$

$$E_{c0.m2_j} := D_{dic_{j,3}}$$

	Nervura	Tabuleiro	
$f_k :=$	$\left( \begin{array}{cc} f_{c90.k2} & f_{c90.k1} \\ f_{c0.k2} & f_{c0.k1} \\ f_{v0.k2} & f_{v0.k1} \\ f_{t0.k2} & f_{t0.k1} \end{array} \right)$	if Caso = Caso1	
	$\left( \begin{array}{cc} f_{c90.k2} & f_{c90.k2} \\ f_{c0.k2} & f_{c0.k2} \\ f_{v0.k2} & f_{v0.k2} \\ f_{t0.k2} & f_{t0.k2} \end{array} \right)$	if Caso = Caso2	
	$\left( \begin{array}{cc} f_{c90.k1} & f_{c90.k1} \\ f_{c0.k1} & f_{c0.k1} \\ f_{v0.k1} & f_{v0.k1} \\ f_{t0.k1} & f_{t0.k1} \end{array} \right)$	if Caso = Caso3	
	$\left( \begin{array}{cc} f_{c90.k1} & f_{c90.k2} \\ f_{c0.k1} & f_{c0.k2} \\ f_{v0.k1} & f_{v0.k2} \\ f_{t0.k1} & f_{t0.k2} \end{array} \right)$	if Caso = Caso4	
$f_k =$			$\left[ \begin{array}{cc} \left( \begin{array}{c} 0.5 \\ 0.625 \\ 0.75 \\ 2 \\ 2.5 \\ 3 \end{array} \right) & \left( \begin{array}{c} 0.5 \\ 0.625 \\ 0.75 \\ 2 \\ 2.5 \\ 3 \end{array} \right) \\ \left( \begin{array}{c} 0.4 \\ 0.5 \\ 0.6 \end{array} \right) & \left( \begin{array}{c} 0.4 \\ 0.5 \\ 0.6 \end{array} \right) \\ \left( \begin{array}{c} 2.5974 \\ 3.2468 \\ 3.8961 \end{array} \right) & \left( \begin{array}{c} 2.5974 \\ 3.2468 \\ 3.8961 \end{array} \right) \end{array} \right]$
			$f_{c90.k}$  $f_{c0.k}$  $f_{v0.k}$  $f_{t0.k}$

- Valores de Cálculo

$$k_{\text{mod}.1} := 0.7 \qquad k_{\text{mod}.2} := 1.0 \qquad k_{\text{mod}.3} := 0.8$$

$$k_{\text{mod}} := k_{\text{mod}.1} \cdot k_{\text{mod}.2} \cdot k_{\text{mod}.3} \qquad k_{\text{mod}} = 0.56$$

$$E_{c0.efN} := \begin{cases} k_{\text{mod}} \cdot E_{c0.m1} & \text{if Caso} = \text{Caso3} \\ k_{\text{mod}} \cdot E_{c0.m1} & \text{if Caso} = \text{Caso4} \\ k_{\text{mod}} \cdot E_{c0.m2} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$E_{c0.efT} := \begin{cases} k_{\text{mod}} \cdot E_{c0.m2} & \text{if Caso} = \text{Caso2} \\ k_{\text{mod}} \cdot E_{c0.m2} & \text{if Caso} = \text{Caso4} \\ k_{\text{mod}} \cdot E_{c0.m1} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Ner Tab

$$\gamma_w := \begin{pmatrix} 1.4 & 1.4 \\ 1.4 & 1.4 \\ 1.8 & 1.8 \\ 1.8 & 1.8 \end{pmatrix} \begin{array}{l} \text{para } f_{c90.k} - \text{Estado Limite Último} \\ \text{para } f_{c0.k} - \text{Estado Limite Último} \\ \text{para } f_{v0.k} - \text{Estado Limite Último} \\ \text{para } f_{t0.k} - \text{Estado Limite Último} \end{array} \quad \begin{array}{l} i := 0..3 \\ j := 0..1 \end{array}$$

$$f_{d_{i,j}} := k_{\text{mod}} \cdot \frac{f_{k_{i,j}}}{\gamma_{w_{i,j}}}$$

Portanto:

$$E_{c0.efN} = \begin{pmatrix} 196 \\ 476 \\ 812 \end{pmatrix} \text{ kN/cm}^2$$

$$E_{c0.efT} = \begin{pmatrix} 196 \\ 476 \\ 812 \end{pmatrix} \text{ kN/cm}^2$$

$$E_{L.n} := E_{c0.efN}$$

$$E_{L.t} := C_{bj} \cdot E_{c0.efT}$$

3) Cálculo do módulo de elasticidade do tabuleiro na direção transversal  $E_T$

$$r := \begin{cases} 3 & \text{if Caso} = \text{Caso2} \\ 3 & \text{if Caso} = \text{Caso4} \\ 2 & \text{otherwise} \end{cases} \quad i := 0..r$$

a -

$$\text{aux}_i := \begin{cases} \sigma_N \cdot 10^4 \cdot \left( 1.17275 \cdot 10^{-5} + 1.795 \cdot 10^{-8} \cdot \rho_{2_i} \cdot 10^6 \right) & \text{if Caso} = \text{Caso2} \\ \sigma_N \cdot 10^4 \cdot \left( 1.17275 \cdot 10^{-5} + 1.795 \cdot 10^{-8} \cdot \rho_{2_i} \cdot 10^6 \right) & \text{if Caso} = \text{Caso4} \\ \sigma_N \cdot 10^4 \cdot \left( 1.17275 \cdot 10^{-5} + 1.795 \cdot 10^{-8} \cdot \rho_{1_i} \cdot 10^6 \right) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$E_{T_i} := \begin{cases} \left( 0.0183673 - 2.0395 \cdot 10^{-5} \cdot \rho_{2_i} \cdot 10^6 + \text{aux}_i \right) \cdot E_{L,t_i} \cdot 10^4 & \text{if Caso} = \text{Caso2} \\ \left( 0.0183673 - 2.0395 \cdot 10^{-5} \cdot \rho_{2_i} \cdot 10^6 + \text{aux}_i \right) \cdot E_{L,t_i} \cdot 10^4 & \text{if Caso} = \text{Caso4} \\ \left( 0.0183673 - 2.0395 \cdot 10^{-5} \cdot \rho_{1_i} \cdot 10^6 + \text{aux}_i \right) \cdot E_{L,t_i} \cdot 10^4 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$E_T := E_{T_i} \cdot 10^{-4}$$

4) Cálculo do número de nervuras

Cálculo de S a partir da verificação do deslocamento local máximo da porção do tabuleiro entre duas nervuras adjacentes.

$$\delta = \frac{P \cdot (S)^3}{4 \cdot K_\delta \cdot E_T \cdot t^4}$$

$$\text{com } K_\delta = -10.9 + 7.8 \cdot \left( \frac{S}{t} \right) + 0.27 \cdot \left( \frac{E_{L,t}}{E_T} \right)$$

Pelo arranjo da equação de deslocamento  $\delta$  na forma polinomial  $p(S)$ , e admitindo-se o limite superior para o  $\delta$ :

$$\delta_{\text{sup}} := 0.5 \quad \text{cm}$$

É calculado os espaçamentos máximos S entre nervuras, a partir das raízes  $r_0, r_1, r_2$  do polinômio  $p(S)$ .

$$r := \begin{cases} 3 & \text{if Caso} = \text{Caso2} \\ 3 & \text{if Caso} = \text{Caso4} \\ 2 & \text{otherwise} \end{cases} \quad i := 0..r$$

Cálculos para o  $\delta_{\text{sup}}$

$$\Psi := 4 \cdot \delta_{\text{sup}} \cdot E_T \cdot t^4 \quad a_1 := P \quad a_2 := 0 \quad a_3 := -7.8 \cdot \frac{\Psi}{t} \quad a_{4_i} := \left( -0.27 \cdot \Psi_i \cdot \frac{E_{L,t_i}}{E_{T_i}} \right) + 10.9 \cdot \Psi_i$$

$j := 0..2$  .....índice do vetor raiz do polinômio

$$\text{pol}(S) := (a_1 \cdot S^3 + a_3 \cdot S + a_4) \quad \text{resw}_i := \text{for } z \in 0..i$$

$$\left. \begin{array}{l} a_4 \leftarrow a_{4_z} \\ a_3 \leftarrow a_{3_z} \\ v \leftarrow \begin{pmatrix} a_4 \\ a_3 \\ a_2 \\ a_1 \end{pmatrix} \\ r \leftarrow \text{polyroots}(v) \end{array} \right\}$$

$$\text{resw}^T = \left[ \begin{pmatrix} -65.48 \\ -0.65 \\ 66.13 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -101.27 \\ -0.78 \\ 102.05 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -131.15 \\ -0.92 \\ 132.07 \end{pmatrix} \right]$$

$$r_0 := \text{resw}_0 \quad r_1 := \text{resw}_1 \quad r_2 := \text{resw}_2 \quad r_3 := \begin{cases} \text{resw}_3 & \text{if Caso} = \text{Caso2} \\ \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$r_{0_j} := \begin{cases} 0 & \text{if Im}(r_{0_j}) \\ r_{0_j} & \text{otherwise} \end{cases} \quad r_{1_j} := \begin{cases} 0 & \text{if Im}(r_{1_j}) \\ r_{1_j} & \text{otherwise} \end{cases} \quad r_{2_j} := \begin{cases} 0 & \text{if Im}(r_{2_j}) \\ r_{2_j} & \text{otherwise} \end{cases} \quad r_{3_j} := \begin{cases} 0 & \text{if Im}(r_{3_j}) \\ r_{3_j} & \text{otherwise} \end{cases}$$



Seleção da maior raiz positiva do vetor resw, para  $\delta_{sup}$

$$S_{m\acute{a}x0} := \begin{cases} r_{0_0} & \text{if } (r_{0_0} \geq r_{0_1}) \cdot (r_{0_0} \geq r_{0_2}) \\ r_{0_1} & \text{if } (r_{0_1} \geq r_{0_0}) \cdot (r_{0_1} \geq r_{0_2}) \\ r_{0_2} & \text{if } (r_{0_2} \geq r_{0_0}) \cdot (r_{0_2} \geq r_{0_1}) \end{cases}$$

$$S_{m\acute{a}x0} = 66.1302 \quad \text{cm}$$

$$S_{m\acute{a}x1} := \begin{cases} r_{1_0} & \text{if } (r_{1_0} \geq r_{1_1}) \cdot (r_{1_0} \geq r_{1_2}) \\ r_{1_1} & \text{if } (r_{1_1} \geq r_{1_0}) \cdot (r_{1_1} \geq r_{1_2}) \\ r_{1_2} & \text{if } (r_{1_2} \geq r_{1_0}) \cdot (r_{1_2} \geq r_{1_1}) \end{cases}$$

$$S_{m\acute{a}x1} = 102.0538 \quad \text{cm}$$

$$S_{m\acute{a}x2} := \begin{cases} r_{2_0} & \text{if } (r_{2_0} \geq r_{2_1}) \cdot (r_{2_0} \geq r_{2_2}) \\ r_{2_1} & \text{if } (r_{2_1} \geq r_{2_0}) \cdot (r_{2_1} \geq r_{2_2}) \\ r_{2_2} & \text{if } (r_{2_2} \geq r_{2_0}) \cdot (r_{2_2} \geq r_{2_1}) \end{cases}$$

$$S_{m\acute{a}x2} = 132.0696 \quad \text{cm}$$

$$S_{m\acute{a}x3} := \begin{cases} r_{3_0} & \text{if } (r_{3_0} \geq r_{3_1}) \cdot (r_{3_0} \geq r_{3_2}) \\ r_{3_1} & \text{if } (r_{3_1} \geq r_{3_0}) \cdot (r_{3_1} \geq r_{3_2}) \\ r_{3_2} & \text{if } (r_{3_2} \geq r_{3_0}) \cdot (r_{3_2} \geq r_{3_1}) \end{cases}$$

$$S_{m\acute{a}x3} = 0 \quad \text{cm}$$

$$S_{m\acute{a}x} := \begin{cases} \text{if Caso} = \text{Caso2} \\ \quad \begin{cases} S_{m\acute{a}x0} & \text{if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C20"} \\ S_{m\acute{a}x1} & \text{if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C30"} \\ S_{m\acute{a}x2} & \text{if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C40"} \\ S_{m\acute{a}x3} & \text{if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C60"} \end{cases} \\ \text{if Caso} = \text{Caso4} \\ \quad \begin{cases} S_{m\acute{a}x0} & \text{if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C20"} \\ S_{m\acute{a}x1} & \text{if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C30"} \\ S_{m\acute{a}x2} & \text{if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C40"} \\ S_{m\acute{a}x3} & \text{if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C60"} \end{cases} \\ \text{otherwise} \\ \quad \begin{cases} S_{m\acute{a}x0} & \text{if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C20"} \\ S_{m\acute{a}x1} & \text{if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C25"} \\ S_{m\acute{a}x2} & \text{if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C30"} \end{cases} \end{cases}$$

Portanto, o espaçamento máximo entre nervuras, para a  $C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C30"}$  é:  $S_{m\acute{a}x} = 132.0696 \quad \text{cm}$

A partir do valor  $S_{\text{máx}}$  é calculado o número mínimo de nervuras.

$$n_{\text{min}_k} := 1 + \frac{b - B_{w_k}}{S_{\text{máx}}}$$

$$n_{\text{min}} = \begin{pmatrix} 1.8102 \\ 1.8026 \\ 1.795 \end{pmatrix}$$

$$n := \max(n_{\text{min}})$$

$$n := \text{ceil}(n)$$

Portanto, o número de nervuras é  $n := 6$

Em função do  $n$  serão calculados os espaçamentos  $S$  correspondentes aos valores de  $B_w$

$$S_k := \frac{b - B_{w_k}}{n - 1}$$

$$S = \begin{pmatrix} 21.4 \\ 21.2 \\ 21 \end{pmatrix} \text{ cm}$$

$$\text{Verificação}S_k := \begin{cases} \text{"O.K"} & \text{if } 14 < S_k < 40 \\ \text{"Não"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Verificação}S = \begin{pmatrix} \text{"O.K"} \\ \text{"O.K"} \\ \text{"O.K"} \end{pmatrix}$$

5) Verificação dos efeitos localizados no tabuleiro

$$E_{L.t} := \begin{cases} \text{if Caso} = \text{Caso2} \\ \quad \begin{cases} E_{L.t_0} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C20"} \\ E_{L.t_1} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C30"} \\ E_{L.t_2} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C40"} \\ E_{L.t_3} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C60"} \end{cases} \\ \text{if Caso} = \text{Caso4} \\ \quad \begin{cases} E_{L.t_0} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C20"} \\ E_{L.t_1} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C30"} \\ E_{L.t_2} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C40"} \\ E_{L.t_3} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C60"} \end{cases} \\ \text{otherwise} \\ \quad \begin{cases} E_{L.t_0} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C20"} \\ E_{L.t_1} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C25"} \\ E_{L.t_2} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C30"} \end{cases} \end{cases}$$

$$E_{L.t} = 812 \quad \text{kN/cm}^2$$

$$E_T := \begin{cases} \text{if Caso} = \text{Caso2} \\ \quad \begin{cases} E_{T_0} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C20"} \\ E_{T_1} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C30"} \\ E_{T_2} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C40"} \\ E_{T_3} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C60"} \end{cases} \\ \text{if Caso} = \text{Caso4} \\ \quad \begin{cases} E_{T_0} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C20"} \\ E_{T_1} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C30"} \\ E_{T_2} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C40"} \\ E_{T_3} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C60"} \end{cases} \\ \text{otherwise} \\ \quad \begin{cases} E_{T_0} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C20"} \\ E_{T_1} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C25"} \\ E_{T_2} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C30"} \end{cases} \end{cases}$$

$$E_T = 17.7654 \quad \text{kN/cm}^2$$

$$E_{L.n} := \left| \begin{array}{l} \text{if Caso = Caso3} \\ \left| \begin{array}{l} E_{L.n_0} \text{ if } C_{nervura} = \text{"C20"} \\ E_{L.n_1} \text{ if } C_{nervura} = \text{"C25"} \\ E_{L.n_2} \text{ if } C_{nervura} = \text{"C30"} \end{array} \right. \\ \text{if Caso = Caso4} \\ \left| \begin{array}{l} E_{L.n_0} \text{ if } C_{nervura} = \text{"C20"} \\ E_{L.n_1} \text{ if } C_{nervura} = \text{"C25"} \\ E_{L.n_2} \text{ if } C_{nervura} = \text{"C30"} \end{array} \right. \\ \text{otherwise} \\ \left| \begin{array}{l} E_{L.n_0} \text{ if } C_{nervura} = \text{"C20"} \\ E_{L.n_1} \text{ if } C_{nervura} = \text{"C30"} \\ E_{L.n_2} \text{ if } C_{nervura} = \text{"C40"} \\ E_{L.n_3} \text{ if } C_{nervura} = \text{"C60"} \end{array} \right. \end{array} \right.$$

$$E_{L.n} = 812 \quad \text{kN/cm}^2$$

a-Cálculo do deslocamento local máximo,  $\delta_{\text{máx}}$

$$K_{\delta_k} := -10.9 + 7.8 \cdot \left( \frac{S_k}{t} \right) + 0.27 \cdot \left( \frac{E_{L.t}}{E_T} \right)$$

$$\delta_{\text{máx}_k} := \frac{P \cdot (S_k)^3}{4 \cdot K_{\delta_k} \cdot E_T \cdot t^4}$$

$$\delta_{\text{localmáx}_k} := \left| \begin{array}{l} \text{"O.K"} \text{ if } \delta_{\text{máx}_k} \leq 0.5 \\ \text{"Não"} \text{ otherwise} \end{array} \right.$$

b-Cálculo da tensão transversal local máxima,  $\sigma_{\text{máx}}$

$$K_{\sigma_k} := 3 + 3.1 \cdot \left( \frac{S_k}{t} \right) + 0.15 \cdot \left( \frac{E_{L,t}}{E_T} \right) \qquad \sigma_{\text{máx}_k} := 1.4 \cdot \left( \frac{3 \cdot P \cdot S_k}{2 \cdot K_{\sigma_k} \cdot t^3} + \sigma_N \right)$$

Resistência à compressão perpendicular às fibras ( $f_{c90,k}$ ),  $R_{\text{cperpendicular}}$

$$f_c := f_{d_{0,1}}$$

$$f_{c90,d} := \begin{cases} \text{if Caso} = \text{Caso2} \\ \left| \begin{array}{l} f_{c_0} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C20"} \\ f_{c_1} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C30"} \\ f_{c_2} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C40"} \\ f_{c_3} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C60"} \end{array} \right. \\ \text{if Caso} = \text{Caso4} \\ \left| \begin{array}{l} f_{c_0} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C20"} \\ f_{c_1} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C30"} \\ f_{c_2} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C40"} \\ f_{c_3} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C60"} \end{array} \right. \\ \text{otherwise} \\ \left| \begin{array}{l} f_{c_0} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C20"} \\ f_{c_1} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C25"} \\ f_{c_2} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C30"} \end{array} \right. \end{cases}$$

$$f_{c90,d} = 0.3 \quad \text{kN/cm}^2$$

$$R_{\text{cperpendicular}_k} := \begin{cases} \text{"O.K"} & \text{if } \sigma_{\text{máx}_k} \leq f_{c90,d} \\ \text{"Não"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

6) - Cálculo da largura efetiva da mesa de uma viga T ( $b_e$ )

- Largura efetiva da aba ( $B_E$ )

$$B_k := \frac{1}{2} \cdot (S_k - B_{w_k}) \quad D := \begin{pmatrix} 22 \\ 20 \\ 18 \end{pmatrix} \text{ cm}$$

$$B_{E_k} := B_k \cdot \left[ 0.4586 + \frac{1}{198} \cdot \left( \frac{L_p}{B_k} \right) \cdot \left( \frac{D_k - t}{t} \right) \cdot \frac{E_{L.n}}{E_{L.t}} \right]$$

Verificação da condição  $\frac{B_E}{B} \leq 1$        $rel_k := \frac{B_{E_k}}{B_k}$        $rel = \begin{pmatrix} 0.8319 \\ 0.811 \\ 0.7869 \end{pmatrix}$

A largura efetiva da mesa é tomada como o menor entre os valores dos casos a, b, c:

a -  $b_{e_k} \leq 2.0 \cdot B_{E_k} + B_{w_k}$        $b_{ea_k} := 2 \cdot B_{E_k} + B_{w_k}$

$b_{ea0} := b_{ea_0}$        $b_{ea1} := b_{ea_1}$        $b_{ea2} := b_{ea_2}$

b -  $b_{e_k} \leq S_k$        $b_{eb_k} := S_k$

$b_{eb0} := b_{eb_0}$        $b_{eb1} := b_{eb_1}$        $b_{eb2} := b_{eb_2}$

c -  $b_{ec_k} \leq \frac{L_p}{8}$        $b_{ec_k} := \frac{L_p}{8}$

$b_{ec0} := b_{ec_0}$        $b_{ec1} := b_{ec_1}$        $b_{ec2} := b_{ec_2}$

$$b_{e0} := \begin{cases} b_{ea0} & \text{if } (b_{ea0} \leq b_{eb0}) \cdot (b_{ea0} \leq b_{ec0}) \\ b_{eb0} & \text{if } (b_{eb0} \leq b_{ea0}) \cdot (b_{eb0} \leq b_{ec0}) \\ b_{ec0} & \text{if } (b_{ec0} \leq b_{ea0}) \cdot (b_{ec0} \leq b_{eb0}) \end{cases} \quad b_{e1} := \begin{cases} b_{ea1} & \text{if } (b_{ea1} \leq b_{eb1}) \cdot (b_{ea1} \leq b_{ec1}) \\ b_{eb1} & \text{if } (b_{eb1} \leq b_{ea1}) \cdot (b_{eb1} \leq b_{ec1}) \\ b_{ec1} & \text{if } (b_{ec1} \leq b_{ea1}) \cdot (b_{ec1} \leq b_{eb1}) \end{cases}$$

$$b_{e2} := \begin{cases} b_{ea2} & \text{if } (b_{ea2} \leq b_{eb2}) \cdot (b_{ea2} \leq b_{ec2}) \\ b_{eb2} & \text{if } (b_{eb2} \leq b_{ea2}) \cdot (b_{eb2} \leq b_{ec2}) \\ b_{ec2} & \text{if } (b_{ec2} \leq b_{ea2}) \cdot (b_{ec2} \leq b_{eb2}) \end{cases} \quad b_e := \begin{pmatrix} b_{e0} \\ b_{e1} \\ b_{e2} \end{pmatrix}$$

- Momento de Inércia Transformado

Viga T interna

$$\text{Razão modular} \quad M_R := \frac{E_{L,t}}{E_{L,n}} \quad M_R = 1$$

$$\text{Largura efetiva transformada da aba} \quad b_{t_k} := M_R \cdot (b_{e_k} - B_{w_k})$$

$$\text{Largura efetiva transformada da mesa} \quad b_{eti_k} := b_{t_k} + B_{w_k}$$

Localização da linha neutra

$$y_n := \frac{D}{2} \quad A_{n_k} := D_k \cdot B_{w_k}$$

$$y_{bal} := \frac{t}{2} + (D - t) \quad A_{bal_k} := \frac{b_{t_k}}{2} \cdot t$$

$$y_{i_k} := \frac{A_{n_k} \cdot y_{n_k} + 2 \cdot A_{bal_k} \cdot y_{bal_k}}{A_{n_k} + 2 \cdot A_{bal_k}}$$

Momento de inércia da viga T interna

$$I_{i_k} := \left[ \frac{B_{w_k} \cdot (D_k)^3}{12} + A_{n_k} \cdot (y_{i_k} - y_{n_k})^2 \right] + 2 \cdot \left[ \left( \frac{b_{t_k}}{2} \cdot t^3 \right) \frac{1}{12} + A_{bal_k} \cdot (y_{i_k} - y_{bal_k})^2 \right]$$

- Momento de Inércia Transformado

Viga T Externa

$$\text{Largura efetiva transformada da aba } b_{\text{tex}} := \left( \frac{b_t}{2} \right)$$

Localização da linha neutra

$$y_{\text{balx}_k} := \frac{t}{2} + D_k - t \qquad A_{\text{balx}_k} := t \cdot b_{\text{tex}_k}$$

$$y_{\text{ex}_k} := \frac{A_{n_k} \cdot y_{n_k} + A_{\text{balx}_k} \cdot y_{\text{balx}_k}}{A_{n_k} + A_{\text{balx}_k}}$$

Momento de Inércia da viga T externa

$$I_{\text{ex}_k} := \left[ \frac{B_{w_k} \cdot (D_k)^3}{12} + A_{n_k} \cdot (y_{\text{ex}_k} - y_{n_k})^2 \right] + \left[ \left( \frac{b_{\text{tex}_k} \cdot t^3}{12} \right) + A_{\text{balx}_k} \cdot (y_{\text{ex}_k} - y_{\text{balx}_k})^2 \right]$$

7) Cálculo do fator de distribuição da carga de roda ( $W_f$ )

$$D_T := E_T \cdot \frac{t^3}{12} \qquad D_T = 185.0561 \text{ kN.cm} \qquad E_{L.n_k} := E_{L.n} \qquad B_{e_k} := E_{L.n_k} \cdot I_{\text{ex}_k}$$

$$\lambda_k := \frac{(b - B_{w_k})}{L_p} \qquad C_k := \frac{(b - B_{w_k})}{\pi} \cdot \frac{D_T}{B_{e_k}} \cdot \frac{[8 \cdot (\lambda_k)^2 + 1]}{(\lambda_k)^4}$$

$$W_{f_k} := \frac{1 + C_k}{n \cdot C_k + \frac{2}{\pi} \cdot (n - 1)} \qquad W_{f_k} := \begin{cases} (W_{f_k} \cdot 1.6) & \text{if } N_L = 1 \\ W_{f_k} & \text{if } N_L = 2 \end{cases}$$



8) Determinação do momento fletor de cálculo total ( $M_{dT}$ )

a- Cálculo do momento fletor máximo devido à carga móvel

$$R := \frac{3 \cdot (2 \cdot P)}{2} + p \cdot 60 \cdot \left( \frac{L_p - 120}{2} \right) \quad R = 7.2 \quad \text{kN}$$

$$\phi := 1 + \left( \frac{\alpha}{40 + \frac{L_p}{100}} \right) \quad \phi = 1.2857$$

$$M_{\text{máx.v}} := \begin{cases} \left[ R \cdot \left( \frac{L_p}{2} \right) - \left[ \left( p \cdot 60 \cdot \frac{L_p - 120}{2} \right) \cdot \left( \frac{L_p - 120}{4} + 60 \right) + 2 \cdot P \cdot 30 \right] \right] & \text{if } N_L = 1 \\ \left[ R \cdot \left( \frac{L_p}{2} \right) - \left[ \left( p \cdot 60 \cdot \frac{L_p - 120}{2} \right) \cdot \left( \frac{L_p - 120}{4} + 60 \right) + 2 \cdot P \cdot 30 \right] \right] & \text{if } N_L = 2 \end{cases}$$

$$M_{\text{máx.v}} = 504 \quad \text{kN.cm}$$

$$P_e := \frac{4 \cdot M_{\text{máx.v}}}{L_p} \quad P_e = 10.08 \quad \text{kN}$$

$$P_{d_k} := N_L \cdot W_{f_k} \cdot P_e$$

$$M_{\text{máx.cm}_k} := \frac{P_{d_k} \cdot L_p}{4}$$

b- Cálculo do momento fletor máximo devido à carga permanente

- Cálculo da carga permanente total suportada por uma nervura interna

$$\rho N := \begin{cases} \text{if Caso} = \text{Caso3} \\ \left| \begin{array}{l} \rho_{1_0} \text{ if } C_{\text{nervura}} = \text{"C20"} \\ \rho_{1_1} \text{ if } C_{\text{nervura}} = \text{"C25"} \\ \rho_{1_2} \text{ if } C_{\text{nervura}} = \text{"C30"} \end{array} \right. \\ \text{if Caso} = \text{Caso4} \\ \left| \begin{array}{l} \rho_{1_0} \text{ if } C_{\text{nervura}} = \text{"C20"} \\ \rho_{1_1} \text{ if } C_{\text{nervura}} = \text{"C25"} \\ \rho_{1_2} \text{ if } C_{\text{nervura}} = \text{"C30"} \end{array} \right. \\ \text{otherwise} \\ \left| \begin{array}{l} \rho_{2_0} \text{ if } C_{\text{nervura}} = \text{"C20"} \\ \rho_{2_1} \text{ if } C_{\text{nervura}} = \text{"C30"} \\ \rho_{2_2} \text{ if } C_{\text{nervura}} = \text{"C40"} \\ \rho_{2_3} \text{ if } C_{\text{nervura}} = \text{"C60"} \end{array} \right. \end{cases}$$

$$\rho N = 6 \times 10^{-4} \text{ kg/cm}^3$$

b.1-Peso-próprio das barras de protensão, linearmente distribuído ao longo do vão

$$P_{bp_k} := \frac{P_b}{s \cdot n}$$

b.2-Peso-próprio da nervura, linearmente distribuído ao longo do vão

$$P_{n_k} := (9.81 \cdot \rho N \cdot A_{n_k}) \cdot 10^{-3}$$

b.3- Peso-próprio do tabuleiro entre duas nervuras, linearmente distribuído ao longo do vão

$$\rho T := \begin{cases} \text{if Caso} = \text{Caso2} \\ \left| \begin{array}{l} \rho_{2_0} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C20"} \\ \rho_{2_1} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C30"} \\ \rho_{2_2} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C40"} \\ \rho_{2_3} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C60"} \end{array} \right. \\ \text{if Caso} = \text{Caso4} \\ \left| \begin{array}{l} \rho_{2_0} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C20"} \\ \rho_{2_1} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C30"} \\ \rho_{2_2} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C40"} \\ \rho_{2_3} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C60"} \end{array} \right. \\ \text{otherwise} \\ \left| \begin{array}{l} \rho_{1_0} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C20"} \\ \rho_{1_1} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C25"} \\ \rho_{1_2} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C30"} \end{array} \right. \end{cases}$$

$$\rho T = 6 \times 10^{-4} \text{ kg/cm}^3$$

$$A_{t_k} := (S_k - B_{w_k}) \cdot t \quad P_{t_k} := (9.81 \cdot \rho T \cdot A_{t_k}) \cdot 10^{-3}$$

b.4- Peso-próprio do revestimento asfáltico sobre uma seção do tabuleiro, linearmente distribuído ao longo do vão

$$A_{\text{asf}_k} := S_k \cdot C_{\text{asf}} \quad P_{\text{asf}_k} := \gamma_{\text{asf}} \cdot A_{\text{asf}_k}$$

Portanto, a carga permanente total suportada por uma nervura interna é:  $P_{nt_k} := P_{bp_k} + P_{n_k} + P_{t_k} + P_{\text{asf}_k}$

$$\text{Portanto: } M_{\text{máx.cp}_k} := \frac{P_{nt_k} \cdot L_p^2}{8}$$

c- Cálculo do momento fletor de cálculo total

$\gamma_{g_k} := 1.4$  coeficiente de ponderação para estados limites últimos (ações permanentes de grande variabilidade)

$\gamma_q := 1.4$  coeficiente de ponderação para estados limites últimos (ações variáveis)

Combinações em estados limites últimos

\* Combinações últimas normais

$$Md_{T_k} := \gamma_{g_k} \cdot M_{\text{máx.cp}_k} + \gamma_q \cdot M_{\text{máx.cm}_k} + 0.75 \cdot \gamma_q \cdot [(\phi - 1) \cdot M_{\text{máx.cm}_k}]$$

9) Cálculo do cortante de cálculo total ( $V_{dT}$ )

a- Esforço cortante devido à carga permanente,  $V_{cp}$ , no ponto x

$$x_{cp_k} := 2 \cdot D_k \quad \text{cm}$$

$$V_{cp_k} := P_{nt_k} \cdot \left( \frac{L_p}{2} - x_{cp_k} \right)$$

b- Esforço cortante devido à carga móvel,  $V_{cm}$

Esforço cortante na distância x devido às cargas de rodas concentradas, sem distribuição de carga,  $V_{crc}$

$$V_{crc1} := \frac{P \cdot [(L_p - x_{cp}) + [L_p - (30 + x_{cp})] + [L_p - (60 + x_{cp})]]}{L_p}$$

$$V_{crc2_k} := \frac{p \cdot 60 \cdot [L_p - (x_{cp_k} + 90)] \cdot \left[ \frac{L_p - (x_{cp_k} + 90)}{2} \right]}{L_p}$$

$$V_{crc} := V_{crc1} + V_{crc2}$$

Esforço cortante na distância x devido às cargas de rodas distribuídas,  $V_{\text{crd}}$

$$V_{\text{crd}_k} := N_L \cdot W_{f_k} \cdot V_{\text{crc}_k}$$

Portanto:

$$V_{\text{cm}_k} := \frac{1}{2} \cdot (0.6 \cdot V_{\text{crc}_k} + V_{\text{crd}_k})$$

c- Cálculo do cortante de cálculo total

Combinações em estados limites últimos

\* Combinações últimas normais

$$V_{d_{T_k}} := \gamma_{g_k} \cdot V_{cp_k} + \gamma_q \cdot V_{cm_k} + 0.75 \cdot \gamma_q \cdot [(\phi - 1) \cdot V_{cm_k}]$$

## 10) Verificações

a- Verificação da seção transversal T

a.1- Verificação das tensões normais

a.1.1- Tensão de tração máxima na nervura

$$c_k := y_{i_k}$$

$$\sigma_{t_k} := \frac{M_{d_{T_k}} \cdot c_k}{I_{i_k}}$$

Resistência à tração paralela às fibras ( $f_{t0,k}$ ),  $R_{tf}$

$$f_c := f_{d_{3,0}}$$

$$f_{t0,d} := \begin{cases} \text{if Caso} = \text{Caso3} \\ \left| \begin{array}{l} f_{c_0} \text{ if } C_{nervura} = \text{"C20"} \\ f_{c_1} \text{ if } C_{nervura} = \text{"C25"} \\ f_{c_2} \text{ if } C_{nervura} = \text{"C30"} \end{array} \right. \\ \text{if Caso} = \text{Caso4} \\ \left| \begin{array}{l} f_{c_0} \text{ if } C_{nervura} = \text{"C20"} \\ f_{c_1} \text{ if } C_{nervura} = \text{"C25"} \\ f_{c_2} \text{ if } C_{nervura} = \text{"C30"} \end{array} \right. \\ \text{otherwise} \\ \left| \begin{array}{l} f_{c_0} \text{ if } C_{nervura} = \text{"C20"} \\ f_{c_1} \text{ if } C_{nervura} = \text{"C30"} \\ f_{c_2} \text{ if } C_{nervura} = \text{"C40"} \\ f_{c_3} \text{ if } C_{nervura} = \text{"C60"} \end{array} \right. \end{cases}$$

$$f_{t0,d} := \text{round}(f_{t0,d}, 2) \quad f_{t0,d} = 1.21 \quad \text{kN/cm}^2$$

$$\sigma_{t_k} := \text{round}(\sigma_{t_k}, 2)$$

$$R_{tf_k} := \begin{cases} \text{"O.K."} & \text{if } \sigma_{t_k} \leq f_{t0,d} \\ \text{"N\~{a}o"} & \text{if } \sigma_{t_k} > f_{t0,d} \end{cases} \quad R_{tf\%_k} := \frac{\sigma_{t_k}}{f_{t0,d}}$$

$$D0_k := \sqrt{(D^2)_k \cdot R_{tf\%_k}}$$

a.1.2 - Tensão de compressão máxima no tabuleiro

$$c_k := D_k - y_{i_k} \quad \sigma_{c_k} := M_R \cdot \frac{Md_{T_k} \cdot c_k}{I_{i_k}}$$

Resistência à compressão paralela às fibras ( $f_{c0.k}$ ),  $R_{cparalela}$

$$f_c := f_{d_{1,1}}$$

$$f_{c0.d} := \begin{cases} \text{if Caso} = \text{Caso2} \\ \left| \begin{array}{l} f_{c_0} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C20"} \\ f_{c_1} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C30"} \\ f_{c_2} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C40"} \\ f_{c_3} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C60"} \end{array} \right. \\ \text{if Caso} = \text{Caso4} \\ \left| \begin{array}{l} f_{c_0} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C20"} \\ f_{c_1} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C30"} \\ f_{c_2} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C40"} \\ f_{c_3} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C60"} \end{array} \right. \\ \text{otherwise} \\ \left| \begin{array}{l} f_{c_0} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C20"} \\ f_{c_1} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C25"} \\ f_{c_2} \text{ if } C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C30"} \end{array} \right. \end{cases}$$

$$f_{c0.d} = 1.2 \quad \text{kN/cm}^2$$

$$R_{cparalela_k} := \begin{cases} \text{"O.K."} & \text{if } \sigma_{c_k} \leq f_{c0.d} \\ \text{"Não"} & \text{if } \sigma_{c_k} > f_{c0.d} \end{cases}$$

$$R_{cparalela\%_k} := \frac{\sigma_{c_k}}{f_{c0.d}}$$

a.2- Verificação das tensões de cisalhamento

$$y_{i_k} := \begin{cases} y_{i_k} & \text{if } y_{i_k} \leq (D_k - t) \\ (D_k - t) & \text{if } y_{i_k} > (D_k - t) \end{cases} \quad M_{S_k} := y_{i_k} \cdot B_{w_k} \cdot \left( y_{i_k} - \frac{y_{i_k}}{2} \right)$$

$$\tau_k := \frac{Vd_T \cdot M_{S_k}}{B_{w_k} \cdot I_{i_k}}$$

Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras ( $f_{v0,k}$ ),  $R_{\text{cisparalelo}}$

$$f_c := f_{d_{2,0}}$$

$$f_{v0,d} := \begin{cases} \text{if Caso} = \text{Caso3} \\ \left| \begin{array}{l} f_{c_0} \text{ if } C_{\text{nervura}} = \text{"C20"} \\ f_{c_1} \text{ if } C_{\text{nervura}} = \text{"C25"} \\ f_{c_2} \text{ if } C_{\text{nervura}} = \text{"C30"} \end{array} \right. \\ \text{if Caso} = \text{Caso4} \\ \left| \begin{array}{l} f_{c_0} \text{ if } C_{\text{nervura}} = \text{"C20"} \\ f_{c_1} \text{ if } C_{\text{nervura}} = \text{"C25"} \\ f_{c_2} \text{ if } C_{\text{nervura}} = \text{"C30"} \end{array} \right. \\ \text{otherwise} \\ \left| \begin{array}{l} f_{c_0} \text{ if } C_{\text{nervura}} = \text{"C20"} \\ f_{c_1} \text{ if } C_{\text{nervura}} = \text{"C30"} \\ f_{c_2} \text{ if } C_{\text{nervura}} = \text{"C40"} \\ f_{c_3} \text{ if } C_{\text{nervura}} = \text{"C60"} \end{array} \right. \end{cases}$$

$$f_{v0,d} = 0.1867 \text{ kN/cm}^2$$

$$R_{\text{cisparalelo}_k} := \begin{cases} \text{"O.K."} & \text{if } \tau_k \leq f_{v0,d} \\ \text{"Não"} & \text{if } \tau_k > f_{v0,d} \end{cases}$$

$$R_{\text{cisparalelo}\%_k} := \frac{\tau_k}{f_{v0,d}}$$



### a.3- Verificação dos deslocamentos

- Cálculo do deslocamento devido à carga móvel

$$z := \frac{L_p - 120}{2} \quad z = 40 \quad \text{cm} \quad x_\delta := z + 30 \quad x_\delta = 70 \quad \text{cm} \quad P_{\delta_k} := 2 \cdot P \cdot W_f \cdot N_L$$

$$\delta_{cm1_k} := \frac{P_{\delta_k} \cdot L_p^3}{48 \cdot E_{L.n_k} \cdot I_{i_k}} + \frac{P_{\delta_k} \cdot (x_\delta)}{24 \cdot E_{L.n_k} \cdot I_{i_k}} \cdot \left[ 3 \cdot L_p^2 - 4 \cdot (x_\delta)^2 \right]$$

$$\delta_{cm2_k} := 2 \cdot \left[ \frac{P \cdot 60 \cdot (z)^2}{24 \cdot L_p \cdot E_{L.n_k} \cdot I_{i_k}} \cdot \left[ -z^2 \cdot L_p + 2 \cdot L_p^3 + z^2 \cdot \frac{L_p}{2} - \frac{3}{2} \cdot L_p^3 + 2 \cdot \left( \frac{L_p}{2} \right)^3 \right] \right]$$

$$\delta_{cm_k} := \delta_{cm1_k} + \delta_{cm2_k}$$

- Cálculo do deslocamento devido à carga permanente

$$\delta_{cp_k} := \frac{5 \cdot P_{nt_k} \cdot L_p^4}{384 \cdot E_{L.n_k} \cdot I_{i_k}}$$

- Cálculo do deslocamento total

Combinações em estados limites de utilização

\* Combinações de longa duração

$$\delta_{t_k} := \delta_{cp_k} + \psi_2 \cdot \delta_{cm_k}$$

Para elementos bi-apoiados  $\delta_{lim} := \frac{L_p}{200}$

$$\text{Verificação}_{\delta t_k} := \begin{cases} \text{"O.K."} & \text{if } \delta t_k \leq \delta_{lim} \\ \text{"Não"} & \text{if } \delta t_k > \delta_{lim} \end{cases}$$

$$\text{Verificação}_{\delta t_k} := \frac{\delta t_k}{\delta_{lim}}$$

b- Verificação do puncionamento no tabuleiro

$$V_k := \frac{P}{S_k} \cdot \left( S_k - \frac{a + B_{w_k}}{2} \right)$$

Esforço cortante resistente,  $V_{res}$

$$V_{res} := \sigma_N \cdot b_l \cdot t \cdot \mu_S$$

$$V_{local_k} := \begin{cases} \text{"O.K."} & \text{if } V_k \leq V_{res} \\ \text{"Não"} & \text{if } V_k > V_{res} \end{cases}$$

$$V_{local_k} := \frac{V_k}{V_{res}}$$

11) Cálculo do volume de madeira

a -Volume de madeira laminada colada das nervuras,  $V_{nervura}$

$$V_{nervura_k} := \frac{n}{10^6} \cdot (B_{w_k} \cdot D_k \cdot L_p)$$

b -Volume de madeira serrada do tabuleiro,  $V_{tabuleiro}$

$$V_{tabuleiro_k} := \left[ b - (n \cdot B_{w_k}) \right] \cdot t \cdot \frac{L_p}{10^6}$$

## RESULTADOS

$$C_{\text{tabuleiro}} = \text{"C30"} \quad C_{\text{nervura}} = \text{"C30"} \quad \delta_{\text{sup}} = 0.5 \text{ cm}$$

$$4) \quad L_p = 200 \text{ cm} \quad b = 110 \text{ cm} \quad t = 5 \text{ cm} \quad n = 6$$

$$S = \begin{pmatrix} 21.4 \\ 21.2 \\ 21 \end{pmatrix} \text{ cm}$$

$$5) \quad E_{L,t} = 812 \text{ kN/cm}^2 \quad E_T = 17.7654 \text{ kN/cm}^2 \quad E_{L,n_0} = 812 \text{ kN/cm}^2$$

$$\delta_{\text{máx}} = \begin{pmatrix} 0.0127 \\ 0.0124 \\ 0.0122 \end{pmatrix} \text{ cm}$$

$$\text{Verificação do deslocamento local máximo} \quad \delta_{\text{localmáx}} = \begin{pmatrix} \text{"O.K"} \\ \text{"O.K"} \\ \text{"O.K"} \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{\text{máx}} = \begin{pmatrix} 0.1291 \\ 0.129 \\ 0.1288 \end{pmatrix} \text{ kN/cm}^2$$

$$\text{Verificação da Resistência à compressão perpendicular à fibra} \quad R_{\text{cperpendicular}} = \begin{pmatrix} \text{"O.K"} \\ \text{"O.K"} \\ \text{"O.K"} \end{pmatrix}$$

$$6) \quad B = \begin{pmatrix} 9.2 \\ 8.6 \\ 8 \end{pmatrix} \text{ cm} \quad B_E = \begin{pmatrix} 7.6535 \\ 6.9743 \\ 6.2951 \end{pmatrix} \text{ cm} \quad \text{rel} = \begin{pmatrix} 0.8319 \\ 0.811 \\ 0.7869 \end{pmatrix}$$

$$b_e = \begin{pmatrix} 18.3069 \\ 17.9485 \\ 17.5901 \end{pmatrix} \text{ cm} \quad b_t = \begin{pmatrix} 15.3069 \\ 13.9485 \\ 12.5901 \end{pmatrix} \text{ cm} \quad D = \begin{pmatrix} 22 \\ 20 \\ 18 \end{pmatrix} \text{ cm}$$

$$b_{eti} = \begin{pmatrix} 18.307 \\ 17.949 \\ 17.59 \end{pmatrix} \text{ cm}$$

$$I_i = \begin{pmatrix} 5381.92 \\ 4907.84 \\ 4126.16 \end{pmatrix} \text{ cm}^4$$

$$b_{tex} = \begin{pmatrix} 7.65 \\ 6.97 \\ 6.3 \end{pmatrix} \text{ cm}$$

$$I_{ex} = \begin{pmatrix} 4491.82 \\ 4105.37 \\ 3480.83 \end{pmatrix} \text{ cm}^4$$

7)

$$W_f = \begin{pmatrix} 0.475 \\ 0.473 \\ 0.468 \end{pmatrix}$$

8)

$$M_{\text{máx.cm}} = \begin{pmatrix} 240 \\ 238 \\ 236 \end{pmatrix} \text{ kN.cm}$$

$$M_{\text{máx.cp}} = \begin{pmatrix} 7.3 \\ 7.51 \\ 7.61 \end{pmatrix} \text{ kN.cm}$$

$$M_{dT} = \begin{pmatrix} 418 \\ 416 \\ 411 \end{pmatrix} \text{ kN.cm}$$

9)

$$V_{cp} = \begin{pmatrix} 0.08 \\ 0.09 \\ 0.1 \end{pmatrix} \text{ kN}$$

$$V_{cm} = \begin{pmatrix} 2.21 \\ 2.29 \\ 2.37 \end{pmatrix} \text{ kN}$$

$$V_{dT} = \begin{pmatrix} 3.8682 \\ 4.0174 \\ 4.1573 \end{pmatrix} \text{ kN}$$

10)

Verificação da resistência à tração  
paralela às fibras,  $R_{tf}$

$$\sigma_t = \begin{pmatrix} 1.21 \\ 1.14 \\ 1.16 \end{pmatrix} \text{ kN/cm}^2$$

$$R_{tf\%} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0.9421 \\ 0.9587 \end{pmatrix}$$

$$R_{tf} = \begin{pmatrix} \text{"O.K."} \\ \text{"O.K."} \\ \text{"O.K."} \end{pmatrix}$$

$$S = \begin{pmatrix} 21.4 \\ 21.2 \\ 21 \end{pmatrix}$$

$$D0 = \begin{pmatrix} 22 \\ 19.4129 \\ 17.6242 \end{pmatrix}$$

$$DD_k := \text{ceil}(D0_k)$$

$$DD = \begin{pmatrix} 22 \\ 20 \\ 18 \end{pmatrix}$$

Verificação da resistência à compressão

verificação da resistência a compressão  
paralela às fibras,  $R_{c\text{paralela}}$

$$\sigma_c = \begin{pmatrix} 0.4993 \\ 0.5509 \\ 0.6305 \end{pmatrix} \text{ kN/cm}^2$$

$$R_{c\text{paralela}\%} = \begin{pmatrix} 0.4161 \\ 0.4591 \\ 0.5255 \end{pmatrix}$$

$$R_{c\text{paralela}} = \begin{pmatrix} \text{"O.K."} \\ \text{"O.K."} \\ \text{"O.K."} \end{pmatrix}$$

Verificação da resistência ao cisalhamento  
paralelo às fibras,  $R_{c\text{isparalelo}}$

$$\tau = \begin{pmatrix} 0.0871 \\ 0.0745 \\ 0.0687 \end{pmatrix} \text{ kN/cm}^2$$

$$R_{c\text{isparalelo}\%} = \begin{pmatrix} 0.4664 \\ 0.3992 \\ 0.3679 \end{pmatrix}$$

$$R_{c\text{isparalelo}} = \begin{pmatrix} \text{"O.K."} \\ \text{"O.K."} \\ \text{"O.K."} \end{pmatrix}$$

Verificação dos deslocamentos

$$\delta_t = \begin{pmatrix} 0.0523 \\ 0.0573 \\ 0.0677 \end{pmatrix} \text{ cm}$$

$$\text{Verificação}\%_{\delta_t} = \begin{pmatrix} 0.0523 \\ 0.0573 \\ 0.0677 \end{pmatrix}$$

$$\text{Verificação}_{\delta_t} = \begin{pmatrix} \text{"O.K."} \\ \text{"O.K."} \\ \text{"O.K."} \end{pmatrix}$$

Verificação do puncionamento  
no tabuleiro

$$V = \begin{pmatrix} 1.486 \\ 1.434 \\ 1.381 \end{pmatrix} \text{ kN}$$

$$V_{\text{local}\%} = \begin{pmatrix} 0.4043 \\ 0.3902 \\ 0.3758 \end{pmatrix}$$

$$V_{\text{local}} = \begin{pmatrix} \text{"O.K."} \\ \text{"O.K."} \\ \text{"O.K."} \end{pmatrix}$$

$$V_{\text{res}} = 3.675 \text{ kN}$$

11)

$$V_{\text{nervura}} = \begin{pmatrix} 0.0792 \\ 0.096 \\ 0.108 \end{pmatrix} \text{ m}^3$$

$$V_{\text{tabuleiro}} = \begin{pmatrix} 0.092 \\ 0.086 \\ 0.08 \end{pmatrix} \text{ m}^3$$

$$V_{\text{nervura}} + V_{\text{tabuleiro}} = \begin{pmatrix} 0.1712 \\ 0.182 \\ 0.188 \end{pmatrix} \text{ m}^3$$