

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS**

**ESTUDO DE PONTES DE MADEIRA COM
TABULEIRO MULTICELULAR PROTENDIDO**

Jorge Luís Nunes de Góes

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Estruturas.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Antonio Alves Dias

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Engenharia de Estruturas

São Carlos

2005

*Dedico este trabalho aos meus pais
e ao Menino Jesus de Praga.*

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos são dirigidos aos amigos e familiares que prestaram os melhores incentivos para a concretização deste trabalho.

Em especial, ao Professor Dr. Antonio Alves Dias pela excelente orientação e amizade e ao Professor Dr. Carlito Calil Jr pelo incansável estímulo à pesquisa.

À FAPESP – “Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo”, pela concessão da bolsa de estudos e suporte financeiro para o desenvolvimento da pesquisa.

A todos os colegas, professores e funcionários do Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeiras, que direta ou indiretamente, participaram na elaboração deste trabalho.

À Bruna Ferreira Gonçalves pelo apoio, companhia e sobretudo pelo carinho durante todo o período de realização deste doutorado.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	xvi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xviii
LISTA DE SÍMBOLOS	xix
RESUMO	xxiii
ABSTRACT	xxiv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. HISTÓRICO E EVOLUÇÃO DAS PONTES PROTENDIDAS DE MADEIRA	4
2.2. COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DA MADEIRA LAMINADA PROTENDIDA	9
2.2.1. Efeito da frequência de juntas	10
2.2.2. Parâmetros elásticos e níveis de protensão	12
2.2.3. Perda de protensão	15
2.3. SISTEMA PROTENDIDO COM TABULEIRO MULTICELULAR	17
2.3.1. Comportamento estrutural	19
2.3.2. Ação composta entre mesas e nervuras	21
2.3.3. Efeito “Shear Lag”	22
2.4. MODELOS DE CÁLCULO	24
2.4.1. Modelo de viga equivalente	25

2.4.2. Modelo de placa ortotrópica equivalente	29
2.4.3. Modelo em elementos finitos	32
2.5. TEORIA DE PLACAS ORTOTRÓPICAS	38
2.5.1. Solução da equação de placas ortotrópicas (Equação de Huber) ...	43
2.6. CONCLUSÕES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	46
3. O PROGRAMA OTB	48
3.1. VERIFICAÇÃO DA SOLUÇÃO POR SÉRIES	55
4. AVALIAÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS EM MEF APLICADOS À ANÁLISE ESTRUTURAL DE PONTES PROTENDIDAS	66
4.1. AVALIAÇÃO DO MODELO PARA A NERVURA	67
4.2. AVALIAÇÃO DO MODELO PARA UMA VIGA DE SEÇÃO CAIXÃO	74
3.1. SENSIBILIDADE DO MODELO ÀS CONSTANTES ELÁSTICAS	78
5. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	102
5.1. FASE PRELIMINAR	104
5.2. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA	106
5.3. MONTAGEM DO MODELO REDUZIDO	110
5.4. INSTRUMENTAÇÃO DO MODELO REDUZIDO	112
5.5. ENSAIOS DO MODELO REDUZIDO	116
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	122
6.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA	122
6.2. ENSAIOS DO MODELO REDUZIDO	124
6.2.1. Influência do nível de protensão na rigidez longitudinal	125
6.2.2. Calibração das propriedades elásticas	128
6.2.3. Variação da força nas barras de protensão	140
6.2.4. Avaliação da distribuição de deformações e tensões no modelo ...	153
6.2.5. Fator de Distribuição de Carga experimental	165
7. COMPARAÇÃO DOS MODELOS DE CÁLCULO	169

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES	175
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	180

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Ilustração de ponte de madeira com tabuleiro multicelular	2
Figura 2 -	(a) Sistema em madeira laminada pregada (MLP). (b) Detalhe do sistema de recuperação dos tabuleiros em madeira laminada pregada	4
Figura 3 -	Ponte em placa de madeira laminada protendida de seção simples	5
Figura 4 -	Ponte protendida formada por vigas de seção T	6
Figura 5 -	Ponte com tabuleiro multicelular protendido	6
Figura 6 -	Ponte Poverty Run. Fonte: DICKSON (1995)	7
Figura 7 -	Ponte com tabuleiro treliçado protendido. CHEUNG (2003)	8
Figura 8 -	Arranjo do tabuleiro treliçado protendido transversalmente. CHEUNG (2003)	8
Figura 9 -	Arranjo básico das placas protendidas de madeira. VELOSO (1999)	9
Figura 10 -	Transferência de esforços na madeira laminada protendida. CREWS (2000)	10
Figura 11 -	Frequência e espaçamento de juntas. DAVALOS & SALIM (1992)	11
Figura 12 -	Valores do coeficiente C_{bj} em função da frequência das juntas de topo	12
Figura 13 -	E_T em função do nível de protensão	14
Figura 14 -	G_{LT} em função do nível de protensão	14
Figura 15 -	Perda de protensão e reprotensão em função do tempo, OKIMOTO (1997)	16
Figura 16 -	Sistema em Madeira Laminada Colada, RITTER (1992)	18

Figura 17 -	Sistema protendido com tabuleiro multicelular, WACKER et. al. (1998) e OKIMOTO (1997)	18
Figura 18 -	Comportamento estrutural do sistema com tabuleiro multicelular	20
Figura 19 -	Ação composta em uma viga celular e os esforços de cisalhamento entre as nervuras e mesas. OLIVA & RAMMER (1993)	22
Figura 20 -	Distribuição de tensões normais nas mesas da seção caixão, LAMAS(1982)	23
Figura 21 -	Esquema clássico para exemplificar o efeito “Shear Lag”, LAMAS (1982)	23
Figura 22 -	Viga transformada seção I	26
Figura 23 -	Geometria da seção transversal – Ponte protendida com tabuleiro multicelular	30
Figura 24 -	Volume elementar de um sólido e suas tensões	33
Figura 25 -	Elemento finito SHELL 63, ANSYS 5.7 (1994)	36
Figura 26 -	Exemplos de esforços nos elementos SHELL 64, ANSYS 5.7 (1994)	36
Figura 27 -	Elemento finito SOLID 64, ANSYS 5.7 (1994)	37
Figura 28 -	Elemento finito SOLID 64 e suas tensões, ANSYS 5.7 (1994)	37
Figura 29 -	Elemento infinitesimal de placa ortotrópica, TROITSKY (1987)	39
Figura 30 -	Distribuição de tensões internas, TROITSKY (1987)	40
Figura 31 -	Tabuleiro com carregamentos distribuídos em pequenas áreas, CUSENS & PAMA (1975)	45
Figura 32 -	Janela Inicial do Programa OTB	50
Figura 33 -	Dados de entrada para ponte protendida com tabuleiro multicelular ..	51
Figura 34 -	Caixa de diálogo – Escolha do veículo-tipo 30, 45	51
Figura 35 -	Caixa de diálogo – Escolha do veículo-tipo 12	52
Figura 36 -	Janela inicial com veículo tipo	52
Figura 37 -	Caixa de diálogo – Modificar Cargas	53
Figura 38 -	Janela inicial – Seção transversal deslocada	54
Figura 39 -	Janela de Visualização 3D – Vista isométrica da deformada	54
Figura 40 -	Placa 1 carregada com carga uniforme distribuída	56

Figura 41 -	Placa 1 carregada com carga distribuída no centro	56
Figura 42 -	Placa 1 carregada com carga distribuída na borda	56
Figura 43 -	Placa 2 carregada com carga uniforme distribuída	57
Figura 44 -	Placa 2 carregada com carga distribuída no centro	58
Figura 45 -	Placa 2 carregada com carga distribuída na borda	58
Figura 46 -	Placa 1 carregada com carga uniforme distribuída	59
Figura 47 -	Placa 1 carregada com carga distribuída no centro	60
Figura 48 -	Placa 1 carregada com carga distribuída na borda	61
Figura 49 -	Placa 2 carregada com carga uniforme distribuída	62
Figura 50 -	Placa 2 carregada com carga distribuída no centro	63
Figura 51 -	Placa 2 carregada com carga distribuída na borda	64
Figura 52 -	Viga 1 discretizada conforme Modelo 01 (VS01 e VS02)	68
Figura 53 -	Viga 2 discretizada conforme Modelo 01 (VS9 e VS10)	68
Figura 54 -	Viga 1 discretizada conforme Modelo 02 (VS05 e VS06)	69
Figura 55 -	Viga 2 discretizada conforme Modelo 02 (VS13 e VS14)	69
Figura 56 -	Viga 1 discretizada conforme Modelo 03 (VS03 e VS04)	70
Figura 57 -	Viga 2 discretizada conforme Modelo 03 (VS11 e VS12)	70
Figura 58 -	Viga 1 discretizada conforme Modelo 04 (VS07 e VS08)	71
Figura 59 -	Viga 2 discretizada conforme Modelo 04 (VS15 e VS16)	71
Figura 60 -	Viga 1 e suas formas de carregamento	72
Figura 61 -	Viga 2 e suas formas de carregamento	72
Figura 62 -	Viga Caixa discretizada conforme Modelo 01 (Box02)	75
Figura 63 -	Viga Caixa discretizada conforme Modelo 02 (Box01)	76
Figura 64 -	Viga caixa e seu carregamento	76
Figura 65 -	Representação esquemática do Modelo 01 com elementos SHELL ...	77
Figura 66 -	Discretização da seção transversal – Ponte 1 e 2	79
Figura 67 -	Influência do G_{xy} para as Pontes 1 e 2	82

Figura 68 -	Influência do G_{xy} para a Ponte 1	82
Figura 69 -	Posicionamento do carregamento nas Pontes 1 e 2	83
Figura 70 -	Influência do E_y para a ponte 1 sob carregamento de borda	84
Figura 71 -	Influência do E_z para a ponte 1 sob carregamento de borda	85
Figura 72 -	Influência do G_{xy} para a ponte 1 sob carregamento de borda	86
Figura 73 -	Influência do G_{xz} para a ponte 1 sob carregamento de borda	87
Figura 74 -	Influência do G_{yz} para a ponte 1 sob carregamento de borda	88
Figura 75 -	Influência do v_{xy} para a ponte 1 sob carregamento de borda	89
Figura 76 -	Influência do v_{xz} para a ponte 1 sob carregamento de borda	90
Figura 77 -	Influência do v_{yz} para a ponte 1 sob carregamento de borda	91
Figura 78 -	Influência das propriedades elásticas para a ponte 1 sob carregamento de borda	92
Figura 79 -	Influência do E_y para a ponte 2 sob carregamento de borda	93
Figura 80 -	Influência do E_z para a ponte 2 sob carregamento de borda	94
Figura 81 -	Influência do G_{xy} para a ponte 2 sob carregamento de borda	95
Figura 82 -	Influência do G_{xz} para a ponte 2 sob carregamento de borda	96
Figura 83 -	Influência do G_{yz} para a ponte 2 sob carregamento de borda	97
Figura 84 -	Influência do v_{xy} para a ponte 2 sob carregamento de borda	98
Figura 85 -	Influência do v_{xz} para a ponte 2 sob carregamento de borda	99
Figura 86 -	Influência do v_{yz} para a ponte 2 sob carregamento de borda	100
Figura 87 -	Influência das propriedades elásticas para a ponte 2 sob carregamento de borda	101
Figura 88 -	Planta baixa da ponte do Campus II da USP São Carlos	110
Figura 89 -	Seção transversal da ponte do Campus II da USP São Carlos	103
Figura 90 -	Seção transversal do modelo reduzido na configuração 1 (16 nervuras)	103
Figura 91 -	Seção transversal do modelo reduzido na configuração 2 (12 nervuras)	103
Figura 92 -	Vista lateral do modelo e o espaçamento entre as barras de protensão	105

Figura 93 -	Furação das peças de madeira	105
Figura 94 -	Secagem das peças de madeira	105
Figura 95 -	Instalação de extensômetros elétricos	106
Figura 96 -	Configuração do ensaio flexão estática das nervuras	106
Figura 97 -	Diagrama carga-flecha na flexão. Fonte NBR 7190 (1997)	107
Figura 98 -	Diagrama de carregamento para a determinação da rigidez à flexão. Fonte NBR 7190 (1997)	107
Figura 99 -	Configuração do ensaio flexão estática dos sarrafos (menor inércia) .	108
Figura 100 -	Configuração do ensaio flexão estática dos sarrafos (maior inércia) ..	108
Figura 101 -	Ensaio de flexão estática das nervuras	108
Figura 102 -	Ensaio de flexão estática dos sarrafos (menor e maior inércia)	109
Figura 103 -	Montagem do tabuleiro	111
Figura 104 -	Protensão do tabuleiro	112
Figura 105 -	Sistemas de aquisição de dados	113
Figura 106 -	Localização das células de carga nas barras de protensão para a configuração 1 e 2 (vista lateral esquerda do modelo)	114
Figura 107 -	Localização dos transdutores de deslocamento (planta baixa configuração 1)	114
Figura 108 -	Localização dos transdutores de deslocamento (planta baixa configuração 2)	114
Figura 109 -	Transdutores de deslocamento KYOWA e MITUTOYO	115
Figura 110 -	Localização dos extensômetros nas nervuras e mesas (vista frontal do modelo – configuração 1)	115
Figura 111 -	Localização dos extensômetros nas nervuras e mesas (vista frontal do modelo – configuração 2)	116
Figura 112 -	Posicionamento do carregamento distribuído (configuração 1)	119
Figura 113 -	Posicionamento dos carregamentos concentrados (configuração 1) ...	119
Figura 114 -	Posicionamento do carregamento distribuído (configuração 2)	120
Figura 115 -	Posicionamento dos carregamentos concentrados (configuração 2) ...	120
Figura 116 -	Arranjos dos Carregamentos	121

Figura 117 -	Discretização da seção transversal do modelo com a configuração 1 .	125
Figura 118 -	Discretização da seção transversal do modelo com a configuração 2 .	125
Figura 119 -	Deslocamento vertical da seção transversal do modelo carregado com carga distribuída - P=125 kN.(configuração 1)	126
Figura 120 -	Deslocamento vertical da seção transversal do modelo carregado com carga distribuída - P=125 kN.(configuração 2)	126
Figura 121 -	Influência do nível de protensão na rigidez à flexão longitudinal do tabuleiro	128
Figura 122 -	Flexão longitudinal do tabuleiro (Configuração 1)	130
Figura 123 -	Flexão transversal do tabuleiro (Configuração 1)	130
Figura 124 -	Deformada experimental e numérica otimizada do ensaio P1-X/CLE	132
Figura 125 -	Deformada experimental e numérica otimizada do ensaio P1-X/CQE	132
Figura 126 -	Deformada experimental e numérica otimizada do ensaio P1-X/CC ..	132
Figura 127 -	Deformada experimental e numérica otimizada do ensaio P1-X/CQD	133
Figura 128 -	Deformada experimental e numérica otimizada do ensaio P1-X/CLD	133
Figura 129 -	Deformada experimental e numérica otimizada do ensaio P2-X/CLE	133
Figura 130 -	Deformada experimental e numérica otimizada do ensaio P2-X/CQE	134
Figura 131 -	Deformada experimental e numérica otimizada do ensaio P2-X/CC ..	134
Figura 132 -	Deformada experimental e numérica otimizada do ensaio P2-X/CQD	134
Figura 133 -	Deformada experimental e numérica otimizada do ensaio P2-X/CLD	135
Figura 134 -	Deformada experimental e numérica otimizada média do ensaio P1-X/CLE	136
Figura 135 -	Deformada experimental e numérica otimizada média do ensaio P1-X/CQE	137
Figura 136 -	Deformada experimental e numérica otimizada média do ensaio P1-X/CC	137
Figura 137 -	Deformada experimental e numérica otimizada média do ensaio P1-X/CQD	137
Figura 138 -	Deformada experimental e numérica otimizada média do ensaio P1-X/CLD	138

Figura 139 -	Deformada experimental e numérica otimizada média do ensaio P2-X/CLE	138
Figura 140 -	Deformada experimental e numérica otimizada média do ensaio P2-X/CQE	138
Figura 141 -	Deformada experimental e numérica otimizada média do ensaio P2-X/CC	139
Figura 142 -	Deformada experimental e numérica otimizada média do ensaio P2-X/CQD	139
Figura 143 -	Deformada experimental e numérica otimizada média do ensaio P2-X/CLD	139
Figura 144 -	Localização das células de carga nas barras de protensão para a configuração 1 e 2 (vista lateral esquerda do modelo)	140
Figura 145 -	Variação da força de protensão do ensaio P1-700/D	141
Figura 146 -	Variação da força de protensão do ensaio P1-550/D	141
Figura 147 -	Variação da força de protensão do ensaio P1-350/D	141
Figura 148 -	Variação da força de protensão do ensaio P1-700/CLE	142
Figura 149 -	Variação da força de protensão do ensaio P1-550/CLE	142
Figura 150 -	Variação da força de protensão do ensaio P1-350/CLE	142
Figura 151 -	Variação da força de protensão do ensaio P1-700/CQE	143
Figura 152 -	Variação da força de protensão do ensaio P1-550/CQE	143
Figura 153 -	Variação da força de protensão do ensaio P1-350/CQE	143
Figura 154 -	Variação da força de protensão do ensaio P1-700/CC	144
Figura 155 -	Variação da força de protensão do ensaio P1-550/CC	144
Figura 156 -	Variação da força de protensão do ensaio P1-350/CC	144
Figura 157 -	Variação da força de protensão do ensaio P1-700/CQD	145
Figura 158 -	Variação da força de protensão do ensaio P1-550/CQD	145
Figura 159 -	Variação da força de protensão do ensaio P1-350/CQD	145
Figura 160 -	Variação da força de protensão do ensaio P1-700/CLD	146
Figura 161 -	Variação da força de protensão do ensaio P1-550/CLD	146
Figura 162 -	Variação da força de protensão do ensaio P1-350/CLD	146

Figura 163 -	Variação da força de protensão do ensaio P2-700/D	147
Figura 164 -	Variação da força de protensão do ensaio P2-550/D	147
Figura 165 -	Variação da força de protensão do ensaio P2-350/D	147
Figura 166 -	Variação da força de protensão do ensaio P2-700/CLE	148
Figura 167 -	Variação da força de protensão do ensaio P2-550/CLE	148
Figura 168 -	Variação da força de protensão do ensaio P2-350/CLE	148
Figura 169 -	Variação da força de protensão do ensaio P2-700/CQE	149
Figura 170 -	Variação da força de protensão do ensaio P2-550/CQE	149
Figura 171 -	Variação da força de protensão do ensaio P2-350/CQE	149
Figura 172 -	Variação da força de protensão do ensaio P2-700/CC	150
Figura 173 -	Variação da força de protensão do ensaio P2-550/CC	150
Figura 174 -	Variação da força de protensão do ensaio P2-350/CC	150
Figura 175 -	Variação da força de protensão do ensaio P2-700/CQD	151
Figura 176 -	Variação da força de protensão do ensaio P2-550/CQD	151
Figura 177 -	Variação da força de protensão do ensaio P2-350/CQD	151
Figura 178 -	Variação da força de protensão do ensaio P2-700/CLD	152
Figura 179 -	Variação da força de protensão do ensaio P2-550/CLD	152
Figura 180 -	Variação da força de protensão do ensaio P2-350/CLD	152
Figura 181 -	Deformações e tensões normais máximas das nervuras - ensaio P1-700/D	154
Figura 182 -	Deformações e tensões normais máximas das nervuras - ensaio P1-700/CLE	154
Figura 183 -	Deformações e tensões normais máximas das nervuras - ensaio P1-700/CQE	154
Figura 184 -	Deformações e tensões normais máximas das nervuras - ensaio P1-700/CC	155
Figura 185 -	Deformações e tensões normais máximas das nervuras - ensaio P1-700/CQD	155
Figura 186 -	Deformações e tensões normais máximas das nervuras - ensaio P1-700/CLE	155

Figura 187 -	Deformações e tensões normais máximas das nervuras - ensaio P2-700/D	156
Figura 188 -	Deformações e tensões normais máximas das nervuras - ensaio P2-700/CLE	156
Figura 189 -	Deformações e tensões normais máximas das nervuras - ensaio P2-700/CQE	156
Figura 190 -	Deformações e tensões normais máximas das nervuras - ensaio P2-700/CC	157
Figura 191 -	Deformações e tensões normais máximas das nervuras - ensaio P2-700/CQD	157
Figura 192 -	Deformações e tensões normais máximas das nervuras - ensaio P2-700/CLD	157
Figura 193 -	Deformações e tensões normais máximas das nervuras – P1-X/CLE (P=60 kN)	159
Figura 194 -	Deformações e tensões normais máximas das nervuras – P1-X/CQE (P=60 kN)	159
Figura 195 -	Deformações e tensões normais máximas das nervuras – P1-X/CC (P=60 kN)	159
Figura 196 -	Deformações e tensões normais máximas das nervuras – P1-X/CQD (P=60 kN)	160
Figura 197 -	Deformações e tensões normais máximas das nervuras – P1-X/CLD (P=60 kN)	160
Figura 198 -	Deformações e tensões normais máximas das nervuras - P2-X/CLE (P=60 kN)	160
Figura 199 -	Deformações e tensões normais máximas das nervuras - P2-X/CQE (P=60 kN)	161
Figura 200 -	Deformações e tensões normais máximas das nervuras - P2-X/CC (P=60 kN)	161
Figura 201 -	Deformações e tensões normais máximas das nervuras - P2-X/CQD (P=60 kN)	161
Figura 202 -	Deformações e tensões normais máximas das nervuras - P2-X/CLD (P=60 kN)	162
Figura 203 -	Localização dos extensômetros nas mesas da célula central – tabuleiro 1	162
Figura 204 -	Localização dos extensômetros nas mesas da célula central – tabuleiro 2	162

Figura 205 -	Deformações e tensões normais da face de cima da mesa superior - P1-700/CC (P=60 kN)	163
Figura 206 -	Deformações e tensões normais da face de baixo da mesa superior - P1-700/CC (P=60 kN)	163
Figura 207 -	Deformações e tensões normais da face de baixo da mesa inferior - P1-700/CC (P=60 kN)	164
Figura 208 -	Deformações e tensões normais da face de baixo da mesa superior - P2-700/CC (P=60 kN)	164
Figura 209 -	Deformações e tensões normais da face de baixo da mesa inferior - P2-700/CC (P=60 kN)	164
Figura 210 -	Deformações e tensões normais da face de baixo da mesa inferior - P2-700/CC (P=60 kN)	165
Figura 211 -	Fator de Distribuição de Carga do ensaio P1-700/X	166
Figura 212 -	Fator de Distribuição de Carga do ensaio P1-550/X	166
Figura 213 -	Fator de Distribuição de Carga do ensaio P1-350/X	166
Figura 214 -	Fator de Distribuição de Carga do ensaio P2-700/X	167
Figura 215 -	Fator de Distribuição de Carga do ensaio P2-550/X	167
Figura 216 -	Fator de Distribuição de Carga do ensaio P2-350/X	167
Figura 217 -	Posicionamento do veículo tipo para a análise da tensão normal e flecha (meio tabuleiro com simetria longitudinal)	170
Figura 218 -	Posicionamento do veículo tipo para a análise da tensão cisalhante (tabuleiro inteiro)	171
Figura 219 -	Deslocamento vertical da seção transversal – tabuleiro 1	172
Figura 220 -	Deslocamento vertical da seção transversal – tabuleiro 2	172

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Valores do coeficiente C_{bj} em função da frequência das juntas de topo	12
Tabela 2 -	Parâmetros elásticos em relação ao E_L	13
Tabela 3 -	Parâmetros elásticos em relação ao nível de protensão	14
Tabela 4 -	Resultados da placa 1 carregada com carga uniforme distribuída	59
Tabela 5 -	Resultados da placa 1 carregada com carga distribuída no centro	60
Tabela 6 -	Resultados da placa 1 carregada com carga distribuída na borda	61
Tabela 7 -	Resultados da placa 2 carregada com carga uniforme distribuída	62
Tabela 8 -	Resultados da placa 2 carregada com carga distribuída no centro	63
Tabela 9 -	Resultados da placa 2 carregada com carga distribuída na borda	64
Tabela 10 -	Resultados das simulações realizadas para a viga 1 ($L/h = 15$)	73
Tabela 11 -	Resultados das simulações realizadas para a viga 2 ($L/h = 20$)	74
Tabela 12 -	Resultados das simulações realizadas para a viga caixão	77
Tabela 13 -	Resultados de flecha no centro do vão da Ponte 1	81
Tabela 14 -	Resultados de flecha no centro do vão da Ponte 2	81
Tabela 15 -	Influência do E_y para a ponte 1 sob carregamento de borda	84
Tabela 16 -	Influência do E_z para a ponte 1 sob carregamento de borda	85
Tabela 17 -	Influência do G_{xy} para a ponte 1 sob carregamento de borda	86
Tabela 18 -	Influência do G_{xz} para a ponte 1 sob carregamento de borda	87
Tabela 19 -	Influência do G_{yz} para a ponte 1 sob carregamento de borda	88

Tabela 20 -	Influência do v_{xy} para a ponte 1 sob carregamento de borda	89
Tabela 21 -	Influência do v_{xz} para a ponte 1 sob carregamento de borda	90
Tabela 22 -	Influência do v_{yz} para a ponte 1 sob carregamento de borda	91
Tabela 23 -	Influência do E_y para a ponte 2 sob carregamento de borda	93
Tabela 24 -	Influência do E_z para a ponte 2 sob carregamento de borda	94
Tabela 25 -	Influência do G_{xy} para a ponte 2 sob carregamento de borda	95
Tabela 26 -	Influência do G_{xz} para a ponte 2 sob carregamento de borda	96
Tabela 27 -	Influência do G_{yz} para a ponte 2 sob carregamento de borda	97
Tabela 28 -	Influência do v_{xy} para a ponte 2 sob carregamento de borda	98
Tabela 29 -	Influência do v_{xz} para a ponte 2 sob carregamento de borda	99
Tabela 30 -	Influência do v_{yz} para a ponte 2 sob carregamento de borda	100
Tabela 31 -	Relação de ensaios para o modelo com a primeira configuração	117
Tabela 32 -	Relação de ensaios para o modelo com a segunda configuração	118
Tabela 33 -	Módulos de elasticidade das vigas de madeira	122
Tabela 34 -	Módulos de elasticidade dos sarrafos de madeira	124
Tabela 35 -	Comparação flecha teórica x experimental dos ensaios com carga distribuída	127
Tabela 36 -	Correspondência entre os parâmetros elásticos (ANSYS x OTB)	131
Tabela 37 -	Parâmetros elásticos calibrados para cada configuração de ensaio (P1)	135
Tabela 38 -	Parâmetros elásticos calibrados para cada configuração de ensaio (P2)	135
Tabela 39 -	Resumo dos parâmetros elásticos médios calibrados	136
Tabela 40 -	Valores máximos de flecha	173
Tabela 41 -	Valores máximos de tensão normal e cisalhante	174

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	- American Association of State Highway and Transportation Officials
CDE	- Chapa com Dentes Estampados
DT	- Transdutor de Deslocamento
EESC	- Escola de Engenharia de São Carlos
ELE	- Engineereing Laboratory Equipment Limited
FPL	- Forest Products Laboratory
LaMEM	- Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira
LVL	- Laminated Veneer Lumber
MLC	- Madeira Laminada Colada
NBR	- Norma Brasileira Registrada
OHBDC	- Ontário Highway Bridge Design Code
SET	- Departamento de Engenharia de Estruturas
USDA	- United States Department of Agriculture
USP	- Universidade de São Paulo
WVU	- Método de Cálculo (West Virginia University)

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras romanas maiúsculas:

- A Área da seção transversal, área do tabuleiro contida na linha média dos banzos;
- C_{bj} Coeficiente de redução das juntas de topo;
- C_e Coeficiente de deslocamento de borda
- D Matriz Constitutiva;
- D_x Rigidez à flexão longitudinal;
- D_y Rigidez à flexão transversal;
- D_{xy} Rigidez à torção;
- $E_{f,x}$ Módulo de elasticidade à flexão da nervura na direção x;
- $E_{f,y}$ Módulo de elasticidade à flexão da nervura na direção y;
- E_L Módulo de elasticidade à flexão longitudinal da placa ortotrópica protendida;
- $E_{L,ef}$ Módulo de elasticidade à flexão longitudinal efetivo;
- $E_{L,m}$ Módulo de elasticidade à flexão longitudinal médio das lâminas;
- $E_{M, ext}$ Módulo de elasticidade à flexão obtido com os valores de deformação específica de cada extensômetro do ensaio;
- $E_{M, flecha}$... Módulo de elasticidade à flexão obtido com os valores de flecha do ensaio;
- E_T Módulo de elasticidade à flexão transversal da placa ortotrópica protendida;
- E_x Módulo de elasticidade à flexão longitudinal;
- $(E_x)_{eq}$ Módulo de elasticidade à flexão longitudinal da placa ortotrópica equivalente;
- E_y Módulo de elasticidade à flexão longitudinal;

$E_{y,f}$	Módulo de elasticidade à flexão transversal das mesas;
$(E_y)_{eq}$	Módulo de elasticidade à flexão transversal da placa ortotrópica equivalente;
E_w	Módulo de elasticidade à flexão da nervura;
$G_{f,xy}$	Módulo de elasticidade à torção da mesa,
G_{LT}	Módulo de elasticidade à torção da placa ortotrópica protendida;
G_{xy}	Módulo de elasticidade à torção;
$(G_{xy})_{eq}$	Módulo de elasticidade à torção da placa ortotrópica equivalente;
I	Momento de inércia;
I_p	Momento de inércia da placa por unidade de comprimento;
J	Momento de inércia à torção;
K	Parâmetro “Shear Lag”;
L	Vão da ponte;
M_x	Momento fletor por unidade de comprimento na direção x;
M_y	Momento fletor por unidade de comprimento na direção y;
M_{xy}	Momento torçor por unidade de comprimento;
N_b	Número de nervuras;
N_L	Número de faixas de tráfego;
P	Carga concentrada aplicada,
Q_x	Força de cisalhamento por unidade de comprimento na direção x;
Q_y	Força de cisalhamento por unidade de comprimento na direção y;
S	Distância livre entre nervuras;
W_L	Fator de Distribuição de Carga;

Letras romanas minúsculas:

a menor dimensão da placa;

b Largura do tabuleiro;

b_e Largura da mesa;

b_m Largura da aba;

b_w Largura da nervura;

d distância entre os centros de gravidade das mesas, espessura da placa;

h_{eq} Altura da placa ortotrópica equivalente;

h_f Altura da mesa;

n_v Número de nervuras.

Letras gregas:

- β Fator de Distribuição de Carga experimental;
- σ Tensão normal;
- $\sigma_{\text{máx}}$ Tensão normal máxima;
- ΔF Variação da força;
- $\Delta \delta$ Variação da flecha;
- δ Deslocamento vertical da viga ou placa;
- δ_e Deslocamento da viga da borda, flecha;
- $\delta_{\text{máx}}$ Deslocamento vertical máximo, flecha;
- γ Distorção no plano;
- ε Deformação específica;
- ν Coeficiente de Poisson.

RESUMO

GÓES, J. L. N. (2005). *Estudo de pontes de madeira com tabuleiro multicelular protendido*. São Carlos, 2005. 184p. Tese (doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

As pontes de madeira com tabuleiro multicelular protendido são uma das mais recentes tecnologias usadas na construção das modernas pontes de madeira. Nesta tese é realizado o estudo teórico e experimental do comportamento estrutural destas pontes. Os principais métodos de cálculo são apresentados e discutidos. A investigação experimental foi realizada em dois modelos reduzidos em escala 1:3 com as mesmas dimensões externas mas diferente quantidade de nervuras. Os modelos foram ensaiados com diferentes posições de carregamento enquanto os deslocamentos, deformações e forças nas barras, eram monitorados. Os resultados obtidos demonstraram que os modelos de Placa Ortotrópica Equivalente e Elementos Finitos podem ser empregados para o dimensionamento das pontes de madeira com tabuleiro multicelular protendido. O método de Viga Equivalente pode ser empregado desde que utilizado o correto Fator de Distribuição de Carga. Os estudos realizados neste trabalho, indicam a viabilidade da utilização deste sistema estrutural para pontes com vãos de 12 a 25 m.

Palavras-chave: pontes de madeira, tabuleiro multicelular, modelos de dimensionamento.

ABSTRACT

GÓES, J. L. N. (2005). *Study of timber bridges with multicellular prestressed decks*. São Carlos, 2005. 184p. Thesis (PhD) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Timber bridges with multicellular prestressed decks is one of the most recent technology for modern timber bridges construction. In this thesis the theoretical and experimental study of the structural behavior of these bridges is accomplished. The main calculation methods are introduced and discussed. Two reduced models on scale 1:3, with the same external dimensions but different number of webs, were used for the experimental investigation. The models were tested with different load positions meanwhile displacements, strains and bar forces were measured. The obtained results have show that either model of Equivalent Orthotropic Plate or Finite Elements can be used for the design of this type of bridge. The Equivalent Beam model can also be employed as long as the correct Load Distribution Factor is chosen. The accomplished studies demonstrate that this structural system is viable for bridges with span from 12 to 25 m.

Keywords: timber bridges, multicellular decks, design models.