

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE DORMENTES  
DE CONCRETO PROTENDIDO  
REFORÇADOS COM FIBRAS DE AÇO**

**PAULO SÉRGIO DOS SANTOS BASTOS**

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: **Libânio Miranda Pinheiro**, Prof. Dr.

São Carlos

1999

**Dedico este trabalho:**

**Aos meus pais, José e Aparecida.**

**A minha esposa Marta  
e a minha filha Thaís.**

# AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Libânio Miranda Pinheiro, pela orientação e estímulo constante durante todo o período de elaboração da pesquisa.

Ao Prof. M.Sc. Toshiaki Takeya, pela atenção e orientação na fabricação e no ensaio dos dormentes. Ao Prof. Dr. Maximiliano Malite, pelo projeto da estrutura de protensão. Aos funcionários do Laboratório do Departamento de Engenharia de Estruturas, Amaury Ignácio da Silva, Jorge Luís Rodrigues Brabo, Eng<sup>o</sup> Dr. Luiz Vicente Vareda, Mário Botelho, Mauri Sérgio Dias Guillen, Valdir Carlos de Lucca, e aos estagiários João Domingos Pereira Filho, Reginaldo Luiz Guedes e Ricardo Jorge Miller, pelo auxílio na fabricação e no ensaio dos dormentes.

Ao Centro de Tecnologia - Engenharia de Sistemas e Ferroviária da UNICAMP, em especial ao Eng<sup>o</sup> Dr. Antonio Arlindo Guidetti Porto e aos Eng<sup>o</sup> Rodolfo Décio Ferreira e Mário Valter Albertini, que forneceram os meios necessários à execução de todos os ensaios dinâmicos.

Ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da UNESP - Bauru, pelo apoio. Aos professores e funcionários desse Departamento, em especial ao Prof. Dr. Rudney C. Queiroz, pelo incentivo e sugestão do tema.

À CAPES, pela concessão de bolsa PICD, e à FAPESP pelo auxílio financeiro à pesquisa.

Às empresas Belgo Mineira Bekaert Arames Finos Ltda, representada pelos Eng<sup>o</sup> Antonio Alexandre de Moraes e Eugênio Cauduro e pelo Prof. M.Sc. Marco Antonio Cárnio, Reax Indústria e Comércio Ltda, Ciminas S.A. e Pandrol Fixações Ltda, pelo auxílio e fornecimento gratuito de materiais.

Ao Prof. Newton de Oliveira Pinto Jr., do Departamento de Estruturas da UNICAMP, e ao Prof. William J. Venuti, do Departamento de Engenharia Civil da San Jose State University, pelas informações fornecidas e pelo estímulo.

À UNESP (Universidade Estadual Paulista), pelo afastamento concedido para o desenvolvimento do doutorado.

A todos que, embora aqui não citados, colaboraram para que este trabalho fosse realizado.

# SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS .....	i
LISTA DE SÍMBOLOS .....	i
RESUMO .....	iv
ABSTRACT .....	v

## Cap. 1 - INTRODUÇÃO

1.1 IMPORTÂNCIA DA PESQUISA .....	4
1.2 OBJETIVOS .....	6
1.3 CONTEÚDO DO TRABALHO .....	7

## Cap. 2 - DORMENTES DE CONCRETO

2.1 CLASSIFICAÇÃO DOS DORMENTES .....	9
2.2 BREVE HISTÓRICO .....	12
2.3 DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO NOS PRINCIPAIS PAÍSES .....	12
2.3.1 Inglaterra .....	13
2.3.2 Alemanha .....	13
2.3.3 França .....	14
2.3.4 Estados Unidos .....	15
2.4 OS PRIMEIROS MODELOS DE DORMENTES .....	19
2.4.1 Dormente Orion .....	20
2.4.2 Dormente Vagneux .....	21
2.4.3 Dormente Dow-Mac .....	21
2.4.4 Dormente Franki-Bagon .....	22
2.4.5 Dormente Stent .....	23
2.4.6 Dormente SNCF-VW .....	24
2.4.7 Dormente B 9 .....	25
2.4.8 Dormentes B 55 e B 58 .....	27
2.5 VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS DORMENTES DE CONCRETO .....	29

2.6	ALGUNS DOS ATUAIS MODELOS .....	31
2.6.1	Inglaterra .....	31
2.6.2	Alemanha .....	33
2.6.3	Estados Unidos .....	35
2.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO .....	38

### **Cap. 3 - TENSÕES E DEFORMAÇÕES NA VIA FERROVIÁRIA**

3.1	AÇÕES DOS VEÍCULOS NA VIA PERMANENTE .....	41
3.2	VIA LONGITUDINAL - TENSÕES DEVIDAS ÀS AÇÕES VERTICAIS .....	42
3.2.1	Método de ZIMMERMANN .....	44
3.2.2	Método de TALBOT .....	46
3.2.3	Método de TIMOSHENKO-SALLER-HANKER .....	48
3.3	VIA TRANSVERSAL - TENSÕES DEVIDAS ÀS AÇÕES VERTICAIS .....	50
3.4	VALORES ADOTADOS PARA O COEFICIENTE DE LASTRO .....	52
3.5	VALORES ADOTADOS PARA O MÓDULO DE VIA .....	53

### **Cap. 4 - CONCRETO COM FIBRAS DE AÇO**

4.1	INTRODUÇÃO .....	55
4.2	TIPOS DE FIBRAS .....	58
4.3	INTERFACE FIBRA-MATRIZ .....	59
4.4	INTERAÇÃO FIBRA-MATRIZ .....	60
4.5	EFICIÊNCIA DAS FIBRAS .....	62
4.6	FISSURAÇÃO MÚLTIPLA E TENACIDADE .....	64
4.7	COMPORTAMENTO À FLEXÃO .....	66
4.8	TRABALHABILIDADE .....	67
4.9	DETERMINAÇÃO DA TENACIDADE E DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO .....	68
4.9.1	ASTM C 1018 .....	69
4.9.2	JSCE - SF 4 .....	70
4.9.3	Proposição de BANTHIA & TROTTIER .....	71
4.10	FIBRAS DE AÇO .....	72
4.10.1	Tecnologia de Produção .....	73
4.10.2	Resistência à Compressão .....	74
4.10.3	Resistência à Tração .....	74
4.10.4	Resistência à Flexão .....	75
4.10.5	Fadiga .....	75
4.10.6	Impacto .....	77
4.10.7	Outras Características Resistentes .....	78

4.10.8 Durabilidade .....	78
4.10.9 Vigas de Concreto Protendido .....	79
4.10.10 Aplicações .....	79

## **Cap. 5 - ESTUDO DOS COMPÓSITOS**

5.1 MATERIAIS UTILIZADOS .....	81
5.1.1 Cimento .....	82
5.1.2 Aditivo Superplastificante .....	82
5.1.3 Agregados .....	82
5.2 DEFINIÇÃO DO TRAÇO DOS CONCRETOS .....	84
5.3 CARACTERÍSTICAS DOS COMPÓSITOS NO ESTADO FRESCO .....	92
5.4 CARACTERÍSTICAS DOS COMPÓSITOS NO ESTADO ENDURECIDO .....	94
5.4.1 Resistências Mecânicas .....	94
5.4.2 Tenacidade .....	97
5.5 CONCLUSÕES PARCIAIS .....	100

## **Cap. 6 - PROJETO DO DORMENTE**

6.1 PRINCIPAIS ESPECIFICAÇÕES DO MANUAL AREMA .....	113
6.1.1 Distribuição da Carga Vertical aos Dormentes .....	113
6.1.2 Fator de Impacto .....	114
6.1.3 Pressão no Lastro .....	114
6.1.4 Concreto .....	116
6.1.5 Momentos Fletores .....	116
6.2 PRINCIPAIS ESPECIFICAÇÕES DA NORMA CEN .....	118
6.2.1 Cargas .....	118
6.2.2 Momento Positivo na Seção Sob o Trilho .....	118
6.2.3 Concreto .....	121
6.3 RELAÇÃO ENTRE O MOMENTO RESISTENTE DO DORMENTE E O MOMENTO APLICADO .....	121
6.4 PROJETO DO DORMENTE .....	123
6.4.1 Força Vertical Dinâmica do Trilho no Dormente .....	123
6.4.1.1 Segundo a AREMA .....	124
6.4.1.2 Segundo a AREMA e ZIMMERMANN .....	124
6.4.1.3 Segundo a CEN .....	125
6.4.2 Momentos Fletores Solicitantes .....	125
6.4.2.1 Dormente com Largura da Base Constante .....	128
6.4.2.2 Dormente com Largura da Base Variável .....	130
6.4.2.3 Conforme a Equação Empírica da CEN .....	133

6.4.2.4 Comparação dos Momentos Fletores .....	135
6.4.3 Dimensionamento do Dormente .....	136
6.4.3.1 Determinação das Tensões em Serviço .....	138
6.4.3.2 Determinação da Armadura de Protensão .....	141
6.4.4 Pressão no Lastro .....	144
6.5 MODIFICAÇÕES NO PROJETO DO DORMENTE ORIGINAL .....	144
6.5.1 Primeira Modificação .....	145
6.5.2 Segunda Modificação .....	148
6.6 CONCLUSÕES PARCIAIS .....	150

## **Cap. 7 - FABRICAÇÃO DOS DORMENTES**

7.1 MOLDE METÁLICO .....	153
7.2 ESTRUTURA DE PROTENSÃO .....	156
7.3 ESTIRAMENTO DOS FIOS DE PROTENSÃO .....	159
7.4 PREPARATIVOS PARA A CONCRETAGEM .....	160
7.5 CONCRETAGEM .....	162
7.6 DESMOLDAGEM .....	166

## **Cap. 8 - ENSAIOS ESTÁTICOS E DINÂMICOS**

8.1 ENSAIOS PARA VERIFICAÇÃO DO PROJETO DO DORMENTE ORIGINAL	171
8.1.1 Momentos Positivo e Negativo na Seção Sob o Trilho .....	172
8.1.2 Momentos Positivo e Negativo no Centro do Dormente .....	174
8.1.3 Ancoragem da Armadura de Protensão e Momento Fletor Último .....	175
8.1.4 Carregamento Repetido - Fadiga .....	175
8.2 ENSAIOS ESTÁTICOS .....	177
8.2.1 Momento Positivo na Seção Sob o Trilho .....	177
8.2.1.1 Comportamento na Ruptura .....	180
8.2.1.2 Deslocamento Vertical .....	182
8.2.1.3 Escorregamento dos Fios de Protensão .....	185
8.2.1.4 Fissuração .....	188
8.2.1.5 Deformações .....	199
8.2.2 Momento Negativo no Centro .....	205
8.2.2.1 Comportamento na Ruptura .....	207
8.2.2.2 Deslocamento Vertical .....	208
8.2.2.3 Fissuração .....	209
8.2.2.4 Deformações .....	214
8.3 ENSAIOS DINÂMICOS .....	215
8.3.1 Fissuração .....	218

8.3.2 Deformações .....	222
8.4 ENSAIOS DE FADIGA .....	228
8.4.1 Cálculo da Variação de Tensão .....	228
8.4.2 Resultados dos Ensaios .....	230
8.4.3 Valores Teóricos da Variação de Tensão .....	233
8.5 CONCLUSÕES PARCIAIS .....	234

## **Cap. 9 - CONCLUSÕES**

9.1 RESULTADOS OBTIDOS .....	236
9.2 PESQUISAS FUTURAS .....	238
9.2.1 Fadiga em Dormente com Fibras .....	238
9.2.2 Análise de Dormente Bibloco com Fibras .....	240
9.2.3 Análise Dinâmica do Sistema Ombreira / Dormente com Fibras .....	240
9.2.4 Comprimento de Ancoragem de Fios e Cordoalhas em Concreto com Fibras .....	241
9.2.5 Formulação Teórica para Viga Protendida com Armadura Distribuída em Toda a Altura .....	242
9.2.6 Avaliação Experimental de Viga Protendida .....	242
9.2.7 Alinhamento de Fibras .....	243
9.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	243

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>245</b>
---	------------

<b>BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR .....</b>	<b>252</b>
--	------------



## LISTA DE ABREVIATURAS

AAR - *Association of American Railroads*  
ACI - *American Concrete Institute*  
AREMA - *American Railway Engineering and Maintenance Association*  
ASCE - *American Society of Civil Engineers*  
ASTM - *American Society for Testing and Materials*  
CEN - *Comité Européen de Normalisation*  
ERRI - *European Rail Research Institute*  
FIP - *Fédération Internationale de la Précontrainte*  
IPT - *Instituto de Pesquisas Tecnológicas*  
JSCE - *The Japan Society of Civil Engineers*  
ORE - *Office for Research and Experiments*  
PCA - *Portland Cement Association*  
SNCF - *Société Nationale de Chemins de Fer Français*  
UIC - *International Union of Railways*

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$  = relação agregado miúdo seco/cimento em massa; distância entre os eixos de dois dormentes adjacentes; distância do eixo do trilho à extremidade do dormente;  
 $a/c$  = relação água/cimento;  
 $A$  = área de apoio do dormente no lastro;  
 $\bar{A}$  = coeficiente de distribuição de carga;  
 $A_p$  = área de armadura de protensão;  
 $b$  = largura da seção retangular; largura da viga prismática;  
 $b_d$  = largura do dormente;  
 $b_v$  = largura da viga; largura equivalente do dormente;  
 $B$  = momento fletor positivo;  
 $C$  = coeficiente de lastro ou de Winkler; consumo de cimento por  $m^3$  de concreto;  
 $d$  = distância do eixo do trilho à extremidade do dormente; altura útil; diâmetro da fibra;

$d_p$  = altura da fibra mais comprimida ao centro de protensão;  
 $E$  = módulo de elasticidade ou módulo de deformação longitudinal;  
 $E_{pós,m}$  = energia pós-pico numa fração  $m$  do deslocamento vertical;  
 $EI$  = rigidez do trilho à flexão;  
 $f'_c$  = resistência do concreto à compressão;  
 $f_{ck}$  = resistência característica do concreto à compressão;  
 $f_c$  = resistência média à compressão;  
 $f_{ct,eq}$  = resistência equivalente à tração na flexão correspondente ao deslocamento de 3 mm;  
 $f_p$  = tensão na armadura de protensão na situação última;  
 $f_{ptk}$  = valor característico da resistência à tração do aço de protensão;  
 $f_{pyk}$  = valor característico da resistência de escoamento do aço de protensão;  
 $f_{pu}$  = resistência última do aço de protensão;  
 $f_u$  = resistência máxima à tração na flexão ou módulo de ruptura;  
 $f_t$  = resistência à tração por compressão diametral;  
 $f_o$  = resistência à tração na flexão na primeira fissura;  
 $F_{ti}$  = tensão limite de tração no concreto após a transferência da protensão;  
 $F_{ci}$  = tensão limite de compressão no concreto após a transferência da protensão;  
 $F_t$  = tensão limite de tração no concreto após todas as perdas;  
 $F_c$  = tensão limite de compressão no concreto após todas as perdas;  
 $FD$  = fator de distribuição;  
 $FI$  = fator de impacto;  
 $h$  = altura da viga prismática;  
 $I$  = índice de tenacidade; momento de inércia;  
 $K_1, K_2$  = fatores de impacto;  
 $L$  = comprimento do dormente; vão entre apoios de uma viga; comprimento da fibra;  
 $L_{ap}$  = comprimento de apoio do dormente no lastro;  
 $m$  = fração do vão  $L$ ; relação agregados secos/cimento em massa;  
 $M$  = momento fletor;  
 $M_{dr}$  = momento fletor positivo de projeto na seção sob o trilho;  
 $M_{dc}$  = momento fletor negativo de projeto na seção do centro;  
 $M_{exc}$  = momento fletor excepcional;  
 $p_m$  = pressão média do dormente no lastro;  
 $p$  = pressão de contato; relação agregado graúdo seco/cimento em massa;  
 $P$  = força sobre o dormente; força máxima; força do trilho no dormente;  
 $P_i$  = força de protensão inicial;  
 $P_j$  = força de estiramento dos fios de protensão ou força no macaco;  
 $PCS$  = resistência pós-fissura;

$q$  = carga ou reação vertical distribuída;

$Q = Q_N$  = força vertical da roda;

$Q_{din}$  = carga dinâmica da roda;

$R$  = fator residual de resistência;

$R_{e3}$  = fator de tenacidade correspondente ao deslocamento vertical de 3 mm;

$S_{din}$  = força dinâmica do trilho sobre o dormente;

$T$  = fator tonelagem;

$T_b$  = tenacidade na flexão;

$U$  = módulo de via;

$V$  = fator velocidade; velocidade; força cortante;

$V_f$  = volume de fibras;

$x$  = posição do deslocamento vertical do trilho;

$y$  = deslocamento vertical do trilho;

$w_p$  = índice de reforço;

$\delta_{tb}$  = flecha equivalente a  $L/150$ ;

$\sigma_b$  = resistência à tração na flexão;

$\delta_{pico}$  = flecha correspondente à força máxima;

$\tau$  = tensão de cisalhamento na interface fibra-matriz;

$\phi$  = coeficiente dinâmico;

$\chi$  = incremento dinâmico da reação do dormente no lastro devido às falhas de apoio;

$\psi_1$  ,  $\psi_2$  = incrementos dinâmicos devido a irregularidades no apoio longitudinal do dormente;

$\lambda$  = braço de alavanca;

$\lambda$  = fator entre o momento resistente do dormente e o momento estático aplicado;

$\sigma_{adm}$  = tensão admissível;

## RESUMO

BASTOS, P.S.S. *Análise experimental de dormentes de concreto protendido reforçados com fibras de aço*. São Carlos, 1999, 256p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Este trabalho descreve um dormente monobloco de concreto protendido, o qual foi projetado para atender as características de uma via ferroviária brasileira. O dormente apresentou comportamento e resistência semelhantes aos dormentes de concreto comumente fabricados em vários países. A fim de verificar e aprovar o projeto, o dormente foi submetido a ensaios estáticos e dinâmicos, segundo as especificações da norma americana AREMA. Verificado e aprovado o projeto, dezoito dormentes foram fabricados sem e com fibras de aço, no teor de  $60 \text{ kg/m}^3$  (aproximadamente 0,75 % por volume). Ensaios estáticos e dinâmicos foram realizados em dormentes com e sem fibras de aço, com o objetivo de quantificar o benefício das fibras de aço à resistência estrutural do dormente. As fibras aumentaram o momento fletor de primeira fissura e o momento último, aumentaram significativamente a força de início de escorregamento dos fios de protensão e reduziram o espaçamento e a abertura das fissuras. As fibras também acrescentaram grande ductilidade aos dormentes e diminuíram a tensão nos fios de protensão, nos estágios mais avançados do carregamento. Sob ação dinâmica, as fibras reduziram a tensão nos fios de protensão mais tracionados em aproximadamente 50%, o que elevou significativamente a resistência do dormente à fadiga. Dormentes fabricados com menor força de protensão apresentaram excelente comportamento plástico e grande ductilidade, especialmente o dormente com fibras.

Palavras-chave: dormente de concreto, dormente monobloco, projeto de dormente, concreto pré-moldado, concreto protendido, ferrovia, fibra de aço, fadiga, ensaio estático, ensaio dinâmico.

## ABSTRACT

BASTOS, P.S.S. *Resistance of steel fiber prestressed concrete sleepers to static and cyclic loading*. São Carlos, 1999, 256p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

This work describes a prestressed concrete monoblock railway sleeper designed according to a Brazilian railway track. The sleeper was tested according to the AREMA Specifications in order to verify the project. The sleeper presented a structural behavior similar to the concrete railway sleepers used worldwide. After the preliminary tests, eighteen sleepers were manufactured without and with steel fibers contents of 60 kg/cm<sup>3</sup> (about 0.75% by volume) and they were tested under static and dynamic loading to evaluate the fiber contribution on the resistance. Steel fibers increased the first crack and ultimate bending moments, reduced the deflection under ultimate load and increased significantly the slip force of the prestressing tendons. Reinforcing the sleeper with fibers also reduced the crack width and the spacing between cracks, adding higher ductility to the sleepers and decreasing the stress in the prestressing tendons under higher loads. The fibers increased significantly the fatigue strength under cyclic loading, decreasing the stress in the prestressing tendons in about 50%. The test results showed that sleepers manufactured with lower prestressed force have higher toughness, especially those reinforced with steel fibers.

Keywords: monoblock sleepers, concrete railroad tie, design sleeper, prestressed concrete, precast concrete, railway, steel fibers, flexural fatigue, static and dynamic tests.