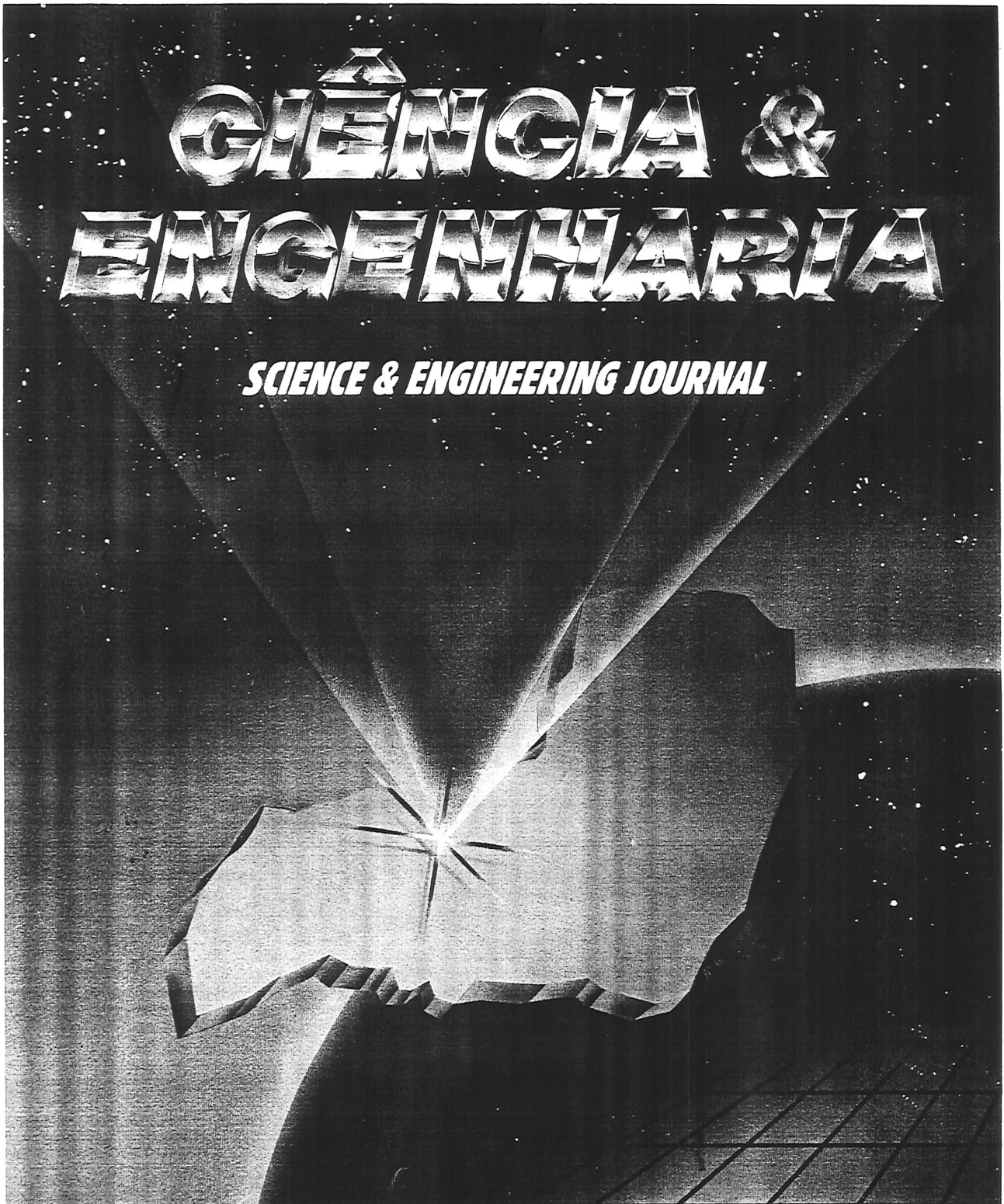


SET
01
08
02

ISSN 0103-944X
ANO 10 - NÚMERO 2 - JULHO/DEZEMBRO

REVISTA DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA

2001



268

CIÊNCIA & ENGENHARIA

Órgão oficial de divulgação tecnológica e científica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Reitor: *Arquimedes Diógenes Ciloni*

Vice-Reitor: *Antônio de Almeida*

Pró-Reitor de Planejamento e Administração: *Raquel Cristina Radamés de Sá*

Pró-Reitor de Graduação: *Vera Lucia Puga de Sousa*

Pró-Reitor de Pesquisa e Pós-Graduação: *Jomar Medeiros Cunha*

Pró-Reitor de Extensão, Assuntos Estudantis e Cultura: *Gabriel Humberto Munõz Palafox*

Pró-Reitora de Recursos Humanos: *Leila Bitar Moukachar Ramos*

COMISSÃO EDITORIAL

José Roberto Camacho (Editor)

Humberto Molinar Henrique e Sandra Terezinha de Farias Furtado (Editores associados)

Aristeu da Silveira Neto, Carlos Roberto Lopes, Célia Aparecida Zorzo Barcelos, Fabiano Chaves Silva, Leila Aparecida de Castro Motta e Noélio Dantas Oliveira.

EDITORAÇÃO

Alex Duarte Faria

REVISORES / UFU

Alberto Arnaldo Raslan, Álisson Rocha Machado, Antonio Pedro Clapis, Aristeu da Silveira Neto, Carlos Alberto Melo, Cleudmar Amaral Araújo, Darizon Alves de Andrade, Eloizio Júlio Ribeiro, Gesiel Cunha, Haroldo Rodrigues Azevedo, Helder Barbieri Lacerda, José Manoel Fernandes, José Roberto D. Finzer, Lucienne Lobato Romanielo, Luís Cláudio Oliveira Lopes, Marcelo Tavares, Marcio Bacci da Silva, Milton Itsuo Samesima, Raquel Santini Leandro Rade, Sinésio Domingues Franco.

REVISORES EXTERNOS

Carlos Osamu Hokka, José Teixeira Freire (UFSCar)

Enrique Luis Lima, Geraldo Lippel Sant'Ana, José Carlos Pinto, Marcelo Castier, Magali Christe Cammarota, Mauricio B. Souza Junior (UFRJ)

Claudio Melo, Hans Helmut Zurn (UFSC)

Flávio Augusto Sanzogo Fiorelli, José Roberto Cardoso (USP)

João Fernando Gomes de Oliveira, José Samuel Giongo (USP - São Carlos)

Amilton Sinatosa, Paulo Roberto do Lago Helene (EPUSP)

Anselmo Eduardo Diniz, Edson Bim, Theo Guenter Kieckbusch (UNICAMP)

Eduardo Bearzoti (UFLavras)

Luis Antonio Aguirre, Mario Fernando Montenegro Campos, Paulo F. Seixas, Paulo José Modenesi (UFMG)

Jesuvaldo Pereira Farias (UFC)

Célia Regina Granhen Tavares, Nehemias Curvelo Pereira (UEMaringá)

Carlos Roberto Camello Lima (UNIMEP)

Alvaro Luiz Mathias, Luiz Pereira Ramos (UFPR)

Flávio Teixeira da Silva (FAENQUIL)

José Vladimir de Oliveira (URI / RS)

Alexandre Dias da Silva, Cesar Ramos Rodrigues (UFSM)

Benedito Antonio Luciano (UFPB)

Gilberto C. D. Souza (UFES)

Osvaldo José Venturini (EFEI)

Nathan Mendes (PUC - PR)

Neville R. Watson (University Of Canterbury / New Zeland)

C569 CIÊNCIA & ENGENHARIA, Uberlândia, MG, Brasil, Universidade Federal de Uberlândia, nº 2, Ano 10, Julho/Dezembro 2001.

Indexed in: Engineering Information, Chemical Abstracts and Applied Mechanics Reviews



FADIGA EM DORMENTES DE CONCRETO REFORÇADOS COM FIBRAS DE AÇO

CONCRETE RAILROAD TIES REINFORCED WITH STEEL FIBERS TO FATIGUE LOADING

Paulo S. S. Bastos¹, Libânio M. Pinheiro²

¹Professor Assistente Doutor – UNESP - Dep. de Engenharia Civil, Bauru/SP.
pbastos@feb.unesp.br

²Professor Doutor – USP - Dep. de Engenharia de Estruturas, São Carlos/SP.
libanio@sc.usp.br

ABSTRACT

A prestressed concrete monoblock railroad tie was designed to attend the characteristics of a Brazilian railroad track with 1,600 mm gauge and 320 kN axle load. Concrete ties specimens were manufactured without and with steel fibers in a volume fraction of 60 kg/m³ (0.76 % by volume), and three different initial prestress forces. Static and fatigue tests were carried out on the ties. Static tests showed that steel fibers increase the first crack and ultimate bending moments, increase significantly the slip force of the prestressing tendons, reduce crack width, add higher ductility to the ties and decrease the stress in the prestressing tendons. Under dynamic loading the steel fibers decreased the stress in the prestressing tendons by about 50 %, which improved significantly the fatigue strength of the tie. A tie without fibers failed after only 150,000 cycles. However, a similar tie, with fibers, resisted 3,000,000 cycles without suffering fatigue failure.

Keywords: concrete tie, steel fibers, fatigue, prestressed concrete, precast concrete.

RESUMO

Um dormente monobloco de concreto protendido foi projetado para atender às características de uma via ferroviária brasileira, com bitola de 1.600 mm e carga de 320 kN por eixo. Protótipos foram fabricados sem e com fibras de aço, com teor de 60 kg/m³ (0,76 % por volume) e três diferentes graus de protensão. Foram executados ensaios estáticos e de fadiga. Os ensaios estáticos mostraram que as fibras de aço aumentam os momentos fletores de primeira fissura e último, aumentam significativamente a força de início de escorregamento dos fios de protensão, reduzem as aberturas das fissuras, acrescentam ductilidade aos dormentes e diminuem a tensão nos fios de protensão. Sob carregamento dinâmico, as fibras diminuíram a tensão nos fios de protensão em cerca de 50 %, o que melhorou significativamente a resistência do dormente à fadiga. Um dormente sem fibras rompeu após somente 150.000 ciclos, mas um dormente similar, com fibras, resistiu aos 3.000.000 de ciclos sem sofrer ruptura por fadiga.

Palavras-chave: dormente de concreto, fibras de aço, fadiga, concreto protendido, concreto pré-moldado.

1- INTRODUÇÃO

Como já é muito bem conhecido, os dormentes são submetidos a ações dinâmicas e altíssimas forças de impacto, decorrentes do movimento dos veículos sobre a via e imperfeições nas rodas, nos trilhos, nos veículos e na via.^{1,2,3} Além disso, em função do carregamento cíclico, os materiais que constituem o dormente são submetidos a intenso processo de fadiga. Os dormentes protendidos são projetados de modo a não apresentarem fissuras em serviço, pois se estas ocorrem, há um aumento de até 50 % no comprimento necessário para ancoragem. As tensões na armadura também aumentam, podendo causar ruptura por fadiga.¹

Fibras de aço podem ser adicionadas ao concreto para aumentar a absorção de energia (tenacidade), melhorar a resistência ao impacto e à fadiga, controlar a fissuração e melhorar a aderência da matriz à armadura.⁴ Estudos mostraram que a aplicação de fibras de aço nos dormentes de concreto melhorou enormemente o comportamento estrutural do dormente, resultando fissuras de menores

aberturas e aumentando a resistência à flexão e aos impactos.^{3,5,6} Dormentes de concreto reforçados com fibras de aço apresentaram significativo aumento da resistência à fadiga na flexão.⁷

Sob carregamento de impacto, dormentes com menor grau de protensão, acrescidos de fibras de aço, mostraram comportamento muito melhor do que o dormente original, sem fibras, e comportamento similar ao dormente com o grau de protensão normal e acrescido de fibras.³ Um menor grau de protensão no dormente resulta numa redução da sua rigidez à flexão dinâmica. Conseqüentemente, é menor a intensidade das forças de impacto sobre o dormente.

O propósito do estudo descrito aqui, o qual é parte de uma investigação sobre o comportamento de dormentes de concreto protendido sob carregamento estático e de fadiga,⁷ é investigar e quantificar o benefício das fibras de aço em dormentes de concreto, com três diferentes graus de protensão.

1253915
120802

SYSNO 1253915
PROD 000715

2 - PROGRAMA EXPERIMENTAL

Um dormente monobloco de concreto protendido foi projetado com características semelhantes às dos dormentes correntemente utilizados em outros países. Este dormente, chamado "normal", foi projetado para atender às características de uma via ferroviária brasileira (bitola de 1.600 mm, carga de 320 kN por eixo e velocidade de 100 km/h). Quatro protótipos deste dormente, dois com fibras e dois sem fibras, foram submetidos a ensaios estáticos e dinâmicos. Quatro outros dormentes, chamados "modificados", construídos com as mesmas dimensões, mas com a metade da armadura de protensão e dois graus de protensão menores do que o do dormente normal, foram também submetidos a ensaios estáticos e dinâmicos (fadiga aos três milhões de ciclos).

2.1. Dormente Protendido de Concreto

O dormente "normal" usado neste estudo foi submetido aos ensaios da AREMA² para a verificação do projeto, tendo sido considerado aprovado. Os momentos fletores de projeto do dormente normal na seção sob o trilho foram de 2.856 kN.cm (positivo) e 1.509 kN.cm (negativo), e na seção do centro, 1.786 kN.cm (negativo) e 1.304 kN.cm (positivo). A Figura 1 mostra as dimensões do dormente e a disposição da armadura de protensão na seção sob o trilho. A força de protensão inicial aplicada foi de 510 kN. A armadura foi composta por 16 fios CP 175 RB E, com diâmetro de 6,0 mm, f_{pk} de 1.750 MPa e f_{pyk} de 1.580 MPa. O dormente, com comprimento de 270 cm, apresentou massa de 326 kg.

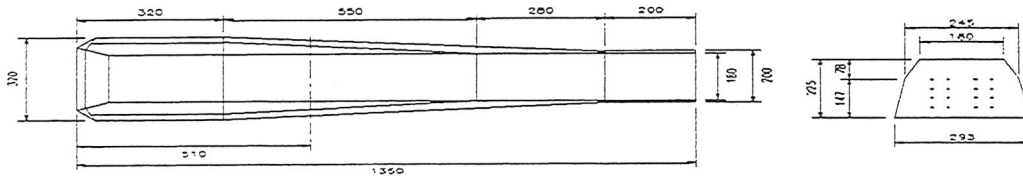


Figura 1. Dimensões (mm) e armadura de protensão do dormente.

Tabela 1. Propriedades físicas do concreto de controle e do compósito.

Propriedades	Concreto de controle	Compósito
Abatimento (mm)	60	35
Tempo de escoamento no tronco de cone invertido (s)*	20	35
Resistência do concreto à tração por compressão diametral (MPa)	4,33	5,55
Módulo de Ruptura (MPa)	7,24	9,41
Módulo de Deformação Longitudinal (MPa)	39.850	41.920

* altura de queda do concreto de 75 mm.

2.2. Materiais

O cimento utilizado foi o de alta resistência inicial. O agregado miúdo consistiu de areia natural e foi usado um agregado graúdo com dimensão máxima de 19 mm. Foi utilizado um aditivo superplastificante no concreto de controle e no compósito, na proporção de 0,6 % e 1,5 % da massa do cimento, respectivamente. O traço em massa adotado foi: 1:1,66:1,84:0,40. A fibra de aço aplicada foi a DRAMIX RC 80/60 BN (comprimento de 60 mm e diâmetro de 0,8 mm), com fator de forma igual a 75. As

resistências mecânicas das misturas foram obtidas em ensaios de corpos-de-prova cilíndricos de 15 cm x 30 cm e vigas prismáticas de 15 cm x 15 cm x 50 cm. Os ensaios de flexão foram realizados em conformidade com as normas JSCE SF-4⁸ e ASTM C 1018⁹. A Tabela 1 mostra algumas propriedades do concreto de controle e do compósito. As fibras de aço ocasionaram uma grande diminuição do abatimento. Porém, o compósito mostrou boa trabalhabilidade sob vibração. O compósito apresentou a resistência à flexão equivalente ($f_{ct,eq}$) de 8,25 MPa e os seguintes fatores de tenacidade:

$I_5 = 4,4$; $I_{10} = 8,8$; $I_{20} = 18,0$; $I_{30} = 28,0$; $I_{60} = 57,7$; $R_{20,30} = 100,2$; $R_{30,60} = 98,7$ e $R_{es} = 103,7$ %. Esses resultados indicam um compósito com excelentes características de tenacidade e comportamento muito próximo ou até superior ao elastoplástico perfeito.

2.3. Protótipos

A Tabela 2 mostra as características dos dormentes ensaiados, onde os números ímpares indicam os dormentes

Tabela 2. Características dos dormentes ensaiados.

Modelo	Fibras (kg/m ³)	F_i (kN)	A_{ps} (cm ²)	$f_{Aps,i}$	$f_{c,28}$ (MPa)	$f_{c,ens}$ (MPa)	V.T. (MPa)	% de f_{pu}
T1	0	510	4,53	$0,64 f_{ptk}$	66,8	73,6	150	8,5
T2	60	510	4,53	$0,64 f_{ptk}$	65,5	66,1	-	-
T3	0	510	4,53	$0,64 f_{ptk}$	66,0	71,2	-	-
T4	60	510	4,53	$0,64 f_{ptk}$	67,5	67,0	-	-
T5	0	250	2,26	$0,63 f_{ptk}$	65,3	60,5	265	15,1
T6	60	250	2,26	$0,63 f_{ptk}$	71,0	62,5	137	7,8
T7	0	300	2,26	$0,76 f_{ptk}$	68,3	64,3	210	12,0
T8	60	300	2,26	$0,76 f_{ptk}$	76,2	64,6	128	7,3

$f_{c,28}$ e $f_{c,ens}$ representam a resistência de dosagem do concreto à compressão, aos 28 dias e na data do ensaio, respectivamente. $f_{Aps,i}$ é a tensão inicial nos fios da armadura, produzida pela força de protensão inicial (F_i). V.T. é a variação de tensão (stress range) nos fios de protensão mais tracionados, calculada de acordo com as forças recomendadas pela AREMA² para o ensaio de fadiga - para os dormentes deste estudo, força mínima de 17,8 kN e força máxima de 1,1 P (222 kN). Usando o ACI 318,¹⁰ os dormentes normais (T1 a T4) foram classificados como superarmados, e os dormentes modificados (T5 a T8) como subarmados.

2.4. Ensaio Estático

O esquema adotado nos ensaios é mostrado na Figura 2, de acordo com as especificações da AREMA.² A carga foi aplicada por meio de um cilindro hidráulico acoplado a uma célula de carga, ambos com capacidade de 1.000 kN. A carga era aplicada com velocidade aproximada de 20 kN/min. Nos valores de força múltiplos de dez mantinha-se a força constante por cerca de três minutos, para verificação das fissuras e registro dos deslocamentos e deformações. Os deslocamentos foram medidos por meio de três LVDTs (Figura 2).

de controle, sem fibras. T1 a T4 são dormentes normais, ou seja, com força de protensão inicial (F_i) de 510 kN. T5 a T8 são dormentes modificados, ou seja, com força de protensão e armadura (A_{ps}) menores do que no dormente normal. T2, T4, T6 e T8 continham fibras de aço. Os modelos T5 a T8 tiveram a armadura de protensão diminuída para apenas oito fios, o que foi obtido com a retirada dos fios das duas camadas intermediárias.

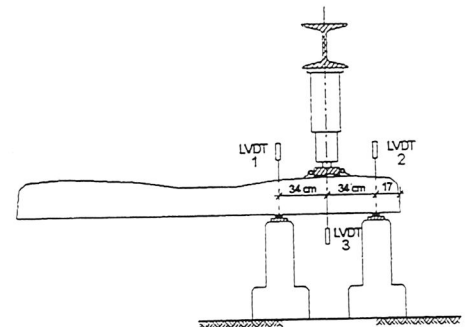
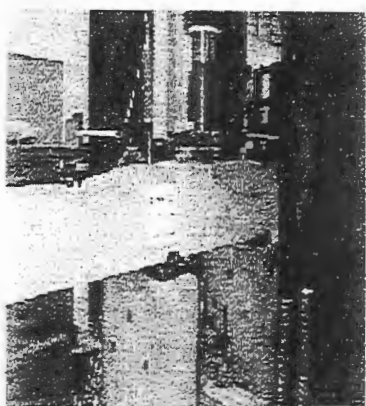


Figura 2. Esquema de apoios, carregamento e posição dos LVDT.

Para verificar o instante do escorregamento dos fios de protensão, foram instalados dois relógios na extremidade do dormente, posicionados em dois dos quatro fios da camada de armadura mais inferior. Para medida das deformações, a instrumentação consistiu de extensômetros colados nos fios de protensão e na superfície do concreto comprimido, posicionados na linha de ação do carregamento aplicado. A Figura 3 mostra um instante do ensaio estático.

Figura 3. Ensaio estático.



2.5. Ensaios Dinâmicos

Somente os modelos T3 e T4 foram submetidos aos ensaios dinâmicos, conforme descrito a seguir. O esquema de apoios foi igual àquele mostrado na Figura 2. A carga foi aplicada por uma máquina servo controlada, com capacidade de 400 kN. O modo de aplicação do carregamento seguiu aquele recomendado pela norma CEN.¹¹ As forças mínimas e máximas foram aplicadas em fases dinâmicas de 5.000 ciclos. Em cada nova fase fazia-se um acréscimo de 20 kN sobre a força máxima da fase anterior. A força mínima foi de 50 kN em todas as fases e o ensaio começou com a força máxima igual à força de projeto do dormente (202 kN). A força máxima na última fase foi de 380 kN, força esta um pouco inferior à máxima da máquina de ensaio utilizada. A frequência aplicada foi de 5 Hz. Após a última fase de ciclos dinâmicos, o total de ciclos alcançou o número de 50.000. As deformações e as aberturas das fissuras, no final de cada fase, foram medidas para diferentes valores de forças estáticas, começando com força nula e com as subseqüentes obtidas com incrementos de 50 kN, terminando com os valores correspondentes às forças máximas do ciclo recém concluído e do ciclo posterior.

Os ensaios de fadiga até 3.000.000 de ciclos foram feitos sobre os modelos T1 e T5 a T8, para investigar se as fibras de aço podem ser utilizadas nos dormentes de concreto, a fim de diminuir a força e a armadura de protensão. Isto pode levar a um dormente com menor rigidez à flexão dinâmica, o que é muito importante, pois um dormente mais flexível tem o seu comportamento melhorado sob carregamento de impacto.³

Os ensaios de fadiga foram feitos de acordo com a AREMA,² com cada ciclo variando uniformemente de 17,8 kN a 1,1 P (222 kN). A Figura 4 mostra um instante deste ensaio.

3- RESULTADOS DOS ENSAIOS ESTÁTICOS

3.1. Comportamento na Ruptura

A ruptura dos dormentes normais T1 e T2 ocorreu por esmagamento do concreto comprimido, sem o escoamento da armadura de protensão. O dormente sem fibras rompeu de forma explosiva e violenta, já o dormente com fibras rompeu de forma lenta e gradual. Os dormentes modificados T5, T6 e T8 romperam de forma lenta e não explosiva, e com escoamento da armadura. A ruptura do dormente modificado T7 ocorreu com o rompimento dos fios de protensão.

3.2. Deslocamento Vertical

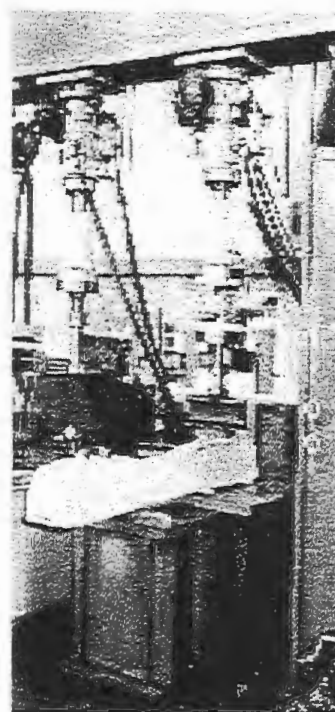


Figura 4. Ensaio de fadiga.

A Figura 5 apresenta o diagrama força x deslocamento vertical. Comparando os dormentes T1 com T2, T5 com T6 e T7 com T8, verifica-se que as fibras aumentaram a força última e proporcionaram um significativo ganho de capacidade de absorção de energia (tenacidade) pós força última. Os dormentes com menor força de protensão (T5 a T8) apresentaram significativa redução na força última. Entretanto, eles apresentaram excelente comportamento plástico, principalmente aqueles com fibras. O dormente T8 teve seu teste interrompido por ter ocorrido ruptura de uma mangueira de óleo.

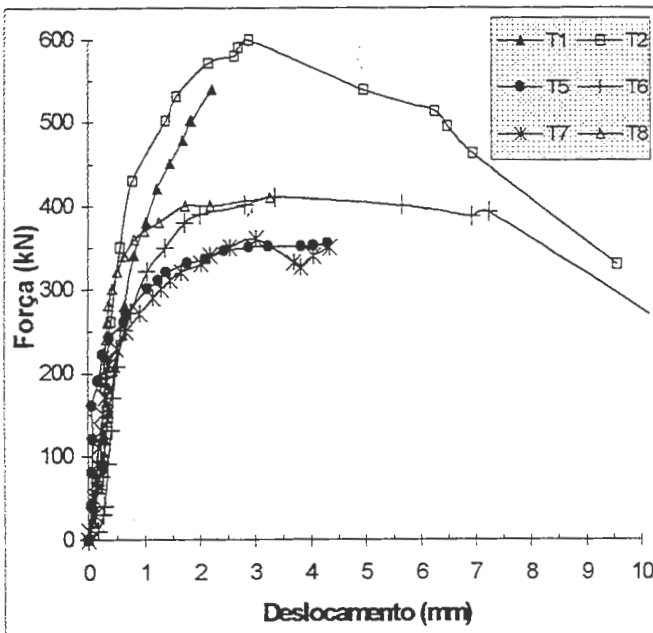


Figura 5. Deslocamento vertical dos dormentes sob carregamento estático.

Tabela 3 - Força (kN) de início de escorregamento dos fios de protensão.

Fio	Modelo					
	T1	T2	T5	T6	T7	T8
1	300	501	260	300	240	350
2	313	480	260	380	230	350

Tabela 4 - Forças (kN) e momentos fletores (kN.cm) correspondentes às aberturas de fissuras.

Modelo	Primeira Fissura	$F_{0,10}$	$F_{0,15}$	$F_{0,20}$	$F_{0,30}$	$F_{0,50}$	F_u
T1	300	320	350	370	390	430	520
	4125	4400	4813	5088	5363	5913	7150
T2	360	400	420	440	460	500	580
	4950	5500	5775	6050	6325	6875	7975
T5	190	210	220	230	250	270	340
	2613	2888	3025	3163	3438	3713	4675
T6	220	250	270	310	340	370	400
	3025	3438	3713	4263	4675	5088	5500
T7	200	220	240	250	270	280	360
	2750	3025	3300	3438	3713	3850	4950
T8	260	270	290	310	330	360	410
	3575	3713	3988	4363	4538	4950	5638

Como mostra a análise da Tabela 4, o dormente modificado T5 (sem fibras e com a menor força de protensão inicial) foi o que apresentou os piores resultados, refletindo a grande influência da força de protensão sobre os momentos fletores de primeira fissura e último e sobre as

3.3. Escorregamento dos Fios de Protensão

A Tabela 3 mostra as forças medidas no início do escorregamento de dois fios de protensão. Como as fibras diminuem as quantidades de microfissuras no concreto, os dormentes com fibras (T2, T6 e T8) apresentaram um grande aumento na força de escorregamento. Como a ancoragem dos fios de protensão por aderência é um problema delicado nos dormentes, este melhoramento fornecido pelas fibras é muito importante.

3.4. Fissuração

Os dormentes sem fibras romperam com uma ou duas fissuras, mas aqueles com fibras romperam com quatro ou cinco fissuras. A Tabela 4 apresenta a força última e as forças correspondentes à primeira fissura e às aberturas de 0,10 mm, 0,15 mm, 0,20 mm, 0,30 mm e 0,50 mm. Como primeira fissura foi definida aquela com abertura de 0,05 mm que surgiu e tornou-se visível. Os valores posicionados abaixo das forças são os momentos fletores correspondentes.

aberturas das fissuras. O uso de fibras levou à diminuição das aberturas das fissuras.

Os aumentos dos momentos fletores na primeira fissura, de 20 %, 16 % e 30 % para os dormentes T1-T2, T5-T6 e T7-T8, respectivamente,

representam um ganho muito importante proporcionado pelas fibras ao dormente. Por uma questão de durabilidade e principalmente para evitar a ruptura por fadiga, é regra em todos os países do mundo projetar o dormente de modo a ele não fissurar em serviço na via. Assim, é desejável aumentar o momento de primeira fissura, sem no entanto aumentar a rigidez do dormente à flexão. Um maior momento fletor de primeira fissura possibilita diminuir a altura da seção sob o trilho. Aliada à diminuição da força de protensão, esta é também uma excelente solução para diminuir a intensidade das forças máximas de impacto no dormente.³

3.5. Deformações

As Figuras 6 a 10 mostram as deformações nos fios de protensão mais tracionados e na superfície comprimida dos dormentes, em função das forças aplicadas. Nos dormentes normais T1 e T2, superarmados, a armadura de protensão não iniciou o escoamento. Entretanto, nos dormentes modificados T5 a T8, subarmados, a armadura alcançou o escoamento. Após a fissuração inicial as fibras passaram a suportar uma parcela das tensões de tração, o que refletiu em menores deformações nos fios de protensão. Ao contrário do ocorrido nos dormentes normais, nos dormentes modificados as fibras contribuíram diminuindo a deformação no concreto comprimido, principalmente nos estágios superiores à força de serviço do dormente (202 kN). A deformação última alcançou os valores de 2,5 mm/m a 3,0 mm/m.

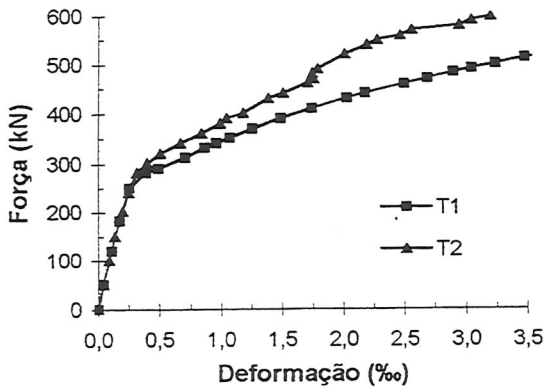


Figura 6. Deformação nos fios de protensão mais tracionados dos dormentes T1 e T2.

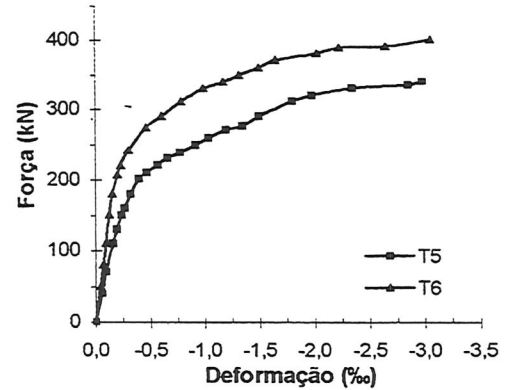


Figura 7. Deformação no concreto comprimido dos dormentes T5 e T6.

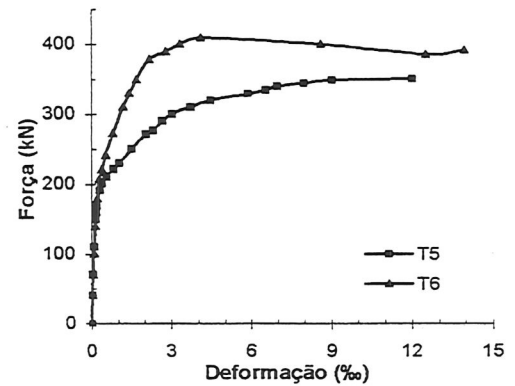


Figura 8. Deformação nos fios de protensão mais tracionados dos dormentes T5 e T6.

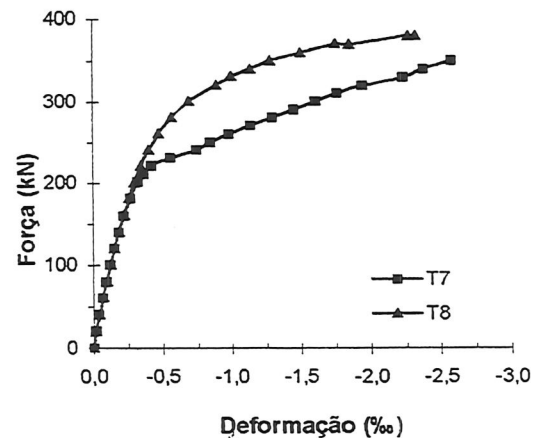


Figura 9. Deformação no concreto comprimido dos dormentes T7 e T8.

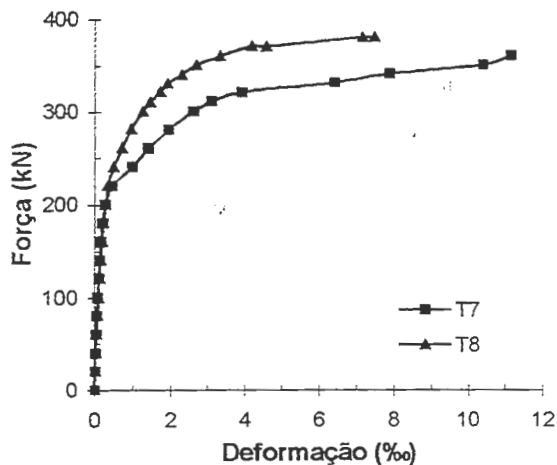


Figura 10. Deformação nos fios de protensão mais tracionados dos dormentes T7 e T8.

4- RESULTADOS DOS ENSAIOS DINÂMICOS

4.1. Fissuração

A Tabela 5 apresenta a evolução da fissuração nos dormentes normais T3 e T4 em função do número de ciclos; o valor superior é a força e o inferior é o número de ciclos transcorridos até o instante da medição. As fibras de aço exerceram uma grande ou importante influência sobre as aberturas das fissuras. O dormente sem fibras T3 apresentou a primeira fissura após transcorridos 15.000 ciclos de carga, sob a força estática de 260 kN. Já no dormente com fibras T4 a primeira fissura surgiu somente após 35.000 ciclos, sob uma força consideravelmente maior, de 340 kN. Após transcorrido o número total de ciclos aplicados (50.000), o dormente sem fibras T3 mostrou, sob a atuação da força estática de 380 kN, abertura máxima de fissura de 0,5 mm. O dormente com fibras T4, sob as mesmas condições, mostrou a abertura máxima de 0,15 mm.

Tabela 5.- Força (kN) e número de ciclos dinâmicos correspondentes às aberturas das fissuras.

Modelo	Primeira Fissura	$F_{0,10}$	$F_{0,15}$	$F_{0,20}$	$F_{0,25}$	$F_{0,50}$
T3	260 15.000	270 20.000	280 25.000	320 30.000	320 35.000	380 50.000
T4	340 35.000	360 45.000	380 50.000	-	-	-

4.2. Deformações

As Figuras 11 e 12 apresentam a evolução da deformação nos fios de protensão tracionados, em função do número de ciclos. Após a primeira fissura no dormente sem fibras T3, houve um forte acréscimo na deformação dos fios. A partir de 15.000 ciclos o dormente com fibras T4 passou a apresentar significativa redução de deformação nos fios em relação ao dormente sem fibras T3. Com 20.000 ciclos, por exemplo, a deformação nos fios do dormente sem fibras foi 0,8 mm/m e no dormente com fibras foi apenas 0,3 mm/m. Transcorridos 50.000 ciclos, a deformação nos fios do dormente sem fibras alcançou 2,25 mm/m, enquanto que no dormente com fibras a deformação foi apenas 1,08 mm/m.

Nota: Dois outros dormentes normais, um com fibras e outro sem fibras, foram também ensaiados sob carregamento com amplitude constante, até 360.000 ciclos.⁷ Os resultados foram similares àqueles mostrados anteriormente.

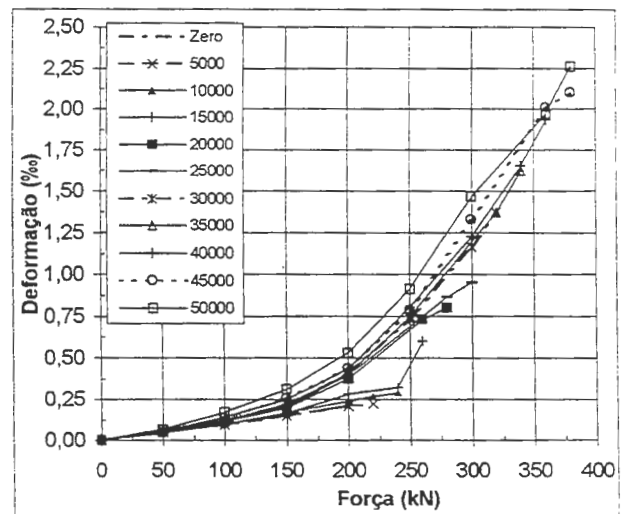


Figura 11. Deformação nos fios tracionados do dormente sem fibras T3.

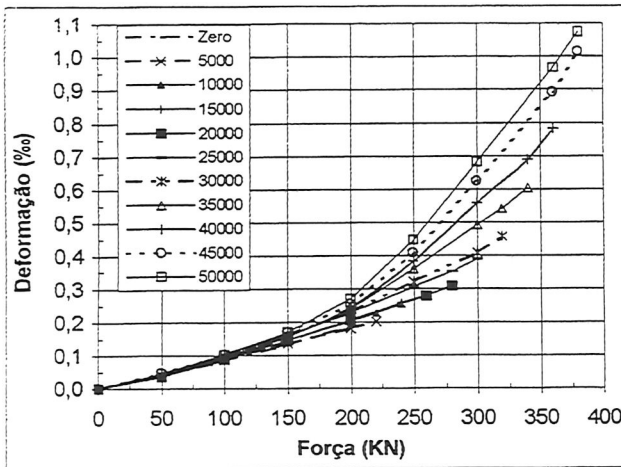


Figura 12. Deformação nos fios tracionados do dormente com fibras T4.

4.3. Fadiga

O dormente normal sem fibras T1 apresentou variação de tensão de 150 MPa ou 8,5 % de f_{ptk} . Este valor é menor que a variação máxima recomendada pelo ACI C.215¹² – 12 % de f_{ptk} . Tais valores levaram o dormente a não apresentar qualquer problema no ensaio de fadiga, suportando muito bem o carregamento cíclico. Após terminado o ensaio, nenhuma fissura mostrou-se visível, o que significa que a fissura estrutural previamente provocada (conforme exigência da AREMA²), fechou-se completamente pelo efeito da alta força inicial de protensão (510 kN).

Submetido ao mesmo ensaio de fadiga, o dormente modificado sem fibras T5 suportou apenas 150.000 ciclos. Isto demonstrou que a variação de tensão de 265 MPa ou 15,1 % de f_{ptk} foi excessiva, o que resultou na ruptura prematura dos fios de protensão. Após a ruptura de alguns fios, a linha neutra se elevou, diminuindo a altura da zona comprimida de concreto. Conseqüente-mente, o dormente rompeu após o completo esmagamento do concreto comprimido. A Figura 13 mostra o estado final do dormente após a ruptura.

O dormente T6, semelhante ao T5, mas com fibras, por causa da ação das fibras de aço, apresentou variação de tensão de 137 MPa ou 7,8 % de f_{ptk} . Tal valor é menor que o máximo recomendado pelo ACI C.215¹² e também muito inferior ao apresentado pelo dormente T5. Com esses valores, a resistência do dormente T6 à fadiga resultou significativamente maior que a resistência do dormente T5. Assim, o dormente suportou com sucesso o ensaio, resistindo aos três milhões de ciclos. A Figura 13 mostra o estado do dormente T6 após os três milhões de ciclos; terminado o ensaio e sem carga aplicada, uma única fissura mostrou-se visível, com abertura de 0,16 mm.

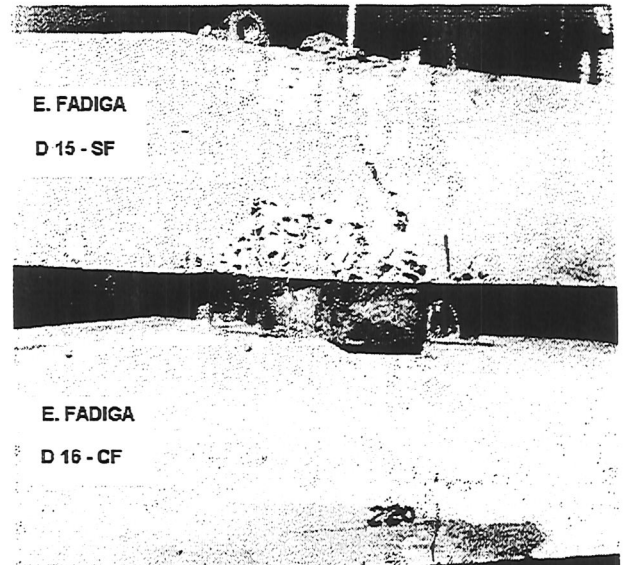


Figura 13. Configuração final dos dormentes T5 e T6 após o término do ensaio de fadiga.

O dormente modificado sem fibras T7, com força de protensão inicial 50 kN maior que a mesma força dos dormentes T5 e T6, apresentou variação de tensão nos fios igual a 210 MPa. É importante notar que esta variação é igual à máxima recomendada pelo ACI C.215¹² de 12 % de f_{ptk} . No ensaio à fadiga da AREMA² este dormente suportou com sucesso os três milhões de ciclos. Tal resultado, embora único, é expressivo e demonstra que a variação de tensão limite indicada pelo ACI C.215¹² pode ser considerada adequada a dormentes com condições semelhantes. Após terminado o ensaio e sem carga aplicada, uma única fissura mostrou-se visível, com abertura de 0,10 mm (ver Figura 14).

O dormente modificado T8, semelhante ao T7, mas com fibras, com variação de tensão igual a 7,3 % de f_{pu} , levemente inferior à variação do dormente T6, também suportou com sucesso os três milhões de ciclos do ensaio. Tal resultado era, aliás, de se esperar, dada a contribuição das fibras em aumentar a resistência deste dormente à fadiga. Terminado o ensaio e sem carga aplicada, a abertura da única fissura existente foi de 0,07 mm (ver Figura 14).

Em ensaio estático executado após o dormente T8 ter passado pelos três milhões de ciclos dinâmicos, a força de ruptura foi de 410 kN. É interessante observar que esta força foi idêntica à obtida no ensaio estático, sem o dormente ter passado pelo ensaio de fadiga (ver Tabela 4).

Se comparadas as aberturas das fissuras residuais existentes após os ensaios dos dormentes

modificados, nota-se que o dormente com fibras T6 foi o que apresentou a maior abertura, e o dormente com fibras T8 foi o que obteve o melhor resultado. A menor abertura nos dormentes T7 e T8 se deve à maior força de protensão inicial, de 300 kN, contra 250 kN no dormente T6.

A AREMA² não faz restrições quanto à existência de fissuras no dormente, após decorridos os três milhões de ciclos do ensaio de fadiga. Ela apenas impõe que, terminados os ciclos, o dormente tem que suportar uma força estática igual à força de projeto, acrescida em 10 % (1,1 P). Isso significa que, além do dormente normal T1, os dormentes modificados T6, T7 e T8 também foram aprovados no ensaio de fadiga.

Comparando os dormentes modificados T6 e T8 com o dormente normal T1, esses dormentes, em função do uso de fibras de aço, puderam ter a força e a armadura de protensão muito menores. Como já comentado, isto é muito importante para os dormentes, desde que um dormente com menor força de protensão tem sua rigidez à flexão dinâmica diminuída, o que é essencial para diminuir a magnitude das forças de impacto.³

Em continuidade a esta pesquisa, é necessário executar ensaios de impacto sobre os dormentes, de modo a confirmar e melhor analisar as propriedades dinâmicas dos dormentes de concreto reforçados com fibras de aço.

5 - CONCLUSÕES

As principais conclusões são:

1. As fibras de aço modificam o modo de ruptura dos dormentes, de frágil para dúctil. Dormentes com fibras mostraram significativo ganho de tenacidade, o que aumenta a resistência dos dormentes aos impactos.
2. A força necessária para iniciar o escorregamento dos fios de protensão é significativamente aumentada pelas fibras de aço. Dormentes de concreto com fibras podem ser projetados com menores comprimentos.
3. As fibras de aço aumentaram o momento de primeira fissura de 16 % a 30 %. O momento fletor último aumentou de 12 % a 18 %. O maior momento fletor de primeira fissura permite projetar dormentes com menores forças e armaduras de protensão.
4. A menor fissuração nos dormentes com fibras é melhor avaliada nos ensaios dinâmicos do que nos ensaios estáticos.
5. Sob carregamento dinâmico, as fibras diminuíram em 50 % a tensão nos fios de protensão mais tracionados, o que melhora significativamente o comportamento do dormente à fadiga.
6. A introdução de fibras de aço permite projetar dormentes com menores forças de protensão, o que melhora a ductilidade, reduz a rigidez à flexão e a

magnitude das forças de impacto. Desse modo, um dormente com fibras de aço poderia ser projetado com um fator de impacto menor que 200 %, fator este recomendado pela AREMA² para dormentes sem fibras.

7. A variação de tensão de 12 % de f_{pk} indicada pelo ACI C.215¹² pode ser considerada adequada para os dormentes sem fibras.
8. Como as fibras suportam uma parte das tensões de tração, a tensão de projeto na armadura de protensão deve ser adotada como a máxima permitida pelas normas.

6 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), pelo auxílio financeiro à pesquisa, à CAPES (Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão de bolsa PICD, e às empresas Belgo Mineira Bekaert Arames Finos Ltda, Reax Indústria e Comércio Ltda e Pandrol Fixações Ltda, pelo fornecimento gratuito de materiais. Agradecimentos também ao Centro de Tecnologia da UNICAMP, pela realização dos ensaios dinâmicos e de fadiga dos dormentes.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. FÉDÉRATION INTERNATIONALE DE LA PRÉCONTRAÎTE. (1987). *Concrete railway sleepers - State-of-art report*. FIP, London, Thomas Telford Ltd., 22p.
- [2]. AMERICAN RAILWAY ENGINEERING AND MAINTENANCE-OF-WAY ASSOCIATION. (1997). *Manual for railway engineering - Concrete ties*. AREMA, v.2, cap.10, 54p.
- [3]. WANG, N. (1996). *Resistance of concrete railroad ties to impact loading*. Vancouver, Tese (Doutorado), Department of Civil Engineering, The University of British Columbia - UBC, 248p.
- [4]. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. (1988). Committee 544. *Design considerations for steel fiber reinforced concrete* (ACI 544.4R-88), 18p.
- [5]. VENUTI, W.J. (1990). *Report on static properties of prestressed concrete ties with fibres*. Association of American Railroads Research and Test Department.
- [6]. MINDESS, S.; YAN, C.; VENUTI, W.J. (1991). *Impact resistance of prestressed concrete railroad sleepers*. Proceedings of International Symposium on Precast Concrete Railway Sleepers, Madrid, p.487-504.
- [7]. BASTOS, P.S.S. (1999). *Análise experimental de dormentes de concreto protendido reforçados com fibras de aço*. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas, 256p.
- [8]. JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. (1984).

Method of tests for flexural toughness of steel fiber reinforced concrete. JSCE - SF 4, Concrete Library of JSCE, Part III-2 - Method of tests for steel fiber reinforced concrete, n.3, June, p.58-61.

[9].AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (1994). *Standard test method for flexural toughness and first crack strength of fiber reinforced concrete.* ASTM C 1018, Book of ASTM Standards, Part 04.02, 8p.

[10].AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. (1995). *Building code requirements for structural concrete* (ACI 318-95). 369p.

[11].COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. (1996). *Railway applications - track - concrete sleepers and bearers*, CEN, Part 2.1 - Prestressed Monoblock Sleepers, Brussels, 20p.

[12].AMERICAN- CONCRETE INSTITUTE. (1974). Committee 215. *Considerations for design of concrete structures subjected to fatigue loading.* (ACI C.215). ACI Journal, March. p.97-121.