



## **Dimensionamento e simulação computacional de esforços mecânicos de dormentes de concreto protendido com e sem adição de fibras de aço**

**Aline de Sousa Ferreira<sup>1</sup>**

**Letícia Mesquita Silva<sup>2</sup>**

**Tânia Nogueira Fonseca Souza<sup>3</sup>**

Este trabalho descreve o dimensionamento de dormentes de concreto protendido com e sem adição de fibras de aço e a simulação computacional dos esforços que agem sobre os mesmos. Com o objetivo de projetar o dormente em conformidade com as especificações das normas ABNT – NBR 11709/15 e da empresa Valec, considerou-se para o estudo, esforços estáticos e dinâmicos. Foram simulados dois dormentes através do software ANSYS 14.5 de forma a comparar os possíveis benefícios das fibras Dramix RC 80/60 BN no dormente. Busca-se verificar a viabilidade da utilização e a resposta do componente quando em condições de serviço. Para cargas estáticas, a simulação mostrou pontos de alta concentração de tensão em ambos os dormentes. Quando comparado ao dormente com fibras de aço, constata-se que, não houve benefícios para a peça, tanto para distribuição de tensões quanto para deformação. Na simulação dinâmica, quando analisada a fadiga, o dormente sem fibras resistiu a 31 ciclos completos de tensão sem fissurar, contra 9234 ciclos do dormente com adição de fibras. Conclui-se que a adição de fibras de aço pode proporcionar um elevado aumento da vida útil da peça, por agirem como ponte de transferência de tensões.

**Palavras-chave:** Dimensionamento. Dormente. Fibras. Simulação.

1. Engenharia Civil, bacharela, Universidade de Itaúna, alinedesousa25@gmail.com
2. Engenharia Civil, bacharela, Universidade de Itaúna, leticiamesquitaengcivil@gmail.com
3. Engenharia Mecânica, doutora, Universidade de Itaúna, tnfsousa@gmail.com

### **1. Introdução**

O Brasil é caracterizado pela sua grande dimensão territorial, sendo o maior país da América do Sul e o quinto maior do mundo em área territorial (MAIA, 2012). Neste contexto, o transporte é o principal responsável pelo desenvolvimento do país, da sociedade e da economia.

Atualmente, o sistema ferroviário apresenta um cenário evolutivo favorável e com esse panorama atual, a escolha dos materiais a serem empregados tanto na ampliação das vias, quanto na manutenção das existentes torna-se essencial para garantir a qualidade da via, aumentar a confiabilidade do modal, diminuir reposições e manutenções e gerar economia.

O dormente, material constituinte da superestrutura ferroviária, projetado para suportar as cargas solicitantes e transferi-las para o lastro, é um dos elementos mais importantes constituintes da via permanente.



Desde sua criação, a malha ferroviária brasileira utiliza dormentes de madeira, porém, a escassez e o respeito ao meio ambiente, levaram as concessionárias a estudarem e testarem outros materiais a serem utilizados como dormentes.

Como alternativa a substituição de dormentes de madeira, propõe-se o uso do dormente de concreto protendido, pois o mesmo apresenta qualidade estrutural superior, melhor estabilidade, alto desempenho e reduzida manutenção, quando comparado aos outros tipos.

Como os dormentes são sujeitos a carregamentos cíclicos durante toda sua vida útil, os materiais que o constituem são submetidos a intenso processo de fadiga. Por isso, o dormente não poderá apresentar fissuras sob o carregamento dinâmico, uma vez que se isso ocorre, há um grande aumento de tensões na armadura de protensão.

Surgiram então novas possibilidades tecnológicas como os concretos reforçados com fibras, que tem como finalidade principal aumentar a absorção de energia (tenacidade), melhorar a resistência ao impacto e à fadiga e controlar a fissuração.

## 2. Metodologia

A pesquisa realizada estuda a via ferroviária brasileira e seus componentes, aprofunda o estudo em dormentes de concreto protendido e a adição de fibras ao seu compósito. Com a finalidade de realizar um projeto de dormente adequado às vias brasileiras, tendo como base a NBR 11709/15 - Dormente de concreto — Projeto, materiais e componentes, determinar a fibra a ser utilizada e, como principal objetivo, comparar e verificar a influência das fibras no que tange a tenacidade e a resistência a fadiga, sendo utilizada a simulação computacional com o software ANSYS 14.5.

Levando em consideração as disposições normativas da Valec e da NBR 11709/15 adotou-se para o dimensionamento do dormente em estudo, parâmetros para um projeto com medidas mínimas exigidas, a fim de verificar seu comportamento perante os carregamentos solicitados e suas possíveis alterações quando adicionadas fibras de aço ao componente.

### 2.1 Escolha do dormente em estudo

A experiência tem indicado que a aplicação de dormentes de concreto resulta em vias de qualidade estrutural superior, de melhor estabilidade e desempenho e reduzida manutenção (BASTOS, 1999).

A escolha do dormente em estudo se deu, além de suas vantagens e desempenhos estudados, à sua larga utilização pela Valec Engenharia, Construções e Ferrovias S.A., empresa pública vinculada ao Ministério dos Transportes.

### 2.2 Problemática

Como os dormentes são sujeitos a carregamentos cíclicos e altas forças de impacto durante toda a sua vida útil, é desejável que os mesmos apresentem condições de trabalho que façam com que eles sejam uma alternativa para a substituição dos dormentes de madeira.

Pode-se associar a reduzida capacidade de resistência à tração do concreto à sua grande dificuldade em interromper a propagação de fissuras. Assim, caracterizando-se como um material frágil, onde sob o carregamento acima citado a propagação de fissuras ocorre de forma rápida e brusca, o concreto protendido somente não demonstra as características ideais para um dormente.



Para diminuir a deficiência dos materiais cimentícios a adição de fibras ao concreto proporciona a este elemento maior ductilidade, ganho de tenacidade e aumento da durabilidade, dentre outras vantagens. Estas características conferem concreto protendido com adição de fibras um desempenho similar ao desejado em condições ideais de aplicação como dormente.

Retardar o início ou inibir o crescimento das microfissuras é então o principal foco quando aplicado as fibras de aço randomicamente dispersas na matriz do concreto.

A partir do estudo do comportamento estrutural de dormente monobloco de concreto protendido e de dormente monobloco de concreto protendido com adição de fibras de aço, através simulação em software de análise estrutural, submetidos a carregamentos cíclicos de modo a simular a passagem das composições ferroviárias, podemos comparar seus desempenhos e descrever suas atuações perante o carregamento solicitado. Podendo assim, concluir também sobre a influência da adição de fibras de aço neste elemento.

### 2.3 Características gerais adotadas para projeto

De acordo com o Normativo Técnico da Valec Engenharia, Construções e Ferrovias S.A. e da NBR 11709/15. Adotaram-se os seguintes parâmetros para o dimensionamento do dormente:

- a) Resistência a compressão do concreto – 45 MPa;
- b) Bitola larga (1,60 m);
- c) Velocidade máxima de projeto - 80 km/h;
- d) Velocidade operacional - 60 km/h;
- e) Trilho - TR 57, padrão AREMA;
- f) Cobertura da armação - 30 mm na região superior e 40 mm nas demais partes;
- g) Sistema de protensão - Armadura ativa pré-tracionada;
- h) Cabos de protensão - CP 175 RB E ( $\varnothing$  5 mm);
- i) Não possui armadura transversal;
- j) Superfície de apoio do trilho - Plana e lisa;
- k) Trem tipo – TB - 320 (kN);
- l) Carga por eixo - 480 kN;
- m) Volume aproximado do dormente - 0,128 m<sup>3</sup>;
- n) Peso aproximado do dormente -  $0,128 * 2400 \text{ kg/m}^3 = 307 \text{ kg}$ .

O ANEXO A demonstra o projeto do dormente, nas condições geométricas adotadas.

### 2.4 Processo de protensão

Considerou-se que o processo de protensão ocorreu com armadura ativa pré-tracionada por ser este o processo com maior utilização na fabricação de dormentes de concreto protendido.

A força máxima aplicada à armadura de protensão pelo equipamento de tração ( $P_i$ ) foi



considerada como sendo de 250 kN.

Assim, conforme Bastos (1999) a força de estiramento dos fios de protensão ou força no macaco ( $P_j$ ) dada em kN, pode ser calculada pela seguinte equação:

$$P_j = P_i * x \quad (1)$$

$x$  são as perdas iniciais por relaxação da armadura e por deformação imediata do dormente, sendo utilizado um valor referencial de 6%. Portanto o valor de  $P_j$  será de 265 kN.

## 2.5 Armadura ativa

De acordo com Valec (2016) o fio de aço para protensão deve ser de alta resistência e estabilizado, para garantir uma relaxação baixa (RB), devendo possuir características mínimas correspondentes às categorias CP 170 RB E ou CP 175 RB E, estabelecidas na norma NBR 7482, da ABNT.

Devido à possibilidade de utilização de armadura de diâmetros menores, o cabo de protensão escolhido foi o correspondente a categoria CP 175 RB E. A FIGURA 1 mostra em destaque a curva tensão x deformação do cabo escolhido.

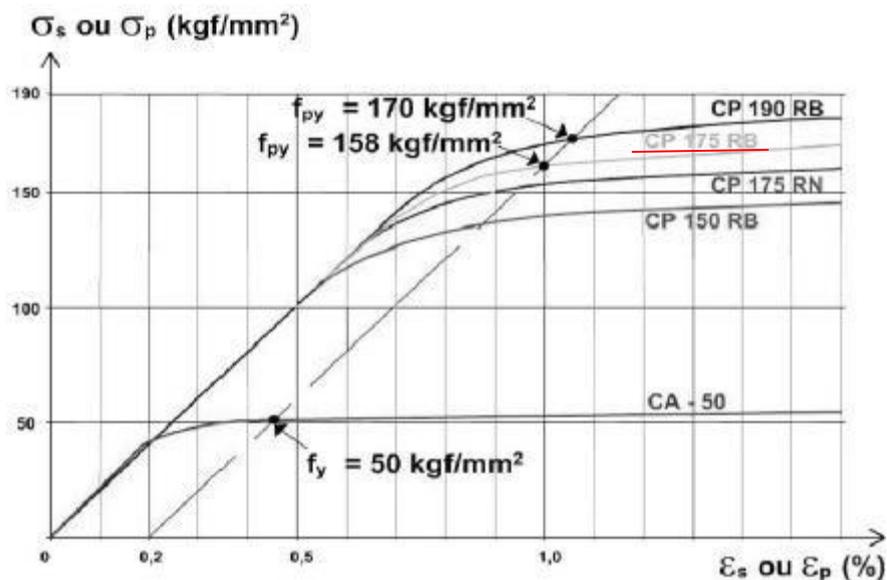


FIGURA 1 – Diagrama tensão x deformação de cabos de protensão. Fonte: BORTONE (2013).

Para cálculo dos valores limites do estiramento da armadura de protensão para aços de relaxação baixa (RB) que no estiramento (JÚNIOR; VERÍSSIMO, 1998):

$$\alpha_{pi} \leq \{0,81 f_{ptk}\} \\ \alpha_{pi} \leq \{0,90 f_{pyk}\} \quad (2)$$

$f_{ptk}$  é a resistência característica à ruptura por tração em MPa;



$f_{pyk}$  é a tensão correspondente à 1% de alongamento considerada equivalente à tensão a 0,2% de deformação permanente em MPa;

De acordo com Belgo (2004), o referido cabo possui valor de  $f_{ptk}$  igual a 1.750 MPa e  $f_{pyk}$  com valor de 1.580 MPa, assim:

$$\begin{aligned}\alpha_{pi} &\leq 1.417,5MPa \\ \alpha_{pi} &\leq 1.422MPa\end{aligned}\quad (2)$$

Logo a área da armadura de protensão ( $A_p$ ) dada em  $cm^2$ , será:

$$A_p \leq \frac{P_j}{\sigma P_i f_{ptk}}\quad (3)$$

Portanto,  $A_p$  será igual a 1,87  $cm^2$ . Verificando a área, serão utilizadas 10 barras de Ø5 mm (CP 175 RB E) resultando em uma área de 1,96  $cm^2$ .

Para cálculo dos valores limites do estiramento da armadura de protensão temos que na aplicação (JÚNIOR; VERÍSSIMO, 1998):

$$\begin{aligned}\alpha_{pi} &\leq \{0,77 f_{ptk}\} \\ \alpha_{pi} &\leq \{0,86 f_{pyk}\}\end{aligned}\quad (4)$$

Portanto,  $A_p$  será igual a 1,855  $cm^2$ . Da mesma forma pode-se utilizar 10 barras de Ø5 mm (CP 175 RB E) resultando em uma área de 1,96  $cm^2$ .

## 2.6 Cálculo do carregamento

Para efeitos de carregamento foi utilizado o trem tipo TB-320 que aplica uma carga por eixo dos trilhos correspondente a 320 kN.

## 2.7 Fator de impacto

Segundo Cardoso (2015) o fator de impacto vertical ( $\phi$ ) pode ser definido pela Equação 5.

$$\phi = 10^{-3} (1600 - 60\sqrt{l} + 2,25l) < 1,2\quad (5)$$

$l$  é a distância entre eixos dos trilhos.

Sendo a bitola utilizada 1,6 m e o trilho TR-57 a distância entre eixos será 1,67. Assim o fator de impacto terá um valor de aproximadamente 1,5. Multiplicando-se o valor da carga por eixo pelo fator de impacto vertical tem-se que a carga total por eixo será 480 kN.



## 2.8 Determinação da fibra de aço

Para proporcionar ao dormente as propriedades necessárias como o aumento de tenacidade, melhor resistência ao impacto e a fadiga e controlar a fissuração, a fibra que melhor se adequa a estas características é a RC 80/60 BN, produzida pela empresa ArcelorMittal. Esta foi utilizada em um volume de 2%, pois de acordo com Mehta e Monteiro (2008) *apud* Gois (2010) esse percentual traz ao material maior módulo de ruptura, tenacidade à fratura e de resistência ao impacto.

A FIGURA 2 mostra um esquema com as dimensões da fibra de aço RC 80/60 BN.



FIGURA 2 – Geometria fibra de aço RC 90/60 BN. Fonte: Dramix (2009).

## 2.9 Simulação computacional

A simulação é um processo amplo que engloba não apenas a construção do modelo, mas todo o método experimental que se segue, buscando descrever o comportamento do sistema, construir teorias e hipóteses considerando as observações efetuadas e usar o modelo para prever o comportamento futuro.

Para esta simulação computacional utilizou-se o software baseado em elementos finitos ANSYS 14.5, licenciado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG.

O dormente monobloco de concreto protendido será denominado Dormente A e o dormente monobloco de concreto protendido com adição de fibras será denominado Dormente B.

Para a realização desta simulação foram utilizados dados experimentais constantes em bibliografia acadêmica além dos parâmetros de projeto definidos no item 2.3.

Destaca-se que a simulação computacional apresenta resultados não conclusivos devido a fatores como a ausência de cabos de protensão nas peças simuladas, por motivos de incompatibilidade da interface com a matriz de concreto e a incerteza dos dados de entrada da simulação, devido a falta de acesso pleno ao arquivo base gerado no software ANSYS 14.5;

Para estimar a resistência característica dos materiais empregados, foram inseridas as informações obtidas dos gráficos de tensão x deformação dos mesmos.

A FIGURA 3 mostra o gráfico que foi utilizado para entrada das características mecânicas na simulação dos materiais a que se referem. Os valores destacados correspondem aos efetivamente aplicados.

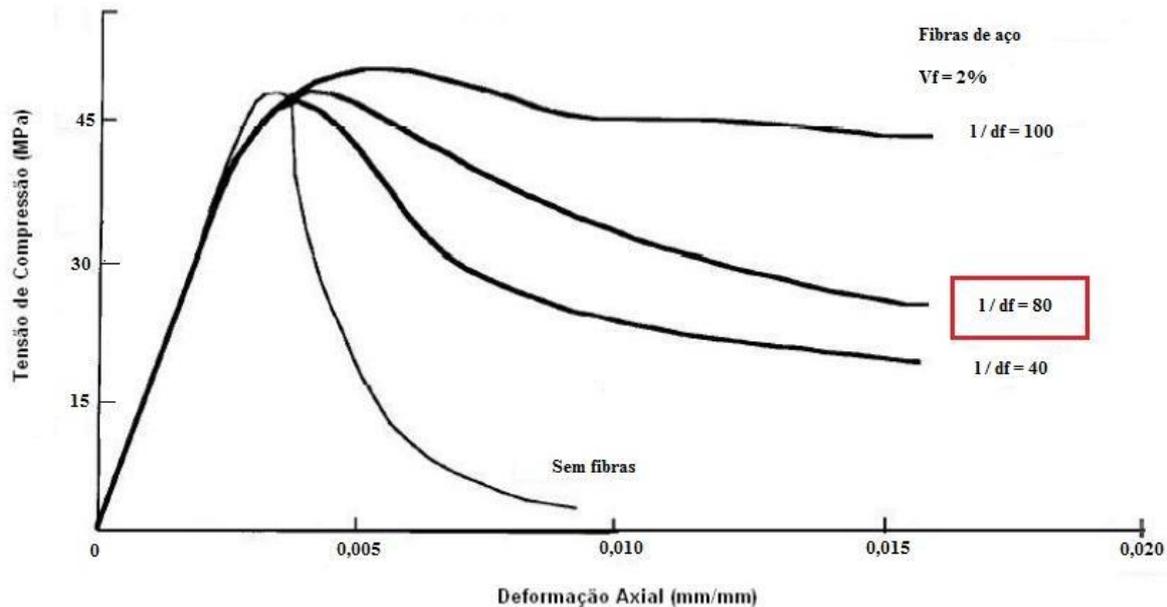


FIGURA 3 – Diagrama tensão x deformação para concreto com e sem adição de fibras de aço Fonte: Adaptado de ACI 544.4R (1988).

### 3. Resultados

#### 3.1 Análise do gráfico tensão x deformação.

Analisando a curva de fator de forma ( $l/df = 80$ ) em comparação à curva do concreto sem adição de fibras do Gráfico 1, verificou-se através da medição da área sobre ambas curvas, um aumento da tenacidade de aproximadamente 3 vezes.

#### 3.2 Simulação de carga estática

A FIGURA 4 mostra as áreas de aplicação da força que estão destacadas em azul, essa área representa o local de apoio dos trilhos, que atua como transferência de cargas para o dormente.

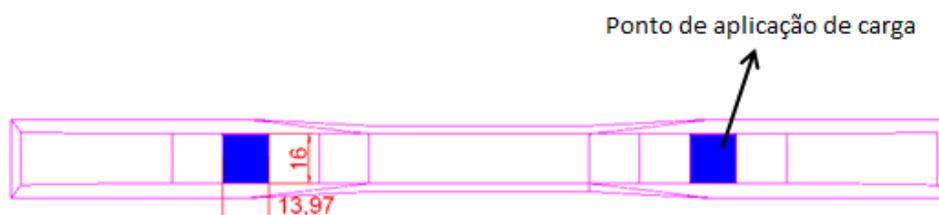


FIGURA 4 – Vista superior do dormente destacando a área de aplicação de força. Fonte: Próprio autor (2016).

##### 3.2.1 Distribuição de tensões principais

Inicialmente, os Dormentes A e B foram submetidos à carga de compressão de 320 kN, que gerou a distribuição de tensões principais ao longo do dormente. Tanto para o Dormente A, quanto para o B, a tensão máxima de compressão atingida foi de mesmo valor, chegando a 1,8966 MPa no ponto mais crítico da peça.

##### 3.2.2 Deformação

Com a finalidade de ainda comparar o comportamento dos dormentes sob efeito a força



de compressão, verificou-se a deformação do dormente a carga atuante, de 320 kN, como citado anteriormente.

Os Dormentes A e B atingiram o mesmo valor de deformação no ponto mais crítico, obtiveram 0,032232 mm.

### 3.3 Simulação de carga dinâmica: esforços cíclicos

Foram aplicados ciclos de tensão definidos em valores de tração e compressão repetidos com regularidade, simulando a passagem do trem tipo sobre o dormente considerando a aplicação da carga e o alívio da mesma.

#### 3.3.1 Fadiga – Dormente A

A FIGURA 5 demonstra o comportamento do corpo-de-prova do Dormente A quando submetido aos ciclos de tensão da simulação.

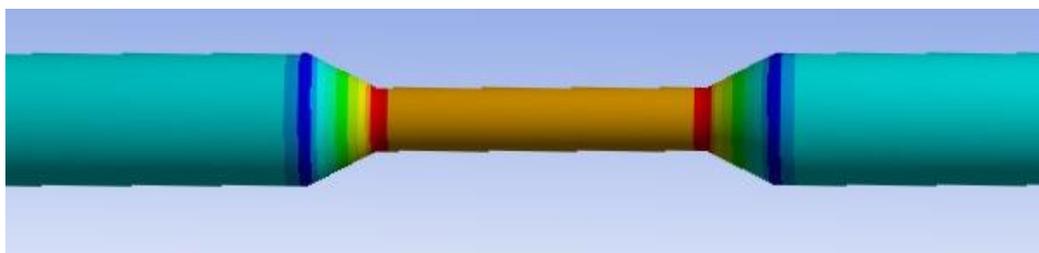


FIGURA 5 – Comportamento do corpo-de-prova do Dormente A. Fonte: Próprio autor (2016).

A TABELA 1 apresenta os valores de tensões mostradas correlacionados às cores obtidas na FIGURA 5.

TABELA 1 – Valores de tensões cíclicas – Dormente A

Fadiga - Dormente A			
	Ciclos	Carga por eixo	
	17324	480	Máximo
	8596	480	
	4265,3	480	
	2116,5	480	
	1050,2	480	
	521,1	480	
	258,57	480	
	128,3	480	
	63,664	480	
	31,59	480	Mínimo

Unidade: kN

Fonte: Próprio autor (2016).

#### 3.3.2 Fadiga – Dormente B

A FIGURA 6 mostra a simulação de fadiga no Dormente B.

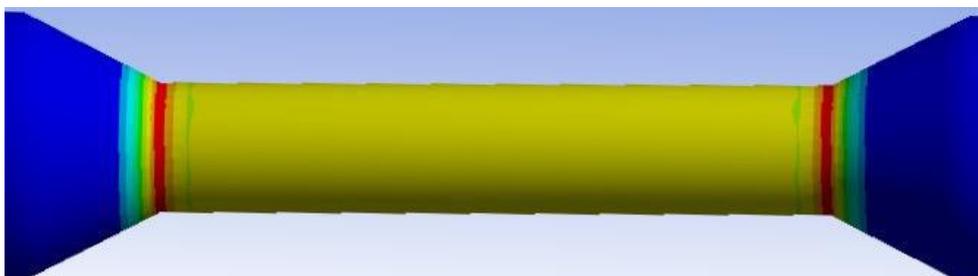


FIGURA 6 – Comportamento do corpo-de-prova do Dormente B. Fonte: Próprio autor (2016).

A TABELA 2 apresenta os valores relativos a FIGURA 6.

TABELA 2 – Valores de tensões cíclicas – Dormente B

Fadiga - Dormente B			
	Ciclos	Carga por eixo	
	$1 \cdot 10^8$	480	Máximo
	$3,566 \cdot 10^7$	480	
	$1,2716 \cdot 10^7$	480	
	$4,5345 \cdot 10^6$	480	
	$1,1617 \cdot 10^6$	480	
	$5,7662 \cdot 10^5$	480	
	$2,0562 \cdot 10^5$	480	
	73323	480	
	26147	480	
	9323,9	480	Mínimo

Unidade: kN

Fonte: Próprio autor (2016).

## 4 Discussão

### 4.1 Carga estática

#### 4.1.1 Distribuição de tensões principais

Os pontos de compressão máxima ocorrem na região de apoio do trilho onde ocorre a aplicação direta da carga. Como o concreto não apresenta características de um material homogêneo, a distribuição de tensões ao longo do dormente, que também possui geometria onde se podem visualizar quinas e pontos de massa diferenciados, é heterogênea.

Para fins de ganhos de resistência, os resultados indicam que a adição das fibras de aço Dramix RC 80/60 BN, não somou benefícios ao dormente, mantendo a distribuição de tensões principais em valores exatamente iguais aos anteriormente obtidos.

#### 4.1.2 Deformação

Avalia-se o comportamento do Dormente B exatamente igual ao Dormente A, concluindo-se que a adição de fibras de aço como proposta de redução da deformação é dispensável.



## 4.2 Simulação dinâmica

### 4.2.1 Esforços cíclicos

De forma comparativa percebe-se a diferença visível entre a paleta de cores apresentadas nas FIGURAS 5 e 6 representando respectivamente os Dormentes A e B sob o efeito de cargas cíclicas. Os resultados indicam que a adição de fibras pode proporcionar um elevado aumento da vida útil mínima da peça.

## 4.2 Conclusão

### 4.2.1 Carga estática

Como propriedade mecânica do concreto, a resistência à compressão é a mais importante dentre outras características que o material apresenta. O concreto utilizado para o projeto dos dormentes possui  $f_{ck}$  igual a 45 MPa, em outros termos, ele deve resistir a uma tensão de compressão de 45 MPa, sem apresentar nenhuma microfissura.

Entende-se que a máxima tensão de compressão submetida por ambos os dormentes após aplicada a carga de serviço, foi de 1,8896 MPa. Apesar de os valores não serem precisos, pode-se observar que as tensões representam apenas 4,2 % do valor máximo que o concreto foi projetado para resistir.

Conclui-se que a adição de fibras de aço não é recomendada para casos em que se necessita acrescentar ao concreto propriedades relacionadas à compressão.

### 4.2.2 Carga dinâmica

A resistência do dormente de concreto à execução de esforços repetidos é uma das necessidades primárias para redução do número de manutenções da via ferroviária.

Objetivando-se este princípio, a análise dos resultados do corpo-de-prova do Dormente B indica a capacidade de contenção de fissuras e de propagação de tensões que as fibras possuem na estrutura de concreto.

O corpo-de-prova do Dormente A possui resistência mínima de aproximadamente 31 ciclos completos de tensão. Tendo em vista que para a utilização do dormente o mesmo não deve apresentar nenhum tipo de fissuração, este seria, portanto, o tempo de vida útil do mesmo.

Já o Dormente B, de forma diferenciada, apresenta valores de resistência mínimos de aproximadamente 9324 ciclos de tensão. Pode-se atribuir este ganho absoluto de capacidade mecânica à aplicação das fibras como pontes de transferência de tensões dentro da estrutura.

Conforme ressaltado, não se pode atribuir os baixos valores obtidos ao comportamento real que um corpo-de-prova de concreto sem adição de fibra teria, devido às inconsistências da simulação.

As fibras de aço, aplicadas em proporções ideais possuem a capacidade de conter o avanço das linhas de tensões sobre a matriz de concreto além de impedir o acréscimo de abertura de fissuras já geradas, proporcionando o “ganho de resistência” pós-fissuração.

A vida útil mínima do corpo-de-prova do Dormente A representa hipoteticamente somente 0,33% da do Dormente B. Assim, os resultados apontam um aumento da durabilidade do componente, justificando a aplicação de fibras de aço em um elemento como o dormente de



**SICIP**  
Semana de Iniciação  
Científica e Tecnológica

25 a 29 de setembro de 2017  
Engenharias e Computação

 Universidade de Itaúna

concreto protendido.

Os pontos críticos do corpo-de-prova (regiões em vermelho nas Figuras 3 e 4) podem ser comparados de forma teórica aos pontos de maior aplicação de tensões no dormente como na região logo abaixo do trilho, que recebe aplicação direta de carga e alívio constantemente.

#### 4.2.3 Conclusão final

Atendendo às especificações normativas (Valec e ABNT – NBR 11709/15) pode-se desenvolver o dimensionamento do dormente de concreto protendido, dentro dos parâmetros mínimos exigidos, a fim de criar um dormente viável, econômico e plenamente aplicável às vias ferroviárias brasileiras.

A demonstração experimental dos benefícios da adição de fibras de aço em dormentes de concreto protendido apresentou resultados de caráter demonstrativo das melhorias que a adição de fibras de aço fornece ao concreto.

A necessidade de redução de custos na manutenção de vias férreas é atualmente de grande interesse econômico das concessionárias brasileiras. A opção de utilização de dormentes com maior durabilidade e capacidade de absorver maior energia é totalmente atrativa comparado com as opções amplamente utilizadas, como os dormentes de madeiras ou até mesmo o de concreto sem a adição de fibras.

#### Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11709: Dormente de concreto — Projeto, materiais e componentes. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7482: Fios de aço para concreto protendido. Rio de Janeiro, 2008.
- BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. Análise experimental de dormentes de concreto protendido reforçados com fibras de aço. 256 p. Dissertação (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.
- BORTONE, Thiago Pena. Avaliação das tensões no estado limite de serviço em seções de concreto protendido. 20 p. Artigo (Mestrado Engenharia de Estruturas). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.
- CARDOSO. Pedro Antônio Abrantes. Tabelas gerais de pontes. Divinópolis, 2015.
- GOIS, Fernanda Alves Pinto. Avaliação experimental do comportamento de concreto fluido Reforçado com fibras de aço: Influência do fator de forma e da fração volumétrica Das fibras nas propriedades mecânicas do concreto. 157 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2010.
- JÚNIOR, Kléos Lenz César; VERÍSSIMO, Gustavo de Souza. Concreto Protendido – Fundamentos Básicos. Universidade Federal de Viçosa – Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Viçosa, 1998, 78 p. Disponível em: <<http://www.dcc.ufpr.br/mediawiki/images/f/f6/CP-vol1.pdf>>. Acesso em: 18 mai. 2016.
- MAIA, M. P. F. ECODOR: Proposta de mistura sustentável destinada à fabricação de dormentes de concreto. 119 f. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído). Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2012.
- VALEC ENGENHARIA, CONSTRUÇÕES E FERROVIAS S.A.: Normativo Técnico – especificações de projeto. Brasília, 2012. Disponível em: <<http://www.valec.gov.br/a-valec/governanca/normas>>. Acesso em: 13 abr. 2016/



ANEXO A – Projeto do dormente de concreto protendido

