

CAPÍTULO 9

CONCLUSÕES

9.1 RESULTADOS OBTIDOS

Apresentam-se a seguir apenas as conclusões mais importantes, e que não foram apresentadas nas conclusões parciais dos capítulos anteriores.

{ na seção sob o trilho do dormente original as fibras aumentaram o momento de primeira fissura em 20 % e, 16 % e 30 % no caso dos dormentes modificados. As fibras também aumentaram as forças de abertura das fissuras de 20 % a 37 %.

{ para a seção do centro o momento de primeira fissura foi 27 % maior no dormente com fibras. As fibras também aumentaram as forças correspondentes às aberturas das fissuras;

{ o dormente original, projetado de acordo com as especificações da AREMA, teve alta força de protensão e tensão inicial nos fios de $0,64 f_{ptk}$. Nos ensaios estáticos da seção sob o trilho desse dormente sem fibras, a ruptura refletiu seu estado superarmado, pois ocorreu com o esmagamento do concreto comprimido, de forma explosiva e violenta, sem o escoamento dos fios de protensão. Num dormente semelhante, mas com fibras, embora também superarmado, a ruptura foi lenta e gradual, não ocorrendo qualquer explosão;

{ nos dormentes modificados sem e com fibras e com tensão inicial nos fios de $0,63 f_{ptk}$, a ruptura foi dúctil e devida ao esmagamento do concreto comprimido. No dormente sem fibras, o escoamento da armadura iniciou antes do esmagamento, mas, no com fibras, o escoamento e o esmagamento iniciaram praticamente no mesmo instante. Nos dormentes modificados com tensão inicial um pouco maior, de $0,76 f_{ptk}$, a ruptura do dormente sem fibras foi brusca e devida ao rompimento dos fios de protensão. Já num dormente semelhante, mas com fibras, as fibras foram capazes de alterar o modo de ruptura, impedindo o rompimento da armadura antes do esmagamento do concreto;

{ o dormente original sem fibras superarmado não apresentou ductilidade, mas o mesmo dormente com fibras, ao contrário, apresentou grande ductilidade, porém, após o esmagamento do concreto comprimido. Os dormentes modificados sem fibras subarmados apresentaram muito bom comportamento plástico e ductilidade, com os dormentes com fibras alcançando ainda melhores resultados;

{ considerando os valores médios, a força de início de escorregamento dos fios de protensão do dormente original com fibras foi 46 % superior à força do mesmo dormente sem fibras. Índice semelhante foi obtido nos dormente modificados com fibras e com menor força de protensão relativo ao sem fibras. As fibras também aumentaram significativamente a força correspondente ao escorregamento de 0,025 mm dos fios de protensão mais tracionados;

{ da mesma forma como ocorrido nos ensaios estáticos, nos ensaios dinâmicos as fibras também conduziram a fissuras com menor abertura. Tanto no dormente com fibras como no dormente sem fibras a abertura das fissuras cresceu com o aumento do número de ciclos dinâmicos;

{ também nos ensaios dinâmicos, as fibras de aço diminuíram consideravelmente a deformação nos fios de protensão. No ensaio com a amplitude do carregamento constante, após 360.000 ciclos dinâmicos, a deformação nos fios de protensão mais tracionados do dormente com fibras foi de apenas 47 % da deformação nos fios do dormente sem fibras. As fibras também levaram a uma elevação mais lenta da posição da linha neutra;

{ o dormente modificado sem fibras e com variação de tensão de 15,1 % de f_{pu} suportou apenas 150.000 ciclos dos três milhões de ciclos necessários. Outro dormente sem fibras e com variação de tensão de 12 % de f_{pu} resistiu aos três milhões de ciclos dinâmicos. Os

dormentes com fibras de aço e variação de tensão de 7,3 e 7,8 % de f_{pu} resistiram aos três milhões de ciclos;

{ os ensaios estáticos feitos duplamente, isto é, dois ensaios idênticos, mostraram resultados muito próximos. Aliado a este fato e como a fabricação de um dormente é uma atividade muito laboriosa, nas próximas pesquisas recomenda-se que os ensaios estáticos de flexão não sejam feitos duplamente, isto é, que sejam feitos sobre apenas um modelo;

{ outra observação importante refere-se aos estudos de fadiga. Para racionalizar o número de dormentes a serem fabricados e facilitar o manuseio, os dormentes podem ser cortados ao meio, de modo a separá-los em duas partes idênticas. Numa das duas seções sob os trilhos pode-se fazer o ensaio estático e, na outra seção, o ensaio dinâmico de fadiga;

{ nas vias para transporte de carga com velocidade moderada, mesmo para a bitola de 1600 mm, o momento positivo na seção sob o trilho é bem mais importante que o momento negativo no centro do dormente. Tendo este fato em vista e sabendo que o benefício ou as características que as fibras incorporam às duas seções são semelhantes, nas próximas pesquisas recomenda-se que os ensaios se concentrem apenas no momento positivo da seção sob o trilho.

9.2 PESQUISAS FUTURAS

Como ficou demonstrado ao longo deste trabalho, para o desenvolvimento da pesquisa houve a necessidade do estudo dos três temas principais: dormente, concreto com fibras e fadiga. O conhecimento adquirido sobre os temas permite indicar, neste momento, algumas pesquisas que podem ser desenvolvidas.

9.2.1 Fadiga em Dormente com Fibras

Os resultados obtidos nos ensaios de fadiga dos dormentes modificados D15 e D16 mostraram que as fibras de aço aumentam significativamente a resistência dos dormentes à fadiga. E como os dormentes trabalham sob ações dinâmicas, sem dúvida esta pesquisa seria muito importante para o aperfeiçoamento dos dormentes de concreto.

NAAMAN & HAMMOUD (1998) indicaram que a influência da razão de aspecto sobre a resistência à fadiga não é tão importante quanto o volume de fibras. RAMAKRISHNAN et al. (1989) e WEI et al. (1996), entre outros, concluíram que a resistência à fadiga aumenta com o aumento do volume de fibras. WEI et al. (1996) afirmam que *“a capacidade de resistir à iniciação das fissuras, reduzindo o número e o tamanho das fontes de fissuras antes e no processo de fadiga, e a capacidade de resistir à propagação e à extensão das fissuras no processo de fadiga produzirão um profundo efeito sobre a resistência à fadiga.”*

WANG (1996) diz que *“fibras curtas têm um menor espaçamento efetivo no dormente e são, portanto, mais efetivas em resistir micro e finas fissuras; fibras longas concebivelmente transpõem fissuras mais largas e extensas, fornecendo resistência mais efetiva ao desenvolvimento dessas fissuras.”*

Seria interessante determinar a resistência à fadiga de vigas com tamanho reduzido e com grau de protensão semelhante ao dos dormentes. As vigas seriam de compósitos com dois ou três teores de duas diferentes fibras de aço, uma curta, com comprimento de 30 mm, e outra longa, com comprimento de 60 mm. Em função das conclusões de WEI e WANG descritas acima, acredita-se que as fibras curtas serão mais efetivas à fadiga que as fibras longas. Entretanto, devido aos poucos resultados experimentais relatados, esta questão necessita ser investigada.

Com o propósito de determinar o compósito com os melhores resultados em termos de custo e de resistência, ensaios estáticos e de fadiga seriam executados sobre as vigas. O estudo prosseguiria com ensaios estáticos e de fadiga sobre dormentes, fabricados com o melhor compósito e armadura de protensão composta por fios ou cordoalhas.

A finalidade dos ensaios de fadiga nos dormentes seria determinar a curva resistência à fadiga x número de ciclos e, conseqüentemente, a variação de tensão admissível ou máxima (*stress range*) na armadura, que é o parâmetro mais importante no projeto de elementos fletidos submetidos à fadiga. Para completar, a tensão e a variação de tensão na armadura e no concreto seriam determinadas por meio de modelo teórico, desenvolvido sobre as equações de equilíbrio da seção fissurada sob carregamento de serviço, de modo a prever e checar os resultados experimentais.

Outra finalidade do estudo poderia ser correlacionar a resistência à fadiga na flexão de pequenas vigas prismáticas com a resistência do dormente à fadiga. Tal estudo seria muito útil na fase de projeto de um novo dormente com fibras e poderia poupar ensaios de fadiga no dormente.

O estudo poderia ser feito com a armadura de protensão ora consistindo de fios, ora consistindo de cordoalhas, a fim de determinar a solução técnica e econômica mais indicada.

Como essa pesquisa é muito extensa e os ensaios de fadiga são demorados, pois no caso dos dormentes a frequência não deve ser maior do que 10 Hz, haveria a necessidade de divisão dos objetivos entre trabalhos subseqüentes.

9.2.2 Análise de Dormente Bibloco com Fibras

Um estudo que pode ser muito promissor é verificar o benefício das fibras de aço ao comportamento estrutural dos dormentes biblocos. Assim como os dormentes monoblocos protendidos, os dormentes biblocos também são submetidos à fadiga e a altíssimas forças de impacto. A grande diferença é que, normalmente, os biblocos não são protendidos. Isso significa que o dormente bibloco trabalha fissurado em serviço e, conseqüentemente, as fibras podem exercer suas funções de maneira mais efetiva, com claros benefícios ao dormente.

A aplicação das fibras poderá resultar na diminuição da armadura de flexão ou, o que é mais importante, eliminação da armadura helicoidal usualmente utilizada. A eliminação desta armadura traria considerável simplificação ao processo produtivo. Além disso, seriam melhoradas várias outras características importantes ao dormente, como mostradas nas conclusões sobre os resultados obtidos neste trabalho. O estudo poderia ser separado em duas pesquisas, uma com o dormente sob ação estática e a outra sob ação dinâmica (fadiga).

Nos ensaios estáticos, que são mais simples e rápidos de executar, os dormentes poderiam ser investigados com tipos e teores diferentes de fibras. Quanto aos ensaios dinâmicos, talvez seja necessário simplificar o estudo, porque esses ensaios são muito demorados.

9.2.3 Análise Dinâmica do Sistema Ombreira / Dormente com Fibras

Como os trilhos suportam ações dinâmicas, parte dessas ações chegam pelo grampo à ombreira chumbadora do sistema de fixação dos trilhos. A ombreira, por sua vez, por meio da sua geometria e da aderência com o concreto, transfere as ações para o interior do dormente. Como os principais benefícios que as fibras proporcionam aos elementos estruturais são o ganho de ductilidade e a maior absorção de energia, o que significa melhor comportamento frente aos efeitos das ações dinâmicas (impacto, fadiga, etc.), as fibras certamente contribuirão para melhorar a atuação do sistema ombreira / dormente.

Existe um ensaio estático normalizado para medir a força de arrancamento da ombreira, porém, haveria a necessidade de se desenvolver um ensaio dinâmico com a finalidade de avaliar o ganho ou o benefício proporcionado pelas fibras ao comportamento

do sistema ombreira / dormente. Para os resultados conferirem maior confiabilidade, o esquema do ensaio dinâmico teria que eliminar a interferência dos demais dispositivos existentes no sistema de fixação.

Dormentes com diferentes tipos e teores de fibras poderiam ser avaliados, mas acredita-se que as fibras curtas proporcionarão melhores resultados que as fibras longas. Com o auxílio de uma importante empresa fabricante de sistemas de fixação, poderia-se tentar desenvolver o ensaio dinâmico e, também, criar uma modelagem com elementos finitos, de modo a prever ou checar os resultados experimentais.

9.2.4 Comprimento de Ancoragem de Fios e Cordoalhas em Concreto com Fibras

Os resultados obtidos neste trabalho mostraram que as fibras levam a um aumento significativo da força de escorregamento dos fios de protensão. Como as ações atuantes nos dormentes são aplicadas pelos trilhos, isto é, muito próximas às extremidades dos fios de protensão e do dormente, a necessidade de uma ancoragem eficiente da armadura é imprescindível, pois é ela que vai garantir a totalidade da força de protensão nas seções sob os trilhos. Embora a ancoragem por meio de dispositivos, tais como placas de aço, possa ser mais segura e eficiente, a ancoragem por simples aderência é largamente utilizada na produção dos dormentes, pois apresenta menor custo e permite a fabricação em pista de protensão.

Não só para os dormentes como também para outros elementos, como as vigas, seria muito útil um estudo experimental para determinar equações teóricas para prever o comprimento de ancoragem de armaduras de protensão inseridas em concretos com fibras. Fios e cordoalhas brasileiras poderiam ser avaliadas em concretos com diferentes tipos e teores de fibras. Porém, espera-se que compósitos com fibras curtas apresentem melhores resultados do que compósitos com fibras longas.

A pesquisa pode ser dividida em duas, segundo a ação ser estática ou dinâmica. No entanto, no caso particular dos dormentes o estudo sob ação dinâmica é extremamente necessário.

Numa fase posterior, a ancoragem por aderência no concreto com fibras poderia ser comparada à ancoragem com dispositivos, tais como placas, que, embora eficientes, apresentam alto custo.

9.2.5 Formulação Teórica para Viga Protendida com Armadura Distribuída em Toda a Altura

De modo geral, a formulação teórica existente para flexão de vigas protendidas foi desenvolvida com a totalidade da armadura de protensão localizada nas proximidades da fibra mais tracionada. No caso das vigas com protensão parcial com armadura passiva, isso também acontece, o que significa que uma altura útil para cada armadura ou conjunto de armaduras pode ser adotada. O erro introduzido é pequeno e a tensão entre as camadas dos fios ou cordoalhas não varia significativamente.

Nos dormentes isso já não ocorre, pois como a altura é pequena e existem momentos positivos e negativos importantes que precisam ser combatidos, a armadura de protensão, retilínea, distribui-se ao longo de toda a altura do dormente, principalmente na seção do centro, como pode ser observado na fig. 6.30. Por isso, a adoção de uma altura útil para a armadura de protensão conduz a erro grosseiro, pois em função da intensidade do momento fletor considerado, enquanto uma parte da armadura está tracionada, a outra pode estar ainda comprimida.

Para o correto dimensionamento do dormente é necessário determinar o momento de primeira fissura, o momento último e a tensão e variação de tensão no concreto e na armadura sob o carregamento de serviço, particularmente importante na verificação do dormente à fadiga. E se adotada a formulação de flexão já existente e amplamente divulgada, o erro cometido, dado o problema descrito anteriormente, é considerável. Tal fato ficou demonstrado nos valores da Tabela 8.11 para o momento negativo no centro. Portanto, o desenvolvimento de uma formulação teórica específica para o caso da armadura de protensão distribuída ao longo de toda a altura da seção, combinada ou não com armadura passiva, seria muito útil no projeto dos dormentes.

9.2.6 Avaliação Experimental de Viga Protendida

Seria interessante, senão necessário, combinar a pesquisa teórica descrita no item anterior, com os resultados de um trabalho experimental. A finalidade principal dessa pesquisa seria verificar a validade das equações teóricas formuladas. Vigas com protensão completa e com protensão parcial poderiam ser investigadas e comparadas, com o objetivo de alcançar uma viga mais dúctil (com A'_s por exemplo) e menor custo.

Vigas de tamanho reduzido seriam ensaiadas estaticamente, variando-se o grau de protensão e a aplicação ou não de armadura passiva. Posteriormente, as mesmas vigas poderiam ser estudadas com o acréscimo das fibras de aço e também sob carregamento dinâmico (fadiga).

9.2.7 Alinhamento de Fibras

Como já comentado, embora as fibras de aço melhorem significativamente algumas características importantes para os dormentes de concreto, persiste um sério

problema que é o aumento no custo. Isso obriga a necessidade de se tentar aumentar a eficiência da atuação das fibras no dormente. Se as fibras ficarem alinhadas na direção das tensões de tração da flexão, acredita-se que haverá um considerável ganho na eficiência das fibras, tanto na resistência estática quanto na resistência dinâmica.

Poderia ser desenvolvida uma pesquisa experimental em parceria com uma empresa fabricante de dormente, com o propósito de tentar alinhar as fibras paralelamente ao comprimento do dormente, em função do equipamento de adensamento utilizado.

9.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao final da pesquisa espera-se que os ensaios experimentais realizados tenham comprovado a viabilidade da aplicação das fibras de aço nos dormentes monoblocos protendidos de concreto. Os dormentes modificados com fibras (D16 e D18) e com força de protensão significativamente menor que a do dormente padrão, mostraram ser uma alternativa muito boa, pois, além de possuírem a necessária resistência à fadiga, apresentaram comportamento plástico e muito boa ductilidade. Com base nos resultados obtidos por WANG (1996), descritos no item 4.10.6, acredita-se que esses dormentes, por apresentarem melhor resistência às ações de impacto, podem representar um melhoramento à atuação dos dormentes de concreto em serviço.

Como as fibras diminuem a tensão nos fios de protensão, o que foi constatado nos ensaios estáticos e dinâmicos desta pesquisa, para maior economia na quantidade da armadura de protensão dos dormentes com fibras, recomenda-se que a tensão inicial nos fios fique próxima à máxima indicada pela norma NBR 7197 (1989).

No trabalho várias vezes se comentou que, em serviço na via, os dormentes são submetidos a altíssimas forças de impacto, tanto que a AREMA (1997) multiplica por três a ação estática das rodas. E como também descrito no texto, WANG (1996) concluiu em sua pesquisa que as fibras melhoraram enormemente a resistência dos dormentes à ação de impacto. Diante disso, após o término da pesquisa, chega-se à conclusão de que as características mais importantes que os dormentes devem apresentar são a resistência à fadiga e a resistência aos impactos. É preciso, portanto, que as pesquisas realizadas com os carregamentos estáticos e dinâmicos (fadiga) sejam complementadas por pesquisas onde a ação é de impacto. Isso significa que as pesquisas devem ser planejadas para, em conjunto, modificar e aperfeiçoar o projeto corrente dos dormentes de concreto, de modo a aproveitar com a máxima eficiência possível todos os benefícios que as fibras de aço

proporcionam à resistência à fadiga e ao impacto. E, para completar, com o menor aumento de custo possível.

Todas as pesquisas teriam também como objetivo modificar o dormente atual, tornando-o mais próximo ao dormente de madeira, que apresenta menor rigidez à flexão dinâmica. Dormentes com fibras, com menor altura e com concretos de menores f_{ck} , poderiam ser estudados em ensaios estáticos e de impacto, com o objetivo de se alcançar um dormente mais flexível. Um dormente menos rígido em serviço na via receberia uma menor força de impacto e, como consequência, o fator de impacto tomado como 200 % pela AREMA poderia ser diminuído. Tal fato reduziria o custo do dormente, compensando o acréscimo de custo advindo do uso de fibras, mantendo no entanto as suas vantagens.

Cabe ressaltar a necessidade de, numa fase posterior, realizar estudos para verificar o comportamento estrutural do dormente com fibras numa superfície de apoio que represente a situação real do dormente na via. Do mesmo modo, também, é extremamente importante avaliar o novo dormente desenvolvido sob as condições reais, em serviço na via ferroviária. Desta forma, poderiam se obtidas correlações entre os resultados de laboratório e aqueles verificados em situação real na via.