

## **7. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros**

### **7.1. Conclusões**

#### **7.1.1. Introdução**

O objetivo desta tese foi avaliar o comportamento à fadiga em compressão de diferentes concretos – sem fibras C1, com fibras de polipropileno C2 e com fibras de aço C3 – estudando-se o efeito da frequência de carregamento por meio de ensaios de laboratório. Foi realizado um estudo experimental e proposto um modelo probabilístico. Os resultados obtidos no laboratório foram utilizados para validar o modelo.

Foi comprovado experimentalmente que a frequência de carregamento influenciou o comportamento do concreto à fadiga em compressão, e que a adição de fibras melhorou o desempenho à fadiga apenas para as frequências mais baixas. O comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras de aço foi melhor para as menores frequências, e o concreto com fibras de polipropileno teve desempenho intermediário entre o concreto sem fibras e o com fibras de aço. Para a maior frequência testada não houve uma diferença representativa entre os três concretos.

Para avaliar a influência da frequência de carregamento no comportamento à fadiga do concreto em compressão comparou-se a vida à fadiga – o número de ciclos até a ruptura – de cada ensaio para as diferentes séries de ensaios de fadiga: três concretos e quatro frequências.

Observando-se os resultados obtidos neste trabalho, é possível afirmar que a utilização de fibras de aço minimiza o efeito da frequência de carregamento no desempenho à fadiga em compressão. A vida à fadiga do concreto com fibras de aço foi em média cinco vezes superior à do concreto sem fibras para as duas menores frequências, enquanto que para o concreto com fibras de polipropileno a média do número de ciclos para as menores frequências foi pouco maior do que o dobro do concreto sem fibras.

Analisando o número de ciclos dos ensaios nas menores frequências (0,25 Hz e 0,0625 Hz) maiores do que mil ciclos ou menores do que cem ciclos observa-se que: a maioria dos ensaios de fadiga do concreto sem fibras C1 suportaram menos de mil ciclos e alguns ensaios suportaram menos de cem ciclos; para o concreto com fibras de polipropileno C2, muitos números de ciclos ficaram abaixo de mil e poucos foram menores que cem; para o concreto com fibras de aço C3, mais da metade dos ensaios suportaram mais de mil ciclos e nenhum ensaio teve o número de ciclos menor do que cem.

Para as frequências mais altas (1 Hz e 4 Hz) a maioria dos ensaios de fadiga suportou mais de mil ciclos para os três concretos, à exceção do concreto sem fibras C1 para a frequência 1 Hz.

É importante ressaltar que os parâmetros dos ensaios de fadiga utilizados neste trabalho foram selecionados com o intuito de viabilizar o estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto em laboratório. Os elevados níveis de tensão utilizados – 85% da resistência à compressão – e o baixo número de ciclos até a ruptura não representam o comportamento real de estruturas de concreto.

### **7.1.2. Histórico de deformações**

Observando-se o histórico de deformações dos ensaios de fadiga por meio das deformações finais, ou da deformação a cada ciclo, ou da evolução das deformações ao longo do ensaio  $\epsilon$ , foi possível entender porque a vida à fadiga diminuiu com a redução da frequência de carregamento, e porque as fibras melhoraram a vida à fadiga apenas para as baixas frequências, seguindo-se o raciocínio do estudo de Vegt e Weerheijm (2007). Considerando-se os ensaios realizados nas menores frequências (abaixo de 1 Hz) como quase-estáticos e nas maiores frequências como dinâmicos: nos ensaios estáticos as microfissuras têm tempo de encontrar um caminho mais frágil – contornando os agregados ou através da zona de transição – e a ruptura ocorre quando essas microfissuras se unem formando uma microfissura principal; e nos ensaios dinâmicos as microfissuras não têm tempo de encontrar um caminho mais frágil e muitas acabam atravessando os agregados, gerando múltiplas microfissuras que levam o corpo de prova à ruptura.

Primeiro comprovou-se que as deformações totais dos ensaios de fadiga acompanharam uma envoltória de deformações dos ensaios estáticos de

resistência à compressão. Segundo, observou-se que a deformação a cada ciclo entre os diferentes concretos foi maior para o concreto sem fibras e menor para o concreto com fibras de aço, pois as fibras costuram as microfissuras retardando a propagação das mesmas. Terceiro, comparou-se a deformação por ciclo para as diferentes frequências e essa foi maior para a frequência mais baixa e menor para a frequência mais alta, para os três concretos estudados.

Sendo assim, se o concreto sem fibras tem um limite máximo de deformação menor do que os concretos com fibras, e a deformação por ciclo é maior no concreto sem fibras, esse vai romper com um menor número de ciclos. Assim como, se a deformação por ciclo foi maior para a frequência mais baixa 0,0625 Hz (procurando o caminho mais frágil) e menor para a frequência mais elevada 4 Hz nos três concretos, o número de ciclos para atingir a deformação limite e romper o corpo de prova é menor para as frequências mais baixas.

As fibras melhoraram a vida à fadiga apenas nas menores frequências porque as fibras atrasam a propagação das fissuras que levam o corpo de prova à ruptura, porém para as altas frequências enquanto as fibras costuram algumas fissuras, outras fissuras ocorrem fora do alcance das fibras levando o corpo de prova à ruptura.

O trabalho das fibras também foi observado nas curvas de fluência cíclica (evolução das deformações máximas ao longo dos ensaios) onde houve uma quebra de tendência no tramo central. Essa quebra de tendência indica a contribuição das fibras.

Verificou-se também que existe uma forte relação entre a evolução das deformações máximas, através da taxa de deformação específica secundária  $\dot{\epsilon}$ , com o número de ciclos até a ruptura. Quanto menor for a taxa de deformação maior será o número de ciclos até a ruptura.

### **7.1.3. Modelo probabilístico proposto**

O modelo probabilístico proposto buscou relacionar o número de ciclos até ruptura com as tensões envolvidas em um ensaio de fadiga e também com a variação da frequência de carregamento considerando-se a distribuição estatística tanto dos resultados dos ensaios de fadiga quanto dos resultados de caracterização da resistência dos diferentes concretos estudados.

Esse modelo foi validado por mais de cento e cinquenta ensaios de fadiga e quarenta e seis ensaios de compressão em corpos de prova cúbicos de

100 mm de aresta. O ajuste do modelo foi bastante satisfatório na maioria das séries de ensaios com erros relativos médios abaixo de 5% e coeficientes de correlação próximos ou superiores a 0,95. A exceção ocorreu no concreto com fibras de polipropileno C2 para a frequência 1 Hz o que mostrou a dependência do modelo à distribuição estatística dos resultados de resistência à compressão. Neste caso o ajuste dos resultados de compressão não foi tão preciso devido ao baixo número de ensaios e à grande dispersão, e este ajuste menos preciso refletiu no ajuste dos ensaios de fadiga do concreto C2.

Ficou comprovado que a ruptura é probabilística em termos do número de ciclos  $N$  ou da taxa de deformação secundária  $\dot{\epsilon}$ , e que existe uma relação direta entre  $N$  e  $\dot{\epsilon}$ , onde o ajuste do modelo a estes resultados foi muito bom. Em termos práticos esta relação entre  $N$  e  $\dot{\epsilon}$  fornece a possibilidade de estimar o número de ciclos até a ruptura sem chegar a romper um corpo de prova.

## **7.2. Sugestões para trabalhos futuros**

Foi comprovada a influência da frequência no comportamento à fadiga do concreto em compressão e o benefício da adição de fibras. O efeito de diferentes conteúdos de fibras pode ser estudado com o objetivo de encontrar um teor ótimo de fibras que melhore o desempenho do concreto à fadiga. A adição de fibras melhora a resistência à tração e a tenacidade do concreto, porém, existe um limite de conteúdo de fibras a partir do qual a adição de mais fibras deixa de ser benéfica.

Estudar em laboratório a influência da frequência de carregamento para diferentes tipos de fibras como: fibras de basalto, de carbono, de vidro, fibras naturais, entre outras ou ainda mesclando tamanhos diferentes de fibras de aço, processo conhecido como hibridização que consiste na utilização conjunta de microfibras e macrofibras de aço, onde o incremento das propriedades do concreto à tração pode ser substancial, pois as microfibras retardam o surgimento de fissuras e as macrofibras contêm a propagação das mesmas (Ferrari e Hanai, 2009; Akcay e Tasdemir, 2012).

Verificar a influência da frequência de carregamento em ensaios de fadiga em concreto para outras formas de solicitação como: ensaios de flexão, ensaios de tração direta, ensaios de tensões alternadas de tração e compressão.

Nos ensaios realizados neste trabalho foram utilizados apenas corpos de prova de pequenas dimensões. Seria interessante procurar verificar o efeito da

frequência em ensaios estruturais em vigas, pilares e lajes. Apesar das limitações dos ensaios de fadiga em elementos estruturais de grandes dimensões em função da capacidade das máquinas de ensaio, é viável estudar a influência da frequência em peças estruturais de concretos com e sem fibras a baixas frequências, inferiores a 1 Hz.

Tendo em vista a relação direta entre a taxa de deformação secundária  $\dot{\epsilon}$  e o número de ciclos até a ruptura  $N$  observados neste trabalho é possível estudar experimentalmente a fadiga em diversos tipos concretos sob quaisquer condições de carregamento, com um grande número de repetições utilizando-se o modelo probabilístico proposto. Inicialmente seria necessário calibrar o modelo com um número mínimo de ensaios e logo em seguida agilizar os ensaios de fadiga não levando os corpos de prova à ruptura, estimando a vida à fadiga pelo monitoramento do histórico de deformações.

Uma vez realizados outros ensaios de fadiga aqui sugeridos, procurar validar ou até melhorar o modelo probabilístico proposto para diferentes tipos de ensaios, variando-se os tipos de concreto e os distintos tipos e conteúdos de fibras.

A influência da frequência de carregamento no comportamento à fadiga em compressão do concreto com e sem fibras ficou comprovada experimentalmente neste trabalho, porém o estudo ficou limitado entre as frequências 0,0625 Hz e 4 Hz. Não se pode afirmar que o comportamento à fadiga a elevadas frequências – acima de 10 Hz – ou frequências muito baixas – abaixo de 0,01 Hz – sigam as tendências apresentadas neste trabalho. Seria interessante estudar o comportamento à fadiga do concreto para frequências muito altas ou muito baixas. Contudo, para viabilizar este estudo é importante levar em consideração a possibilidade de ensaios de longa duração em dois casos: os ensaios a baixas frequências, ou a necessidade de ensaios a menores níveis de tensão para altas frequências, devido à limitação das máquinas de ensaios para fadiga em compressão (neste caso cabe a possibilidade de se utilizar máquinas de ensaios mais modernas que poderiam, por exemplo, trabalhar até 100 Hz, com deformações superiores a 1 mm, a níveis de tensão próximos de 100 toneladas).