

# 1. Introdução

## 1.1. Motivação

Esta tese foi desenvolvida durante o doutorado sanduíche em uma parceria entre a Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro e a Universidad de Castilla-La Mancha em Ciudad Real – Espanha.

Este intercâmbio possibilitou uma experiência internacional e uma formação pessoal multidisciplinar voltada para a pesquisa de novas tecnologias em concreto com vasta experiência experimental na produção e em ensaios de concreto. No momento em que se desenvolveu o programa experimental desta tese o Laboratorio de Estructuras y Materiales da Escuela Técnica Superior de Caminos, Canales y Puertos da Universidad de Castilla-La Mancha em Ciudad Real na Espanha tinha algumas máquinas e equipamentos de laboratório para ensaios em concreto que ainda não estavam disponíveis em laboratórios de concreto no Brasil.

A motivação da pesquisa surgiu com a idéia de um grupo de construtores espanhóis de construir torres eólicas com mais de cem metros de altura utilizando concreto de alto desempenho, como uma solução mais prática e econômica em relação às torres de aço.

O concreto é o material de construção mais utilizado no mundo. Tem custo relativamente baixo e alta durabilidade, quando comparado com outros materiais, além de boa resistência à compressão e as matérias primas (cimento, agregados e água) utilizadas na sua produção são encontradas com facilidade.

Entretanto, o concreto tem algumas limitações como a baixa resistência à tração, que acarreta um comportamento frágil, e pouca capacidade de deformação. Para superar essas limitações, a sua combinação com aço no concreto armado ou no protendido provê ao concreto a ductilidade e a resistência à tração que são necessárias para o seu uso em estruturas. Novos tipos de concreto com elevadas resistências à compressão, denominados concretos de alta resistência, foram desenvolvidos nas últimas décadas.

O desenvolvimento da tecnologia do concreto, as novas técnicas construtivas e as ferramentas computacionais sofisticadas, capazes de reproduzir com maior precisão o comportamento das estruturas, possibilitam atualmente o projeto de estruturas mais arrojadas e esbeltas.

Os pilares de concreto do Viaduto de Millau na França, por exemplo, têm altura entre 77 e 246 metros e estão sujeitos a ciclos de carga e descarga. Nesse caso o desempenho à fadiga pode ser um dos critérios relevantes para o projeto, as estruturas esbeltas sujeitas a ciclos de carga e descarga podem ruir por fadiga e, nesses casos, a adição de fibras tem como objetivo o acréscimo de resistência da estrutura. Aumentando-se a resistência do concreto, a ductilidade do material diminui e a ruptura é mais frágil. A adição de fibras ao concreto aumenta a tenacidade do material e, portanto, a ductilidade das estruturas além de melhorar o desempenho à fadiga (Li e Matsumoto, 1998; Marangon, 2011).

Nas torres eólicas a preocupação com a fissuração do concreto provocada pelas solicitações cíclicas do aerogerador, e pela ação do vento diretamente sobre as torres eólicas, levou à solução de se adicionar fibras estruturais ao concreto para reduzir a fissuração ao longo do tempo. A opção de protender as peças estruturais do fuste da torre permite que a estrutura seja solicitada somente à compressão, evitando-se as solicitações de tração. O giro das pás do aerogerador gera uma solicitação adicional à estrutura a uma frequência de aproximadamente 0,3 Hz. A frequência natural de uma torre com cem metros de altura é estimada em 0,01 Hz.

A idéia inicial foi adicionar fibras de aço ao concreto, porém, o alto custo dessas fibras poderia inviabilizar a construção das torres. Uma solução foi tentar o uso de fibras poliméricas que também controlam a fissuração, apesar de não terem um desempenho tão bom quanto o das fibras de aço.

Segundo Rodrigues e Montardo (2002), fibras de aço ou de polipropileno têm sido utilizadas para evitar ou minimizar fissuração em pavimentos de concreto, concretos projetados em túneis, barragens, pisos industriais, blocos de fundação, entre outras estruturas. A escolha do tipo de fibra a ser adicionada ao concreto resulta de uma otimização entre o desempenho e o custo das mesmas. As fibras de diâmetro micrométrico são denominadas microfibras, enquanto que as de diâmetro milimétrico são chamadas de macrofibras.

No Brasil está bem difundido o uso de microfibras de polipropileno para o controle de fissuração e macrofibras estruturais de aço que, além da melhoria na fissuração, aumentam significativamente, a tenacidade e ductilidade. Alguns

estudos buscam substituir parte da armadura de tração de concretos armados por fibras de aço (Rodrigues, 2009).

Apesar de o desempenho das fibras de aço ser muito superior às de polipropileno, em algumas aplicações específicas, o baixo custo das fibras poliméricas vem despertando o interesse de construtores e fomentando pesquisas para avaliar seu desempenho em diversas aplicações (Zhang e Tian, 2007; Vasconcelos, 2012).

Com respeito ao desempenho do concreto à fadiga, a maioria dos estudos está centrado em estruturas submetidas à flexão, em vigas e placas, onde as tensões de tração são preponderantes.

No Brasil, os estudos de fadiga do concreto são recentes e prioritariamente direcionados para fadigas de vigas, pontes e pavimentos de concreto: Crepaldi e Djanikian (2001); Schäffer (2002); Gonçalves (2003); Cervo (2004), Maggi (2004) ou para investigar o desempenho de reforços em vigas com PRF (Polímeros Reforçados com Fibras): Silva Filho (2005); Meneghetti (2007).

O comportamento do concreto submetido à fadiga em compressão ainda não mereceu a mesma atenção de pesquisadores. Um grande número de estudos é encontrado na literatura internacional sobre fadiga em flexão em concreto com fibras (Naaman e Hammoud, 1998; Lee e Barr, 2004; Goel *et al.*, 2012 e referências internas), enquanto que os estudos sobre fadiga em compressão em concreto com fibras são escassos.

Para materiais dúcteis, como o aço, o nível de tensões  $S$  tem um papel importante e a vida à fadiga, ou seja, o número de ciclos  $N$  resistido antes da ruptura, geralmente é descrito pela curva de Wöhler, ou curva  $SxN$  (*Stress x Number*), que relaciona as tensões aplicadas com o número de ciclos até a ruptura. Essa curva mostra a tendência de que quanto maior a tensão aplicada, menor será o número de ciclos. Assim como para menores tensões, maiores serão os números de ciclos.

A curva  $SxN$  engloba apenas tensões e o número de ciclos deixando de lado outros fatores que interferem no desempenho à fadiga do concreto, tais como: a influência dos materiais constituintes, as condições de umidade, a relação entre tensões mínima e máxima, a frequência de carregamento, entre outros.

Em especial, a frequência de carregamento tem certa influência no desempenho do concreto à fadiga de uma forma que aparentemente contraria a lógica. Sparks e Menzies (1973), Hanson (1974), Jansen (1996), entre outros

apontam que a elevados níveis de tensão, acima de 75% da tensão estática máxima, ao se elevar a frequência, aumenta o número de ciclos até a ruptura. Seguindo-se este raciocínio, um ensaio a alta frequência consumiria mais energia para levar um corpo de prova ao colapso, comparado a um ensaio a baixa frequência.

Alguns modelos baseados em ensaios de fadiga em concreto convencional – sem fibras – desenvolvidos por Hsu (1981), Furtak (1984) e Zhang *et al.* (1996) consideram esta influência da frequência. Por meio das expressões sugeridas por estes autores, em uma simulação variando apenas a frequência, o número de ciclos diminui com a redução da frequência. Entretanto, estes modelos são determinísticos e não levam em conta a dispersão, sempre presente, em resultados de ensaios de fadiga em concreto.

Estudos desenvolvidos por Grzybowski e Meyer (1993), Paskova (1994), Cachim *et al.* (2001), apontam que o desempenho do concreto com fibras à fadiga em compressão é superior ao concreto sem fibras, porém estes estudos buscaram comparar diferentes conteúdos ou diversos tipos de fibras e não abordaram a influência da frequência do carregamento.

Na revisão bibliográfica, não foram encontrados estudos que incluíssem os cinco parâmetros pesquisados nesta tese: concreto; compressão; fadiga; fibras e frequência.

## **1.2. Objetivos**

O objetivo desta pesquisa de natureza teórico-experimental foi estudar o comportamento à fadiga em compressão de diferentes concretos (sem fibras e com dois tipos de fibras: polipropileno e aço), com ênfase na influência da frequência de carregamento. Os resultados experimentais serão utilizados para validar um modelo probabilístico que foi desenvolvido em paralelo.

As diferentes etapas são listadas a seguir:

1. estudar em laboratório a contribuição da adição de diferentes fibras no desempenho à fadiga do concreto em compressão submetido a diversas frequências de carregamento, avaliando-se o desempenho de cada fibra;
2. compreender qual o fenômeno que governa a ruptura a baixas frequências considerando-se o histórico de deformações de cada ensaio de fadiga;

3. propor um modelo probabilístico que avalie o desempenho à fadiga do concreto capaz de relacionar as seguintes variáveis: o número de ciclos até a ruptura, as tensões máximas e mínimas, a frequência de carregamento e a distribuição probabilística tanto das propriedades mecânicas do concreto como dos próprios ensaios de fadiga;
4. validar o modelo proposto utilizando-se os resultados experimentais obtidos no laboratório para concretos com diferentes tipos de fibras.

### **1.3. Organização do trabalho**

O trabalho está dividido em oito capítulos.

A motivação e os objetivos da pesquisa são descritos no capítulo 1.

A revisão bibliográfica de estudos sobre a fadiga em concreto é apresentada no capítulo 2 e no capítulo 3 sobre concreto com fibras.

A descrição do programa experimental incluindo-se os materiais, os equipamentos que foram utilizados e o detalhamento dos ensaios realizados estão no capítulo 4.

Os resultados obtidos nos ensaios para caracterização dos diferentes tipos de concreto e nos ensaios de fadiga, com ênfase na influência da frequência e no histórico das deformações, são apresentados e analisados no capítulo 5.

No capítulo 6 é apresentado o modelo probabilístico proposto que permite avaliar o comportamento do concreto à fadiga levando-se em conta a frequência de carregamento. Esse modelo é validado com a utilização dos resultados experimentais que foram obtidos no laboratório.

As conclusões e as sugestões para trabalhos futuros são apresentadas no capítulo 7.

As referências bibliográficas consultadas estão listadas no capítulo 8.