

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Arthur Medeiros

**Estudo do comportamento à fadiga em
compressão do concreto com fibras**

Tese de Doutorado

Tese apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientadora: Marta de Souza Lima Velasco

Co-orientador: Gonzalo Francisco Ruiz Lopez

Rio de Janeiro

Dezembro de 2012



Arthur Medeiros

Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Marta de Souza Lima Velasco

Orientadora
Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Gonzalo Francisco Ruiz López

Co-orientador
Universidad de Castilla-La Mancha

Raul Rosas e Silva

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Emil de Souza Sánchez Filho

Universidade Federal Fluminense

Glauco José de Oliveira Rodrigues

Eletrobrás

Túlio Nogueira Bittencourt

Universidade de São Paulo

José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 17 de dezembro de 2012

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e dos orientadores.

Arthur Medeiros

Graduou-se em Engenharia Civil, pela Universidade Federal do Paraná em 2002. Em fevereiro de 2007 defendeu sua Dissertação de Mestrado no programa de pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina com o trabalho intitulado Aplicação do ultra-som na estimativa da profundidade de fendas superficiais e na avaliação da eficácia de injeções em elementos de concreto armado.

Ficha Catalográfica

Medeiros, Arthur

Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras/ Arthur Medeiros; orientadora: Marta de Souza Lima Velasco; co-orientador: Gonzalo Francisco Ruiz Lopez. Rio de Janeiro PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2012.

v., 201 f.;; il. (color.) ; 29,7 cm

1. Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui referências bibliográficas

1. Engenharia civil – Teses. 2. Concreto. 3. Fibras. 4. Fadiga. 5. Frequência. 6. Modelo probabilístico. I. Velasco, Marta de Souza Lima. II. Ruiz Lopez, Gonzalo Francisco. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

Aos meus amados pais,
Rui e Suely

Agradecimentos

Inicialmente peço desculpas aos leitores deste trabalho pela extensão dos agradecimentos. Desejo agradecer a um número muito grande de pessoas que de forma direta ou indireta foram importantes para a minha formação e para a conclusão do curso de doutorado. Nos longos anos que se passaram até o final deste trabalho tive o prazer de conhecer centenas de pessoas, em diversas cidades, que de alguma forma contribuíram para o êxito e a conclusão desta tese. Seja participando da minha vida acadêmica ou fazendo parte da minha vida longe de casa, que não seria a mesma sem a companhia das pessoas a quem agradeço a seguir.

Primeiramente aos meus pais Rui e Suely pelo apoio e confiança incondicionais, sem eles seria impossível chegar até aqui. É impossível descrever em palavras como meu coração sofreu de saudades por viver tanto tempo longe dos senhores, mas o sorriso que eu recebia a cada vez que voltava para casa me enchia de alegria e motivação para seguir em frente.

Aos meus orientadores Marta de Souza Lima Velasco pela PUC-Rio e Gonzalo Ruiz pela Universidad de Castilla-La Mancha UCLM que além de todas as discussões e colaborações científicas sempre me ajudaram muito em questões burocráticas dentro e fora das universidades.

Aos membros da banca examinadora, pelas contribuições ao texto desta tese, e também por acompanhar meu trabalho em apresentações e discussões anteriores. Em especial agradeço ao professor Túlio Bittencourt que foi o elo inicial do doutorado sanduíche na Espanha.

Seguirei em ordem retroativa e parte dos agradecimentos deixarei em espanhol, para os amigos que conheci no velho mundo.

De todo el tiempo que he vivido en España he tenido el placer de disfrutar de la amistad de personas de muchos países, una mezcla de cultura que fue una de las mejores experiencias de vivir en un país extranjero. Estos amigos hicieron que yo me sintiera en casa, aún viviendo a miles de kilómetros de mi tierra. No puedo mencionar a todos, pero sí a los principales que voy a llevar en el corazón durante toda mi vida.

A todos los miembros del Grupo Español de Fractura de la UCLM: Adris, Elisa y Manu, Marian, Miguel Ángel Cámara y M.A. Romero, Rocio y Waleed por las colaboraciones en mi trabajo, por la amistad y los buenos momentos que vivimos juntos dentro y fuera de la UCLM. En especial doy las gracias a Luis Saucedo y a la profesora Rena Yu por todas las discusiones y colaboraciones sobre el modelo probabilista. También al profesor Juan Carlos Lancha, que facilitó el suministro de las probetas para el programa experimental y por las ideas aportadas a este trabajo. Y también tengo mucho que agradecer al Dr. Xiaoxin Zhang que fue como un tercer tutor de mi tesis, siempre ayudándome en discusiones científicas y en todo el programa experimental.

A Begoña, M^a Jesús y toda su familia que me adoptaron como si yo fuera uno de los suyos y siempre me ayudaron para que mi vida en Ciudad Real fuera más agradable. A Jaime Peco y Lidia Ruiz por la amistad y por las miles de pequeñas ayudas de vocabulario en nuestro despacho-pasillo. A mis grandes amigos de Marruecos Hamza y Mehdi Regragui, y Hamza Jouhri por los innumerables momentos de diversión, fútbol, fiestas, cenas, barbacoas... A los brasileños que conocí en Ciudad Real Diego Arruda, Sara Lotif, Fernanda y Rafael, Julia y Lara por la amable amistad y por los momentos que hemos compartido piso, fiestas, viajes y experiencias. También a los italianos Dario, Valentina y Roberta, Elisa y Lorenzo. Los alemanes Bob y Philipp. Los turcos Bilge, Tolga y Didem. A mi amiga francesa Mélissa. Y por último y no menos importante a mi gran amiga griega Maria Lekka.

E também tenho que agradecer aos brasileiros que eu já conhecia e tive o prazer de encontrar na Espanha, e me fizeram me sentir um pouco mais perto de casa: Tonho; Felipe, Fernanda e Nina; André Caliman; meu primo Neto e sua esposa Mariana; e outra vez meus pais.

A minha grande amiga Vanessa Rheinheimer que muito me ajudou antes e durante a minha chegada na Espanha, com todas as dúvidas e ansiedades de como chegar e como se adaptar a um país estrangeiro.

Na primeira metade deste curso de doutorado morei por 3 anos na cidade do Rio de Janeiro onde tive o prazer de conhecer muitas pessoas especiais e com algumas dessas também compartilhei moradia e agradeço a todos pelos bons momentos que passamos juntos: Johan e Leo, Antonio Pelissari e Márcia, Antonio Geraldo, Jorge Wissmann, a família do professor Eloy e aos avós do

meu amigo Heitor Coelho, Milner e Selma que me acolheram nas minhas primeiras semanas no Rio de Janeiro como se eu fosse seu neto.

Tenho que agradecer especialmente a minha amiga Thais Abreu que colaborou muito para minha vida dentro e fora da PUC-Rio, compartilhando moradia, viajando, passeando, almoçando, e também por me ajudar bastante com toda a burocracia à distância quando eu já não vivia mais no Rio de Janeiro.

Ainda no Rio de Janeiro tive o prazer de conviver com duas famílias que me viram nascer em Curitiba e tenho uma amizade incondicional com todos em especial aos amigos Heitor Coelho e Ivan Conti, e suas esposas.

Dentro da PUC-Rio tive o prazer de estudar, conviver e cultivar uma grande amizade com pessoas que sempre farão parte da minha vida. Suelen e Felipe, Bruna, Cubano, Danilo, David, Jackeline, Paloma, Raffaelo e Sherryne. Fora da PUC-Rio conheci um grupo de fanáticos torcedores do meu time de futebol, Atlético Paranaense, exilados futebolisticamente na capital fluminense e a grande amizade com eles fez minha vida no Rio de Janeiro muito mais prazerosa: Cyro e Sara, Marcelo e Marcela, Mick, Paulo Cesar, Ewerton, Thiago, Rafael e muitos outros. Não posso esquecer de duas amigas especiais Mariana Jacó e Vivi Fazzio.

A toda a minha família e em especial aos meus primos Ericson, Neto, Augusto e Thiago que muitas vezes à distância me ajudaram a solucionar problemas de informática que fugiam à minha compreensão.

Aos meus amigos de Curitiba ou Santa Catarina que sempre me deram muito apoio e carinho à distância, muitos deles foram me visitar e cada vez que me reencontravam onde quer que fosse, me recebiam com um sorriso e uma alegria que só grandes amigos são capazes de fazer: Léo, Fabrício, Rodolfo, Marco e Otávio, Eduardo “Birus”, Fabio “Modo”, Emerson “Wilber”, Danilo, Fábio Pimentel, Dilan. Os casais Diego e Flávia, Ricardo e Thaissa, e Fernando e Tati. As minhas grandes amigas Dayana e Thaylana. E um especial agradecimento as minhas amigas Ingrid e Tatiane Karas que por inúmeras vezes me ajudaram a encurtar a distância entre o Rio de Janeiro e Curitiba.

Ao CNPq através da PUC-Rio e a empresa PACADAR através da UCLM pelo apoio financeiro no decorrer deste longo curso de pós-graduação.

Resumo

Medeiros, Arthur; Velasco, Marta de Souza Lima; Ruiz, Gonzalo López. **Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras**. Rio de Janeiro, 2012. 201p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta pesquisa teórico-experimental teve como objetivo avaliar a influência da frequência de carregamento no comportamento à fadiga em compressão do concreto com e sem fibras e foi realizada através da colaboração entre a Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro e a Universidad de Castilla-La Mancha – Espanha durante o doutorado sanduíche. A motivação surgiu da idéia de construir torres eólicas, com cem metros de altura, em concreto de alto desempenho como uma solução mais econômica. Estas torres estão submetidas a ciclos de carga e descarga com frequências desde 0,01 Hz até 0,3 Hz. A adição de fibras melhora o desempenho do concreto à tração, reduzindo a fissuração. No estudo experimental foram produzidos três concretos de mesma matriz: sem fibras, com fibras de polipropileno e fibras de aço. Foram realizados 124 ensaios de fadiga em compressão em corpos de prova cúbicos de 100 mm de aresta, divididos em doze séries: três concretos e quatro frequências 4 Hz, 1 Hz, 0,25 Hz e 0,0625 Hz. Comparando-se o número de ciclos até a ruptura foi possível verificar experimentalmente que a frequência 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 desempenho das fibras de aço foi bastante superior ao das de polipropileno. Foi proposto um modelo probabilístico que busca relacionar os parâmetros de um ensaio de fadiga com a frequência de carregamento, levando em consideração a distribuição estatística dos ensaios de fadiga e das propriedades mecânicas do concreto. O modelo foi validado pelos resultados experimentais. Foi comprovado que a ruptura é probabilística em termos do número de ciclos N ou da taxa de deformação específica secundária $\dot{\epsilon}$, e que existe uma relação direta entre N e $\dot{\epsilon}$. Em termos práticos, o modelo permite estimar o número de ciclos até a ruptura sem chegar a romper o corpo de prova.

Palavras Chave

Concreto; fibras; fadiga; frequência; modelo probabilístico.

Abstract

Medeiros, Arthur; Velasco, Marta de Souza Lima (Advisor); Ruiz, Gonzalo López (Co-advisor). **Study of the compressive fatigue behavior of fiber reinforced concrete**. Rio de Janeiro, 2012. 201p. D.Sc. Thesis – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work presents the results of a theoretical-experimental study performed in cooperation between the Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro and the Universidad de Castilla-La Mancha in Spain. The main goal was to verify the influence of the loading frequency on the compressive fatigue behavior of plain and fiber reinforced concrete FRC. The motivation comes from the intention on building wind energy generator towers with one hundred meters in height by using a high-performance concrete as a cheaper alternative material instead of steel. These towers are subjected to load and unload cycles at frequencies from 0,01 Hz to 0,3 Hz. The addition of fibers improves concrete properties such as tensile strength, reducing cracking. In the experimental study three types of concrete were produced from the same matrix: a plain concrete and two FRC, with polypropylene fibers and with steel fibers. One hundred twenty four compressive fatigue tests were performed on cubic specimens with 100 mm in edge length, divided on twelve series: three types of concrete and four frequencies 4 Hz, 1 Hz, 0,25 Hz and 0,0625 Hz. Comparing the number of cycles to failure, it is clear that the loading frequency influences the compressive fatigue behavior and that the addition of fibers improves fatigue performance only at the lower frequencies. The performance of the steel fibers is more efficient than the polypropylene ones. A probabilistic model was proposed to relate the fatigue parameters with the loading frequency, considering both statistical distributions of the fatigue tests and the concrete mechanical properties. There is a good agreement between the model and the experimental results. In terms of number of cycles N or strain history (through the secondary strain rate $\dot{\epsilon}$) the rupture is probabilistic, and there is a direct relation between N and $\dot{\epsilon}$. This relation provides the possibility to estimate the number of cycles to failure without breaking the specimen.

Keywords

Concrete; fibers; fatigue; frequency; probabilistic model.

Sumário

1. Introdução	21
1.1. Motivação	21
1.2. Objetivos	24
1.3. Organização do trabalho	25
2. Fadiga em concreto	26
2.1. Comportamento à fadiga do concreto	26
2.2. Fatores intervenientes na vida à fadiga	29
2.3. Comentários finais	46
3. Concreto com fibras	47
3.1. Considerações gerais	47
3.2. Aplicações	49
3.3. Fibras de aço	50
3.4. Fibras de polipropileno	51
3.5. Propriedades do concreto com fibras	53
3.6. Resistência a ações dinâmicas e à fadiga	65
3.7. Comentários finais	75
4. Programa experimental	77
4.1. Introdução	77
4.2. Produção dos concretos	77
4.3. Descrição dos corpos de prova	79
4.4. Descrição dos ensaios e dos equipamentos	82
4.5. Resumo do programa experimental	95
5. Apresentação e análise dos resultados	96
5.1. Introdução	96
5.2. Ensaios de caracterização	96
5.3. Ensaios de fadiga	103
5.4. Histórico de deformações	117
5.5. Modo de ruptura	139
5.6. Ensaios de fadiga – variação da razão entre tensões	142
5.7. Comentários finais	145

6. Modelo probabilístico	146
6.1. Introdução	146
6.2. Modelo probabilístico para fadiga baseado na distribuição inicial	147
6.3. Validação do modelo probabilístico baseado nos resultados experimentais	154
6.4. Histórico de deformações	172
6.5. Comentários finais	176
7. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	178
7.1. Conclusões	178
7.2. Sugestões para trabalhos futuros	181
8. Referências bibliográficas	183
Anexo A	196
Anexo B	199

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Curvas SxN comparando amostras secas e saturadas (Cornelissen e Lewis, 1986).	35
Figura 2.2 – Curvas SxN comparando-se amostras secas e saturadas (Raithby e Galloway, 1974).	36
Figura 2.3 – Número de ciclos <i>versus</i> frequência (Cervo, 2004).	39
Figura 2.4 – Variação da frequência em ensaio de tração na flexão (Cornelissen, 1984).	39
Figura 2.5 – Variação da frequência em ensaios de tensão alternada em flexão (Cornelissen, 1984).	40
Figura 2.6 – Variação da frequência: ciclos <i>versus</i> taxa de fluência secundária (Cornelissen, 1984).	40
Figura 2.7 – Curva de fluência cíclica (Cornelissen, 1984).	41
Figura 2.8 – Curva SxN : alto ciclo à fadiga; modelo desenvolvido por Hsu (1981).	44
Figura 2.9 – Número de ciclos <i>versus</i> frequência por vários autores.	45
Figura 2.10 – Ciclos <i>versus</i> frequência; modelo simplificado de Siemes (1988).	46
Figura 3.1 – Mecanismo de transferência de tensões entre a matriz e as fibras.	48
Figura 3.2 – Concreto com fibras onde há (a) e onde não há (b) compatibilidade dimensional entre as fibras e o agregado graúdo	54
Figura 3.3 – Ensaio de Vebe (ACI 211.3-75, 2002).	56
Figura 3.4 – Comportamento sob compressão do concreto de resistência normal com fibras de aço (Balaguru e Shah, 1992).	58
Figura 3.5 – Comportamento sob compressão do concreto de alta resistência com fibras de aço (Balaguru e Shah, 1992).	58
Figura 3.6 – Curvas carga <i>versus</i> deslocamento para concreto com fibras (Balaguru e Shah, 1992).	61
Figura 3.7 – Curvas carga <i>versus</i> flecha com diferentes teores de fibras (Balaguru e Shah, 1992).	63
Figura 3.8 – Resistência ao impacto de concretos com e sem fibras (Balaguru e Shah, 1992).	66
Figura 3.9 – Dano acumulado para o concreto com fibras de polipropileno (Grzybowski e Meyer, 1993).	71
Figura 3.10 – Dano acumulado para o concreto com fibras de aço (Grzybowski e Meyer, 1993).	71

Figura 3.11 – Comparação da máxima deformação específica de ruptura dentro de uma envoltória devida a carregamento monotônico (Cachim <i>et al.</i> ,2002).	75
Figura 4.1 – Foto das fibras de aço e de polipropileno.	78
Figura 4.2 – Corpos de prova cúbicos cortados a partir de prismas.	80
Figura 4.3 – Máquina servo-hidráulica de ensaios de compressão.	83
Figura 4.4 – Extensometria axial e radial em um corpo de prova cilíndrico: ensaio de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson.	85
Figura 4.5 – Máquina híbrida adaptada para ensaios de flexão em três pontos.	86
Figura 4.6 – Extensometria do ensaio de flexão em três pontos.	87
Figura 4.7 – Resistências residuais à tração na flexão (UNE-EN 14651, 2007).	89
Figura 4.8 – Máquina de ensaios utilizada para os ensaios de fadiga.	90
Figura 4.9 – Sinal senoidal: parâmetros de configuração do ensaio de fadiga.	91
Figura 4.10 – Gaiola de proteção ao redor do ensaio de fadiga.	92
Figura 5.1 – Curvas carga x flecha: concreto sem fibras C1.	100
Figura 5.2 – Curvas carga x flecha e tensão x CMOD: concreto com fibras de polipropileno C2.	101
Figura 5.3 – Curvas carga x flecha e tensão x CMOD: concreto com fibras de aço C3.	102
Figura 5.4 – Comparação do comportamento pós-pico dos concretos com e sem fibras.	103
Figura 5.5 – Ensaio de fadiga: frequência x número de ciclos: concreto sem fibras C1.	106
Figura 5.6 – Ensaio de fadiga: frequência x número de ciclos: concreto com fibras de polipropileno C2.	110
Figura 5.7 – Ensaio de fadiga: frequência x número de ciclos: concreto com fibras de aço C3.	113
Figura 5.8 – Ensaio de fadiga: concretos C1, C2 e C3; médias e desvios padrão.	114
Figura 5.9 – Ensaio de fadiga: comparação entre os concretos com e sem fibras.	115
Figura 5.10 – Número de ciclos x taxa de deformação ϵ : C1, C2 e C3.	118
Figura 5.11 – Número de ciclos x taxa de deformação ϵ : 4 Hz, 1Hz, 0,25 Hz e 0,0625 Hz.	119
Figura 5.12 – Número de ciclos x taxa de deformação ϵ : 4 Hz, 1Hz, 0,25 Hz e 0,0625 Hz.	120
Figura 5.13 – Tempo normalizado x deformação específica máxima: C1, C2 e C3.	122
Figura 5.14 – Tempo normalizado x deformação específica máxima: 0,0625 Hz, 0,25 Hz, 1 Hz e 4 Hz.	124
Figura 5.15 – Envoltórias das curvas carga x deformação: ensaios de compressão em cubos; concretos C1, C2 e C3.	126

Figura 5.16 – Três períodos de um ensaio de fadiga.	127
Figura 5.17 – Histórico de deformações: concreto sem fibras; 0,0625 Hz.	128
Figura 5.18 – Histórico de deformações: concreto sem fibras; 0,25 Hz.	128
Figura 5.19 – Histórico de deformações: concreto sem fibras; 1 Hz.	129
Figura 5.20 – Histórico de deformações: concreto C1; 4 Hz.	129
Figura 5.21 – Histórico de deformações: concreto com fibras de polipropileno; 0,0625 Hz.	130
Figura 5.22 – Histórico de deformações: concreto com fibras de polipropileno; 0,25 Hz.	130
Figura 5.23 – Histórico de deformações: concreto com fibras de polipropileno; 1 Hz.	131
Figura 5.24 – Histórico de deformações: concreto com fibras de polipropileno; 4 Hz.	131
Figura 5.25 – Histórico de deformações: concreto com fibras de aço; 0,0625 Hz.	132
Figura 5.26 – Histórico de deformações: concreto com fibras de aço; 0,25 Hz.	132
Figura 5.27 – Histórico de deformações: concreto com fibras de aço; 1 Hz.	133
Figura 5.28 – Histórico de deformações: concreto com fibras de aço; 4 Hz.	133
Figura 5.29 – Modo de ruptura: ensaio de fadiga; concreto sem fibras, 1Hz.	137
Figura 5.30 – Modo de ruptura: ensaio de fadiga; concreto sem fibras, 0,0625 Hz.	140
Figura 5.31 – Modo de ruptura por deslizamento: ensaio de compressão em corpo de prova cilíndrico; concreto sem fibras.	140
Figura 5.32 – Face superior dos corpos de prova rompidos: C1, C2 e C3.	141
Figura 5.33 – Faces laterais de um corpo de prova rompido: concreto com fibras de polipropileno; frequência 0,25 Hz	141
Figura 5.34 – Faces laterais de um corpo de prova rompido: concreto com fibras de aço; frequência 4 Hz, separação em um corpo central e laterais aderidas.	142
Figura 5.35 – Faces laterais de um corpo de prova rompido: concreto com fibras de aço; frequência 0,25 Hz, separação em duas partes semelhantes.	142
Figura 6.1 – Curvas de iso-probabilidade de falha, onde D_i é a CDF inicial, determinada pelos ensaios de resistência ajustada segundo a Equação 6.1, enquanto que D_f é a CDF final, ajustada aos ensaios de fadiga.	150
Figura 6.2 – Variação da distribuição D_f em função da frequência.	153
Figura 6.3 – Influência da razão entre tensões nas curvas de iso-probabilidade de falha: $R = 0,1; 0,5$ e $0,9$.	154
Figura 6.4 – Distribuição inicial D_i dos ensaios de resistência à compressão $f_{c_{cub}}$ em conjunto com os resultados experimentais.	156
Figura 6.5 – Distribuição inicial D_i para os diferentes concretos.	158

Figura 6.6 – Distribuição final D_f ajustada para os ensaios de fadiga do concreto sem fibras C1 para as diferentes frequências, em conjunto com os resultados experimentais.	160
Figura 6.7 – Distribuição final D_f ajustada para os ensaios de fadiga do concreto C2, em conjunto com os resultados experimentais, para as diferentes frequências.	161
Figura 6.8 – Distribuição final D_f ajustada para os ensaios de fadiga do concreto com fibras de aço C3, para as quatro frequências distintas, em conjunto com os resultados experimentais.	163
Figura 6.9 – Número de ciclos <i>versus</i> probabilidade de falha; comparação da influência da frequência para as curvas ajustadas aplicando-se o modelo aos três concretos.	164
Figura 6.10 – Distribuição inicial D_i dos ensaios de resistência à compressão $f_{c_{cub}}$ em conjunto com os resultados experimentais para o concreto sem fibras C4.	166
Figura 6.11 – Distribuição final D_f ajustada para os ensaios de fadiga; $R = 0,3$ e $R = 0,1$: concreto sem fibras C4.	168
Figura 6.12 – Passos de carregamento cíclico utilizando-se o modelo.	169
Figura 6.13 – Probabilidades de falha acumuladas após quatro passos de carregamento cíclico.	171
Figura 6.14 – Número de ciclos <i>versus</i> taxa de deformação: C1, C2, C3 e C4.	173
Figura B.1 – (a) Função de Densidade de Probabilidades PDF; (b) Função de Distribuição Cumulativa CDF	201

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Classificação da fadiga em função do número de ciclos (Hsu, 1981).	42
Tabela 4.1 – Dosagem dos concretos C1, C2 e C3.	78
Tabela 4.2 – Série de corpos de prova cúbicos utilizadas nos ensaios de fadiga.	81
Tabela 4.3 – Taxas de armazenamento de dados: ensaios em corpos de prova cúbicos: compressão e fadiga.	90
Tabela 4.4 – Dosagem do concreto sem fibras C4.	93
Tabela 4.5 – Resumos dos ensaios realizados no programa experimental.	95
Tabela 5.1 – Propriedades mecânicas: concreto sem fibras C1.	97
Tabela 5.2 – Propriedades mecânicas: concreto com fibras de polipropileno C2.	97
Tabela 5.3 – Propriedades mecânicas: concreto com fibras de aço C3.	98
Tabela 5.4 – Resistência à tração por flexão e resistências residuais: concreto sem fibras C1.	99
Tabela 5.5 – Resistência à tração por flexão e resistências residuais: concreto com fibras de polipropileno C2.	100
Tabela 5.6 – Resistência à tração por flexão e resistências residuais: concreto com fibras de aço C3.	102
Tabela 5.7 – Resistência à compressão em cubos $f_{c_{cub}}$: concreto sem fibras C1.	104
Tabela 5.8 – Ensaio de fadiga: frequência 4 Hz; concreto sem fibras C1.	105
Tabela 5.9 – Ensaio de fadiga: frequência 1 Hz; concreto sem fibras C1.	105
Tabela 5.10 – Ensaio de fadiga: frequência 0,25 Hz; concreto sem fibras C1.	105
Tabela 5.11 – Ensaio de fadiga: frequência 0,0625 Hz; concreto sem fibras C1.	106
Tabela 5.12 – Resistência à compressão em cubos: concreto com fibras de polipropileno.	107
Tabela 5.13 – Ensaio de fadiga: frequência 4 Hz; concreto com fibras de polipropileno.	108
Tabela 5.14 – Ensaio de fadiga: frequência 1 Hz; concreto com fibras de polipropileno.	109
Tabela 5.15 – Ensaio de fadiga: frequência 0,25 Hz; concreto com fibras de polipropileno.	109
Tabela 5.16 – Ensaio de fadiga: frequência 0,0625 Hz; concreto com fibras de polipropileno.	109

Tabela 5.17 – Resistência à compressão em cubos: concreto com fibras de aço C3.	111
Tabela 5.18 – Ensaio de fadiga: frequência 4 Hz; concreto com fibras de aço C3.	111
Tabela 5.19 – Ensaio de fadiga: frequência 1 Hz; concreto com fibras de aço C3.	112
Tabela 5.20 – Ensaio de fadiga: frequência 0,25 Hz; concreto com fibras de aço C3.	112
Tabela 5.21 – Ensaio de fadiga: frequência 0,0625 Hz; concreto com fibras de aço C3.	112
Tabela 5.22 – Deformação total e central: média \pm desvio padrão.	135
Tabela 5.23 – Propriedades mecânicas: concreto sem fibras C4.	143
Tabela 5.24 – Resistência à compressão $f_{c_{cub}}$ concreto sem fibras C4.	143
Tabela 5.25 – Resistência à compressão $f_{c_{cub}}$: concreto sem fibras C4.	144
Tabela 6.1 – Resistência à compressão estática $f_{c_{cub}}$ e probabilidade de falha para cada corpo de prova e para cada concreto.	155
Tabela 6.2 – Parâmetros ajustados para a distribuição inicial D_i com base nos ensaios de resistência à compressão $f_{c_{cub}}$.	157
Tabela 6.3 – Número de ciclos até a ruptura e probabilidade de falha: concreto sem fibras C1.	159
Tabela 6.4 – Número de ciclos até a ruptura e probabilidade de falha: concreto C2.	161
Tabela 6.5 – Número de ciclos até a ruptura e probabilidade de falha: concreto com fibras de aço C3.	163
Tabela 6.6 – Parâmetros de ajuste b , c e γ ajustados para cada concreto.	164
Tabela 6.7 – Resistência à compressão estática e probabilidade de falha para cada corpo de prova do concreto C4.	166
Tabela 6.8 – Número de ciclos até a ruptura e probabilidade de falha: concreto sem fibras C4: $R = 0,3$ e $R = 0,1$.	167
Tabela 6.9 – Passos de carregamento cíclico	169
Tabela 6.10 – Quatro ciclos de carregamento, concreto sem fibras C1	170
Tabela 6.11 – Quatro ciclos de carregamento, concreto com fibras de polipropileno C2.	170
Tabela 6.12 – Quatro ciclos de carregamento, concreto com fibras de aço C3.	170
Tabela 6.13 – Número de ciclos para alcançar a ruptura.	171
Tabela 6.14 – Resumo dos parâmetros do modelo ajustados para os diferentes concretos.	176

Lista de símbolos e abreviações

Letras Latinas

A, B', C	Constantes experimentais, eq. 2.17;
a, b, c	Parâmetros de ajuste do modelo proposto, eq. 6.9;
a/c	Fator água/cimento;
B	Espessura do corpo de prova prismático;
$C1$	Concreto sem fibras;
$C2$	Concreto com fibras de polipropileno;
$C3$	Concreto com fibras de aço;
$C4$	Concreto sem fibras C4;
C_f	Coefficiente do efeito da frequência, eq. 2.17 e 2.18;
d, e	Constantes empíricas, eq. 2.2;
D_i	Deformação máxima correspondente ao período i , Fig. 5.16;
D_i	Distribuição inicial, Fig. 6.1;
D_f	Distribuição final, Fig. 6.1;
$d_{m\acute{a}x}$	Diâmetro máximo dos agregados;
DP	Desvio padrão;
E	Modulo de elasticidade;
f	Frequência de carregamento;
f_0	Frequência de referência abaixo da qual o ensaio é considerado estático;
f_c	Resistência à compressão;
f_{c_0}	Resistência à compressão estática;
$f_{c_{cub}}$	Resistência à compressão em corpo de prova cúbico;
f_{cd}	Resistência à compressão dinâmica;
f_{ck}	Resistência à compressão axial;
$f_{t,f}$	Resistência à tração na flexão estática;
f_{est}	Resistência estática;
F_j	Carga em um ponto j determinado;
f_{Rj}	Resistência residual à tração na flexão;
f_t	Resistência à tração pura;
H	Altura do corpo de prova prismático;

h_{ent}	Profundidade do entalhe;
k	Parâmetro de forma de Weibull;
L1, L2, L3	Medidas das arestas do corpo de prova cúbico nas três dimensões;
m, n	Constantes experimentais, eq. 2.17;
N	Número de ciclos até a ruptura;
o, p, q	Constantes experimentais, eq. 2.19;
PF	Probabilidade de falha;
$P_{máx}$	Carga máxima do ensaio de flexão em três pontos;
$P_{máx,c}$	Carga máxima calculada para ser equivalente a 85% f_{cub} ;
R	Razão entre a tensão mínima e a tensão máxima;
R'	Razão entre as tensões mínima e máxima para tensões alternadas;
S	Tensão (<i>Stress</i>);
S_a	Amplitude de carregamento do ensaio de fadiga;
S_m	Tensão média do ensaio de fadiga;
$S_{máx}$	Tensão máxima do ensaio de fadiga;
$S_{mín}$	Tensão mínima do ensaio de fadiga;
T	Período de repetição de carga, eqs. 2.15 e 2.16;
T_i	Tempo correspondente ao período i , Fig. 5.16.

Letras Gregas

α	Expoente ajustável para diferentes frequências, eqs. 6.2 e 6.4;
β	Parâmetro do material, eq. 2.1;
β'	Constante experimental, eq. 2.19;
δ	Descolamento vertical ou flecha;
$\Delta\sigma$	Faixa de tensões;
$\dot{\epsilon}$	Taxa de deformação específica;
$\dot{\epsilon}_i$	Taxa de deformação específica qualquer;
$\dot{\epsilon}_{sec}$	Taxa de deformação específica secundária;
φ	Inclinação da reta da eq. 6.16;
γ	Parâmetro de ajuste para diferentes frequências;
η	Inclinação da reta da eq. 6.16;
λ	Parâmetro de escala de Weibull;
ν	Coeficiente de Poisson;
$\dot{\sigma}_d$	Taxa de carregamento do ensaio de fadiga;
σ_f	Tensão de ruptura;

σ_{f_0}	Tensão de ruptura a um ciclo – resistência estática;
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Tensão máxima do ensaio de fadiga;
$\sigma_{m\acute{a}x_0}$	Equivalente estática da tensão máxima do ensaio de fadiga;
$\sigma_{m\acute{i}n_0}$	Tensão mínima abaixo da qual a probabilidade de falha é nula;
$\dot{\sigma}_0$	Taxa de carregamento do ensaio estático.

Abreviações

ACI	American Concrete Institute;
ASTM	American Society for Testing and Materials;
CDF	Cumulative distribution function;
CEB	Comité Euro-International du Betón;
CMOD	Crack mouth opening displacement;
FRC	Fiber reinforced concrete;
JSCE	Japan Society of Civil Engineers;
LVDT	Linear variable differential transformer;
NBR	Norma Brasileira.