

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR MARCO ANTONIO
CARNIO..... E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 05/02/2009

.....
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Propagação de Trinca por Fadiga do Concreto Reforçado com Baixos Teores de Fibra

Autor: **Marco Antonio Carnio**
Orientador: **Itamar Ferreira**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

Propagação de Trinca por Fadiga do Concreto Reforçado com Baixos Teores de Fibra

Autor: **Marco Antonio Carnio**
Orientador: **Itamar Ferreira**

Curso: Engenharia Mecânica
Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Tese de doutorado apresentada à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica

Campinas, 2009
S.P. - Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

C217p Carnio, Marco Antonio
Propagação de trinca por fadiga do concreto reforçado com baixos teores de fibra / Marco Antonio Carnio. --Campinas, SP: [s.n.], 2009.

Orientador: Itamar Ferreira.
Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Materiais - Fadiga. 2. Fribra de concreto armado.
3. Concreto - Fadiga. I. Ferreira, Itamar. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: Fatigue crack propagation of fiber reinforced concrete with low content of fibers

Palavras-chave em Inglês: Fatigue, Fiber reinforced concrete, Crack propagation

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Titulação: Doutor em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Cecilia Amélia de Carvalho Zavaglia, Paulo Sérgio dos Santos Bastos, Libânio Miranda Pinheiro, Célia Marina de Alvarenga Freire

Data da defesa: 05/02/2009

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

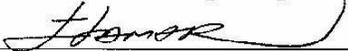
TESE DE DOUTORADO

Propagação de Trinca por Fadiga do Concreto
Reforçado com Baixos Teores de Fibra

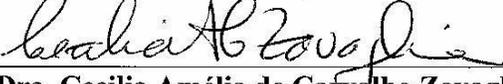
Autor: **Marco Antonio Carnio**

Orientador: **Itamar Ferreira**

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Tese:



Prof. Dr. Itamar Ferreira, Presidente
Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP



Profa. Dra. Cecília Amélia de Carvalho Zavaglia
Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP



Prof. Dra. Célia Marina de Alvarenga Freire
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP



Prof. Dr. Paulo Sergio Santos Bastos
Universidade Estadual Paulista – FEB/UNESP/Bauru



Prof. Dr. Libânio Miranda Pinheiro
Universidade de São Paulo – EESC/USP

Campinas, 05 de fevereiro de 2009

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha Família.

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Itamar Ferreira, que aceitou a orientação deste trabalho com espírito de colaboração para minha formação.

Ao Prof. Dr. Loir Afonso Moreira pelo apoio nos momentos em que a continuidade do trabalho podia se perder.

À Profa. Dra. Rosa Lintz pelo apoio nos trabalhos de moldagem no Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas do CEATEC/PUC-Campinas.

Ao técnico José Luiz Lisboa, do Laboratório de Propriedades Mecânicas da FEM/UNICAMP, pelo apoio constante nos ensaios, que foi imprescindível para realização deste trabalho.

Aos funcionários Valquíria, Fabiano, Joventino e Igor do Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil/CEATEC da PUC-Campinas, pelo apoio operacional na execução dos corpos-de-prova.

Aos Engenheiros Edson e Rodolfo do Centro Tecnológico da UNICAMP, pelo apoio nos ensaios realizados no início dos estudos sobre fadiga.

À FEM/UNICAMP pela nova oportunidade e pelo uso de sua infraestrutura para desenvolvimento deste trabalho

A Deus pela saúde e presença constante.

Resumo

CARNIO, Marco Antonio, *Propagação de trinca por fadiga do concreto reforçado com baixos teores de fibra*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2009. 145 p. Tese (Doutorado)

O concreto reforçado com fibras (CRF) é um compósito constituído de duas fases: concreto (matriz) e fibras (reforço). As fibras são elementos descontínuos de vários aspectos geométricos e materiais, destacando-se atualmente as fibras metálicas (aço) e as fibras sintéticas (polipropileno). Em geral, os teores de fibras em volume adicionados à matriz se dividem em: *baixos teores* - até 0,5%; *médios teores* - entre 0,5% e 1% e *altos teores* - acima de 1%. Dentre as aplicações do CRF com *baixos teores*, a utilização em pavimentos de concreto é a mais significativa, cuja solicitação predominante é cíclica. O estudo da fadiga se divide em iniciação da trinca, propagação da trinca e fratura final, e a vida em fadiga (N_f) é caracterizada pela soma do número de ciclos até a fratura. Dessa forma, como no estudo da fadiga do CRF a maioria dos trabalhos se concentra na obtenção de seu comportamento por meio das curvas S-N (tensão em função do número de ciclos até a fratura), este trabalho tem como objetivo estudar experimentalmente a propagação da trinca por fadiga dos CRFs com *baixos teores*, por meio de ensaios de flexão em corpos-de-prova prismáticos de seção quadrada, submetidos a carga cíclica com frequência de 20 Hz e razão de carga $R = 0,1$, representando seu comportamento pelas curvas $da/dN-\Delta K$ (taxa de propagação de trinca por fadiga em função da variação do fator de intensidade de tensão), ensaios de flexão em corpos-de-prova prismáticos de seção quadrada, submetidos a carga monotônica, representando seu comportamento pelas curvas carga monotônica-deslocamento de abertura da boca da trinca (CMOD) e o estudo macroscópico da seção fraturada desses concretos, após cargas cíclicas e monotônica para avaliação dos mecanismos de fratura da seção, visando melhor entender a contribuição dessas adições nos CRFs submetidos a cargas cíclicas. Os resultados indicam que o CRF com fibras de polipropileno de 54 mm apresenta melhor desempenho à propagação de trinca por fadiga, com comportamento equivalente aos CRFs com fibras de aço de 60 mm e que, o CRF com fibras de aço de 35 mm apresenta melhor desempenho dentre todos tipos e teores de fibras estudadas. Quanto ao comportamento à carga monotônica, o desempenho dos CRFs com fibras de aço de 60 mm se mostrou melhor dentre os estudados, desempenho esse não confirmado quanto à propagação de trinca por fadiga. Também se conclui que a ancoragem das fibras interfere no comportamento dos CRFs às cargas monotônica e cíclica, sendo que a degradação da ancoragem mecânica nas fibras de aço submetidas a cargas cíclicas penaliza mais os CRFs com fibras de aço de 60 mm quanto ao desempenho à propagação de trinca por fadiga. Na avaliação da superfície de fratura dos CRFs, verificou-se que a adição de fibras interfere nessa superfície, apresentando-se mais plana para os CRFs com fibras sintéticas e mais irregular para os CRFs com fibras de aço.

Palavras-chave: Fadiga, Concreto reforçado com fibras. Propagação de trinca.

Abstract

CARNIO, Marco Antonio. *Fatigue crack propagation of the reinforced concrete with low contents of fibers*. Campinas: Faculty of Mechanical Engineering, University of Campinas, São Paulo State, Brazil, 2009. 145 p. Doctoral Thesis.

The fibers reinforced concrete (FRC) is a composite formed by two phases: concrete (matrix) and fibers (reinforce). The fibers are discontinuous elements of several geometric aspects and materials, currently detaching the metal fibers (steel) and the synthetic fibers (polypropylene). In general, the contents of fibers in volume added to the matrix are separated in: *low contents* – up to 0.5%; *medium contents* – between 0.5% and 1% and *high contents* – above 1%. Among the applications of the FRC with low contents, the usage in concrete pavements is the most significant, which predominant request is cyclic. The study of fatigue is divided into initialization of crack, propagation of crack and final fracture and the life in fatigue (N_f) is characterized by the sum of number of cycles up to the fracture. In this way, as in the study of fatigue of FRC the majority of the work focuses on obtaining their behavior through the S-N curves (tensile due to the number of cycles up to the fracture) this work has as objective to study experimentally the fatigue crack propagation of the low contents FRC, by means of testing the flexure in prismatic samples of square section, subjected to a cyclic load of 20 Hz frequency and load ratio $R=0.1$, representing their behavior through the $da/dN-\Delta K$ curves (rate of fatigue crack propagation in lights of the variation of the intensity of the tensile), by testing the flexure in prismatic samples of square section, subjected to a monotonic load, representing their behavior through the curves monotonic load – cracking mouth opening displacement (CMOD) and the macroscopic study of the fracture section, to better understand the contribution of these additions into the FRC subjected to a cyclic load. The results indicate that the FRC with synthetic fibers of 54 mm size shows a better performance for fatigue crack propagation, with equivalent behavior as of the FRCs with steel fibers of 60 mm size and that the FRC with steel fibers of 35 mm size shows even a better performance among all types and contents of fibers studied. About the behavior of the monotonic load, the performance of the FRCs with steel fibers of 60 mm size was better among all studied behaviors, but that performance is not confirmed regarding the fatigue crack propagation. Also concludes that the anchorage of the fibers interfere in the behavior of both FRC subjected to monotonic load and cyclic load, and the degradation of the mechanic anchorage in the steel fibers, subjected to a cyclic loads punish more the FRCs with the steel fibers of 60 mm regarding to their performance of fatigue crack propagation. Evaluating the fracture surfaces of the FRC, verify that the addition of fibers interfere on these, resulting in a more flat to the FRC with synthetic fibers and more irregular to the FRCs with steel fibers.

Keywords: Fatigue, Fiber reinforced concrete, Crack Propagation.

Índice

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xviii
Nomenclatura	xix
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	4
2 Revisão bibliográfica	5
2.1 O concreto	5
2.2 Concreto reforçado com fibras	7
2.2.1 Fibras utilizadas para reforço do concreto	10
2.2.2 Aspectos gerais do concreto reforçado com fibras de aço	12
2.2.3 Aspectos gerais do concreto reforçado com fibras sintéticas	15
2.3 Fadiga	17
2.3.1 A fadiga mecânica	18
2.3.2 Procedimento para o estudo da fadiga	19
2.3.3 Mecanismos de propagação de trinca por fadiga em compósitos cerâmicos	29
2.3.4 Estudo da fadiga no concreto reforçado com fibras	33

3	Materiais e Procedimentos Experimentais	53
3.1	Materiais	54
3.1.1	Concreto de Referência	58
3.1.2	Compósitos de concreto reforçado com fibras	58
3.2	Moldagem e cura dos corpos-de-prova	59
3.3	Preparação dos corpos-de-prova para os ensaios	66
3.4	Ensaio	68
3.4.1	Avaliação da resistência à compressão axial	68
3.4.2	Avaliação do módulo de elasticidade	69
3.4.3	Avaliação da resistência à tração por flexão	70
3.4.4	Avaliação da resistência à tração por compressão diametral	70
3.4.5	Avaliação da propagação de trinca por fadiga	71
3.4.6	Avaliação do comportamento carga monotônica – CMOD	76
4	Resultados e Discussões	77
4.1	Concreto de Referência	77
4.1.1	Estudo do comportamento do CR à propagação de trinca por fadiga	79
4.1.2	Estudo do comportamento Carga monotônica – CMOD do CR	82
4.2	Concreto Reforçado com Fibras	83
4.2.1	Estudo da influência dos tipos e dos teores de fibras no comportamento do CRF à propagação de trincas por fadiga	83
4.2.2	Estudo do comportamento carga monotônica – CMOD dos CRFs	86
4.3	Análise do comportamento dos CRFs à propagação de trinca por fadiga	89
4.3.1	Comparação dos CRFs com o CR	89
4.3.2	Comparação entre os CRFs com o mesmo teor para todos os tipos de fibras	96
4.3.3	Comparação entre os CRFs com mesmo material e mesmo teor	99
4.3.4	Comparação entre os CRFs com comprimentos de fibras similares	105

4.4	Análise do comportamento carga monotônica – CMOD dos CRFs	111
4.4.1	Comparação entre os CRFs e o CR	111
4.4.2	Comparação entre os CRFs com o mesmo teor para todos os tipos de fibras	115
4.4.3	Comparação entre os CRFs com mesmo material e mesmo teor	117
4.4.4	Comparação entre os CRFs com comprimentos de fibras similares	122
4.5	Estudo macroscópico da seção fraturada do CR e dos CRFs	126
5	Conclusões e Sugestões para Próximos Trabalhos.....	135
5.1	Conclusões	135
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	138
	Referências bibliográficas	139

Lista de Figuras

2.1	Esquema de uma trinca em um material com fibras, adaptado de LI & MATSUMOTO (1998)	9
2.2	Tipos de fibras de aço normalmente utilizadas em CRF	13
2.3	Microfibras sintéticas (polipropileno)	16
2.4	Macrofibras sintéticas (polipropileno)	17
2.5	Ciclos de tensões. (a) alternadas simétricas; (b) repetidas; (c) aleatórias, segundo CALLISTER (2002)	20
2.6	Limite de resistência à fadiga, segundo CALLISTER (2002)	21
2.7	Resistência à fadiga e vida em fadiga, segundo CALLISTER (2002)	22
2.8	Curva de histerese para um material carregado ciclicamente com deformações elástica e plástica, segundo SHINGLEY (2004)	23
2.9	Comprimento da trinca em função do número de ciclos, para três níveis de tensões, segundo SHINGLEY (2004)	26
2.10	Diagrama típico da/dN – ΔK , segundo SHINGLEY (2004)	27
2.11	Curvas de propagação de trinca por fadiga de vários materiais, adaptado de RITCHIE (1999)	29
2.12	Mecanismos extrínseco e intrínseco que envolve o crescimento da trinca, adaptado de RITCHIE (1999)	30
2.13	Mecanismos extrínseco e intrínseco dos materiais metálicos (a) e compósitos cerâmicos (b), adaptado de RITCHIE (1999)	31
2.14	Abertura da trinca em função da variação da tensão de aderência devido ao descolamento e ao atrito de arrancamento (a) e o decréscimo no efeito de escudo devido ao carregamento cíclico (b), adaptado de RITCHIE (1999)	33
2.15	Faixas de ciclos de fadiga, segundo HSU (1981)	35
2.16	Diagramas S-N para vários CRFs com teor em volume de 0,5%, segundo RAMAKRISHNAN & LOKVIK (1992)	39

2.17	Diagramas S-N construído a partir das médias dos números de ciclos obtidos para cada percentual da resistência à tração por flexão do material, segundo NANNI (1991)	41
2.18	Diagrama S-N para o CRFA com teor em volume de 2 %, segundo NAAMAN & HAMMOUD (1998)	43
2.19	Resistência à fadiga dos CRFs, segundo SINGH (2006)	45
2.20	Curvas S-N dos CRFs, segundo SINGH (2006)	45
2.21	Curva de propagação de trinca por fadiga, segundo LOU, <i>et al.</i> (2006)	48
2.22	Típica superfície de fratura dos concretos (a) 30 MPa, (b) 35 MPa e (c) 40 MPa, segundo LOU <i>et al.</i> (2006)	49
3.1	Distribuição granulométrica da areia	55
3.2	Distribuição granulométrica do pedrisco	55
3.3	Distribuição granulométrica da brita 1	56
3.4	Fibra 1 (polipropileno) Comprimento 54 mm	57
3.5	Fibra 2 (polipropileno) Comprimento 38 mm	57
3.6	Fibra 3 (aço) Comprimento 60 mm	57
3.7	Fibra 4 (aço) Comprimento 60 mm	57
3.8	Fibra 5 (aço) Comprimento 35 mm	57
3.9	Forma com dispositivo removível para caracterização do entalhe (vista frontal)	60
3.10	Detalhe do dispositivo removível para caracterização do entalhe (vista lateral)	60
3.11	Colocação da brita 1	62
3.12	Colocação do pedrisco	62
3.13	Colocação do cimento	62
3.14	Colocação da água e do fluidificante	62
3.15	Colocação das fibras	63
3.16	Mistura pronta	63
3.17	Colocação do concreto na forma prismática e adensamento em mesa vibratória	63
3.18	Acabamento superficial da forma prismática	63
3.19	Corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos moldados	64
3.20	Retirada do entalhe	65
3.21	Entalhe caracterizado no corpo-de-prova	65

3.22	Tanque de imersão para cura dos corpos-de-prova	66
3.23	Fresagem do corpo-de-prova cilíndrico	66
3.24	Corpo-de-prova cilíndrico fresado	66
3.25	Embalagem do corpo-de-prova com filme plástico	67
3.26	Procedimento para fixação do dispositivo de ensaio no corpo-de-prova. (a) colocação da cola; (b) colocação do dispositivo; (c) ajuste do dispositivo	68
3.27	Ensaio de compressão axial	68
3.28	Ensaio de compressão para obtenção do módulo de elasticidade	69
3.29	Ensaio de flexão para obtenção de resistência à tração	70
3.30	Ensaio de compressão diametral para obtenção de resistência à tração	70
3.31	Foto do equipamento MTS	71
3.32	Corpo-de-prova prismático com entalhe, com três pontos de carga	72
3.33	Pré-trinca no corpo-de-prova	73
3.34	Crescimento de trinca no corpo-de-prova	73
3.35	Gráfico esquemático do método da diferenciação secante	74
3.36	Corpo-de-prova prismático com entalhe, com quatro pontos de carga	76
3.37	“Clip-on-gauge” colocado na face inferior do corpo-de-prova	76
3.38	Ensaio carga monotônica – CMOD	76
4.1	Curvas de propagação de trinca por fadiga em função de ΔK do CR	79
4.2	Curvas de propagação de trinca por fadiga em função de ΔK de materiais metálicos e materiais cerâmicos, adaptado de RITCHIE (1999)	80
4.3	Comparação entre as curvas de propagação de trinca por fadiga do CR deste trabalho (a) e as obtidas por LOU <i>et al.</i> (2006) (b)	81
4.4	Curvas carga monotônica – CMOD do CR	82
4.5	Curvas médias de propagação de trinca por fadiga em função de ΔK do CRF1, com os três teores utilizados	84
4.6	Curvas médias de propagação de trinca por fadiga em função de ΔK do CRF2, com os três teores utilizados	84
4.7	Curvas médias de propagação de trinca por fadiga em função de ΔK do CRF3, com os três teores utilizados	85

4.8	Curvas médias de propagação de trinca por fadiga em função de ΔK do CRF4, com os três teores utilizados	85
4.9	Curvas médias de propagação de trinca por fadiga em função de ΔK do CRF5, com os três teores utilizados	86
4.10	Curvas médias do ensaio carga monotônica – CMOD do CRF1, com os três teores utilizados	87
4.11	Curvas médias do ensaio carga monotônica – CMOD do CRF2, com os três teores utilizados	87
4.12	Curvas médias do ensaio carga monotônica – CMOD do CRF3, com os três teores utilizados	88
4.13	Curvas médias do ensaio carga monotônica – CMOD do CRF4, com os três teores utilizados	88
4.14	Curvas médias do ensaio carga monotônica – CMOD do CRF5, com os três teores utilizados	89
4.15	Curvas de propagação de trinca por fadiga do CR e dos três teores de fibras do CRF1	90
4.16	Curvas de propagação de trinca por fadiga do CR e dos três teores de fibras do CRF2	91
4.17	Curvas de propagação de trinca por fadiga do CR e dos três teores de fibras do CRF3	92
4.18	Aspecto das trincas após o ensaio cíclico no CRF2 (a) e CRF3 (b) em corpos-de-prova ensaiados com carregamento cíclico	93
4.19	Curvas de propagação de trinca por fadiga do CR e dos três teores de fibras do CRF4	94
4.20	Curvas de propagação de trinca por fadiga do CR e dos três teores de fibras do CRF5	95
4.21	Curvas de propagação de trinca por fadiga do CR e dos CRFs com teor de fibras de 0,25%	97
4.22	Curvas de propagação de trinca por fadiga do CR e dos CRFs com teor de fibras de 0,38%	98
4.23	Curvas de propagação de trinca por fadiga do CR e dos CRFs com teor de fibras de 0,50%	99
4.24	Curvas de propagação de trinca por fadiga do CR e dos CRFs com fibras sintéticas com teor de fibras de 0,25%	100
4.25	Curvas de propagação de trinca por fadiga do CR e dos CRFs com fibras sintéticas com teor de 0,38%	101

4.26	Curvas de propagação de trinca por fadiga do CR e dos CRFs com fibras sintéticas com teor de fibras de 0,50%	102
4.27	Curvas de propagação de trinca por fadiga do CR e dos CRFs com fibras metálicas com teor de fibras de 0,25%	103
4.28	Curvas de propagação de trinca por fadiga do CR e dos CRFs com fibras metálicas com teor de fibras de 0,38%	104
4.29	Curvas de propagação de trinca por fadiga do CR e dos CRFs com fibras metálicas com teor de fibras de 0,50%	105
4.30	Aspecto das fibras sintéticas com as pontas que atuam como ancoragem mecânica da fibra na matriz de concreto	106
4.31	Aspecto das fibras metálicas (aços) com as ancoragens nas extremidades deformadas após ensaio	107
4.32	Curvas de propagação de trinca por fadiga do CR e dos CRFs com fibras de comprimentos similares (sintéticas: 54 mm e metálicas: 60 mm), com teor de fibras de 0,25%	108
4.33	Curvas de propagação de trinca por fadiga do CR e dos CRFs com fibras de comprimentos similares (sintéticas: 54 mm e metálicas: 60 mm), com teor de fibras de 0,38%	108
4.34	Curvas de propagação de trinca por fadiga do CR e dos CRFs com fibras de comprimentos similares (sintéticas: 54 mm e metálicas: 60 mm), com teor de fibras de 0,50%	109
4.35	Curvas de propagação de trinca por fadiga do CR e dos CRFs com fibras de comprimentos similares (sintéticas: 38 mm e metálicas: 35 mm), com teor de fibras de 0,25%	110
4.36	Curvas de propagação de trinca por fadiga do CR e dos CRFs com fibras de comprimentos similares (sintéticas: 38 mm e metálicas: 35 mm), com teor de fibras de 0,38%	110
4.37	Curvas de propagação de trinca por fadiga do CR e dos CRFs com fibras de comprimentos similares (sintéticas: 38 mm e metálicas: 35 mm), com teor de fibras de 0,50%	111
4.38	Curvas carga monotônica – CMOD do CR e dos três teores de fibras do CRF1	112
4.39	Curvas carga monotônica – CMOD do CR e dos três teores de fibras do CRF2	112
4.40	Curvas carga monotônica – CMOD do CR e dos três teores de fibras do CRF3	113
4.41	Curvas carga monotônica – CMOD do CR e dos três teores de fibras do CRF4	113
4.42	Curvas carga monotônica – CMOD do CR e dos três teores de fibras do CRF5	114
4.43	Curvas carga monotônica – CMOD do CR e dos CRFs, com teor de fibras de 0,25%	115

4.44	Curvas carga monotônica – CMOD do CR e dos CRFs, com teor de fibras de 0,38%	116
4.45	Curvas carga monotônica – CMOD do CR e dos CRFs, com teor de fibras de 0,50%	117
4.46	Curvas carga monotônica – CMOD do CR e dos CRFs, com fibras sintéticas com teor de fibras de 0,25%	118
4.47	Curvas carga monotônica – CMOD do CR e dos CRFs, com fibras sintéticas com teor de fibras de 0,38%	118
4.48	Curvas carga monotônica – CMOD do CR e dos CRFs, com fibras sintéticas com teor de fibras de 0,50%	119
4.49	Curvas carga monotônica – CMOD do CR e dos CRFs, com fibras metálicas com teor de fibras de 0,25%	120
4.50	Curvas carga monotônica – CMOD do CR e dos CRFs, com fibras metálicas com teor de fibras de 0,38%	120
4.51	Curvas carga monotônica – CMOD do CR e dos CRFs, com fibras metálicas com teor de fibras de 0,50%	121
4.52	Curvas carga monotônica - CMOD do CR e dos CRFs, com fibras de comprimentos similares (sintéticas: 38 mm e metálicas: 35 mm), com teor de fibras de 0,25%	122
4.53	Curvas carga monotônica - CMOD do CR e dos CRFs, com fibras de comprimentos similares (sintéticas: 38 mm e metálicas: 35 mm), com teor de fibras de 0,38%	123
4.54	Curvas carga monotônica - CMOD do CR e dos CRFs, com fibras de comprimentos similares (sintéticas: 38 mm e metálicas: 35 mm), com teor de fibras de 0,50%	123
4.55	Curvas carga monotônica - CMOD do CR e dos CRFs, com fibras de comprimentos similares (sintéticas: 54 mm e metálicas: 60 mm), com teor de fibras de 0,25%	124
4.56	Curvas carga monotônica - CMOD do CR e dos CRFs, com fibras de comprimentos similares (sintéticas: 54 mm e metálicas: 60 mm), com teor de fibras de 0,38%	124
4.57	Curvas carga monotônica - CMOD do CR e dos CRFs, com fibras de comprimentos similares (sintéticas: 54 mm e metálicas: 60 mm), com teor de fibras de 0,50%	125
4.58	Imagem da seção fraturada de corpo-de-prova de propagação de trinca por fadiga do CR	126
4.59	Imagem da seção fraturada de corpo-de-prova de carga monotônica - CMOD do CR	127

4.60	Imagem da seção fraturada de corpo-de-prova de propagação de trinca por fadiga do CRF1 – 0,50%	128
4.61	Imagem da seção fraturada de corpo-de-prova de propagação de trinca por fadiga do CRF2 – 0,50%	128
4.62	Imagem da seção fraturada de corpo-de-prova de propagação de trinca por fadiga do CRF3 – 0,38%	129
4.63	Imagem da seção fraturada de corpo-de-prova de propagação de trinca por fadiga do CRF4 – 0,38%	130
4.64	Imagem da seção fraturada de corpo-de-prova de propagação de trinca por fadiga do CRF5 – 0,38%	130
4.65	Imagem da seção fraturada de corpo-de-prova de carga monotônica - CMOD do CRF1 0,38%	131
4.66	Imagem da seção fraturada de corpo-de-prova de carga monotônica - CMOD do CRF2 0,38%	132
4.67	Imagem da seção fraturada de corpo-de-prova de carga monotônica - CMOD do CRF3 0,38%	133
4.68	Imagem da seção fraturada de corpo-de-prova de carga monotônica - CMOD do CRF4 0,38%	133
4.69	Imagem da seção fraturada de corpo-de-prova de carga monotônica - CMOD do CRF5 0,38%	134

.....

Lista de Tabelas

2.1	Resultados dos ensaios estáticos e dinâmicos do trabalho de NANNI (1991)	40
2.2	Parâmetros da equação 2.11, segundo LOU <i>et al.</i> (2006).....	49
2.3	Resumo da revisão bibliográfica das abordagens sobre fadiga nos CRFs	52
3.1	Características físicas e químicas do cimento	54
3.2	Características físicas da areia	54
3.3	Características físicas do pedrisco	55
3.4	Características físicas da brita 1	56
3.5	Características das fibras utilizadas	57
3.6	Materiais, características e quantidades do traço do Concreto de Referência	58
3.7	Teores e dosagens de fibras nos CRFs	58
3.8	Corpos-de-prova moldados para ensaios de propagação de trinca por fadiga, compressão axial e tração por flexão – Etapa Inicial	60
3.9	Corpos-de-prova moldados para ensaios de propagação de trinca por fadiga, compressão axial, tração por flexão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade – Etapa Final	61
3.10	Corpos-de-prova moldados para ensaios de carga monotônica - CMOD – Etapa Final ..	61
4.1	Resistência à tração por flexão do CR	78
4.2	Resistência à compressão axial do CR	78
4.3	Resistência à tração por compressão diametral do CR	78
4.4	Módulo de elasticidade do CR	79

.....

Nomenclatura

Letras Latinas

a	comprimento da trinca	[mm]
B	espessura do corpo-de-prova	[mm]
b	expoente de resistência à fadiga	
C	flexibilidade ($\Delta\text{CMOD}/\Delta\text{Carga}$)	[mm/N]
C_F, A	parâmetro da lei de Paris	[mm/ciclo]
c	expoente de ductilidade à fadiga	
E	módulo de elasticidade do material	[GPa]
K	fator de intensidade de tensão [MPa.m ^{1/2}]	
m_F, m	parâmetro da lei de Paris	
N	número de ciclos	
P	carga	[N]
R	razão de carga	
S	valor percentual da resistência monotônica	
y	fator que depende da geometria do corpo-de-prova e da trinca	
w	largura do corpo-de-prova	[mm]

.....

Letras Gregas

Δ	variação
ε	deformação
σ	tensão

.....

Abreviações

a_i	comprimento inicial da trinca	[mm]
a_c	comprimento crítico da trinca	[mm]
CMOD	deslocamento de abertura da boca da trinca	[mm]
CP V ARI	cimento portland tipo 5 – Alta Resistência Inicial	
CR	concreto de referência	
CRF	concreto reforçado com fibras	
CRFA	concreto reforçado com fibras de aço	
CRFSn	concreto reforçado com fibras sintéticas	
CRF1	concreto reforçado com fibras poliméricas F1	
CRF2	concreto reforçado com fibras poliméricas F2	
CRF3	concreto reforçado com fibras de aço F3	
CRF4	concreto reforçado com fibras de aço F4	
CRF5	concreto reforçado com fibras de aço F5	
da/dN	taxa de propagação de trinca por fadiga	[mm/ciclo]
$\Delta\varepsilon_e$	faixa da deformação elástica	
$\Delta\varepsilon_p$	faixa da deformação plástica	
ε'_f	coeficiente de ductilidade à fadiga	
ε_f	deformação verdadeira na fratura	
K_I	fator de intensidade de tensão no modo I [MPa.mm ^{1/2}]	
ΔK	variação do fator de intensidade de tensão	[MPa.mm ^{1/2}]
$K_{m\acute{a}x}$	fator de intensidade de tensão máximo	[MPa.mm ^{1/2}]
$K_{m\acute{i}n}$	fator de intensidade de tensão mínimo	[MPa.mm ^{1/2}]
N_f	vida em fadiga	
N_i	número de ciclos para a iniciação da trinca	
N_p	número de ciclos para propagação da trinca	
$P_{m\acute{a}x}$	carga máxima	[N]
$P_{m\acute{i}n}$	carga mínima	[N]
SENB	single edge notched bend	

S_N	resistência à fadiga	[MPa]
S_f	limite de fadiga	[MPa]
$\Delta\sigma$	faixa de variação da tensão	[MPa]
σ_e	tensão de escoamento	[MPa]
σ_N	tensão nominal	[MPa]
σ_t	limite de resistência à tração	[MPa]
σ'_f	coeficiente de resistência à fadiga	
$\sigma_{m\acute{a}x}$	tensão máxima	[MPa]
$\sigma_{m\acute{i}n}$	tensão mínima	[MPa]

.....

Siglas

ABNT	<i>“Associação Brasileira de Normas Técnicas”</i>
ACI	<i>“American Concrete Institute”</i>
ASTM	<i>“American Society for Testing and Materials”</i>
PCA	<i>“Portland Cement Association”</i>
UNI	<i>“Ente Nazionale Italiano di Unificazione”</i>

.....

Capítulo 1

Introdução

O concreto reforçado com fibras (CRF) tem seu maior campo de aplicação hoje, no Brasil e em outros países, como placas diretamente apoiadas sobre o solo (pavimentos de concreto) (CARNIO, 1998) e em camadas de revestimento no solo (revestimento de taludes e túneis) em concreto projetado (FIGUEIREDO, 1997), aplicações estas onde é possível a substituição da armadura contínua sem comprometer a segurança e a integridade da estrutura (CASANOVA; ROSSI; SCHALLER, 1997).

Quando se iniciaram os estudos visando o desenvolvimento da aplicação do concreto reforçado com fibras, tinha-se a expectativa de que elas poderiam aumentar a resistência mecânica do material. No entanto, para se incrementar resistência de maneira significativa, havia a necessidade de incorporar altos teores de fibras (> 1% em volume) nas matrizes de concreto, ocasionando perda de fluidez, característica essa muito importante para a moldagem da maioria dos elementos de construção.

Posteriormente, observou-se que era possível, com menores teores de fibras, acrescentar ao material outras propriedades, as quais poderiam ser úteis para sua aplicação como material de construção, mesmo não incrementando resistência mecânica de maneira significativa em relação à matriz de concreto sem reforço com fibras. Observou-se que, com teores menores do que 1% em volume há um aumento significativo da tenacidade, outra propriedade mecânica bastante útil. Em que pese os teores menores de 1% apresentarem aumentos significativos da tenacidade, atualmente para a maioria das aplicações estruturais se utiliza teores até 0,5%, uma vez que esses

teores não criam dificuldades de fluidez da mistura. Eventualmente se utilizam teores entre 0,50% e 1% para aplicações específicas, tendo-se que tomar cuidado com a fluidez da mistura.

O reforço com fibras descontínuas e aleatoriamente distribuídas na matriz de concreto tem como papel principal atuar no controle da abertura e da propagação de fissuras no concreto, alterando seu comportamento mecânico após a ruptura da matriz, melhorando consideravelmente sua capacidade de absorção de energia, ou seja, sua tenacidade, sua resistência à fadiga e sua resistência ao impacto. Isso ocorre porque as fibras criam pontes de transferência de tensões através das fissuras (BENTUR; MINDESS, 1990), preservando certa resistência mecânica das seções.

Um dos grandes campos de aplicação do CRF são os pavimentos de concreto, que se tratam de estruturas constituídas por placas apoiadas no solo, com carregamentos cíclicos, solicitando o material a tensões repetidas. Essas tensões provocam modificações progressivas e permanentes, processo esse conhecido como fadiga. O processo gera aumento progressivo de fissuras internas, implicando na perda de rigidez da estrutura. A evolução desse processo deteriora o material, podendo fraturá-lo, dependendo do número e níveis de repetições do carregamento. Em virtude dessa situação, a peça estrutural poderá se romper por fadiga, o que ocorre com níveis de tensão inferiores à resistência mecânica do material. Como no caso dos pavimentos a repetição de cargas ocorre solicitando a placa à flexão, é importante no estudo da fadiga dos CRFs considerar esse tipo de sollicitação.

Pesquisas sobre o assunto, feitas com a finalidade de aplicação em pavimentos de concreto por HILSDORF & KESLER (1966) e MURDOCK & KESLER (1958) mostram que

[...] o número admissível de aplicações de cargas que produzam relações de tensões iguais ou inferiores a 0,56 é, praticamente, ilimitado; o concreto tem sua resistência à fadiga aumentada quando ocorrem períodos de descanso entre as passagens das cargas e, também, quando da passagem de cargas que dêem origem a relações de tensões menores do que o limite de 0,56.

Nos projetos de pavimentos de concreto o que se utiliza atualmente como critério de dimensionamento é o método desenvolvido pela Portland Cement Association (PCA), baseado num modelo experimental de fadiga que utiliza para análise do comportamento à fadiga do concreto o valor percentual da resistência monotônica (S) em função do número de ciclos para a

ruptura (N). O modelo apresentado pelo método da PCA/66 (1966) considera que, para um nível de tensões abaixo de 50% da resistência do material, o número admissível de ciclos é ilimitado. O método da PCA/84 (1984) reduziu para 45% da resistência do material o limite para o qual o número de repetições pode ser considerado ilimitado (OLIVEIRA & PINHEIRO, 2000).

Assim como muitos trabalhos na área de fadiga no concreto para aplicação em pavimentos, CERVO (2004) estabeleceu como objetivo em seu trabalho de pesquisa desenvolver um modelo de comportamento à fadiga empregando materiais disponíveis no Brasil, utilizando concreto simples e concreto de elevada resistência. No entanto, tanto o trabalho de CERVO (2004) como a maioria dos estudos sobre a fadiga no concreto trata a questão somente sobre a abordagem da fadiga de alto ciclo, representado seu comportamento por meio das curvas S-N.

Sabe-se, porém, que o processo de ruptura por fadiga é caracterizado por três etapas distintas envolvendo os estágios de nucleação, propagação da trinca e ruptura final e que, a quantidade de ciclos até a fratura, pode ser considerada como a soma do número de ciclos para a iniciação da trinca e para a propagação da trinca, sendo a contribuição da ruptura final insignificante. Na maioria dos materiais, o estágio de nucleação da trinca é responsável por aproximadamente 90% do número total de ciclos restando poucos ciclos para a propagação da trinca. Assim, estudar a propagação da trinca por fadiga é importante para melhor entender o comportamento dos materiais, visando o aumento da quantidade de ciclos nesse estágio e por consequência no aumento de sua vida útil. No caso específico do CRF, como a expectativa é de que as fibras atuem no controle da abertura e da propagação da trinca, estudar o crescimento da trinca por fadiga do CRF ajudará a melhorar sua aplicação em estruturas submetidas a carregamentos cíclicos, na perspectiva de aumento de vida útil, bem como no maior espaçamento de inspeções e manutenção dessas estruturas.

A forma de expressão, fissura ou trinca é apresentada neste trabalho de acordo com o contexto em que as referências se apresentam, bem como de acordo com a abordagem da área em que se inserem. Isso se deve ao fato de que, em geral, na Engenharia Civil as fissuras são caracterizadas como aberturas que aparecem no concreto, proveniente de ruptura de sua massa, com espessura de até 0,5 milímetros, diferenciando-se das trincas, que apresentam espessuras de 0,5 até 1,0 milímetro. No entanto, na área de Engenharia Mecânica não há distinção entre fissuras

e trincas, tratando-se de forma única como trincas qualquer tipo de abertura proveniente de ruptura da massa do material.

1.1 Objetivos

Visando ampliar os conhecimentos sobre a fadiga no CRF com baixos teores ($\leq 0,5\%$), este trabalho tem como objetivo principal estudar a contribuição dessas adições na propagação de trinca por fadiga do material. Este trabalho contempla o estudo de um tipo de concreto de resistência convencional sem reforço com fibras, dois tipos de concreto reforçado com fibras sintéticas com teores-dosagens de 0,25% - 2,25 kg/m³, 0,38% - 3,5 kg/m³ e 0,50% - 4,5 kg/m³ e três tipos de concreto reforçado com fibras metálicas com teores 0,25% - 20 kg/m³, 0,38% - 30 kg/m³ e 0,50% - 40 kg/m³, cujas matrizes de concreto apresentam as mesmas características do concreto de resistência convencional, sem reforço com fibras. Assim, este objetivo será alcançado por meio de:

- Estudo da influência dos tipos e teores de fibras adicionados aos CRFs, no comportamento à propagação de trincas por fadiga desses concretos em relação ao concreto de resistência convencional, sem reforço com fibras, utilizando corpos-de-prova prismáticos de seção quadrada, ensaiando à flexão com frequência de 20 Hz e razão de carga $R = 0,1$;
- Estudo do comportamento carga monotônica – deslocamento de abertura da “boca” da trinca (CMOD) do concreto de resistência convencional, sem reforço com fibras e dos CRFs, utilizando corpos-de-prova prismáticos de seção quadrada, visando poder contribuir no aprofundamento do conhecimento de outros fatores que apresentam ligação com o estudo em questão, bem como contribuir para que os objetivos deste trabalho sejam alcançados;
- Estudo macroscópico da seção fraturada do concreto de resistência convencional, sem reforço com fibras e dos CRFs, após ação das cargas cíclica e monotônica, visando avaliar os mecanismos de fratura da seção, envolvendo a superfície de fratura da matriz e o aspecto das fibras.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 O Concreto

Em artigo publicado pela “*Scientific American*” em abril de 1964, S. Brunaer e L. E. Copeland, dois eminentes cientistas na área de cimento e concreto, escreveram:

O material mais largamente usado em construção é o concreto, normalmente feito com a mistura de cimento Portland com areia, pedra e água. No ano passado, nos Estados Unidos, 63 milhões de toneladas de cimento Portland foram convertidas em 500 milhões de toneladas de concreto, cinco vezes o consumo de aço, em massa. Em muitos países, o consumo de concreto é 10 vezes maior que o de aço. O consumo mundial total de concreto, no ano passado, foi estimado em três bilhões de toneladas, ou seja, uma tonelada por ser humano vivo. O homem não consome nenhum outro material em tal quantidade, a não ser a água. (*apud* MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Uma das grandes vantagens do concreto é sua excelente resistência à água, sem deterioração. Esse fato permite sua utilização em larga escala em muitos tipos de estruturas de construção, sendo aplicado em barragens, canais, canalizações, elementos estruturais expostos à umidade como elementos de fundação, lajes, paredes, vigas, pilares e pisos.

Outra razão para sua utilização é a facilidade de criação de formas, permitindo os mais variados formatos e tamanhos, uma vez que em seu estado fresco apresenta uma consistência plástica que permite ao material fluidez para ser colocado em fôrmas.

Ainda como vantagem pode-se dizer que se trata de um material acessível a uma grande camada da população, seus materiais componentes são relativamente baratos quando comparados a outros materiais estruturais. Em sua produção é baixo o consumo de energia, bem como é possível o aproveitamento de uma série de resíduos industriais que podem ser adicionados ao cimento ou mesmo encapsulados no concreto, substituindo os agregados.

Segundo MEHTA & MONTEIRO (2008), o concreto é um material composto que consiste essencialmente de um meio contínuo aglomerante, dentro do qual estão mergulhadas partículas ou fragmentos de agregados.

Do ponto de vista estrutural as propriedades do concreto endurecido têm grande importância para os projetos. A *resistência* é uma informação importante para o material, sendo grande sua capacidade em resistir à compressão. Já a resistência à tração do material é bastante reduzida, podendo-se dizer que é da ordem de 10 a 15% da resistência à compressão.

Também é importante destacar que o *módulo de elasticidade* é outra propriedade muito importante para aplicação estrutural e no caso do concreto, varia em geral de 14 a 40 GPa, valores esses obtidos por meio de ensaios de compressão axial em corpos-de-prova cilíndricos.

Do ponto de vista de ruptura, o material concreto se rompe fragilmente à compressão e à tração, sem praticamente nenhuma ductilidade. Assim, nas aplicações práticas considera-se o material concreto como frágil. Da mesma forma, a energia necessária para fraturar o material à tração, conhecida como *tenacidade*, é muito baixa.

Outras propriedades que ocorrem no concreto endurecido são: *fluência* - que é o aumento gradual de deformação com o tempo, sob tensão constante - e *retração*. A *retração* pode ser dividida em *retração de secagem*, que ocorre no concreto fresco quando exposto à umidade ambiente e *retração térmica*, que ocorre no processo de resfriamento do concreto quando da dissipação do calor liberado na hidratação do cimento.

Desde o início do século passado, a quantidade de construções em concreto tem aumentado significativamente. O relativo baixo preço do material, a facilidade de moldar o concreto às formas desejadas e as suas propriedades mecânicas têm contribuído para essa ocorrência.

Como consequência, as investigações sobre o material têm conseguido obter melhorias importantes nesse compósito. É especialmente significativo o aumento de resistência à compressão que se tem registrado nos últimos anos nos concretos, porém, não se tem conseguido aumentos significativos de resistência à tração e, principalmente, ganhos de tenacidade com o mesmo grau do obtido na resistência à compressão. Ensaio realizados com corpos-de-prova de concreto de alta resistência têm revelado que com o aumento da resistência à compressão, aumenta também a fragilidade do material, sendo necessário incluir maiores porcentagens de armadura, caso se pretenda tirar os benefícios da maior resistência deste material à compressão, sem perder a necessária ductilidade que as estruturas devem ter, sendo esse sistema chamado de concreto armado. Todavia, o corte e montagem de armaduras convencionais representam custos adicionais que necessitam ser ponderados quando se avalia a oportunidade de se utilizar concretos de alta resistência.

O material ideal de construção deveria ser similar ao concreto em termos de moldabilidade e de custos, e ser suficientemente resistente e com ductilidade, de tal forma a evitar o recurso às armaduras convencionais. Se esses atributos fossem alcançados, o custo das estruturas seria significativamente diminuído. No entanto, esse material ainda não existe. Todavia, alguns passos promissores têm sido dados no sentido de se obter um material com as referidas características.

2.2 Concreto reforçado com fibras

Na natureza há registros claros da utilização de fibras, que podem ser constatados antes mesmo do advento do homem. Um caso desses é o “joão de barro”, pequeno pássaro nativo da Argentina, do Chile, da Bolívia e de outros países sul americanos que trabalha cuidadosamente na construção de ninhos de barro reforçado com palha, no topo de árvores.

A palha e os pelos de animais eram muito utilizados nas construções para melhorar materiais de construção (tijolos, argamassas) em virtude de suas características frágeis. A expectativa que se tinha de “*melhorar resistência*” estava muito mais ligada a garantir a integridade material, do que imaginar que o material ficaria “*mais forte*”. Atualmente, o conceito de reforçar o material concreto por meio de fibras assume também essa vocação, no entanto é possível também tirar-se proveito, quando se utiliza alguns tipos de fibras, de características do material quanto à sua capacidade estrutural.

Materiais de construção reforçados com fibras sempre foram utilizados ao longo da história em elementos de construção de forma empírica. A bibliografia atual não aponta histórico detalhado da evolução da aplicação das fibras nas construções, tratando desse assunto num período mais recente, tendo hoje muitas pesquisas e aplicações do CRF. Por volta de 1950 a Portland Cement Association (PCA) começou o desenvolvimento de pesquisas com a utilização de fibras de aço, plásticas e de vidro em matrizes de cimento, sendo suas aplicações em pavimentos de concreto em rodovias e em indústrias, em túneis e revestimentos de taludes como concreto projetado, em peças pré-moldadas e em peças refratárias.

O reforço de compósitos de matriz de concreto por intermédio da adição de fibras é exemplo da investigação que tem sido desenvolvida na perspectiva de obtenção de um material resistente e com ductilidade. A utilização das fibras aumenta consideravelmente a ductilidade e a capacidade de absorção de energia dos concretos. Porém, aumentos significativos de resistência só são conseguidos à custa de elevados percentuais de fibras, o que torna não usual a aplicação desses materiais compósitos na maior parte das estruturas. No entanto, a existência de um material com ductilidade de elevada resistência permitiria realizar estruturas mais esbeltas, com menor custo de material e mão-de-obra, além de diminuir os efeitos devidos às ações proporcionais à massa das estruturas, de que são exemplo o seu peso próprio e a ação sísmica. Esse domínio de investigação está dando os primeiros passos, potencializando novas possibilidades estruturais no futuro.

Na prática, a adição de fibras a materiais frágeis remonta à época dos Romanos e dos Egípcios onde se utilizavam fibras naturais para reforço de pastas de argila. Contudo, só a partir da metade do século passado é que o CRF começou a ser utilizado em aplicações com importância na indústria da construção. A capacidade de absorção de energia, a ductilidade, o controle de fissuração e a resistência às ações dinâmicas, de fadiga e de impacto são as propriedades mais beneficiadas pelos mecanismos de reforço das fibras.

As matrizes de concreto sem o reforço das fibras apresentam comportamento frágil, com baixa capacidade resistente das seções e baixas deformações quando submetidas a esforços de tração, praticamente não apresentando deformações plásticas. A maioria dos concretos empregados atualmente que incorporam fibras utiliza baixos teores, o que resulta num aumento pouco significativo de suas resistências à compressão e à tração. Dessa forma, a matriz fissa com o mesmo nível de tensão e de deformação do que quando não reforçada.

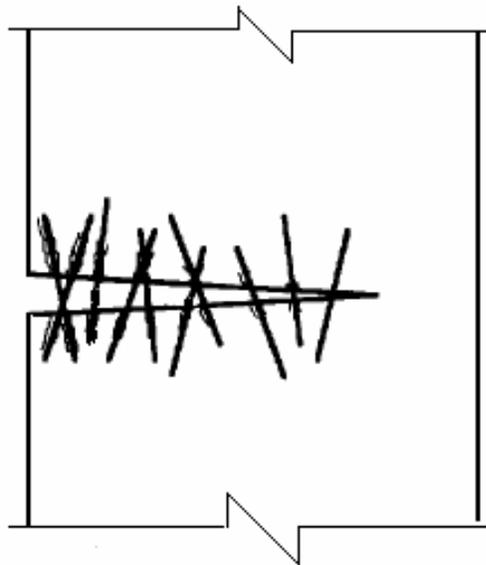


Figura 2.1 – Esquema de uma trinca em um material com fibras, adaptado de LI (1998)

O reforço com fibras descontínuas e aleatoriamente distribuídas na matriz tem como expectativa o controle da abertura e da propagação de fissuras no concreto, alterando o seu comportamento mecânico após a ruptura da matriz, melhorando consideravelmente a capacidade

de absorção de energia do concreto, diminuindo o nível de fragilidade do material. Isto ocorre porque as fibras atuam “costurando”, preservando a resistência mecânica das seções.

A utilização de fibras em matrizes de concreto é um assunto que atualmente tem sido motivo de muitas pesquisas. Surgem as mais variadas alternativas de utilização das fibras, melhorando muitos materiais de comportamento frágil.

No passado, a expectativa que se tinha com a utilização das fibras como reforço do material de construção é que elas trabalhassem para manter a integridade das matrizes de concreto. Havia também muita expectativa de que o reforço com fibras contribuísse também para a melhoria da resistência dessas matrizes, o que para situações específicas também pode ser possível. Porém, o grande avanço que se observou nos concretos reforçados com fibras foi a possibilidade do material absorver energia até sua fratura, aumentando suas possibilidades de aproveitamento como material estrutural.

2.2.1 Fibras utilizadas para reforço do concreto

Em geral, os materiais de construção objeto de estudo para serem reforçados são: o gesso, o concreto, a argamassa de cimento Portland e os solos coesivos e granulares. Vários tipos de fibras têm sido utilizados, cada uma com suas características, as quais se diferem umas das outras pelo seu processo de fabricação, composição química e física, características mecânicas, resistência a meios agressivos, forma, etc. As fibras podem ser divididas segundo seu material de origem: metais, cerâmicos e poliméricos sintéticos ou naturais.

As fibras metálicas mais utilizadas são as de aço. As fibras de aço utilizadas em elementos de construção contemplam uma grande variedade de geometrias, bem como existem vários processos de manufatura. Quanto à geometria, um parâmetro importante é o fator forma (relação entre o comprimento da fibra e seu diâmetro ou diâmetro equivalente para seções transversais não circulares) que em geral fica na faixa de 30 a 100.

As fibras cerâmicas, também conhecidas como fibras minerais, mais utilizadas são de vidro, carbono e asbesto. As fibras de vidro são geralmente manufaturadas na forma de “cachos”, ou seja, fios compostos de centenas de filamentos individuais. O diâmetro dos filamentos individuais depende das propriedades do vidro, do tamanho do furo por onde são extrusados e da velocidade de extrusão. As fibras produzidas a partir do vidro tipo E (Electrical) são atacadas pelos álcalis presentes nos materiais baseados em cimento portland. Fibras de Vidro tipo AR (Álcali Resistent) apresentam resistência ao meio alcalino e têm sido utilizadas com sucesso nas matrizes de concreto à base de cimento Portland. As fibras de carbono são as mais novas e mais promissoras no desenvolvimento de materiais compósitos. São baseadas na resistência das ligações carbono-carbono e na leveza do átomo de carbono. As fibras de asbesto, também conhecidas como fibras de amianto, são de uso mais tradicional que os outros tipos de fibras, devido à sua ocorrência natural. Entretanto, as estatísticas têm mostrado o rápido decréscimo do consumo de placas de cimento amianto devido, principalmente, aos danos à saúde provocados pelas fibras de amianto. Outro problema relacionado a este produto é seu caráter essencialmente frágil e a sua baixa resistência ao impacto.

As fibras poliméricas podem ser divididas em sintéticas e naturais. As poliméricas sintéticas, ou simplesmente sintéticas, mais utilizadas são as fibras de polipropileno, poliéster, polietileno e poliamida. As fibras de polipropileno são constituídas de um material polimérico denominado termoplástico. Os polímeros termoplásticos consistem em uma série de longas cadeias separadas de moléculas polimerizadas, podem deslizar umas sobre as outras e apresentam alta resistência aos álcalis. As fibras de poliéster têm aparência similar às das fibras de polipropileno, mas são mais densas, mais rígidas e mais resistentes. Elas podem ser usadas para as mesmas aplicações que as de polipropileno. Um dos poliésteres mais conhecidos é o poli(tereftalato de etileno) (PET), atualmente utilizado como material de constituição das garrafas plásticas tipo “PET”, porém, apresentam baixa resistência aos álcalis. As fibras de polietileno, de peso molecular normal, têm um módulo de elasticidade baixo, são fracamente aderidas à matriz de concreto e são altamente resistentes aos álcalis. As fibras de poliamida mais comuns estão divididas em dois tipos segundo a origem do polímero, que pode ser a poliamida 6 ou a poliamida 6.6, sendo também conhecidas como náilon.

As fibras poliméricas naturais, também conhecidas como fibras vegetais, são de uso do homem há milênios. Pode-se citar o emprego de fibras vegetais como reforço de gesso que vem desde o Renascimento e a utilização de mantas de raízes para reforço de maciços de terra (zigurates). As fibras vegetais são utilizadas na formação de diversos compostos, mas também podem ser degradadas pela ação de fungos e microorganismos. A produção de materiais de cimento Portland comum reforçados com fibras vegetais não teve sucesso devido à rápida degradação dos compostos, ocasionada pela elevada alcalinidade da água presente nos poros da matriz do cimento. O uso de fibras vegetais em países em desenvolvimento visa, geralmente, ao emprego da mão-de-obra barata para a confecção de placas, painéis e paredes. As fibras vegetais utilizadas em materiais compósitos podem ser de bambu, juta, capim elefante, coco, piaçava, linho, cana-de-açúcar, sisal, malva e bananeira.

2.2.2 Aspectos gerais do concreto reforçado com fibras de aço

O Concreto Reforçado com Fibras de Aço (CRFA) é praticamente o precursor dos concretos reforçados com fibras, como material de construção. A eficiência do CRFA é comprovada pelas inúmeras obras existentes no mundo, bem como pela vasta bibliografia que trata de suas características e comportamento estrutural para diversas aplicações em construções.

Vários trabalhos de pesquisa foram realizados no mundo e, particularmente no país, muitos deles patrocinados pela FAPESP, envolvendo instituições como USP e UNICAMP, procurando conhecer melhor o material, investindo-se em estudos tecnológicos, avaliando-se tipos e teores-dosagens, a influência da quantidade de fibras por quilo, influência das fibras no comportamento mecânico do material (ARMELIN, 1992; FIGUEIREDO, 1997; NUNES, 1998, CECCATO, 1998), bem como em possibilidades de utilização do material estruturalmente (CARNIO, 1998; BASTOS, 1999; GUIMARÃES, 1999; CHAMA NETO, 2002). Também estudos foram feitos comparando-se fibras segundo os vários métodos de ensaios e critérios de quantificação da tenacidade à flexão, visando chegar à melhor representação do comportamento mecânico do material (PINTO JR., 1996; GUIMARÃES, 2001, GAVA, 2006).

Pode-se dizer que a maioria das fibras de aço propicia algum tipo de reforço ao concreto. As fibras de aço para uso em concreto têm comprimentos que variam entre 30 e 60 mm e diferentes formas de seção transversal, dependendo do processo de fabricação. Geralmente, essas fibras possuem conformações ao longo de todo o seu comprimento (fibras onduladas) ou somente nas extremidades, conforme se observa na Figura 2.2. Tais conformações têm a finalidade de melhorar o comportamento da fibra com relação à aderência, por meio da ancoragem mecânica.

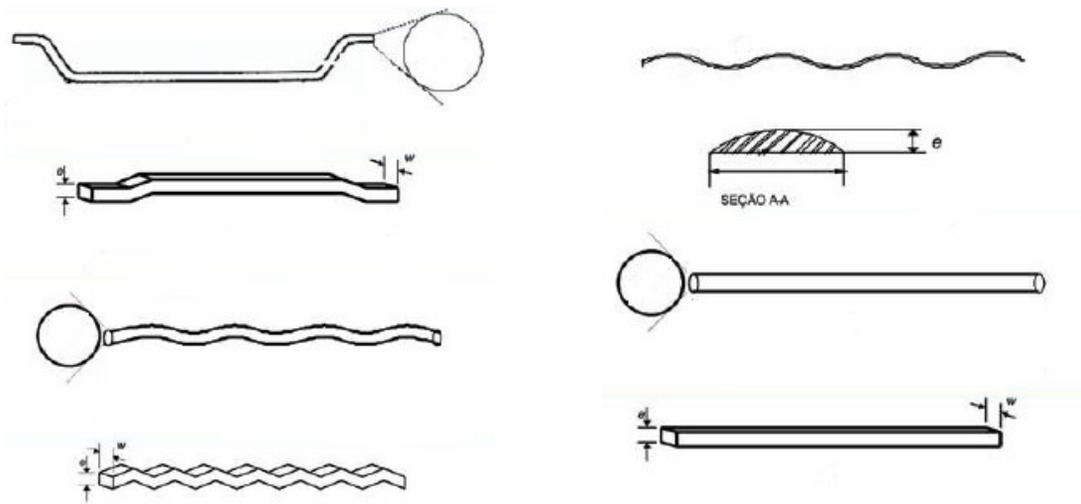


Figura 2.2 - Tipos de fibras de aço normalmente utilizadas em CRF

Dentre os vários tipos de fibras, são mais comuns as de seção transversal circular que são produzidas a partir do corte de fios trefilados e as de seção retangular que são produzidas a partir do corte de chapas de aço. No entanto, as fibras de aço que apresentam atualmente melhor eficiência para reforço do concreto são aquelas de seções transversais circulares com diâmetros entre 0,5 e 1 mm, produzidas por meio de fios trefilados e com ganchos nas extremidades. A resistência à tração das fibras varia entre 500 MPa e 1150 MPa, apresentando módulo de elasticidade de 210 GPa.

A eficiência de um compósito está relacionada com algumas propriedades das fibras de aço tais como, sua resistência à tração, o teor de fibras e seu fator de forma, que é a relação entre o comprimento da fibra e seu diâmetro (diâmetro equivalente no caso de seção transversal não circular). Segundo NUNES (1998), para baixos teores de fibra, onde o número de fibras na matriz de concreto é muito pequeno, o aumento do fator de forma não causa um aumento significativo da tenacidade quando comparado com a influência do teor de fibras.

A matriz do compósito pode ser constituída de concreto de resistência normal ou de alta resistência. Na dosagem de uma matriz de concreto para confecção de um compósito com fibras, deve-se ter atenção com a fluidez da mistura, uma vez que a introdução das fibras causa uma considerável perda de fluidez. Isso ocorre porque as fibras possuem grande área superficial, têm maior contato entre si e com os outros elementos constituintes do concreto, aumentando muito o atrito entre os materiais, diminuindo a fluidez da mistura. Misturas com maior porcentagem de argamassa e o uso de aditivos superfluidificantes auxiliam neste aspecto.

Na maioria dos concretos empregados correntemente em pavimentos que incorporam fibras de aço, a utilização de baixos teores de fibras de aço ($\leq 0,5\%$ e $\geq 0,25\%$ em volume) não aumenta significativamente a resistência à tração. Dessa forma, a matriz fissura praticamente com o mesmo nível de tensão e de deformação do que quando não reforçada com fibras de aço.

A tenacidade do CRFA pode ser verificada por meio de ensaio de flexão em corpos-de-prova prismáticos, denominada tenacidade à flexão. Também é possível a verificação por meio de ensaio de compressão em corpos-de-prova cilíndricos ou cúbicos, a tenacidade do CRFA denominada tenacidade à compressão. Para além do incremento de tenacidade, as fibras de aço podem incrementar ao concreto, resistência à fadiga e resistência ao impacto. Essas melhorias podem ser obtidas em função do teor, da quantidade de fibras por quilo, da resistência à tração e da geometria das fibras de aço, fatores esses que também influem na tenacidade do material.

2.2.3 Aspectos gerais do concreto reforçado com fibras sintéticas

Conforme o ACI 544.1R-82 (1982), as fibras típicas de plástico como poliamida (náilon), polipropileno, polietileno, poliéster (PET) têm diâmetro variando entre 0,02 mm e 0,38 mm. As fibras poliméricas mais empregadas são as sintéticas, e destas em especial as de polipropileno fibrilado. As fibras curtas de polipropileno podem ser incorporadas satisfatoriamente à matriz de concreto em volume de até 8%, usando betoneira comum. Entretanto, na prática, o máximo volume usado é de 1%, e mesmo com teores bem inferiores, como 0,5%, têm-se obtido concretos com considerável melhoria na resistência ao impacto. A adição de fibras de polipropileno interfere pouco na resistência do concreto à tração. A resistência do polipropileno à tração é maior que a da matriz, mas seu módulo de elasticidade é menor, portanto alonga-se mais que a matriz. Os concretos reforçados com fibras de polipropileno podem fissurar muito antes de se romperem, pois a matriz fissa bem antes que a deformação da fibra possa introduzir altas tensões sobre ela. Portanto, as estruturas de concreto reforçado com fibras de polipropileno têm maior resistência ao impacto que as de concreto comum. A resistência do concreto à flexão não é essencialmente alterada pela presença de pequeno volume de fibras curtas de polipropileno. De maior importância é seu comportamento pós-fissuração e sua capacidade de continuar absorvendo energia enquanto as fibras são arrancadas (BAUER, 1987; TEZUKA, 1989 *apud* ACCETTI e PINHEIRO, 2000).

Atualmente as fibras sintéticas podem ser divididas em microfibras (Figura 2.3) e macrofibras (Figura 2.4). As microfibras sintéticas são aquelas utilizadas exclusivamente para contribuir no controle de retração do concreto quando esse ainda está no seu estado fresco (não endurecido), não apresentando capacidade de incorporar tenacidade ao concreto e apresentam comprimentos em geral inferiores a 30 mm e diâmetro inferior a 0,30 mm. As macrofibras sintéticas são aquelas que têm capacidade de incorporar tenacidade ao concreto e podem ser utilizadas como as fibras de aço, atuando após o endurecimento do concreto e incorporando tenacidade ao material. As macrofibras apresentam como características mecânica resistência à tração na faixa de 100 a 650 MPa e módulo de elasticidade numa faixa de 5 a 7 GPa. Seu comprimento varia de 30 mm a 60 mm, seu diâmetro é superior a 0,30 mm e sua densidade é 900

kg/m³. Os teores normalmente utilizados para aplicações estruturais giram em torno de 0,5% em volume, representando dosagem de 4,5 kg/m³. Também há limite para adição dessas fibras em função da dificuldade de mistura sendo que em geral não são adicionados teores superiores a 1,35%, o que representa uma dosagem de 12 kg/m³.

O Concreto Reforçado com Fibras Sintéticas (CRFSn) surgiu recentemente como material estrutural, atuando também assim como o CRFA. As fibras sintéticas denominadas macrofibras são aquelas que conseguem melhorar as características do material concreto quando este se encontra no estado endurecido, atuando após fissuração da matriz no controle da abertura e na propagação dessas fissuras.

Os estudos sobre o comportamento do CRFSn são recentes e ainda são poucas as informações que se tem sobre a tenacidade do material, bem como de sua resistência à fadiga. No entanto, atualmente o CRFSn mostra-se como um material promissor para utilização como material de construção, uma vez que polímeros como o polipropileno apresentam maior durabilidade em meio alcalino, não estando sujeito à oxidação como ocorre com o aço. Essa situação é vantajosa uma vez que, como a maioria das construções está sujeitas à degradação pela exposição ao ambiente, ter um material com maior durabilidade é bastante vantajoso para a vida útil da estrutura.



Figura 2.3 – Microfibras sintéticas (polipropileno)



Figura 2.4 – Macrofibras sintéticas (polipropileno)

2.3 Fadiga

Atribui-se a WÖHLER (1860) o início do desenvolvimento dos estudos sobre o comportamento à fadiga dos materiais. Seus estudos incluíram testes em grande escala para uma variedade de componentes estruturais usando máquinas por ele desenvolvidas para solicitações de flexão, torção e axial. A caracterização do comportamento à fadiga foi expressa em termos de curvas de tensão – vida (S-N), bem como foi desenvolvido o conceito de limite de durabilidade.

2.3.1 A fadiga mecânica

Segundo CALLISTER (2002), a fadiga é uma forma de ruptura que ocorre em estruturas que estão sujeitas a tensão dinâmica e oscilante. Sob essas circunstâncias, é possível a ocorrência de uma ruptura em um nível de tensão consideravelmente inferior ao limite de resistência à tração ou ao limite de escoamento para uma carga monotônica. O termo “fadiga” é usado para o tipo de ruptura que ocorre normalmente após um longo período de exposição do material a ciclos de tensão ou deformação. A ruptura por fadiga é catastrófica, ocorrendo muito repentinamente e sem avisos, para praticamente todos os materiais. As tensões cíclicas aplicadas podem ser de natureza axial (tração-compressão), de flexão (dobramento) ou torcional (torção). A variação da tensão ao longo do tempo é a responsável por rupturas de fadiga.

O processo de ruptura por fadiga é caracterizado por três etapas distintas (BRANCO, 1985 e 1986; GDOUTOS, 1993; HERTZBERG, 1996): A primeira etapa é caracterizada pela nucleação e crescimento microscópico da trinca (algumas vezes eliminada por defeitos já existentes no material), onde uma pequena fissura se forma em algum ponto de alta concentração de tensões, podendo ainda essa fissura ser existente, oriunda de retração do material, ou até ser oriunda da porosidade do material. A segunda etapa é caracterizada pelo crescimento macroscópico da trinca, durante a qual ela avança em incrementos a cada ciclo de tensões. A terceira etapa corresponde à fratura final, que ocorre muito rapidamente pelo avanço da trinca atingindo um comprimento crítico. A vida em fadiga N_f , ou seja, a quantidade de ciclos até a fratura, pode ser considerada, portanto, como sendo a soma do número de ciclos para a iniciação da trinca N_i , e a propagação da trinca N_p . Dessa forma tem-se:

$$N_f = N_i + N_p \quad (2.1)$$

A contribuição da etapa de fratura final para a duração total da fadiga é insignificante, uma vez que ela ocorre muito rapidamente. Já as proporções da duração total que são relativas a N_i e N_p , dependem do material em questão e das condições de ensaio.

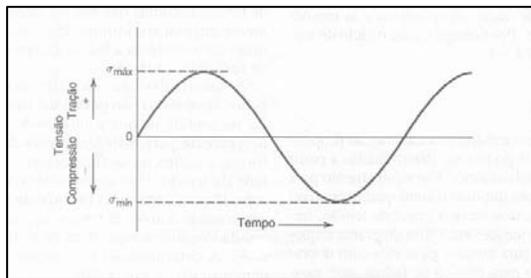
Há sempre uma dispersão de resultados muito grande nos ensaios de fadiga, isto é, uma variação no valor de N medido para vários corpos-de-prova testados sob um mesmo nível de tensão. Isso pode levar a incerteza de projeto quanto à vida em fadiga e/ou o limite de resistência à fadiga (ou resistência à fadiga). A dispersão nos resultados é uma consequência da sensibilidade do comportamento à fadiga a uma variedade de parâmetros do ensaio e da heterogeneidade do material das amostras. Esses parâmetros incluem a fabricação do corpo-de-prova, a preparação da superfície, o alinhamento do corpo-de-prova no equipamento, a tensão média e a frequência dos testes. Outro aspecto também importante sobre a dispersão nos resultados se deve ao desvio padrão da resistência obtida em ensaio monotônico assumida de um conjunto alheio de corpos-de-prova para a avaliação da fadiga de outro conjunto.

2.3.2 Procedimento para o estudo da fadiga

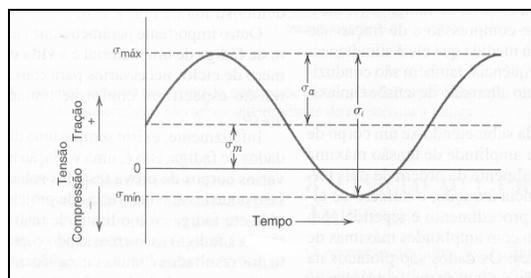
O estudo da fadiga pode ser dividido em três enfoques: *fadiga em alto ciclo*; *fadiga em baixo ciclo* e *propagação de trinca por fadiga*, conforme abordado na seqüência.

Na *fadiga em alto ciclo* ou fadiga controlada por tensões cíclicas, as tensões nominais (σ_N) são inferiores ao limite de escoamento do material (σ_e), representado pelas curvas S-N (curvas da tensão em função do número de ciclos até a fratura). Nesses casos, o número de ciclos até a fratura (N_f) é superior a 10^3 ciclos. Esse domínio é associado a níveis de tensão mais baixos, onde as deformações são caracterizadas em função do comportamento do material, tendo como resultado vidas mais longas, uma vez que número de ciclos relativamente grande é necessário para produzir a ruptura por fadiga. No estudo da fadiga de alto ciclo, divide-se em geral em três modalidades diferentes a tensão ao longo do tempo: ciclo de tensões alternadas, ciclo de tensões repetidas e ciclo de tensões aleatórias. É usual apresentar os dados de fadiga em termos da razão de tensão, R .

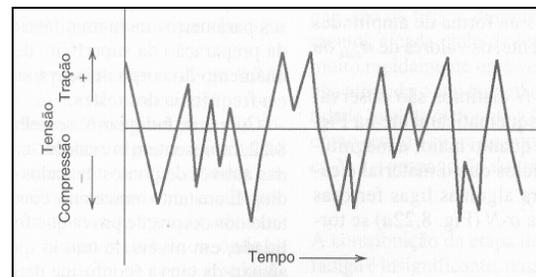
No ciclo de tensões alternadas a tensão oscila em função do tempo de forma simétrica em torno de um nível médio de tensão igual a zero ($\sigma_{\text{máx}}$ e $\sigma_{\text{mín}}$ de igual magnitude), neste caso $R=-1$ (Figura 2.5 a). No ciclo de tensões repetidas, a tensão oscila em função do tempo de forma assimétrica em torno de um nível médio de tensão ($\sigma_{\text{máx}}$ e $\sigma_{\text{mín}}$ são de magnitude diferentes) (Figura 2.5 b). No ciclo de tensões aleatórias a tensão oscila em função do tempo de forma aleatória em amplitude e frequência (Figura 2.5 c).



(a)



(b)



(c)

Figura 2.5 - Ciclos de tensões. (a) alternadas simétricas; (b) repetidas; (c) aleatórias, segundo CALLISTER (2002)

Assim como outras características mecânicas, as propriedades de fadiga dos materiais podem ser determinadas por meio de ensaios de simulação em laboratório, contemplando tanto quanto possível as condições de tensão durante o serviço (nível de tensão, frequência temporal, padrão de tensões, etc.).

O comportamento à fadiga de alto ciclo é expresso em termos da tensão (S) em função do número de ciclos para a ruptura (N), sendo que a tensão pode ser máxima, que é o maior valor algébrico da tensão no ciclo, ou pode ser mínima, que é o menor valor algébrico. Como esses gráficos indicam o número de ciclos que um material é capaz de suportar antes de romper, dois tipos de comportamento S-N distintos são observados:

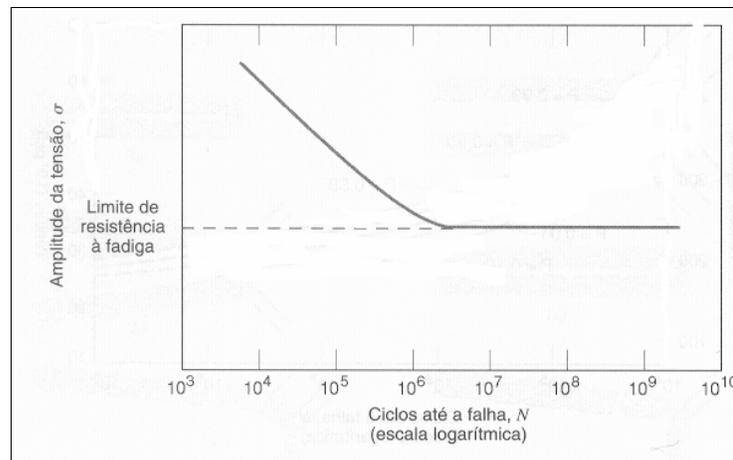


Figura 2.6 - Limite de resistência à fadiga, segundo CALLISTER (2002)

Em alguns casos, a curva S-N se torna horizontal para valores de N mais elevados, caracterizando um nível de tensão limitante, chamado de *limite de resistência à fadiga*, também chamado de *limite de durabilidade*, abaixo do qual a ruptura por fadiga não irá ocorrer. Esse limite de resistência à fadiga representa o maior valor de tensão oscilante que não irá causar ruptura após um número infinito de ciclos, conforme se observa na Figura. 2.6. Segundo a ASTM E 1823 – 05 também podem ser definidos como *limite de fadiga* S_f .

Em outros casos de materiais, não existe um limite de resistência à fadiga, uma vez que a curva no gráfico S-N continua sua tendência decrescente para maiores valores de N . Assim, a fadiga irá ocorrer independente da magnitude da tensão. Para esses materiais, segundo a ASTM E 1823 – 05, a resposta da fadiga é especificada como uma *resistência à fadiga* (S_N), que é definida como sendo o nível de tensão no qual a ruptura irá ocorrer para um dado número de ciclos pré-estabelecido, conforme se observa na Figura 2.7.

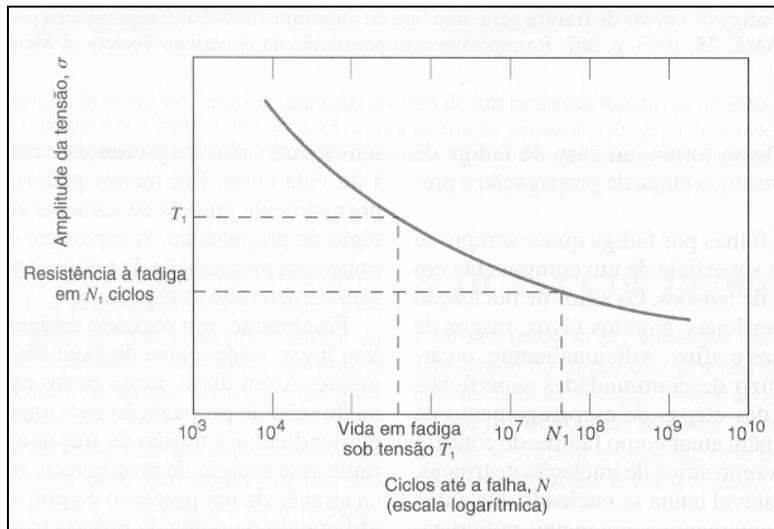


Figura 2.7 - Resistência à fadiga e vida em fadiga, segundo CALLISTER (2002)

Outro importante parâmetro que caracteriza o comportamento de fadiga de um material é a *vida em fadiga* (N_f). Este é o número de ciclos necessários para causar a ruptura em um nível de tensão específico, conforme se observa também na Figura 2.7. Apesar de tratar como *vida*, esse conceito é definido em número de ciclos para um determinado nível de tensão de serviço. Para se obter o tempo dessa *vida*, é necessária compatibilização com a frequência de aplicação de carga.

Na *fadiga em baixo ciclo*, ou fadiga controlada por deformações cíclicas, as tensões nominais (σ_N) são superiores ao limite de escoamento do material (σ_e), representado pelas curvas ϵ - N (curvas da deformação em função do número de ciclos até a fratura). Nesses casos, o número de ciclos até a fratura (N_f) é inferior a 10^3 ciclos e é associado com cargas que produzem não somente deformações elásticas, mas, também alguma deformação plástica durante cada ciclo. Como consequência, as vidas em fadiga são relativamente curtas. Ensaio de fadiga em baixo ciclo controlada por deformações cíclicas são úteis para avaliar a vida de componentes com entalhes. Assim, quando um componente é solicitado envolvendo deformação elástico-plástica homogênea, o ciclo completo de carga (positivo e negativo) produz uma curva conforme a Figura 2.8, denominada curva de histerese, que mostra as deformações elástica e plástica do material. A área dentro da curva de histerese representa uma medida do trabalho de deformação plástica realizado sobre o material.

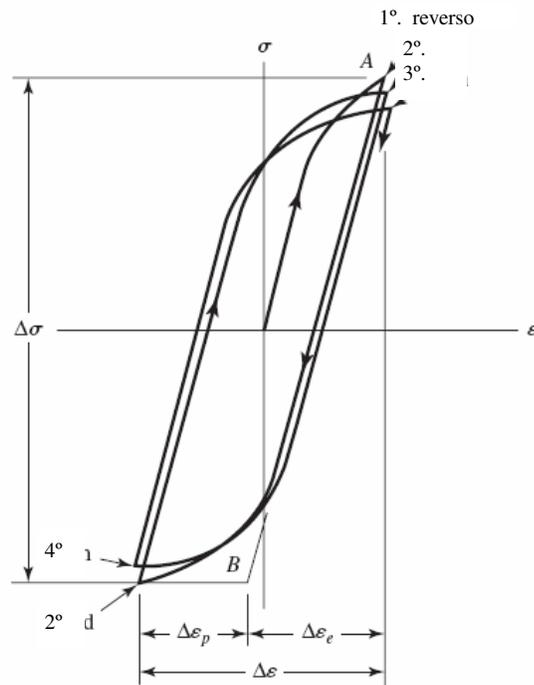


Figura 2.8 – Curva de histerese para um material carregado ciclicamente com deformações elástica e plástica, segundo SHINGLEY (2004)

A faixa da deformação elástica $\Delta\epsilon_e$ na curva de histerese é dada pela equação

$$\Delta\epsilon_e = \Delta\sigma/E \quad (2.2)$$

na qual:

$\Delta\sigma$ é a faixa de variação da tensão;

E é o módulo de elasticidade do material.

A faixa da deformação plástica $\Delta\epsilon_p$ na curva de histerese é dada pela equação

$$\Delta\epsilon_p = \Delta\epsilon - \Delta\sigma/E \quad (2.3)$$

sendo $\Delta\epsilon$ a deformação total, conforme indicado na Figura 2.8.

A vida de um corpo-de-prova solicitado com carregamento controlado por deformações é uma importante propriedade do material estabilizado ciclicamente. Dessa forma se faz necessário para se chegar a isso analisar separadamente os componentes de deformação elástica e plástica.

A componente de deformação elástica, contemplando ajuste experimental, é dada pela Equação 2.4 e os termos definidos na ASTM E 606 – 04.

$$\frac{\Delta \epsilon_e \cdot E}{2} = \sigma_f' \cdot (2N_f)^b \quad (2.4)$$

na qual:

$\Delta \epsilon_e/2$ é a amplitude de deformação elástica;

E é o módulo de elasticidade do material;

σ_f' é o coeficiente de resistência à fadiga, correspondente à fratura em um reverso ($2N_f$);

$2N_f$ é o número de cargas reversas;

b é o expoente de resistência à fadiga.

A componente de deformação plástica, também contemplando ajuste experimental, é dada pela Equação 2.5 e os termos definidos na ASTM E 606 – 04.

$$\frac{\Delta \epsilon_p}{2} = \epsilon_f' \cdot (2N_f)^c \quad (2.5)$$

na qual:

$\Delta \epsilon_p/2$ é a amplitude de deformação plástica;

ϵ_f' é o coeficiente de ductilidade à fadiga, correspondente à fratura em um reverso ($2N_f$);

c é o expoente de ductilidade à fadiga.

Visando poder estimar a vida em fadiga para situações de baixo ciclo e, a partir dos três termos σ_t , ϵ_f e E (limite de resistência à tração, deformação verdadeira na fratura e módulo de elasticidade do material) que podem ser obtidos a partir de ensaio de tração monotônico, a Equação 2.6, com simplificações, pode ser aplicada segundo DIETER (1988).

$$\Delta\epsilon = 3,5 \cdot \frac{\sigma_t}{E} \cdot N^{-0,12} + \epsilon_f^{0,6} \cdot N^{-0,6} \quad (2.6)$$

O estudo da *propagação de trinca por fadiga* é de grande importância para se prever de forma mais apurada a vida em fadiga, uma vez que a parcela de propagação de trinca por fadiga (N_p) representa também uma porção da vida em fadiga. Muitos materiais contêm defeitos formados em seus processos de fabricação ou apresentam defeitos quando em serviço. A partir desses defeitos, trincas podem se propagar chegando a dimensões críticas que levam à fratura.

Atualmente o estudo da propagação de trinca por fadiga utiliza a metodologia da mecânica da fratura (que estabelece as dimensões críticas de trincas ou, para um dado comprimento de trinca, o máximo valor de tensão que o componente estrutural resiste), que trata do controle da fratura (considerada como a propagação instável de uma ou mais trincas) e também de ensaios não destrutivos utilizados para detectar e acompanhar o crescimento de trincas por fadiga. Os ensaios de propagação de trincas por fadiga podem utilizar dentre vários tipos, os corpos-de-prova apoiado em três pontos solicitados à flexão.

A determinação da relação entre a taxa de propagação da trinca em função das tensões cíclicas, nas quais o corpo-de-prova está sendo solicitado, e do comprimento da trinca de fadiga é muito importante no estudo da propagação de trincas por fadiga. A taxa de propagação da trinca por fadiga da/dN depende do comprimento da trinca e do nível de tensão aplicada. No geral, da/dN aumenta com o crescimento do comprimento da trinca. Porém, uma parcela significativa do número total de ciclos até a fratura é consumida nos estágios iniciais do crescimento da trinca, quando a trinca ainda é pequena e muitas vezes ainda não detectável. A Figura 2.11 mostra o comprimento da trinca em função do número de ciclos.

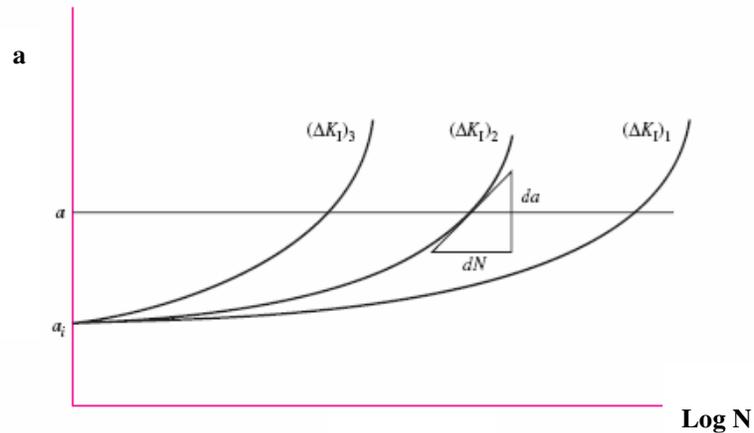


Figura 2.9 – Comprimento da trinca em função do número de ciclos, para três níveis de tensões, segundo SHINGLEY (2004)

Pode-se observar no gráfico da Figura 2.9 que, à medida que a trinca cresce, as taxas de propagação aumentam rapidamente, encurtando a vida do componente. Daí se conclui que a maior parte dos ciclos de carregamento na fase de propagação da trinca por fadiga é consumida durante a fase inicial da propagação da trinca.

Assim, o estudo da propagação de trinca por fadiga é feito, geralmente, analisando os resultados experimentais inseridos no diagrama que relaciona da/dN (taxa de propagação da trinca por ciclo de carga atuante) com ΔK (amplitude do fator de intensidade de tensão em cada ciclo de carga). Conforme se observa na Figura 2.10, o diagrama apresenta coordenadas logarítmicas, sendo o ensaio realizado com amplitude e frequência constantes e carga aplicada sinusoidal (ANDERSON, 1995 *apud* LOPES, 2006).

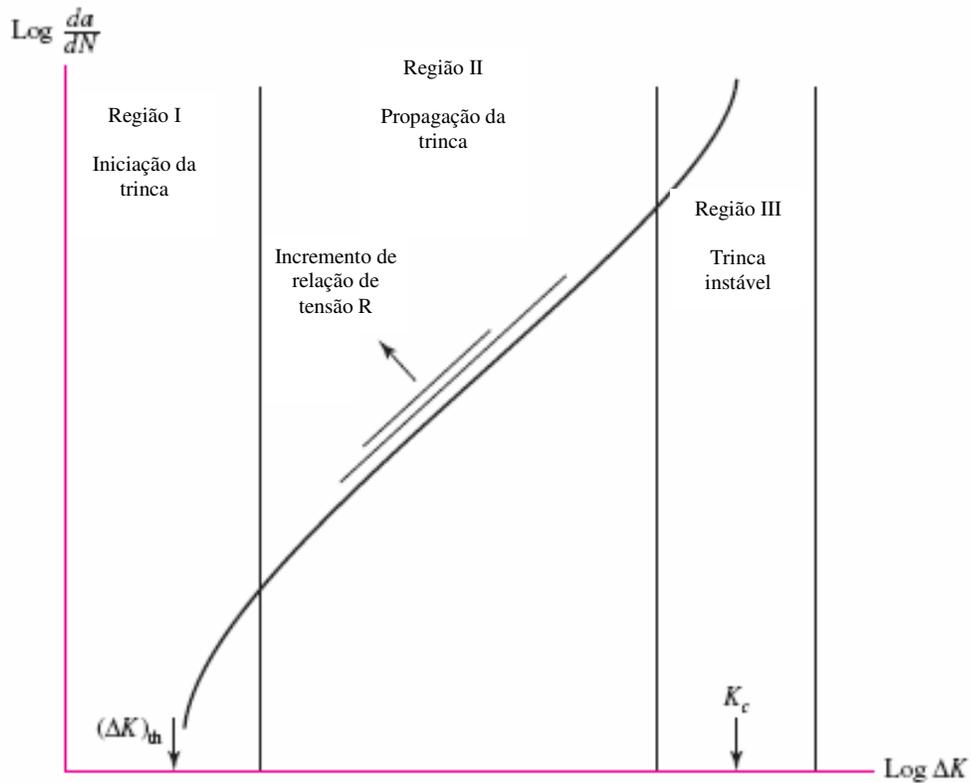


Figura 2.10 – Diagrama típico da/dN – ΔK, segundo SHINGLEY (2004)

PARIS & ERDOGAN (1963) (*apud* SHAH, 1995) postularam que o fator de intensidade de tensão K , que depende do comprimento da trinca e do nível de tensão (Equação 2.7), controla o processo de propagação da trinca por fadiga, e propuseram a Equação (2.8) para descrever a propagação de trinca por fadiga:

$$K_I = y \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (2.7)$$

$$\frac{da}{dN} = C_F \cdot (\Delta K)^{m_F} \quad (2.8)$$

na qual:

K_I é o fator de intensidade de tensão no modo I;

y é o fator que depende da geometria do corpo-de-prova e da trinca;

σ é a tensão;

a é o comprimento da trinca;

ΔK é a variação do fator de intensidade de tensão ($K_{\text{máx}} - K_{\text{mín}}$) associados ao carregamento cíclico;

$K_{\text{máx}}$ é o fator de intensidade de tensão máximo;

$K_{\text{mín}}$ é o fator de intensidade de tensão mínimo;

C_F e m_F são os parâmetros que dependem do material, meio ambiente, frequência, temperatura e razão de carga ($R = P_{\text{mín}} / P_{\text{máx}} = K_{\text{mín}} / K_{\text{máx}}$);

$P_{\text{máx}}$ é a carga máxima;

$P_{\text{mín}}$ é a carga mínima.

A partir das equações (2.7) e (2.8), a vida em fadiga (N_f) pode ser determinada pela seguinte integração:

$$N_f = \int_{a_i}^{a_c} \left[\frac{1}{A \cdot (y \cdot \Delta \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a})^m} \right] da \quad (2.9)$$

na qual:

a_i é o comprimento inicial da trinca;

a_c é o comprimento crítico da trinca;

$\Delta \sigma$ é a variação da tensão ($\sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}}$) associada ao carregamento cíclico;

$\sigma_{\text{máx}}$ é a tensão máxima;

$\sigma_{\text{mín}}$ é a tensão mínima.

A Figura 2.11 mostra curvas de propagação de trinca por fadiga de vários materiais cerâmicos bem como vários materiais metálicos.

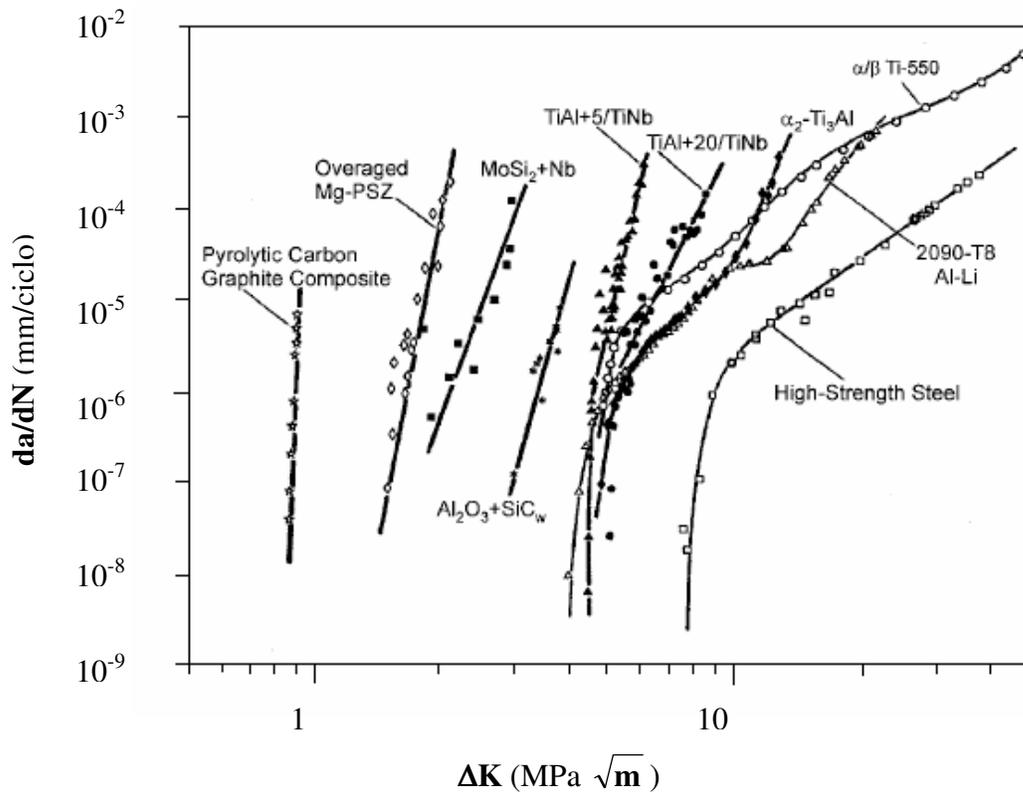


Figura 2.11 – Curvas de propagação de trinca por fadiga de vários materiais, adaptado de RITCHIE (1999)

2.3.3 Mecanismos de propagação de trinca por fadiga em compósitos cerâmicos

Os mecanismos associados com a propagação de trinca por fadiga nos materiais frágeis como os compósitos cerâmicos são muito diferentes dos que se encontram nos materiais metálicos. No caso dos materiais frágeis, a taxa de propagação da trinca (da/dN) é altamente sensível ao fator de intensidade de tensão aplicado (K), enquanto que nos materiais dúcteis a taxa de propagação de trinca por fadiga (da/dN) é altamente sensível à variação do fator de intensidade de tensão aplicado (ΔK).

Segundo RITCHIE (1999), no crescimento da trinca ocorre uma competição entre os mecanismos micro estrutural *intrínseco* (dano) que ocorrem a partir da ponta da trinca e mecanismos *extrínsecos* (escudo) que ocorrem primeiramente, antes da ponta da trinca, retardando seu crescimento, conforme se observa na Figura 2.12.

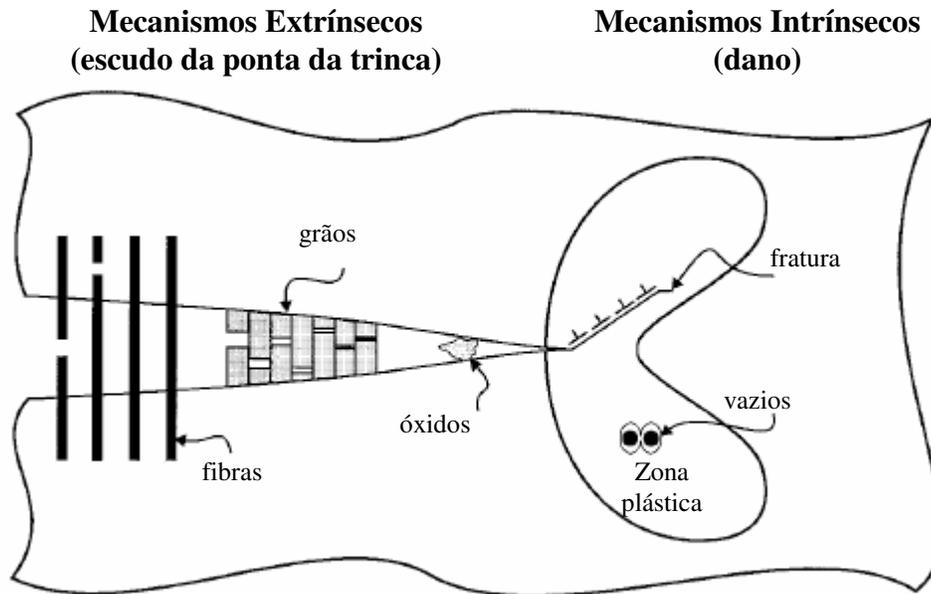


Figura 2.12 – Mecanismos extrínseco e intrínseco que envolvem o crescimento da trinca, adaptado de RITCHIE (1999)

Os mecanismos resistentes extrínsecos em compósitos cerâmicos podem ser identificados como uma série de fatores influentes envolvendo: o desvio do deslocamento da trinca contornando os grãos; a existência de zona inelástica no entorno da trinca envolvendo tensões residuais, resistência à microfissuração e a formação de vazios que relaxam a triaxialidade do material; o contato entre as superfícies da trinca envolvendo o encunhamento dos grãos; o efeito de ponte de fibras e o atrito e a ação conjunta da zona inelástica no entorno da trinca com o contato entre as superfícies da trinca. Segundo RITCHIE (1999), em geral, os materiais metálicos são resistentes intrinsecamente e os materiais cerâmicos são invariavelmente resistentes extrinsecamente.

No comportamento à fadiga, os mecanismos intrínseco e extrínseco distinguem os materiais dúcteis dos materiais frágeis. Assim, nos materiais metálicos, o processo intrínseco que envolve o avanço da trinca é controlado pela variação da intensidade de tensão (ΔK) e o processo extrínseco que envolve os níveis de fechamento da trinca é controlado pelo fator de intensidade de tensão $K_{m\acute{a}x}$, enquanto que para os materiais cerâmicos o processo intrínseco que envolve o avanço da trinca é controlado pelo fator de intensidade de tensão $K_{m\acute{a}x}$, enquanto que o processo extrínseco, que envolve a degradação das pontes de ligação, é controlado pela variação da intensidade de tensão (ΔK). A Figura 2.13 ilustra esquematicamente esses comportamentos para os materiais metálicos e compósitos cerâmicos.

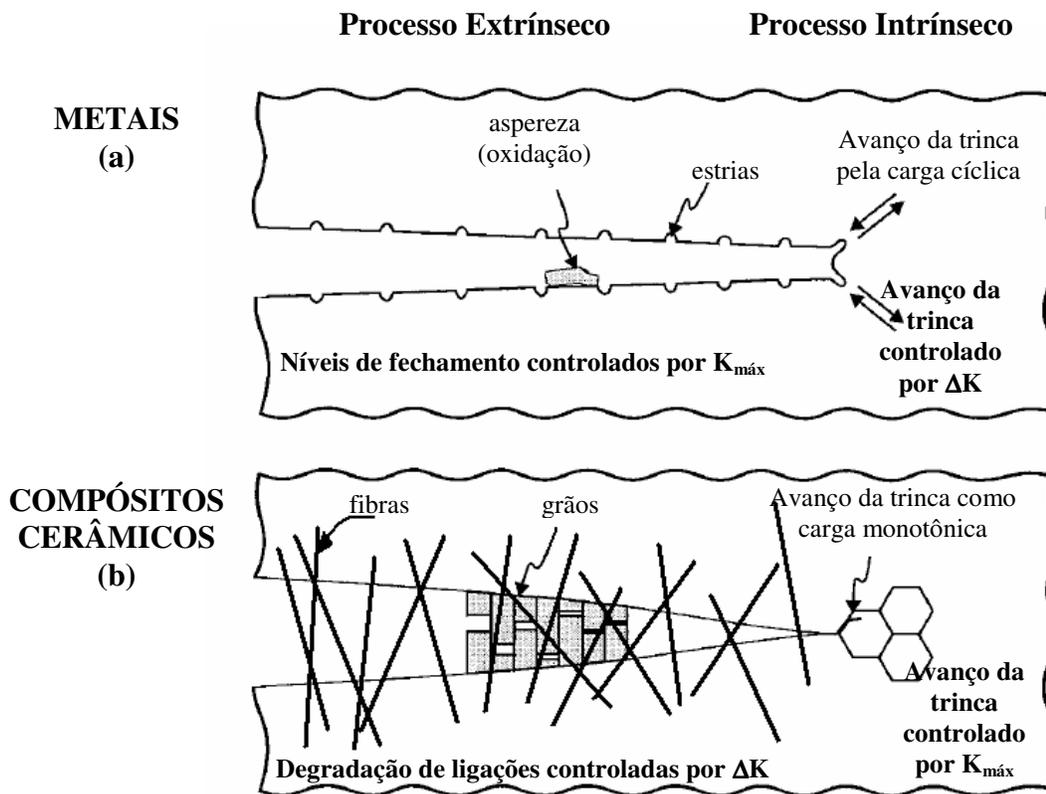


Figura 2.13 – Mecanismos extrínseco e intrínseco dos materiais metálicos (a) e compósitos cerâmicos (b), adaptado de RITCHIE (1999)

Na propagação de trinca por fadiga nos materiais compósitos cerâmicos os mecanismos extrínsecos são da maior importância uma vez que são eles que ajudam no controle do crescimento da ponta da trinca. Há uma variedade de mecanismos de escudo que podem ser utilizados visando impedir a extensão da trinca, reduzindo na ponta da trinca a intensidade de tensão. Especificamente no caso do concreto reforçado com fibras, as fibras atuam como escudo, criando pontes de ligação entre as faces da trinca.

RITCHE (1999) aponta que sob a atuação de ações cíclicas, os materiais cerâmicos se comportam de forma diferente dos materiais metálicos. Nas cerâmicas as fissuras de fadiga não surgem naturalmente, elas ocorrem a partir de um defeito pré-existente. As superfícies de fratura das cerâmicas são idênticas tanto para carga monotônica como para carga cíclica. A microestrutura influi significativamente no crescimento da trinca por fadiga nas cerâmicas e a sensibilidade da taxa de crescimento de trinca à intensidade de tensão é extremamente alta.

Outro aspecto importante apontado por RITCHE (1999) indica que, nos materiais metálicos, o avanço da ponta da trinca por fadiga é resultado do dano na região da ponta da trinca (mecanismo intrínseco) devido unicamente à carga cíclica. Nos materiais cerâmicos, o avanço da ponta da trinca por fadiga é idêntico ao mecanismo de avanço devido à carga monotônica, no entanto, o descarregamento cíclico promove acelerado crescimento da trinca pela degradação do efeito de escudo na parte anterior à ponta da trinca (mecanismo extrínseco).

Nos compósitos cerâmicos sob carregamento monotônico, a tensão solicitante de aderência aumenta rapidamente com a abertura da trinca durante o descolamento do agregado, seguindo a um gradual decréscimo do atrito enquanto o arrancamento do agregado ocorre e ambos os processos contribuem para a tenacidade do material, uma vez que uma maior energia é dissipada no atrito do arrancamento. No entanto, sob carregamento cíclico há um decréscimo da capacidade de resistência da zona de escudo, provocado pela redução da aderência entre os agregados. A Figura 2.14 mostra os diagramas contemplando os processos de arrancamento dos agregados sob carregamentos monotônico e cíclico.

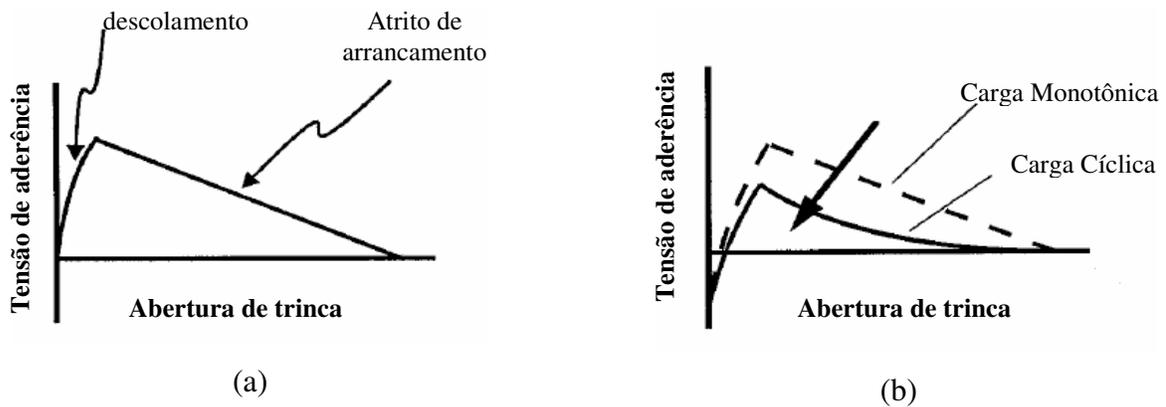


Figura 2.14 – Abertura da trinca em função da variação da tensão de aderência devido ao descolamento e ao atrito de arrancamento (a) e o decréscimo no efeito de escudo devido ao carregamento cíclico (b), adaptado de RITCHIE (1999)

2.3.4 Estudo da fadiga no concreto reforçado com fibras

A fadiga provoca danos na microestrutura do concreto levando, conseqüentemente, à falha do material quando submetido a carregamento cíclico. Nas aplicações estruturais do concreto reforçado com fibras, em geral, somente é levada em consideração a tenacidade do material quando submetido a carga monotônica. No entanto, para algumas aplicações que envolvem, por exemplo, os pavimentos, a integridade estrutural do material pode oferecer limitações para seu desempenho quando submetido a carregamentos cíclicos.

Existem vários estudos sobre fadiga no concreto reforçado com fibras, especialmente abordando a fadiga de alto ciclo, visando buscar informações sobre o *limite de resistência à fadiga*, *resistência à fadiga* e *vida em fadiga*. Na grande maioria dos projetos estruturais, essas informações são utilizadas como referência, especialmente em pavimentos de concreto. Na seqüência são apresentados estudos realizados sobre fadiga envolvendo o concreto sem reforço com fibras, também tratado como concreto simples, e o concreto reforçado com fibras.

Em trabalho de HSU (1981) é feita a discussão sobre a fadiga no concreto simples, sistematizando uma série de informações importantes para a abordagem da questão. Alguns parâmetros de projeto são apontados no trabalho como extremamente úteis para aplicação em pavimentos. Os pavimentos de concreto para rodovias são submetidos a milhões de ciclos de cargas de eixo de caminhões e automóveis, sendo, em geral, utilizado o concreto simples, ou seja, sem nenhum tipo de reforço. Sabe-se que a capacidade de resistência à tração do concreto simples é baixa, e que o parâmetro de projeto é sua resistência à tração por flexão, ou como também é conhecido, módulo de ruptura. Em função desse parâmetro, a maioria dos estudos de fadiga no material se baseia na resistência à tração por flexão. De forma objetiva, dois parâmetros extremamente importantes para o projeto dos pavimentos de concreto simples são a *resistência à tração por flexão*, que se trata de um parâmetro obtido por meio de ensaio monotônico, e a *resistência à fadiga por flexão*, que se trata de um parâmetro obtido por meio de ensaios cíclicos.

O ensaio monotônico para obtenção da resistência à tração por flexão é de realização mais comum sendo utilizado como referência no controle tecnológico das obras de pavimento. O ensaio cíclico para obtenção da resistência à fadiga por flexão não é utilizado para controle tecnológico das obras, no entanto ele pode ser importante para criação de modelos de comportamento para aplicação em projeto, mantendo interface com a resistência à tração por flexão, garantindo dessa forma o controle do processo de forma indireta.

Em sua reflexão, HSU (1981) ressalta que a resistência à fadiga na flexão depende da forma, frequência e número de ciclos de aplicação de carga. Salaria ainda que no caso específico do concreto simples, para uma mesma frequência, à medida que o nível de tensão máxima aumenta, o número de ciclos alcançado diminui, e a ruptura do material ocorrerá mais rapidamente. À medida que o nível de tensão diminui, o número de ciclos alcançado aumenta antes da ruptura do material. Também se observa que a ruptura do material é acelerada quando há redução da frequência de aplicação de carga. Outro aspecto importante do trabalho de HSU (1981) é a caracterização das aplicações estruturais do concreto em faixas de ciclos de carga (*fadiga de baixo ciclo e fadiga de alto ciclo*), apresentando-as conforme a Figura 2.15.

FADIGA DE BAIXO CICLO		FADIGA DE ALTO CICLO	
Estruturas submetidas a terremoto	a	Pavimentos de aeroportos e pontes	Estradas e pontes ferroviárias, pavimentos rodoviários
0	10^3 ciclos	10^5 ciclos	10^7 ciclos

Figura 2.15 - Faixas de ciclos de fadiga, segundo HSU (1981)

Observa-se, na análise dessas referências que, conforme RAMAKRISHNAN & LOKVIK (1992), a *resistência à fadiga por flexão* e o *limite de durabilidade* são parâmetros importantes nos projetos de pavimentos. Essa necessidade é reforçada na análise do trabalho de Hsu, que aprofunda o estudo das aplicações estruturais do concreto, compatibilizando o uso da estrutura com a fadiga. Particularmente situa, no caso dos pavimentos rodoviários, que a faixa de ciclos de fadiga pode ser de 10^5 a 10^6 ciclos de repetição de carga.

Segundo MEHTA & MONTEIRO (1994), em geral os concretos reforçados com fibras terão uma resistência à fadiga de cerca de 90% da resistência monotônica em 2×10^6 ciclos, quando usado carregamento sem reversão de carga ($R=0$) e em torno de 70% quando usado carregamento com sentidos inversos ($R=1$). Essa afirmação ocorre para elevados teores de fibras de aço ($\sim 2\%$). Como a eficiência no controle de propagação da fissura está associada ao teor de fibras, vários trabalhos foram realizados variando-se teores de fibras, tipos de fibras, fator de forma (comprimento da fibra / diâmetro da fibra), procurando encontrar relações com a resistência à fadiga na flexão.

Em estudo de BATSON *et al.* (1972), foram realizados ensaios de vigas de CRFA submetidas à flexão, utilizando teores de fibras de aço de 2,0% e 3,0% em volume, com fibras de 13 mm x 0,17 mm (fator de forma = 77) e de 32 mm x 0,36 mm (fator de forma = 89). Buscava-se também atingir 2×10^6 ciclos, como limite específico de ciclos para a obtenção resistência à fadiga na flexão. Para todos os casos de carregamento, a frequência de aplicação da carga foi de 3 Hz (3 ciclos / segundo). Estudou-se também o efeito da forma de aplicação de carga, ou seja, carregamento com sentidos inversos e carregamento sem reversão.

A partir dos dados obtidos em ensaios de corpos-de-prova prismáticos de 10,1 x 15,2 x 25,8 cm, e com base em tratamento estatístico, pôde-se concluir que a resistência à fadiga atingiu 74% da resistência estática, com frequência de 2×10^6 , usando carregamento com sentidos inversos (teor em volume de 3,0% com fibras de 13 mm x 0,17 mm) e 83% da resistência estática usando carregamento sem reversão (teor em volume de 3,0% com fibras de 32 mm x 0,36 mm). Observou ainda BATSON *et al.* (1972) que o material atingia a ruptura pelo escorregamento e não pelo rompimento das fibras. Essa informação é importante, uma vez que é uma expectativa que se tem para se obter eficiência da fibra, esperando-se que a fibra não se rompa e sim se deforme após a fissuração da matriz, garantindo maior aproveitamento do material. Há nesse caso a contribuição da aderência por atrito entre a fibra de aço e o concreto, bem como a contribuição da aderência mecânica devida às deformações na fibra de aço.

Observou também BATSON *et al.* (1972) que se incrementava a resistência à fadiga na flexão à medida que se aumentava o teor de fibras (os resultados para teores em volume de 3,0% foram superiores aos dos teores de 2,0%). Isso é explicado pelo menor espaçamento entre as fibras, aumentando dessa forma o controle de propagação de fissuras. Porém, esses teores são extremamente elevados (2% em volume representam 160 kg/m^3 e 3,0% 240 kg/m^3). Essas quantidades quando aplicadas ao concreto dificultam em muito a mistura e a fluidez do material, bem como aumenta significativamente o custo do concreto.

Em trabalho de JOHSTON & ZEMP (1991), foi estudada a influência da quantidade, do fator de forma e do tipo de fibras. O programa experimental contemplou a investigação do comportamento da fadiga por flexão do CRFA, envolvendo nove diferentes traços, incluindo também o concreto simples, sem fibras. O estudo variou a quantidade de fibras, o fator de forma e o tipo de fibra. As quantidades variaram de 0,5% em volume (40 kg/m^3) a 1,5% em volume (120 kg/m^3), os fatores de forma variaram de 47 a 100 e foram utilizados quatro tipos de fibras.

A avaliação do desempenho foi feita por meio da análise das curvas S-N e mostra que a influência da quantidade de fibras de aço e do fator de forma são os principais fatores que alteram o comportamento à fadiga do CRFA. Para um mesmo teor de fibras de aço, porém com fatores de forma diferentes, os resultados se mostram também diferentes, tendo o CRFA com fibras de

fator de forma maior um melhor desempenho. O trabalho não aponta a frequência de aplicação de cargas. Também como análise, observou-se que, fixando-se 10^5 ciclos como uma referência para análise do limite de durabilidade, o CRFA cujas fibras apresentam um fator de forma da ordem de 70 atingiu essa quantidade de ciclos com um nível de tensões entre 84% e 89% da resistência à tração por flexão do material. Já para as fibras com fator de forma da ordem de 50, os 10^5 ciclos foram atingidos com níveis de tensões entre 75% e 80%.

Em trabalho de RAMAKRISHNAN *et al.* (1989), é ressaltada a importância como parâmetros de projeto dos pavimentos de CRF a *resistência à fadiga* e o *limite de resistência*. A investigação analisa o comportamento à fadiga nos concretos simples, sem fibras e com fibras (quatro tipos): fibra de aço com dobras nas extremidades, seção circular de 0,5 mm de diâmetro, 50 mm de comprimento e fator de forma igual a 100; fibra de aço reta, seção retangular (0,75 mm x 0,23 mm), comprimento de 19 mm e fator de forma igual a 40; fibra de aço ondulada, seção com diâmetro equivalente entre 0,75 mm e 1,27 mm, 50 mm de comprimento e fator de forma entre 40 e 65 e fibra de polipropileno fibrilada, com comprimento de 19 mm.

Os teores de fibras de aço utilizados foram de 0,5% e 1,0% em volume, porém tendo como base o mesmo traço de concreto para todos os casos. Foram utilizados corpos-de-prova prismáticos (152 mm x 152 mm x 533 mm) para avaliação da fadiga na flexão. O carregamento aplicado foi do tipo sem reversão, tendo como limite inferior de carga 10% da carga aplicada para obtenção da resistência à tração por flexão e o limite superior de carga 90% da carga aplicada para obtenção da resistência à tração por flexão. A frequência de aplicação de carga estabelecida foi de 20 Hz (20 ciclos / segundo). O equipamento utilizado em todos os ensaios foi uma prensa do tipo universal MTS 436. No estudo das propriedades do CRF, o trabalho avaliou o comportamento do material, buscando informações sobre a resistência à fadiga por flexão e sobre o limite de resistência à fadiga por flexão. Para ambos os casos, foram tomados como referência o limite de 2×10^6 de ciclos, aplicando um carregamento sem reversão.

O trabalho aponta também, assim como BATSON *et al.* (1972), a eficiência da ancoragem das fibras e também das dobras nas extremidades de fibras de fios trefilados na resistência à fadiga após a fissura da matriz de concreto, bem como a melhor eficiência à fadiga do CRFA

quando se utiliza esse tipo de fibra comparado com os outros. Por outro lado conclui que para o teor de 0,5% da fibra trefilada com dobras na extremidade há um crescimento da resistência à fadiga no CRFA, incrementando ainda mais essa resistência com o aumento do teor de fibra de aço. Ressalta-se que os ensaios foram realizados com frequência de 20 Hz e que o fator de forma da fibra é igual a 100.

Em trabalho de NAGABHUSHANAM *et al.* (1989) é feito estudo do concreto reforçado com fibras de polipropileno fibriladas, avaliando-se a resistência à fadiga e a tenacidade do material, utilizando-se teores de 0,1%, 0,5% e 1%, cujo módulo de elasticidade é 3,4 GPa e a tensão de escoamento entre 550 MPa e 690 MPa. Os corpos-de-prova utilizados foram prismáticos de 100 mm x 100 mm x 355 mm.

Esse autor, além da avaliação da resistência à fadiga, avaliou também por meio de ensaio monotônico a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão axial. Como conclusão aponta que os teores de 0,5% e 1% incrementam resistência à fadiga da ordem de 27% e 32% respectivamente, em relação à resistência à tração na flexão feito no ensaio monotônico, o que não ocorreu com o teor de 0,1%, chegando até mesmo a um decréscimo de resistência. Por outro lado, em todos os casos, houve aumento de tenacidade do material, porém sendo mais significativo para as adições de 0,5% e 1%.

Em posterior trabalho de RAMAKRISHNAN & LOKVIK (1992), foram feitas novas investigações sobre a resistência à fadiga do CRF para quatro diferentes tipos de fibras: aço com ganchos nas extremidades (fibra tipo A), aço retas (fibra tipo B), aço onduladas (fibra tipo C) e polipropileno (fibra tipo D). Incorporaram-se dois diferentes teores de fibras (0,5% e 1,0%) em volume, mantendo todas as adições sobre uma mesma matriz de concreto. Mais de 300 corpos-de-prova prismáticos de 152 x 152 x 533 mm foram submetidos a ensaio de fadiga por flexão, com frequência de 20 Hz, estabelecendo para análise uma faixa de 1 até 2×10^6 ciclos de carregamento sem reversão, com limite inferior de aplicação de carga de 10% da carga média obtida no ensaio monotônico de tração por flexão. A Figura 2.16 mostra os diagramas S-N para os vários tipos de CRF ensaiados.

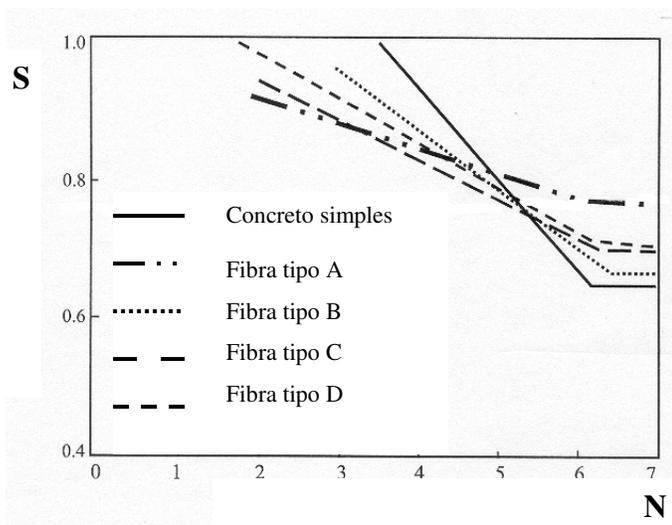


Figura 2.16 - Diagramas S-N para vários CRFs com teor em volume de 0,5%, segundo RAMAKRISHNAN & LOKVIK (1992)

O trabalho dos citados autores conclui que a resistência à fadiga é altamente dependente do tipo de ancoragem da fibra, mostrando o alto desempenho das fibras de aço com ganchos nas extremidades. Outro aspecto apontado nas conclusões é que a distribuição das fibras na seção de ruptura, de modo particular para as fibras com ancoragem nas extremidades, causa uma grande variação no desempenho à fadiga. Observa-se também uma considerável variação nos resultados, chamando atenção para necessidade de uso de conceito estatístico seguro e adequado para tratamento dos resultados, visando aplicação de forma segura em projetos.

Em trabalho de NANNI (1991), os trabalhos de BATSON *et al.* (1972) e RAMAKRISHNAN & LOKVIK (1992) são referenciados, salientando que eles foram realizados com baixos teores em volume de fibras de aço (entre 0,5 e 1,0%). Aponta ainda que o incremento da resistência à fadiga e do limite de resistência pela adição de fibras de aço é função do teor, do tipo e da geometria da fibra. Dependendo da combinação desses parâmetros, as características de fadiga do CRFA variam sobre uma larga faixa. Em seu estudo, comparou o comportamento de fibras fabricadas a partir de fios trefilados e chapas cortadas, para teores de fibras de 0,46% em volume (35 kg/m^3), utilizando para as fibras de fios trefilados um fator de forma de 60 (fibra 3) e para as fibras de chapas cortadas fatores de forma de 45 (fibra 1) e 60 (fibra 2).

Os ensaios foram feitos com corpos-de-prova prismáticos com dimensões de 102 x 102 x 356 mm (vão de 305 mm), utilizando um equipamento hidráulico com controle de carga para os ensaios de fadiga. A carga aplicada foi do tipo não reversa, com amplitude constante, frequência de carga de 20 Hz. Para todos os casos, a carga mínima foi igual a 10% da carga obtida no ensaio estático de resistência à tração, variando-se a carga máxima entre 70 e 95% da carga obtida no ensaio monotônico para obtenção da resistência à tração. O número de ciclos estabelecido como referência foi limitada a 1×10^6 , fixando-se ainda que as tensões que não ultrapassassem esse limite não poderiam ser assumidas como tendo atingido o limite de durabilidade do material. Foi utilizado como parâmetro de tenacidade os Índices de Tenacidade, conforme a ASTM C-1018 (1994), visando a avaliação do incremento de tenacidade pela adição das fibras em relação ao concreto simples. Esse estudo mostra pouca diferença no incremento de tenacidade aos concretos dos vários tipos e teores de fibras quando medidos pelo índice I_{10} , porém o incremento de tenacidade se acentuou na medição do índice de tenacidade I_{30} . Os resultados mostram bom desempenho para os três tipos de fibras de aço utilizadas, apresentando pouca variação em todas as faixas, porém incrementando resistência à fadiga em relação ao concreto simples.

A Tabela 2.1 e a Figura 2.17 apresentam os resultados da investigação, mostrando pouca diferença entre os CRFAs com as fibras 2 e 3, concretos esses que apresentam o mesmo teor em volume de fibras de aço (0,46%) e mesmo fator de forma (60). As fibras apresentam também a mesma forma de ancoragem nas extremidades (ganchos). A única diferença é em relação ao processo de fabricação e na seção transversal.

Tabela 2.1 - Resultados dos ensaios estáticos e dinâmicos do trabalho de NANNI (1991)

S	REFERÊNCIA (Concreto Simples)		CRFA (fibra 1)		CRFA (fibra 2)		CRFA (fibra 3)	
	Média no.de ciclos	Coef. de Var (x100)	Média no. de ciclos	Coef. Var. (x100)	Média no. de ciclos	Coef. de Var (x100)	Média no. de ciclos	Coef. Var (x100)
1,00	1	7	1	6	1	3	1	8
0,95			1193	38	1547	25	860	12
0,90	2220	23	3903	4	3417	32	4320	6
0,85			28053	19	51440	38	68100	26
0,80	60183	17	98303	11	175987	17	185100	14
0,75			233547	19	375047	7	330117	18
0,70	322413	36	> 1E6	n/a	> 1E6	n/a	>1E6	n/a
0,60	> 1E6	n/a						

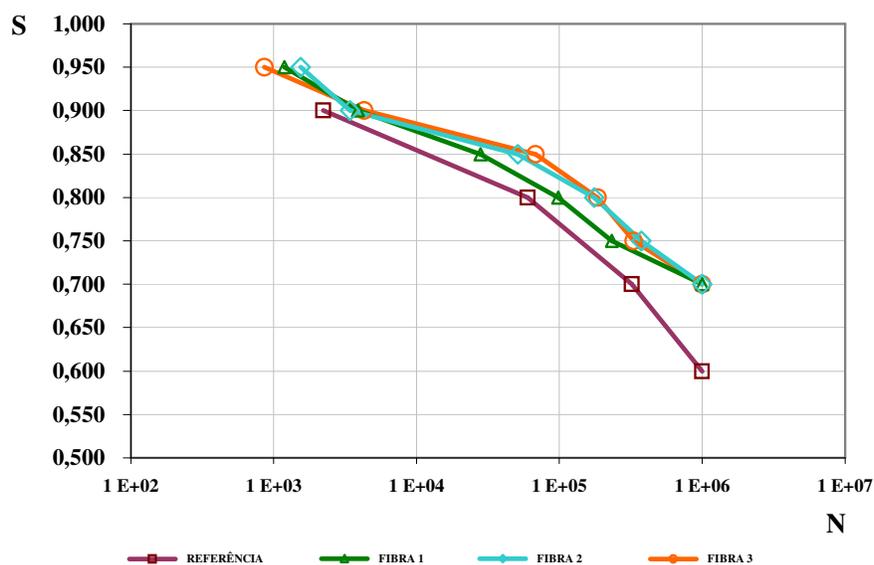


Figura 2.17 - Diagramas S-N construído à partir das médias dos números de ciclos obtidos para cada percentual da resistência à tração por flexão do material, segundo NANNI (1991)

O trabalho de NANNI (1991) procura fazer correlação entre número de ciclos à fadiga e um parâmetro denominado fator fibra (fiber factor) F , que é o resultado do produto do teor de fibra, do fator de forma e a eficiência da ancoragem, para alguns intervalos de relação de tensões. Com base nesses parâmetros, estabelece-se um procedimento para projeto considerando a fadiga no CRFA. Observam-se também alguns pontos interessantes para aprofundamento, uma vez que trabalha com baixos teores (0,46% em volume - 35 kg/m³). Utiliza também fibras de aço com fatores de forma iguais, porém com tipos de fabricação e seção transversal diferentes, bem como explora o conceito de eficiência de ancoragem da fibra, conceito esse não muito comum.

Em trabalho de WEI *et al.* (1996), foi estudado o efeito do teor de fibras de aço no desempenho da fadiga para os concretos convencionais e de alta resistência. Os testes foram realizados em corpos-de-prova de 100 x 100 x 400 mm e 150 x 150 x 550 mm, com frequências variando entre 5 Hz e 20 Hz. Na análise da influência dos teores em volume de fibras de aço, quatro séries de teores foram utilizadas (0,7%, 1,0%, 1,2% e 1,5%) e para cada série, os valores percentuais de resistência variaram partir de 10% do valor da resistência à tração por flexão obtido no ensaio monotônico. O trabalho mostra que a influência do teor de fibras de aço interfere de forma significativa na resistência à fadiga do material. Observa-se também que o

estudo procura trabalhar com um parâmetro dado pelo produto entre o teor de fibras de aço e o seu fator de forma, não trabalhando, como no caso do estudo de NANNI (1991), com a eficiência de ancoragem da fibra. Isso se deve ao fato do trabalho contemplar fibras que apresentam o mesmo tipo de ancoragem e seção transversal, apesar de comprimentos diferentes (25 mm e 30 mm), porém com o mesmo fator de forma, 60. O estudo utiliza concretos de alta resistência e conclui que para esses concretos também o efeito do teor e do fator de forma da fibra é muito importante.

Em trabalho de NAAMAN & HAMMOUD (1998), buscou-se informações sobre o comportamento da fadiga por meio da obtenção da vida em fadiga. O estudo foi feito somente para concreto de alta resistência inicial (35 MPa em 24 hs), incorporando fibras de aço de fio trefilado e com ancoragens nas extremidades tipo gancho. As dosagens foram divididas em baixos teores de fibras de aço, variando de 0,1% até 1,0% em volume, e em altos teores de fibras de aço, variado de 1% até 2% em volume. Os corpos-de-prova prismáticos foram moldados com dimensões de 100 x 100 x 400 mm. Para cada traço, três diferentes situações de valores percentuais máximos da resistência (S): 70%, 80% e 90%, mantendo-se para todas as situações o valor percentual mínimo da resistência em 10%. Todos os ensaios de flexão foram realizados em equipamento servo-controlado MTS, modelo 810. Nos ensaios de fadiga, dependendo do valor de S e da expectativa de vida em fadiga, a frequência variava entre 1 Hz e 5 Hz Os ensaios foram conduzidos até a ruptura do material ou até o limite de 5×10^6 ciclos.

Conclui o trabalho que o reforço com fibras de aço com ancoragens em gancho e teores de 2% em volume atinge da ordem de 10 ciclos como média da vida em fadiga para $S = 90\%$, 8000 ciclos para $S = 80\%$ e $2,7 \times 10^6$ ciclos para $S = 70\%$. Conclui também que o valor de S, que diz respeito à vida em fadiga para esses concretos, é da ordem de 68% da resistência à tração por flexão para 5×10^6 ciclos, 67% para 1×10^7 ciclos e 65 % para 5×10^7 ciclos, conforme se observa na Figura 2.18. Também conclui que a relação de tensões de 65% pode ser tomada como limite de durabilidade para projeto. Outra conclusão aponta que a influência do fator de forma da fibra na vida em fadiga não é tão significativa como o teor de fibra, e que as ancoragens nas extremidades sustentam os ciclos de tensão, independente do comprimento da fibra.

Como contribuição significativa o trabalho aponta que, para concretos de elevada resistência com teor de fibras de aço de 2% em volume e fibras de aço com seção circular e ancoragens na extremidade, o limite de durabilidade pode ser tomado como sendo abaixo de 65% da resistência à tração por flexão.

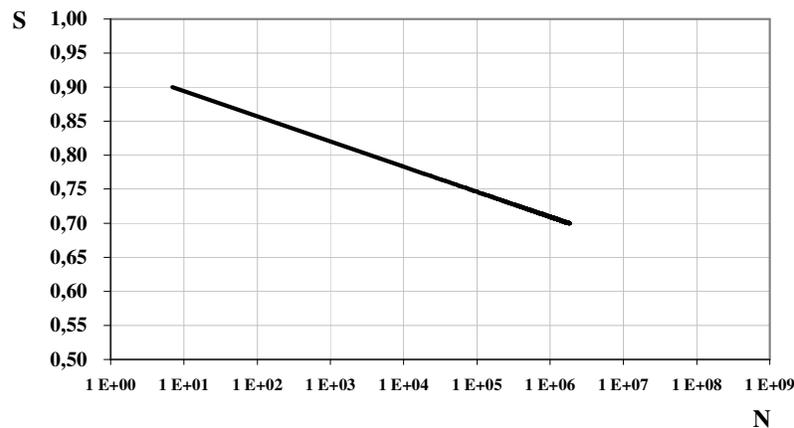


Figura 2.18 - Diagrama S-N para o CRFA com teor em volume de 2 %, segundo NAAMAN & HAMMOUD (1998)

Em trabalho de CACHIM (2004), que estuda experimentalmente e numericamente o comportamento do concreto estrutural sob ações de fadiga para aplicação em pavimentos, há informações sobre o CRFA bastante importantes. Aponta, assim como outros autores, que o efeito da adição de fibras no comportamento à fadiga do concreto é altamente dependente da composição do concreto, do tipo de fibra, da orientação das fibras em relação à direção principal de tensões e porcentagem em volume de fibras adicionadas na mistura. Salienta ainda CACHIM (2004) que “ [...] o comportamento à fadiga do CRFA é um fenômeno muito complexo com adicionais dificuldades, comparado com o concreto simples, causado pela presença das fibras”.

Aponta o trabalho que a presença das fibras de aço produz um duplo efeito no desempenho à fadiga do concreto. Contribuem de forma positiva fazendo ‘ponte’ entre as fissuras e também de forma negativa uma vez que introduzem defeitos adicionais em detrimento da vida em fadiga do material. Dessa forma, pode-se ter efeito benéfico, nenhum ou negativo na observação da vida em fadiga do CRFA comparado com o concreto simples.

Particularmente no estudo da fadiga na flexão, CACHIM (2004) observa que o efeito da adição das fibras na vida em fadiga e no limite de durabilidade do material do CRFA é muito complexo, sendo os fatores que afetam o desempenho do material dependentes essencialmente do tipo, geometria e teor das fibras de aço. Seu trabalho utilizou corpos-de-prova prismáticos de 150 x 150 x 525 mm (vão de 450 mm). As fibras de aço utilizadas foram de fios trefilados com ganchos nas extremidades, com comprimento de 60 mm e diâmetros de 0,8 mm, apresentando fator de forma de 75, com teor de 0,56% (45 Kg/m^3). Os ensaios foram realizados com frequência de 2 e 5 Hz e valores percentuais máximos da resistência estática do material, variando de 60% a 100 % da resistência à tração por flexão, mantendo-se para todas as situações o valor percentual mínimo da resistência à tração por flexão em 10%. Seu trabalho conclui que o efeito da adição de fibras na vida em fadiga do material é pequeno quando comparado com o concreto simples e salienta que as imperfeições causadas pelas fibras no material são de extrema importância para a vida em fadiga do CRFA.

Em trabalho de SHINGH (2006), foi estudada a resistência à fadiga do CRFA contendo uma mistura de dois tipos de fibras de aço. Foram adicionados teores de 1%, 1,5% e 2% em volume de fibras e ensaiados corpos-de-prova prismáticos de 100 mm x 100 mm x 500 mm, com cargas em quatro pontos e frequência de 20 Hz, utilizando um equipamento MTS com capacidade de 100 kN. Os resultados apontaram incremento de 39%, 58% e 67% na resistência à tração por flexão em relação ao concreto simples com a adição respectivamente de 1 %, 1,5% e 2%.

Assim como outros autores, identifica-se que há incremento de resistência à fadiga de 72,10%, 65,4% e 62% em relação à resistência à tração por flexão do concreto simples obtido em ensaio monotônico, para os concretos com adições de fibras de 1%, 1,5% e 2% respectivamente. A Figura 2.19 mostra o incremento de resistência à fadiga dos CRFs em relação ao concreto simples, sem adição de fibras. No entanto, observou também que, na análise da curva S-N o melhor desempenho foi da adição de 1% de fibras, conforme mostra a Figura 2.20.

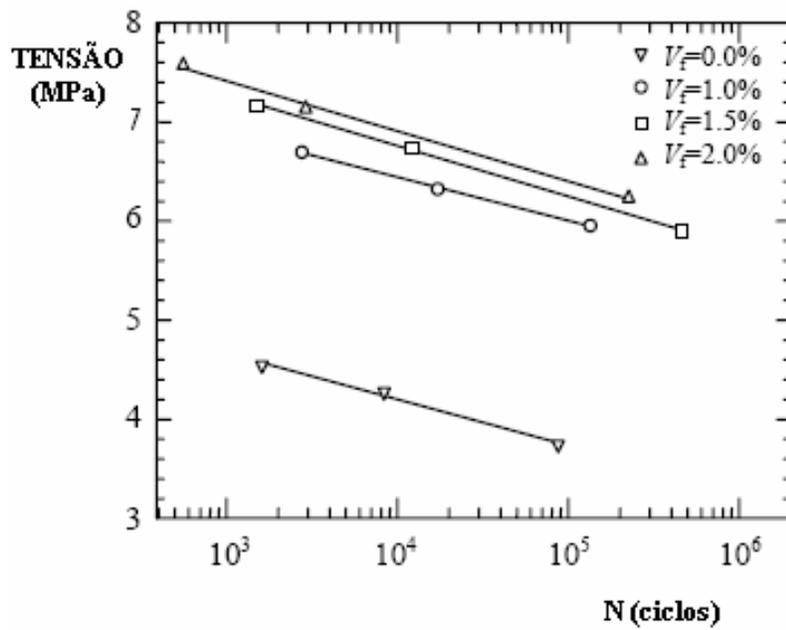


Figura 2.19 - Resistência à fadiga dos CRFs, segundo SINGH (2006)

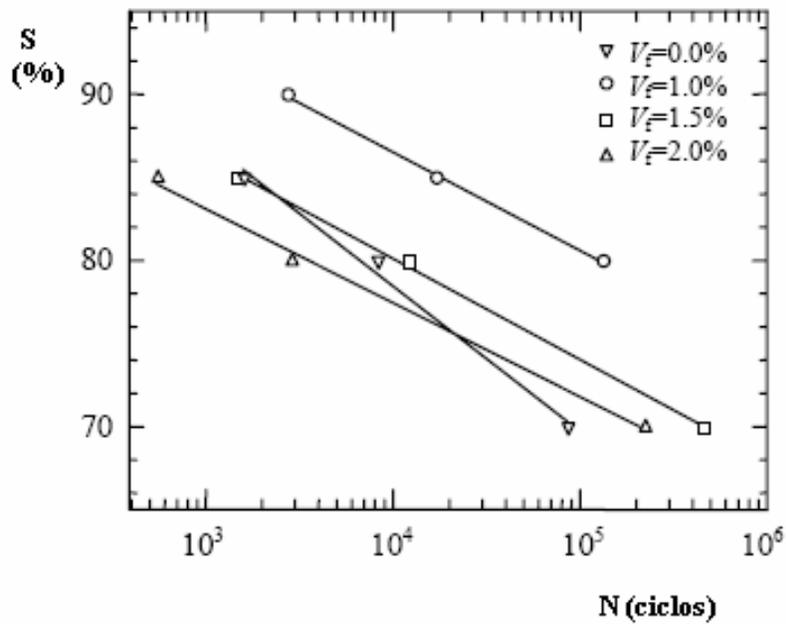


Figura 2.20 – Curvas S-N dos CRFs, segundo SINGH (2006)

Observou também o autor que a fratura dos corpos-de-prova do CRFA ocorre imediatamente após a iniciação da fissura visível para elevados níveis de tensão. No entanto, para baixos níveis de tensão, há necessidade de uma grande quantidade de ciclos para a iniciação visível da fissura, apontando a ação das fibras no controle da abertura das fissuras.

Também aponta o autor que, após o ensaio cíclico, as fibras na superfície de fratura se mostram em sua maioria deformadas em função do esforço de arrancamento, ocorrendo ruptura em poucas fibras e que o concreto na superfície de fratura se mostra com as mesmas características quando do ensaio monotônico.

A grande maioria dos estudos realizados, tanto do material concreto como do concreto reforçado com fibras, aborda a questão da fadiga com o enfoque de fadiga de alto ciclo, tendo-se referências desde a década de 70, das quais algumas importantes foram apresentadas. No estudo da propagação de trinca por fadiga, tanto do concreto simples como no concreto reforçado com fibras, a abordagem é mais recente e as referências que se tem ocorrem nos últimos 10 anos. No entanto, a abordagem de baixos teores de fibras adicionados ao concreto é muito escassa, sendo a maioria dos estudos feitos com teores iguais ou superiores a 0,5%. Na seqüência são apresentadas algumas dessas referências sobre o assunto.

LI & MATSUMOTO (1998) apresentam um modelo analítico para previsão de vida em fadiga para o CRF. O modelo esclarece o crescimento da trinca por fadiga em matrizes de concreto sobre a influência de carregamentos cíclicos e também o efeito de ligação agregado e fibras. Mostra que o dano por fadiga no CRF pode ser quantificado pelo desenvolvimento de modelo onde os materiais constituintes, matriz, fibras, interface fibra-matriz e também alterações microscópicas durante o carregamento cíclico, sejam levados em consideração. Muitas das alterações microscópicas causam alterações macroscópicas nas propriedades do material, como, por exemplo, o fato da ocorrência de microfissuras no concreto acarretar um decréscimo de seu módulo de elasticidade.

LI & MATSUMOTO (1998) utilizaram os resultados experimentais dos trabalhos de STANG & JUN (1994) e também de JUN & STANG (1998) que avaliam os efeitos na propagação de trinca por fadiga na microestrutura do material, envolvendo: comprimento da fibra, diâmetro, módulo de elasticidade, volume adicionado e a resistência de aderência entre fibra-matriz, para fibras de aço e polipropileno com comprimento de 30 mm (aço) e 12 mm (polipropileno), sendo o teor adicionado de 1%. O estudo foi conduzido considerando: a propagação da trinca por fadiga da matriz de concreto, abordando esse comportamento com base na lei de Paris; a contribuição da ligação (ponte) da trinca proporcionada pelas fibras (crack bridging) na amplitude do fator de intensidade de tensão e examinada segundo a lei que relaciona essa ligação com a amplitude do fator de intensidade de tensão e a influência da degradação da aderência na interface fibra matriz quando a carga cíclica é aplicada.

LI & MATSUMOTO (1998) apresentam um modelo para simulação da propagação de trinca por fadiga comparando-o com resultados experimentais. Em sua análise aponta também que a degradação na interface da aderência fibra-matriz afeta diretamente a vida em fadiga dos CRFs e indica que essa degradação é uma propriedade fundamental do CRF e que sua determinação é de crucial importância para previsão da vida em fadiga.

RAMSAMOOJ (2002) estudou um modelo analítico de propagação de trinca por fadiga no concreto, tratando a questão desenvolvida especificamente para metais com quantidades pequenas de deformação plástica e tomando como referência a norma ASTM E 399, uma vez que não há norma específica sobre o assunto para o concreto.

Em sua reflexão RAMSAMOOJ (2002) aponta que, em geral, a propagação de trinca em matrizes de concreto ocorre contornando os agregados e com a ocorrência de microfissuras, podendo considerar essas microfissuras na região próxima à ponta da trinca como uma zona inelástica similar à zona plástica que ocorre nos metais. Após produzir um modelo analítico para tratar o assunto, RAMSAMOOJ (2002) verifica a aderência de seu modelo utilizando-se de vários resultados de estudos sobre fadiga em concretos.

O trabalho de LOU *et al.* (2006) consiste numa investigação de carácter experimental, que avalia o efeito na resistência à compressão na propagação de trinca por fadiga no concreto simples, utilizando resistências de 30, 35 e 40 MPa. Os ensaios de propagação de trinca por fadiga foram realizados em equipamento servo-hidráulico e monitorados por meio de clip-on-gauge instalado na “boca” do entalhe do corpo-de-prova. A propagação da trinca por fadiga foi conduzida com o auxílio do clip-on-gauge e o método de avaliação do comprimento da trinca foi o da flexibilidade (compliance), utilizando-se relação de tensões de 0,1 e 0,25.

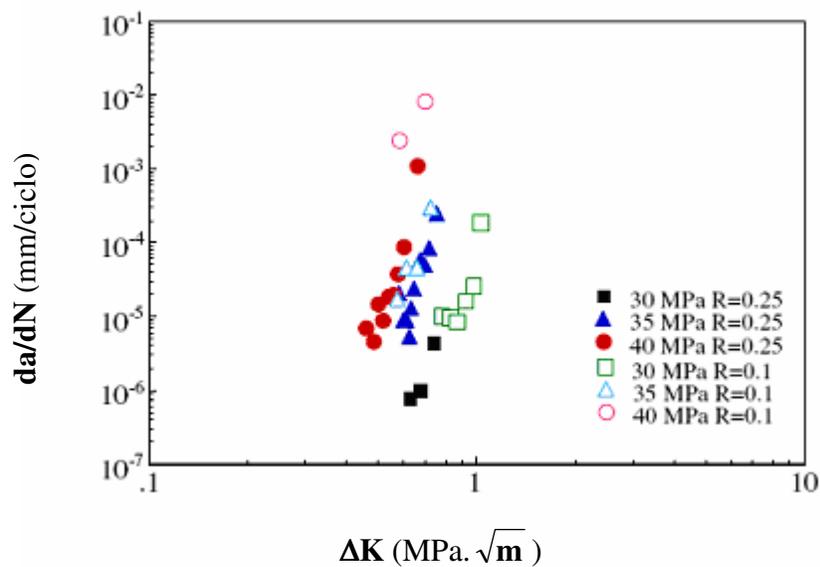


Figura 2.21 – Curva de propagação de trinca por fadiga, segundo LOU, *et al.* (2006)

No estudo da propagação de trinca por fadiga, a partir dos resultados obtidos conforme Figura 2.21, foi considerada a lei de Paris associada ao parâmetro $K_{máx}$, expresso pela equação

$$\frac{da}{dN} = A \cdot (\Delta K)^m \cdot (K_{máx})^n \quad (2.10)$$

obtendo-se os seguintes valores para cada um dos concretos, conforme a Tabela 2.2

Tabela 2.2 – Parâmetros da equação 2.11, segundo LOU *et al.* (2006)

CONCRETO	A	m	n	r ²
30	-7,48	5,18	1,36	0,97
35	-7,99	-0,60	3,09	0,84
40	6,3	27,7	-7,78	0,87

Como conclusão apresenta o autor que o aumento da resistência à compressão não implica necessariamente em incremento de resistência à propagação de trinca por fadiga. Aponta que isso ocorre pelo fato das zonas de ligações pasta-agregado serem degradadas durante o carregamento cíclico. Também aponta o estudo que a superfície de fratura apresenta fratura transgranular com baixa rugosidade na superfície, conforme se observa na Figura 2.22.

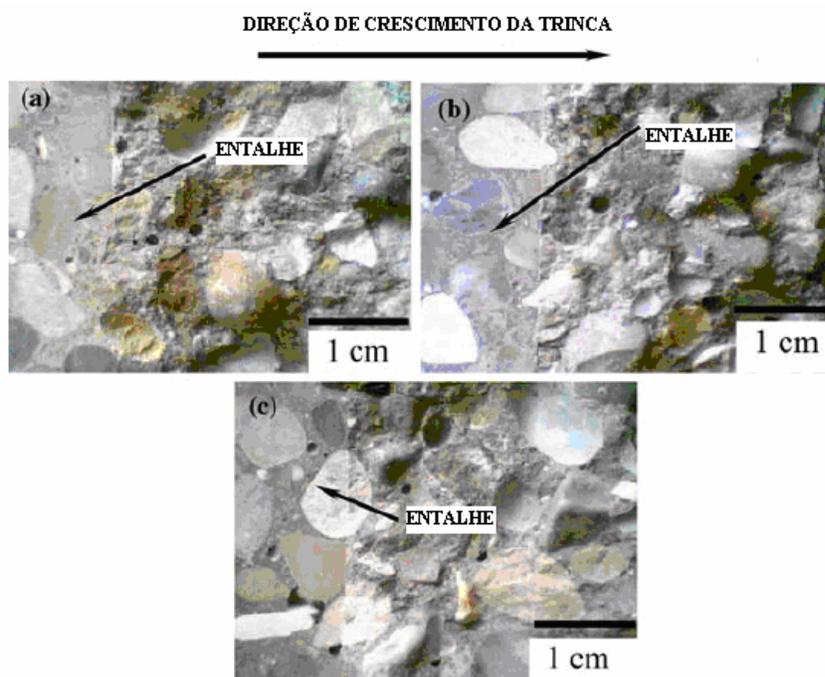


Figura 2.22 – Típica superfície de fratura dos concretos (a) 30 MPa, (b) 35 MPa e (c) 40 MPa, segundo LOU *et al.* (2006)

Particularmente sobre os estudos do comportamento à fadiga do CRFA, dentre as várias referências estudadas, a afirmação de MEHTA & MONTEIRO (1994) de que os concretos reforçados com fibras terão resistência à fadiga de cerca de 90% da resistência estática em 2×10^6 , mesmo para carregamentos sem reversão, só pode ser válida para altos teores em volume de fibras de aço. Outro aspecto não abordado na discussão diz respeito à frequência de aplicação de carga, fator esse que influencia de forma significativa no resultado.

O trabalho de NAGABHUSHANAM *et al.* (1989) trabalha somente com fibras de polipropileno fibriladas (multifilamentos), utilizando teores baixos e médios (0,1%, 0,5% e 1%) identificando a contribuição das fibras de polipropileno para a resistência à fadiga, quando comparada ao concreto simples, somente para os teores de 0,5% e 1%.

Nos trabalhos de JOHNSTON & ZEMP (1991), RAMAKRISHNAN *et al.* (1989) e RAMAKRISHNAN & LOKVIK (1992), que estudam baixos teores de fibras de aço, segundo seus autores entre 0,5% e 1,0% em volume, apesar disso apontam para a contribuição de vários tipos de fibras na *resistência à fadiga na flexão* dos CRFs.

Já no trabalho de NANNI (1991), há uma síntese comparativa entre as várias referências, procurando construir parâmetros para aplicação de informações da fadiga em projeto quando se utiliza o CRFA. O procedimento proposto é um primeiro passo na direção no estabelecimento de parâmetros para aplicação nos projetos de pavimentos.

O trabalho de NAAMAN & HAMMOUD (1998) divide o estudo em baixos teores de fibras de aço (entre 0,1% e 1,0% em volume) e altos teores de fibras de aço (de 1% a 2% em volume), trabalhando com corpos-de-prova com dimensões de 100 x 100 x 400 mm e variando frequência entre 1 Hz. e 5 Hz.

Como análise geral, um ponto levantado por CACHIM (2004), analisando várias referências também citadas em seu trabalho, é o apontamento que se faz do CRFA como um material que apresenta desempenho à fadiga como uma propriedade intrínseca do material.

Porém, esse acréscimo de vida em fadiga no CRFA em relação ao concreto simples depende do tipo e do teor de fibra utilizado, associado ao traço do concreto utilizado.

O trabalho de SHING (2006) estuda altos teores, 1%, 1,5% e 2%, e identifica que o melhor desempenho ocorre com o teor de 1%, apontando para certo teor ótimo para o melhor desempenho à fadiga do CRFA. Seu estudo contribuiu na análise das características da superfície de fratura, observando as fibras e o concreto.

O trabalho de LI & MATSUMOTO (1998) aborda de forma analítica o comportamento à propagação de trinca por fadiga, comparando seu modelo com resultados experimentais de outros autores. Em sua análise aponta também que a degradação na interface da aderência fibra-matriz afeta diretamente na vida em fadiga dos CRFs e indica que essa degradação é uma propriedade fundamental do CRF e que sua determinação é de crucial importância para previsão da vida em fadiga.

No trabalho de RAMSAMOOJ (2002) um ponto importante foi a utilização da norma ASTM E 399 como referência para estudo da propagação de trinca por fadiga no material concreto, uma vez que não há uma norma específica para tratamento do concreto.

No trabalho desenvolvido por LOU *et al.* (2006), a investigação de caráter experimental abordando o efeito na resistência à compressão na propagação de trinca por fadiga no concreto contribui no estabelecimento de parâmetros para aplicação da lei de Paris, considerando-a ainda associada ao parâmetro $K_{m\acute{a}x}$, adaptação essa específica para materiais cerâmicos.

A Tabela 2.3 apresenta uma síntese da revisão bibliográfica dos autores que abordaram por meio experimental ou teórico o assunto de fadiga nos CRFs, indicando os dados identificados em cada uma delas e apontando suas conclusões e efeitos no concreto simples, sem fibras, e no CRF, provocados pela ação de cargas cíclicas.

Tabela 2.3 – Resumo da revisão bibliográfica das abordagens sobre fadiga nos CRFs.

Autores	Tipos de fibras	Teor de fibras	Conclusões
METHA & MONTEIRO (1994)	Fibras de Aço	~2,0%	Resistência à fadiga entre 90% e 70% da resistência monotônica
BATSON et al (1972)	Fibras de Aço	2,0% e 3,0%	Resistência à fadiga de 74% p/ teor 3% e fibras com FF=77 e 83% p/ teor 2% e fibras com FF=89
NAGABHU-SHANAM et al. (1989)	Fibras de polipropileno	0,1% 0,5% 1%	Incremento de resistência à fadiga para os teores de 0,5% e 1%
JOHSTON & ZEMP (1991)	Fibras de Aço	0,5% a 1,5%	Resistência à fadiga entre 84% e 89% p/ fibra com FF=70 e entre 75% e 80% p/fibra com FF=50
RAMA-KRISHNAM et al (1989)	Aço-dobras nas extremidades Aço-reta Aço-ondulada	0,5% e 1,0%	Há crescimento no valor de <i>S</i> Maior eficiência da ancoragem na extremidade
RAMA-KRISHNAM & LOKVIK (1992)	Aço-dobras nas extremidades Aço-reta Aço-ondulada Polipropileno	0,5% e 1,0%	O valor da resistência à fadiga depende da ancoragem da fibra. Melhor desempenho das fibras com ganchos nas extremidades
NANNI (1991)	Fibra 1 Fibra 2 Fibra 3	0,46%	Resistência à fadiga de 70% para todos os tipos de fibras
WEI, et al (1996)		0,7% 1,0% 1,2% 1,5%	Há grande influência do teor de fibra de aço no valor da resistência à fadiga
NAAMAN & HAMMOUD (1998)	Fibras de aço trefiladas com dobras nas extremidades	Baixos teores (0,1% a 1,0%) Altos teores (1,0% a 2,0%)	Resistência à fadiga entre 68% e 65 %, assumindo 65% como referência para projeto. Aponta que há pouca influência do fator de forma (FF) da fibra
CACHIM (2004)	Fibras de aço trefiladas com ganchos nas extremidades	0,56%	O efeito da adição das fibras de aço na vida em fadiga é pequeno comparado ao concreto simples. Indica que as imperfeições na matriz causadas pelas fibras são de extrema importância para a vida em fadiga do CRFA.
SHINGH (2006)	Fibras de aço	1% 1,5% 2%	Desempenho melhor na resistência à fadiga do teor de 1%
LI & MATSUMOTO (1998)	Modelo Analítico		A degradação na interface da aderência fibra-matriz afeta diretamente a vida em fadiga dos CRFs. Essa degradação é uma propriedade fundamental do CRF e sua determinação é importante para previsão da vida em fadiga.
RAMSAMOOJ (2002)	Modelo Analítico		Validade do uso da norma ASTM E 399 para estudo da propagação de trinca no concreto. Consideração das microfissuras no concreto na região próxima à ponta da trinca como uma zona inelástica similar à zona plástica que ocorre nos metais
LOU, et al (2006)	Concreto Simples		Contribuição no estabelecimento de parâmetros para aplicação da lei de Paris, considerando-a associada ao parâmetro $K_{máx}$, adaptação essa específica para materiais cerâmicos, avaliando o efeito do aumento da resistência à compressão na propagação de trinca por fadiga

Capítulo 3

Materiais e Procedimentos Experimentais

Para o estudo da propagação de trinca por fadiga do concreto reforçado com baixos teores de fibras, optou-se pela realização de um estudo experimental contemplando ensaios de flexão em vigas. Como estratégia de trabalho, dividiu-se o estudo em duas etapas: na Etapa Inicial foram feitos alguns ensaios de propagação de trinca por fadiga visando melhorar a percepção dos procedimentos da ASTM E 647-05 bem como sua aplicabilidade para o concreto reforçado com fibras.

Na Etapa Inicial foram feitos ensaios de caracterização dos materiais componentes do concreto e também ensaios de compressão axial e de tração por flexão no CR. Com base nas observações feitas na Etapa Inicial foram feitas novas moldagens para a Etapa Final envolvendo novos ensaios de propagação de trinca por fadiga para avaliar o CR e os CRFs. Assim, na Etapa Final foram repetidos os ensaios de propagação de trinca por fadiga do CR e dos CRFs e também executados novas avaliações da resistência à compressão axial, à tração por flexão, à tração por compressão diametral e obtenção do módulo de elasticidade do CR .

Na seqüência são apresentados os materiais componentes do CR e dos CRFs e os procedimentos e equipamentos utilizados para o estudo, desenvolvidos no Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil/CEATEC da PUC Campinas e no Laboratório de Propriedades Mecânicas da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP.

3.1 Materiais

O concreto utilizado como referência e como matriz dos CRFs foi feito utilizando-se um cimento com alta resistência inicial (CPV-ARI), uma vez tratar-se de um cimento que apresenta menor variação de suas características pelo fato de não conter adição de escórias e apresentar um teor de clínquer elevado. A Tabela 3.1 apresenta as características físicas e químicas fornecidas pelo fabricante de cimento.

Tabela 3.1 - Características físicas e químicas do cimento

Ensaio Físicos			Ensaio Químicos		
Discriminação	Unidade	Média	Discriminação	Unidade	Média
Peneira 400	%	2,7	Perda ao Fogo 500°C	%	0,90
Blaine	m ² /kg	4599	SiO ₂	%	19,25
Início de pega	min	133	Al ₂ O ₃	%	5,18
Fim de pega	min	189	Fe ₂ O ₃	%	2,87
Resistência 3 dias	MPa	42,60	CaO	%	63,56
Resistência 7 dias	MPa	46,70	MgO	%	0,69
Resistência 28 dias	MPa	55,20	SO ₃	%	2,61
Massa específica aparente	kg/l	1,10	CO ₂	%	2,64
Massa específica absoluta	kg/l	3,10	K ₂ O	%	0,72
			Res. Insol.	%	0,44

Os agregados utilizados foram obtidos de empresa de serviços de concretagem da região de Campinas – SP, sendo utilizados areia fina, pedrisco e brita 1, conforme características físicas apresentadas nas Tabelas 3.2, 3.3 e 3.4 e nas Figuras 3.1, 3.2 e 3.3, dados esses ensaiados e fornecidos pela empresa de concretagem.

Tabela 3.2 – Características físicas da areia

AREIA FINA - AJAPI	
Módulo de Finura	1,88
Dimensão Máxima Característica	1,2 mm
Massa Específica	2,64 g/cm ³
Massa Unitária	1442 kg/m ³
Material Pulverulento	1,1 %
Torrões de Argila	0 %
Impurezas Orgânicas	< 300 ppm
Absorção	0 %

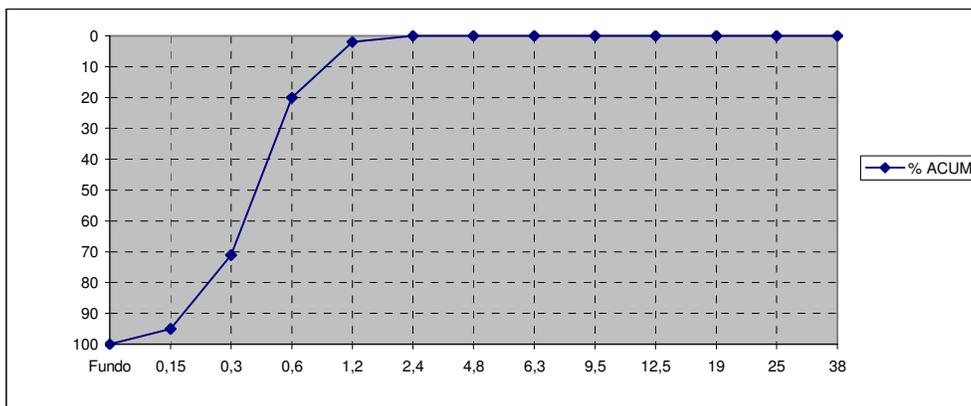


Figura 3.1 - Distribuição granulométrica da areia

Tabela 3.3 – Características físicas do pedrisco

PEDRISCO - KHOURI	
Módulo de Finura	3,96
Dimensão Máxima Característica	9,5 mm
Massa Específica	2,74 g/cm ³
Massa Unitária	1546 kg/m ³
Material Pulverulento	9,6 %
Torrões de Argila	0 %
Impurezas Orgânicas	0 ppm
Absorção	0 %

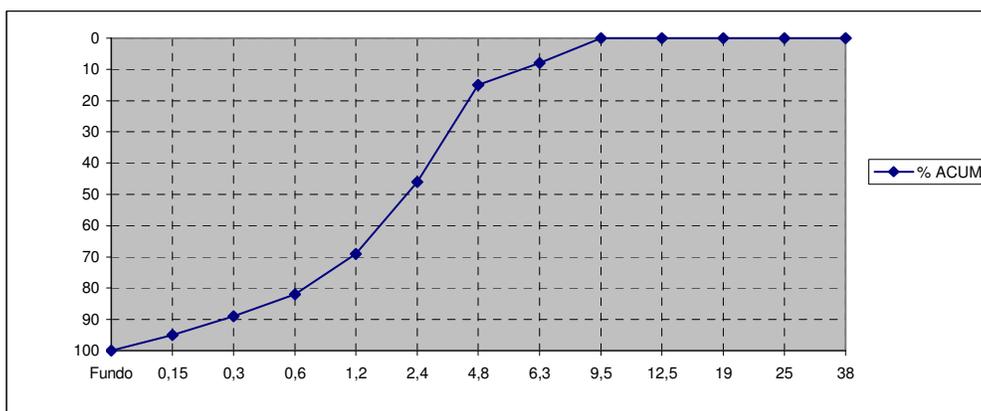


Figura 3.2 - Distribuição granulométrica do pedrisco

Tabela 3.4 - Características físicas da brita 1

BRITA - GALVANI	
Módulo de Finura	6,64
Dimensão Máxima Característica	19 mm
Massa Específica	3,02 g/cm ³
Massa Unitária	1616 kg/m ³
Material Pulverulento	1,9 %
Torrões de Argila	0 %
Impurezas Orgânicas	0 ppm
Absorção	0,8 %

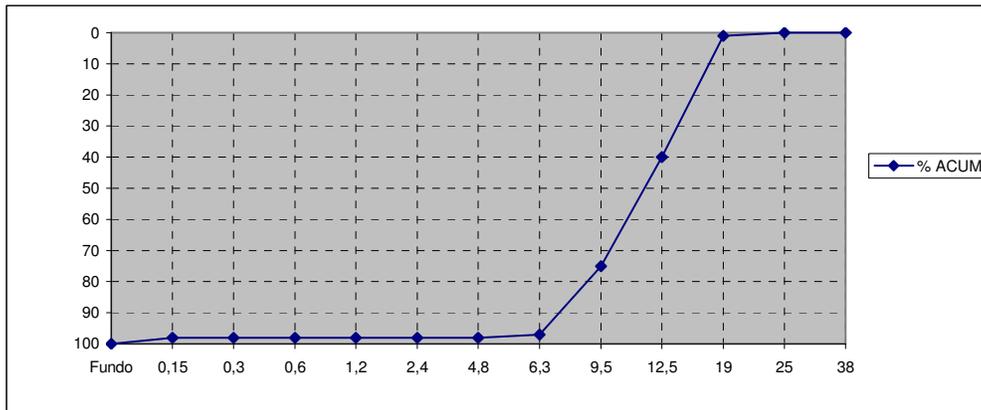


Figura 3.3 - Distribuição granulométrica da brita 1

As fibras utilizadas foram as poliméricas sintéticas (polipropileno) e metálicas (aço), com aspectos diferentes não só do ponto de vista do material, como também de sua forma e sistemas de ancoragem. As fibras de polipropileno utilizadas neste trabalho são consideradas como macrofibras e constituídas de monofilamentos em feixe trançado (twist), conforme se observa nas Figuras 3.4 e 3.5.



Figura 3.4 – Fibra 1 (polipropileno)
Comprimento 54 mm



Figura 3.5 – Fibra 2 (polipropileno)
Comprimento 38 mm

As fibras de aço utilizadas são as de fios trefilados e apresentam seções transversais circulares com ancoragem nas extremidades, conforme se observa nas Figuras 3.6, 3.7 e 3.8.



Figura 3.6 – Fibra 3 (aço)
Comprimento 60 mm

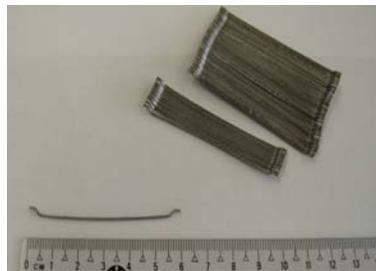


Figura 3.7 – Fibra 4 (aço)
Comprimento 60 mm



Figura 3.8 – Fibra 5 (aço)
Comprimento 35 mm

As características de todas as fibras utilizadas neste trabalho são apresentadas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Características das fibras utilizadas

FIBRAS	MATERIAL	COMPRI- MENTO (mm)	DIÂMETRO (mm)	FATOR DE FORMA	MÓD. ELAST. (GPa)	RESIST. TRAÇÃO MPa	QUANTIDA DE DE FIBRAS/kg
F1	polipropileno	54	0,34*	158	5	620 - 758	221000
F2	polipropileno	38	0,34*	111	5	620 - 758	314770
F3	aço-carbono	60	0,75	80	210	1050	4600
F4	aço-carbono	60	0,90	65	210	1000	3200
F5	aço-carbono	35	0,55	65	210	1100	14500

* diâmetro equivalente

3.1.1 Concreto de Referência

O Concreto de Referência (CR) é um concreto simples de resistência convencional, sem adição de fibras, definido a partir da avaliação do comportamento mecânico do concreto em seu estado endurecido, por meio de ensaios mecânicos usuais de compressão axial e de flexão.

O CR teve estabelecido como resistência à tração por flexão o valor de 4,5 MPa (valor médio). Para obtenção da resistência à tração por flexão na faixa desejada considerou-se a relação água/cimento de 0,55 no traço em massa 1:2,14:0,72:3,35. A Tabela 3.6 mostra os materiais, suas características e as quantidades a serem utilizadas na composição do traço. Os materiais apresentados são os utilizados na região de Campinas - SP.

Tabela 3.6 - Materiais, características e quantidades do traço do Concreto de Referência

MATERIAL	CARACTERÍSTICAS	FORNECEDOR	QUANTIDADES (kg/m ³)
Cimento	Alta Resistência Inicial	CP V ARI	320
Areia	Quartzo	Ajapi	686
Pedrisco	Calcáreo	Khoury	230
Brita 1	Basalto	Galvani	1073
Água			176
Aditivo	polifuncional	GRACE/MIRA	2,85

3.1.2 Compósitos de concreto reforçado com fibras

Nos compósitos de Concreto Reforçados com Fibras (CRF) foram utilizados três teores de fibras assim distribuídos: o teor de 0,50% como o teor limite superior da faixa considerada como “*baixo teor de fibra*”; o teor de 0,25% como o teor limite inferior da faixa considerada como “*baixo teor de fibra*” e um teor de 0,38%, valor intermediário entre esses dois limites. O valor de 0,25%, utilizado como limite inferior, foi assumido como sendo o mínimo que possibilita reforço ao concreto. A Tabela 3.7 apresenta os teores e dosagens utilizadas nos compósitos.

Tabela 3.7 - Teores e dosagens de fibras nos CRFs

COMPÓSITOS	FIBRAS - TEORES (%) / DOSAGENS (kg/m ³)		
CRF1	0,25/2,25	0,38/3,5	0,50/4,5
CRF2	0,25/2,25	0,38/3,5	0,50/4,5
CRF3	0,25/20	0,38/30	0,50/40
CRF4	0,25/20	0,38/30	0,50/40
CRF5	0,25/20	0,38/30	0,50/40

3.2 Moldagem e cura dos corpos-de-prova

Para o CR foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos de Ø 150 mm x 300 mm para ensaios de resistência à compressão axial (6 corpos-de-prova), módulo de elasticidade (6 corpos-de-prova), resistência à tração por compressão diametral (6 corpos-de-prova) e foram utilizados corpos-de-prova prismáticos de 150 mm x 150 mm x 500 mm sem entalhe, para os ensaios de resistência à tração por flexão (4 corpos de prova), todos executados conforme a NBR 5797:1994. Também foram utilizados corpos-de-prova prismáticos de 150 mm x 150 mm x 500 mm com entalhe para os ensaios de propagação de trinca por fadiga (3 corpos-de-prova para obtenção de resistência de ruptura e 3 corpos-de-prova para ensaios de propagação de trinca por fadiga) e para os ensaios de carga monotônica – CMOD (6 corpos-de-prova). Todos esses corpos-de-prova foram executados conforme UNI 11039-1:2003.

Para os CRFs foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos de Ø 150 mm x 300 mm para ensaios de resistência à compressão axial (4 corpos-de-prova), módulo de elasticidade (2 corpos-de-prova), resistência à tração por compressão diametral (2 corpos-de-prova), todos executados conforme a NBR 5797:1994. Também foram utilizados corpos-de-prova prismáticos de 150 mm x 150 mm x 500 mm com entalhe para os ensaios de propagação de trinca por fadiga (3 corpos-de-prova para obtenção de resistência de ruptura e 3 corpos-de-prova para ensaios de propagação de trinca por fadiga) e para os ensaios de carga monotônica – CMOD (6 corpos-de-prova). Todos esses corpos-de-prova foram executados conforme UNI 11039-1:2003.

As Tabelas 3.8, 3.9 e 3.10 mostram as quantidades de corpos-de-prova de cada etapa, moldados para cada tipo de concreto, envolvendo o CR e os CRFs. Os corpos-de-prova prismáticos com entalhe foram moldados em formas prismáticas usuais de 150 mm x 150 mm x 500 mm, adaptando-se dispositivo para criação de entalhe, conforme se observa nas Figuras 3.9 e 3.10. O entalhe tem como finalidade a indução da pré-trinca por fadiga, para posteriormente proceder ao ensaio de propagação de trinca por fadiga, bem como a obtenção do CMOD no ensaio de carga monotônica.

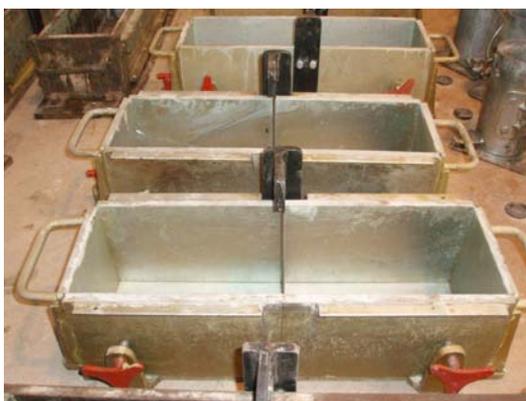


Figura 3.9 – Forma com dispositivo removível para caracterização do entalhe (vista frontal)



Figura 3.10 – Detalhe do dispositivo removível para caracterização do entalhe (vista lateral)

Tabela 3.8 - Corpos-de-prova moldados para ensaios de propagação de trinca por fadiga, compressão axial e tração por flexão – Etapa Inicial

COMPÓSITO	TOTAL DE CPs		FIBRAS - TEORES (%) / DOSAGENS (kg/m ³)					
	CR	CRF	0,25/2,25	0,25/20	0,38/3,5	0,38/30	0,50/4,5	0,50/40
CR Ø 150 x 300 150 x 150 x 500 (com entalhe)	4 2							
CRF1 Ø 150 x 300 150 x 150 x 500 (com entalhe)		6 6	2 2		2 2		2 2	
CRF2 Ø 150 x 300 150 x 150 x 500 (com entalhe)		6 6	2 2		2 2		2 2	
CRF3 Ø 150 x 300 150 x 150 x 500 (com entalhe)		6 6		2 2		2 2		2 2
CRF4 Ø 150 x 300 150 x 150 x 500 (com entalhe)		6 6		2 2		2 2		2 2
CRF5 Ø 150 x 300 150 x 150 x 500 (com entalhe)		6 6		2 2		2 2		2 2

Tabela 3.9 - Corpos-de-prova moldados para ensaios de propagação de trinca por fadiga, compressão axial, tração por flexão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade – Etapa Final

COMPÓSITO	TOTAL DE CPs		FIBRAS - TEORES (%) / DOSAGENS (kg/m ³)					
	CR	CRF	0,25/2,25	0,25/20	0,38/3,5	0,38/30	0,50/4,5	0,50/40
CR Ø 150 x 300 150 x 150 x 500 (sem entalhe)	18 4							
150 x 150 x 500 (com entalhe)	6							
CRF1 Ø 150 x 300		24	8		8		8	
150 x 150 x 500 (com entalhe)		18	6		6		6	
CRF2 Ø 150 x 300		24	8		8		8	
150 x 150 x 500 (com entalhe)		18	6		6		6	
CRF3 Ø 150 x 300		24	8		8		8	
150 x 150 x 500 (com entalhe)		18	6		6		6	
CRF4 Ø 150 x 300		24	8		8		8	
150 x 150 x 500 (com entalhe)		18	6		6		6	
CRF5 Ø 150 x 300		24	8		8		8	
150 x 150 x 500 (com entalhe)		18	6		6		6	

Tabela 3.10 - Corpos-de-prova moldados para ensaios de carga monotônica - CMOD – Etapa Final

COMPÓSITO	TOTAL DE CPs		FIBRAS - TEORES (%) / DOSAGENS (kg/m ³)					
	CR	CRF	0,25/2,25	0,25/20	0,38/3,5	0,38/30	0,50/4,5	0,50/40
CR 150 x 150 x 500 (com entalhe)	6							
CRF1 150 x 150 x 500 (com entalhe)		18	6		6		6	
CRF2 150 x 150 x 500 (com entalhe)		18	6		6		6	
CRF3 150 x 150 x 500 (com entalhe)		18	6		6		6	
CRF4 150 x 150 x 500 (com entalhe)		18	6		6		6	
CRF5 150 x 150 x 500 (com entalhe)		18	6		6		6	

Na elaboração dos concretos reforçados com fibras teve-se o cuidado com a homogeneização da mistura respeitando-se a ordem de colocação dos materiais no misturador, bem como cuidando para que o tempo de mistura feita pelo equipamento (betoneira) fosse suficiente para garantir a adequada homogeneização. Nas Figuras 3.11, 3.12, 3.13, 3.14, 3.15 e 3.16, são apresentados os materiais e sua sequência de colocação no equipamento para os CRFs com fibras sintéticas cujas fibras são adicionadas no final da mistura. No caso dos CRFs com fibras metálicas as fibras são adicionadas após a colocação da brita 1, uma vez que elas necessitam de ação mecânica dos agregados para primeiramente “quebrar” os pentes colados e, posteriormente, com a ação da água, dissolver a cola de ligação entre elas, visando melhor homogeneização da mistura.

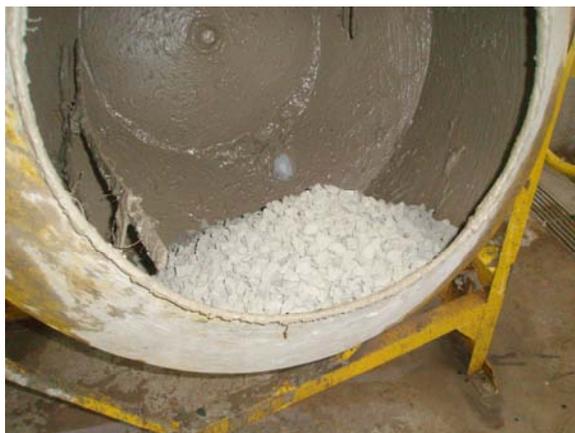


Figura 3.11 – Colocação da brita 1



Figura 3.12 – Colocação do pedrisco



Figura 3.13 – Colocação do cimento



Figura 3.14 – Colocação da água e do fluidificante



Figura 3.15 – Colocação das fibras sintéticas



Figura 3.16 – Mistura pronta

Ao final da mistura, os corpos-de-prova prismáticos e cilíndricos foram moldados, respeitando-se os procedimentos para moldagem do material nas formas. Durante a moldagem, tanto os corpos-de-prova prismáticos como cilíndricos foram adensados por meio de mesa vibratória, permitindo dessa forma a distribuição do concreto na fôrma, evitando-se ocasionar orientação das fibras que ocorre quando há imersão nas fôrmas de equipamentos de adensamento manuais, conforme se observa nas Figuras 3.17, 3.18 e 3.19.



Figura 3.17 – Colocação do concreto na forma prismática



Figura 3.18 – Acabamento superficial da forma prismática



Figura 3.19 – Corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos moldados

Após a moldagem, para proceder à retirada do dispositivo que caracteriza o entalhe no corpo-de-prova, deixou-se iniciar a pega do cimento. Esse tempo, para o cimento utilizado, ocorre num intervalo de 2 a 3 horas após a moldagem dos corpos-de-prova, procedimento esse feito uma vez que após o endurecimento do concreto a operação para retirar os entalhes é dificultada e danifica o corpo-de-prova. Nas Figuras 3.20 e 3.21 é mostrado o procedimento para retirada do entalhe e o corpo-de-prova sem o dispositivo, caracterizando o entalhe. Após esse procedimento, o corpo-de-prova moldado é deixado em temperatura ambiente por 24 horas e posteriormente desmoldado e iniciando-se o processo de cura.



(a)



(b)

Figura 3.20 - Retirada do entalhe



Figura 3.21 – Entalhe caracterizado no corpo-de-prova

Para adequada avaliação do potencial que o material pode apresentar em seus ensaios mecânicos, deve-se fazer a cura dos corpos-de-prova, garantindo assim que todo o processo de endurecimento ocorra de forma adequada. Assim, o processo de cura utilizado foi o convencional, alojando-se os corpos-de-prova em tanque de imersão com água na temperatura constante de 20° C, deixando-os por um período de 28 dias. A Figura 3.22 mostra o tanque de água utilizado para acondicionamento dos corpos-de-prova em cura.



Figura 3.22 – Tanque de imersão para cura dos corpos-de-prova

3.3 Preparação dos corpos-de-prova para os ensaios

Os corpos-de-prova foram adequadamente preparados para realização dos ensaios mecânicos. Assim, nos os ensaios para obtenção da resistência à compressão axial e do módulo de elasticidade que utilizam os corpos-de-prova cilíndricos de \varnothing 150 mm x 300 mm, estes tiveram a “cabeça” fresada, tornando-a plana, visando melhorar o contato com o prato do equipamento de ensaio. A Figura 3.23 mostra a atividade de fresagem de um corpo-de-prova cilíndrico e a Figura 3.24 mostra o corpo-de-prova cilíndrico após a fresagem.



Figura 3.23 – Fresagem do corpo-de-prova cilíndrico



Figura 3.24 – Corpo-de-prova cilíndrico fresado

Para os ensaios de tração por flexão utilizando os corpos-de-prova prismáticos e para os ensaios de tração por compressão diametral utilizando corpos-de-prova cilíndricos, não houve necessidade de nenhuma preparação prévia, além da limpeza externa dos mesmos e da retirada de “rebarbas” na superfície. No entanto, para os ensaios de propagação de trinca por fadiga e carga monotônica - CMOD, visando minimizar que fragmentos do concreto danificassem o equipamento, procederam-se primeiramente a limpeza externa dos corpos-de-prova. Foram retiradas as “rebarbas” das superfícies dos corpos-de-prova, limpeza interna do entalhe, embalando-se posteriormente o corpo-de-prova com filme plástico, conforme mostra a Figura 3.25.



Figura 3.25 – Embalagem do corpo-de-prova com filme plástico

Posteriormente à embalagem, procedeu-se a colocação de dispositivo para posicionamento do “clip-on-gauge”, instrumento necessário para medir a abertura da boca da trinca na avaliação da propagação da trinca por fadiga, bem como na avaliação do CMOD no ensaio de carga monotônica - CMOD. A Figura 3.26 mostra o procedimento de fixação do dispositivo.

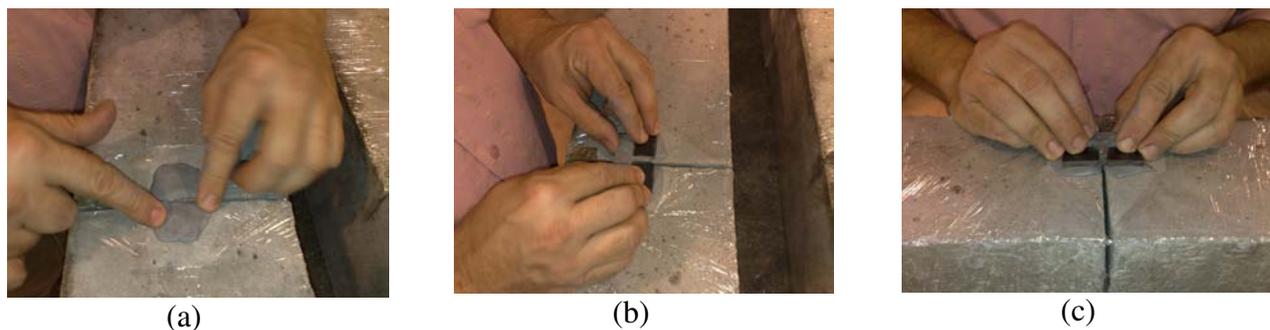


Figura 3.26 – Procedimento para fixação do dispositivo de ensaio no corpo-de-prova. (a) colocação da cola; (b) colocação do dispositivo; (c) ajuste do dispositivo

3.4 Ensaios

Os ensaios de resistência à compressão axial, módulo de elasticidade, resistência à tração por flexão e resistência à tração por compressão diametral foram feitos no Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil/CEATEC na PUC Campinas. Os ensaios de propagação de trinca por fadiga e carga monotônica – CMOD foram feitos no Laboratório de Propriedades Mecânicas da Faculdade de Engenharia Mecânica na UNICAMP.

3.4.1 Avaliação da resistência à compressão axial

Para avaliação da resistência à compressão axial do CR e do CRF foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos de $\varnothing 150$ mm x 300 mm, ensaiados conforme a NBR 5739:1994 e mostrado na Figura 3.27.



Figura 3.27 – Ensaio de compressão axial

3.4.2 Avaliação do módulo de elasticidade

Para avaliação do módulo de elasticidade do CR e do CRF foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos de \varnothing 150 mm x 300 mm, sendo o módulo de elasticidade obtido a partir de ensaio de compressão axial, conforme a NBR 8522:2008 e mostrado na Figura 3.28.



Figura 3.28 – Ensaio de compressão para obtenção do módulo de elasticidade

3.4.3 Avaliação da resistência à tração por flexão

Para avaliação da resistência à tração por flexão foram utilizados corpos-de-prova prismáticos de 150 mm x 150 mm x 500 mm (vão de 450 mm) sem entalhe, ensaiados conforme a NBR 12142:1991 e mostrado na Figura 3.29.

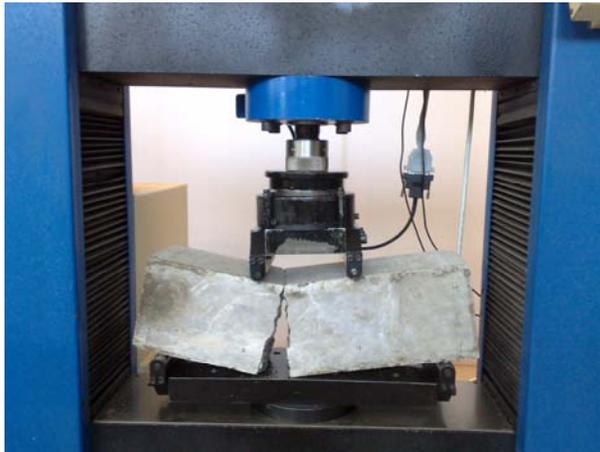


Figura 3.29 – Ensaio de flexão para obtenção da resistência à tração

3.4.4 Avaliação da resistência à tração por compressão diametral

Para avaliação da resistência à tração por compressão diametral do CR e do CRF, foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos de $\varnothing 150 \times 300$ mm ensaiados conforme a NBR 7222:1994, conforme mostra a Figura 3.30.



Figura 3.30 – Ensaio de compressão diametral para obtenção da resistência à tração

3.4.5 Avaliação da propagação de trinca por fadiga

Os ensaios de propagação de trinca por fadiga, em uma máquina servo-hidráulica marca MTS, modelo 810, com controle Test Star II; célula de carga MTS, modelo 661.21B-03, com capacidade de 10000 N; extensômetro tipo “clip-on-gauge” MTS modelo 632.02C-20, com comprimento inicial de 5 mm, abertura de 3 mm. A Figura 3.31 mostra o equipamento utilizado.



Figura 3.31 – Foto do equipamento MTS

O estudo da propagação de trincas por fadiga teve como meta a obtenção da relação entre a taxa de propagação da trinca (da/dN) em função da variação do fator de intensidade de tensão (ΔK). Essa relação foi obtida por meio de ensaios de propagação de trincas por fadiga em corpos-de-prova prismáticos de 150 mm x 150 mm x 500 mm (vão de 450 mm) com entalhe, elaborados conforme a norma UNI 11039-1:2003. O ensaio realizado foi o de flexão com três pontos de carga, conforme mostra a Figura 3.32, seguindo o recomendado pela norma ASTM E 647-05.

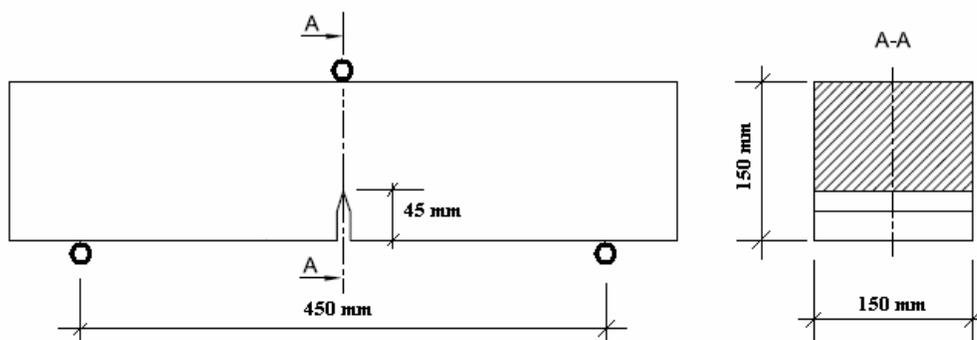


Figura 3.32 – Corpo-de-prova prismático com entalhe, com três pontos de carga

Em que pese a norma ASTM E 647-05 ter sua origem nos materiais metálicos, esta cita em seu escopo que os materiais que podem ser testados pelo método não são limitados pela espessura do corpo-de-prova tipo ou resistência do material, e sim deve-se garantir que os corpos-de-prova tenham geometria suficiente para fletir e se comportarem elasticamente durante o ensaio. A partir dessa possibilidade, a aplicação da norma citada se fez possível para este estudo.

O ensaio de propagação de trinca é dividido em duas etapas: nucleação de pré-trinca de fadiga e propagação de trinca por fadiga. Inicialmente foram nucleadas pré-trincas de fadiga, tendo como referência de controle o valor de $K_{m\acute{a}x}$, a partir da informação da resistência à ruptura e do módulo de elasticidade do material, obtidos por ensaios prévios com carga monotônica para cada CRF/teor, conforme abordado no item 3.4.2. A nucleação da pré-trinca de fadiga foi feita com carga cíclica, razão de carga de 0,1 e frequência de 20 Hz. Como parâmetro geométrico foi informado o comprimento da pré-trinca para que, a partir no método da flexibilidade (compliance), se caracterizasse a nucleação da trinca efetivada quando atingisse o valor especificado. O comprimento utilizado da pré-trinca foi de 80 mm, valor esse definido a partir das observações feitas na Etapa Inicial dos ensaios.

Ao atingir a pré-trinca, a primeira etapa do ensaio era concluída, iniciando-se então a segunda etapa do ensaio: a propagação de trinca por fadiga. Dessa forma, o valor de ΔK_{final} de cada corpo-de-prova, obtido no ensaio de pré-trinca por fadiga, foi utilizado como referência para o início do ensaio de propagação de trinca por fadiga. O ensaio de propagação de trinca por

fadiga foi conduzido, dentro do possível, até a ruptura do corpo-de-prova, de tal forma que o ensaio se situasse dentro da região II da curva de propagação (validade da lei de Paris), contemplando também a região III, que foi possível para algumas situações, uma vez que a fragilidade do material nem sempre permitiu a caracterização dessa região na curva de propagação.

As Figuras 3.33 e 3.34 mostram o equipamento realizando o ensaio de propagação de trinca por fadiga.



Figura 3.33 – Pré-trinca no corpo-de-prova



Figura 3.34 – Crescimento da trinca no corpo-de-prova

Os dados obtidos dos ensaios foram registrados em uma tabela no próprio software do equipamento, a certa taxa de amostragem. Os dados contemplam os valores de ciclos (N) e os valores de $K_{\text{mín}}$, $K_{\text{máx}}$, $P_{\text{mín}}$, $P_{\text{máx}}$, os valores das aberturas máximas e mínimas da abertura da “boca” da trinca (CMOD), bem como os valores de comprimento da trinca e os valores de da/dN , para cada valor de N que registrasse um crescimento significativo da trinca. A partir desses dados, foram traçadas curvas de propagação de trinca $da/dN - \Delta K$, sendo a curva ajustada considerando-se neste trabalho o polinomial de sete pontos. Todas essas curvas foram obtidas por meio do software Origin 7.0.

A medição do tamanho da trinca é possível utilizando-se observação visual ou por um método equivalente (flexibilidade, diferença de potencial, etc), em função do número de ciclos de fadiga, sendo esses dados analisados numericamente para obtenção da taxa de crescimento da trinca (da/dN), expressa em função da amplitude de tensão (ΔK), calculando com base nas tensões obtidas pela mecânica da fratura elástica linear.

Este trabalho utilizou, para a determinação do tamanho da trinca, o método da flexibilidade (compliance), que é o inverso da rigidez. Em termos gerais, a equação polinomial que correlaciona a flexibilidade com o tamanho da trinca é dada por:

$$a/w = f(C,E,B) \quad (3.1)$$

na qual:

a é o comprimento da trinca;

w é a largura do corpo-de-prova;

C é a flexibilidade ($\Delta C_{MOD}/\Delta C_{Carga}$);

E é o módulo de elasticidade do material;

B é a espessura do corpo-de-prova.

A obtenção do valor de da/dN é conseguido pelo método da diferenciação secante, aplicando-se:

$$\frac{da}{dN} = \frac{a_{i+1} - a_i}{N_{i+1} - N_i} \quad (3.2)$$

Essa informação é obtida quando a propagação da trinca ocorre em quantidade significativa, conforme esquematicamente se observa na Figura 3.35.

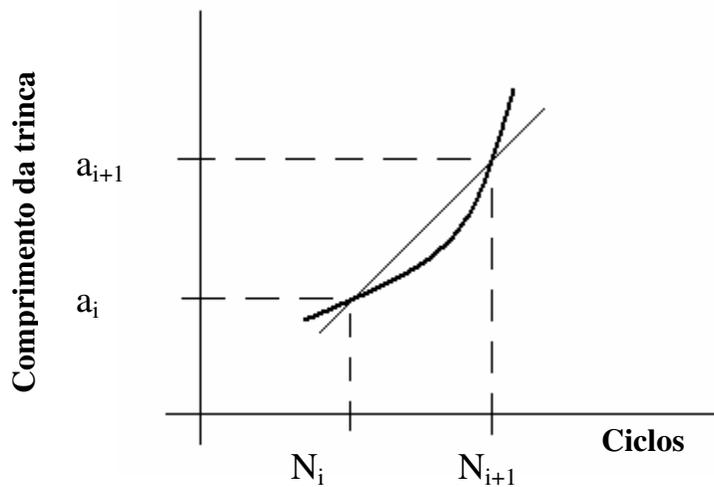


Figura 3.35 – Gráfico esquemático do método da diferenciação secante

A obtenção do valor de ΔK é dada por:

$$\Delta K = K_{\text{máx}} - K_{\text{mín}} \quad (3.3)$$

Como a razão de carga é dada por:

$$R = \frac{P_{\text{mín}}}{P_{\text{máx}}} = \frac{K_{\text{mín}}}{K_{\text{máx}}} \quad (3.4)$$

Tem-se:

$$K_{\text{mín}} = R \cdot K_{\text{máx}} \quad (3.5)$$

Então:

$$\Delta K = K_{\text{máx}} \cdot (1 - R) \quad (3.6)$$

3.4.6 Avaliação do comportamento carga monotônica - CMOD

Os ensaios para avaliação do comportamento carga monotônica – CMOD foram realizados no mesmo equipamento MTS mostrado na Figura 3.1.

O estudo do comportamento carga monotônica – CMOD foi realizado em corpos-de-prova prismáticos de 150 mm x 150 mm x 500 mm (vão de 450 mm) com entalhe, elaborados também conforme a norma UNI 11039-1:2003, com quatro pontos de carga e ensaiados à flexão, conforme mostra a Figura 3.36. A mensuração do CMOD foi feita por meio de “clip-on-gauge”, instalado na parte inferior do corpo-de-prova, conforme mostra a Figura 3.37 e o ensaio conforme mostra a Figura 3.38.

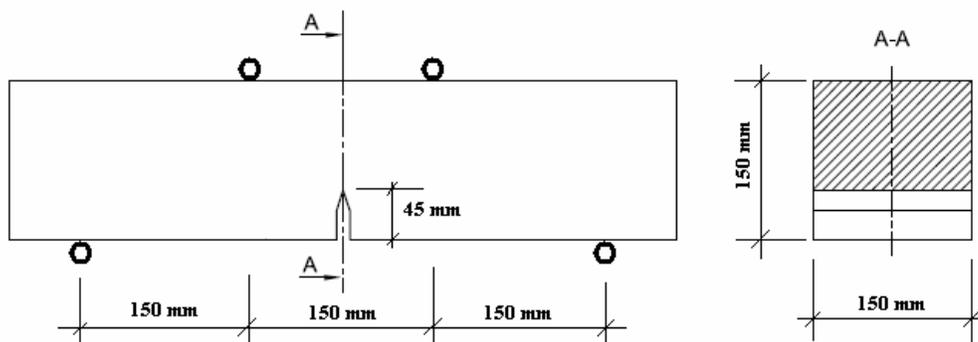


Figura 3.36 – Corpo-de-prova prismático com entalhe, com quatro pontos de carga



Figura 3.37 – “Clip-on-gauge” colocado na face inferior do corpo-de-prova



Figura 3.38 – Ensaio carga monotônica - CMOD

Capítulo 4

Resultados e Discussões

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos no estudo experimental, descritos no capítulo anterior. A discussão será feita a partir da avaliação do comportamento à propagação de trinca por fadiga do CR e dos CRFs, considerando-se também o comportamento carga monotônica – CMOD e a avaliação macroscópica da seção de fratura.

4.1 Concreto de Referência

Para o CR de resistência convencional, sem a adição de fibras, teve-se como meta a obtenção de resistência à tração por flexão de 4,5 MPa (valor médio), sendo esse valor utilizado em grande parte das aplicações estruturais. A resistência à compressão axial é complementar e importante para se observar o comportamento do material quando solicitado à compressão, uma vez ser uma medida obtida de forma direta em ensaio de compressão axial, assim como o módulo de elasticidade e também a resistência à tração por compressão diametral são complementares e obtidos de forma indireta nos ensaios.

Segundo a ABNT NBR 6118 (2003), essas resistências apresentam relação entre elas, sendo que a relação entre a resistência à tração por flexão e a resistência à compressão axial gira em torno de 0,10, e a relação entre a resistência à tração por flexão e a resistência à tração por compressão diametral em torno de 1,30 e, segundo META & MONTEIRO (2004), a relação entre a resistência à tração por compressão e a resistência à compressão axial está entre 0,07 e 0,08.

Assim, observa-se nas Tabela 4.1, 4.2 e 4.3 que as resistências, obtidas à idade de 28 dias, mostram consistência entre elas, a partir dessas referências.

Tabela 4.1 - Resistência à tração por flexão do CR

CP 150 mm x 150 mm x 500 mm					
Corpo-de-prova	CARGA (N)	fct (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coef. de Variação (%)
01	34881	4,65			
02	32473	4,33			
03	31294	4,17	4,52	0,33	7,31
04	36810	4,91			

Tabela 4.2 - Resistência à compressão axial do CR

CP 150 x 300 mm					
Corpo-de-prova	CARGA (N)	fcc (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coef. de Variação (%)
01	796245	47,89			
02	763487	45,29			
03	810701	46,19	44,93	2,10	4,67
04	795655	44,43			
05	778717	44,07			
06	736624	41,69			

Tabela 4.3 - Resistência à tração por compressão diametral do CR

CP 150 x 300 mm					
Corpo-de-prova	CARGA (N)	fct (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coef. de Variação (%)
01	252196	3,57			
02	256262	3,63			
03	241486	3,42	3,49	0,20	5,61
04	264989	3,75			
05	235138	3,33			
06	227998	3,23			

O módulo de elasticidade do material foi obtido a partir da norma ABNT NBR 8522/2008, sendo os valores expressos como módulo de elasticidade tangente inicial à 30% da resistência à compressão axial (E_{ci}). A Tabela 4.4 apresenta os resultados obtidos à idade de 28 dias para o CR.

Tabela 4.4 – Módulo de elasticidade do CR

CP 150 x 300 mm				
Corpo-de-prova	E_{ci} (GPa)	Média (GPa)	Desvio padrão (GPa)	Coef. de Variação (%)
01	42,15			
02	35,44			
03	33,94	38,39	3,92	10,20
04	35,43			
05	43,01			
06	40,36			

4.1.1 Estudo do comportamento do CR à propagação de trinca por fadiga

No estudo do comportamento do CR à propagação de trinca por fadiga, os resultados obtidos à idade de 28 dias estão apresentados na Figura 4.1, onde se observam as curvas dos três corpos-de-prova ensaiados, indicando uniformidade nos resultados obtidos quanto ao comportamento à propagação de trinca por fadiga do concreto simples, sem adição de fibras. As curvas se situam num intervalo de valores de ΔK entre $0,8 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ e $1,5 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ e o valor de da/dN entre 10^{-4} mm/ciclo e $3,5 \times 10^{-2} \text{ mm/ciclo}$.

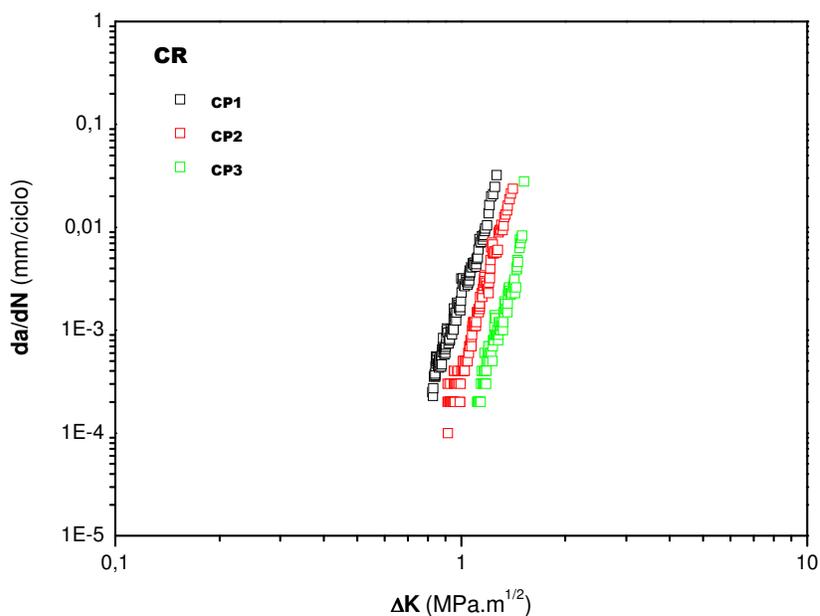


Figura 4.1 – Curvas de propagação de trinca por fadiga em função de ΔK do CR

Pode-se observar, por meio da Figura 4.2, o comportamento à propagação de trinca do concreto simples sem fibras, deste trabalho, comparado com outros materiais metálicos e cerâmicos.

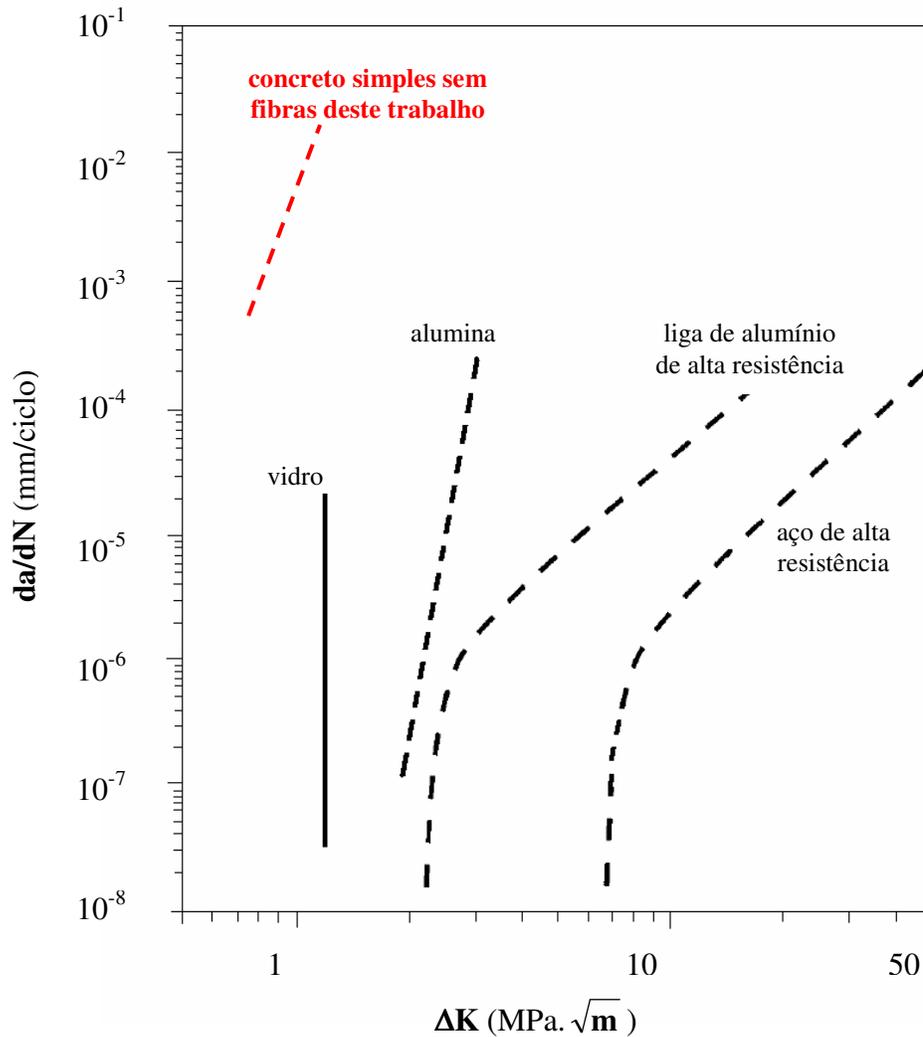


Figura 4.2 – Curvas de propagação de trinca por fadiga em função de ΔK de materiais metálicos e materiais cerâmicos, adaptado de RITCHIE (1999)

Pode-se ainda comparar os gráficos de propagação de trinca por fadiga obtidos neste trabalho com os gráficos de propagação de trinca obtidos por LOU *et al.* (2006), que avaliou a influência da resistência à compressão na propagação de trinca por fadiga no concreto, utilizando

resistências de 30, 35 e 40 MPa. Em que pese seu trabalho utilizar resistência somente até 40 MPa, valor esse inferior ao utilizado neste trabalho (~ 45 MPa), bem como materiais diferentes, é possível compará-los. Utilizando-se as curvas de propagação de trinca por fadiga dos três corpos-de-prova ensaiados e comparando com os gráficos obtidos conforme a Figura 2.21, observa-se que o gráfico $da/dN - \Delta K$ deste trabalho apresenta proximidade com o obtido no estudo de LOU *et al.* (2006) para o concreto de 40 MPa e razão de carga (R) igual a 0,1, conforme se observa na Figura 4.3, em que pese a pouca quantidade de pontos indicados no gráfico de LOU *et al.* (2006). Assim, mesmo havendo a necessidade de aprofundamento dessa análise, é possível considerar que os resultados podem ser comparáveis entre si, criando condições para outras análises que serão feitas na seqüência.

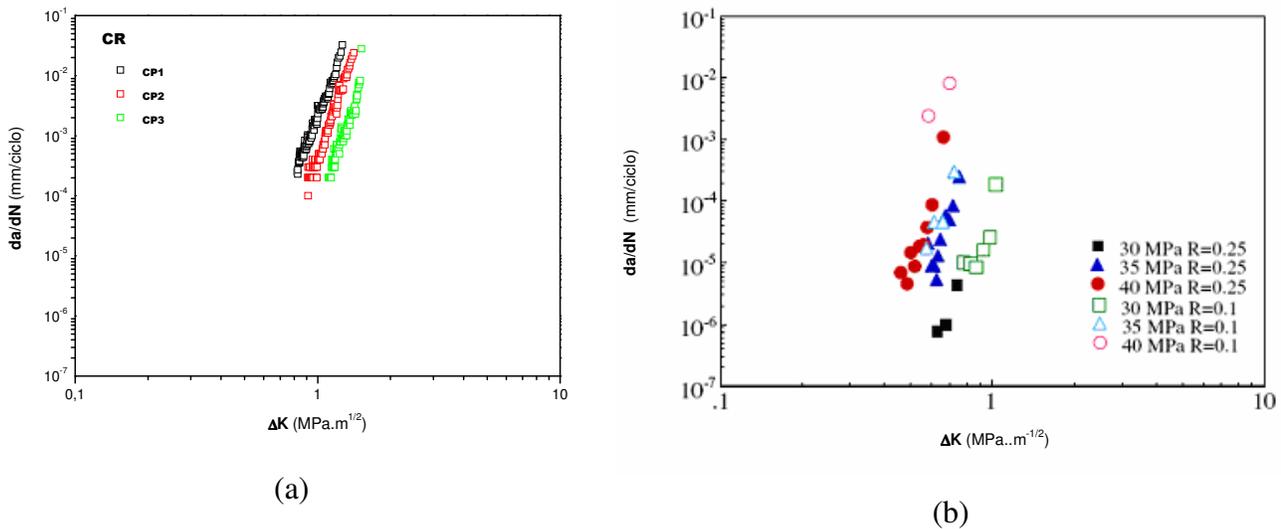


Figura 4.3 – Comparação entre as curvas de propagação de trinca por fadiga do CR deste trabalho (a) e as obtidas por LOU *et al.* (2006) (b).

Outro aspecto importante de se ressaltar entre os dois trabalhos é o uso do método da flexibilidade (compliance) como forma para monitoramento do crescimento da trinca que ambos utilizaram. Mesmo sendo o critério tratado pela ASTM E 647-05 mais utilizado para materiais metálicos, sua utilização para materiais compósitos com matriz cerâmica também foi possível em virtude da característica do corpo-de-prova utilizado apresentar rigidez suficiente e se comportar elasticamente durante o ensaio, conforme prevê a referida norma. Outro aspecto são as dimensões dos corpos-de-prova que, em que pese o trabalho de Lou não apresentar suas dimensões, os

corpos-de-prova utilizados foram os SENB (single edge notched bend), da mesma forma como os utilizados neste trabalho, sendo também os corpos-de-prova submetidos a cargas em três pontos, com solicitação à flexão.

4.1.2 Estudo do comportamento carga monotônica – CMOD do CR

Também com a finalidade de contribuir na análise de outros fatores que apresentam ligação com o estudo da propagação de trinca por fadiga, foram ensaiados à idade de 28 dias, quatro corpos-de-prova com as características descritas no item 3.1.1, características essas também utilizadas nos ensaios de carga cíclica, visando avaliar o comportamento do material quando submetido a carga monotônica.

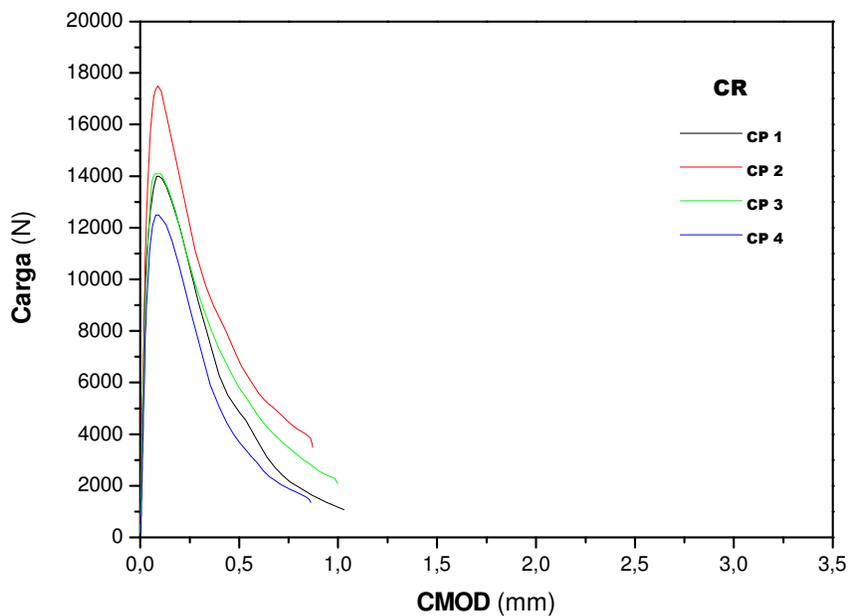


Figura 4.4 – Curvas carga monotônica – CMOD do CR

Observa-se a partir da análise da Figura 4.4, que o concreto consegue manter carga após atingir a carga de ruptura, até um deslocamento de abertura da boca da trinca (CMOD) entre 0,75 mm e 1,0 mm, indicando a pouca capacidade que o material tem de se deformar após a ruptura da matriz, apresentando baixa capacidade de absorção de energia e mostrando a característica frágil do material.

4.2 Concreto Reforçado com Fibras

Para os CRFs as resistências à tração por flexão, compressão axial, tração por compressão diametral e o módulo de elasticidade, foram obtidos à idade de 28 dias, por meio de ensaio monotônico, e seus resultados tiveram como finalidade servir de informação para a realização dos ensaios cíclicos. Na sequência são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios de propagação de trinca por fadiga, bem como os resultados do comportamento carga monotônica – CMOD para os CRFs descritos no capítulo anterior.

4.2.1 Estudo da influência dos tipos e dos teores de fibras no comportamento do CRF à propagação de trincas por fadiga

Primeiramente, visando auxiliar na análise da influência da adição de baixos teores de fibras ao concreto no comportamento do CRF à propagação de trinca por fadiga, foram extraídas para todos os CRFs, curvas médias do diagrama $da/dN - \Delta K$ dos três corpos-de-prova ensaiados, que são apresentadas nas Figuras 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9. Posteriormente serão feitas análises comparativas envolvendo vários aspectos dos CRFs e do CR.

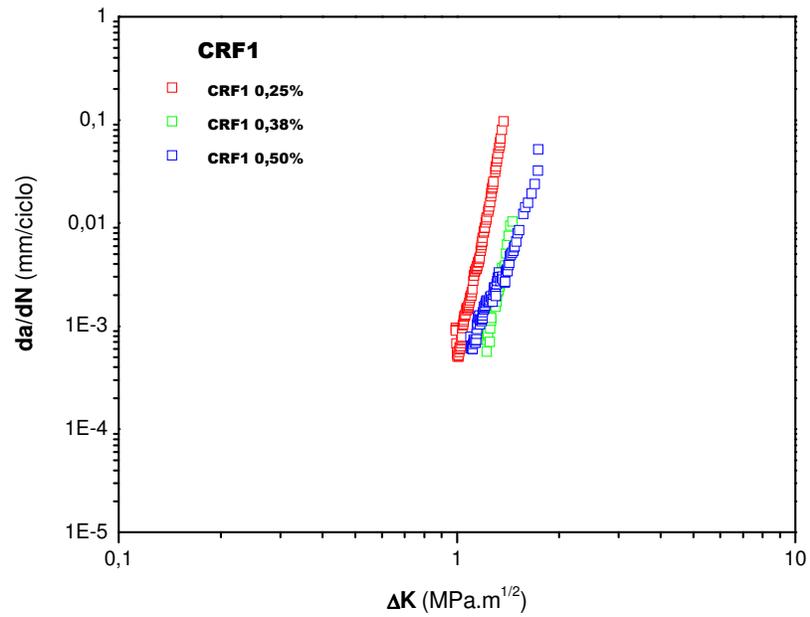


Figura 4.5 – Curvas médias de propagação de trinca por fadiga em função de ΔK do CRF1, com os três teores utilizados

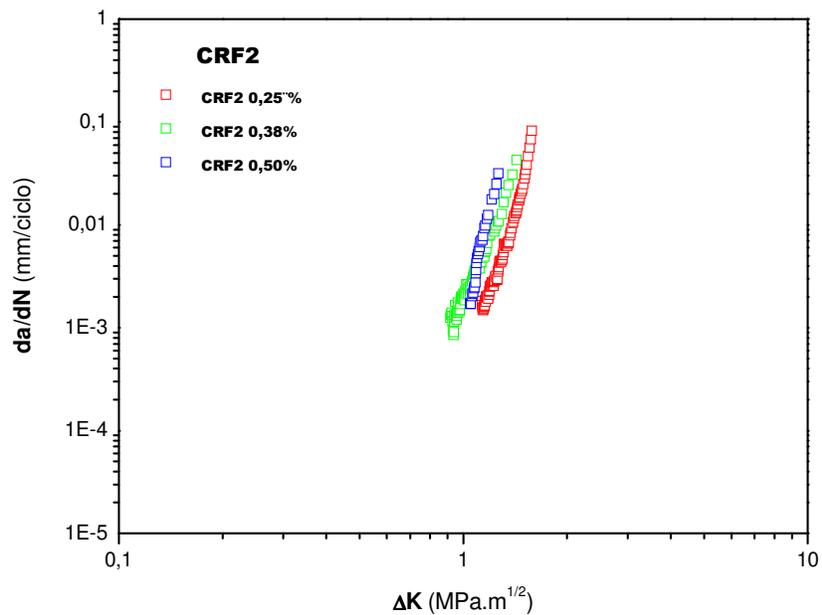


Figura 4.6 – Curvas médias de propagação de trinca por fadiga em função de ΔK do CRF2, com os três teores utilizados

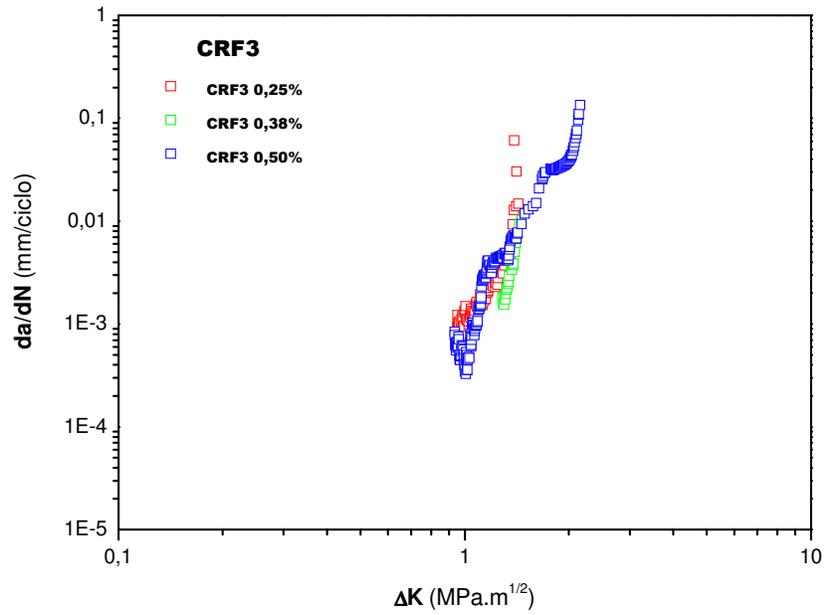


Figura 4.7 – Curvas médias de propagação de trinca por fadiga em função de ΔK do CRF3, com os três teores utilizados

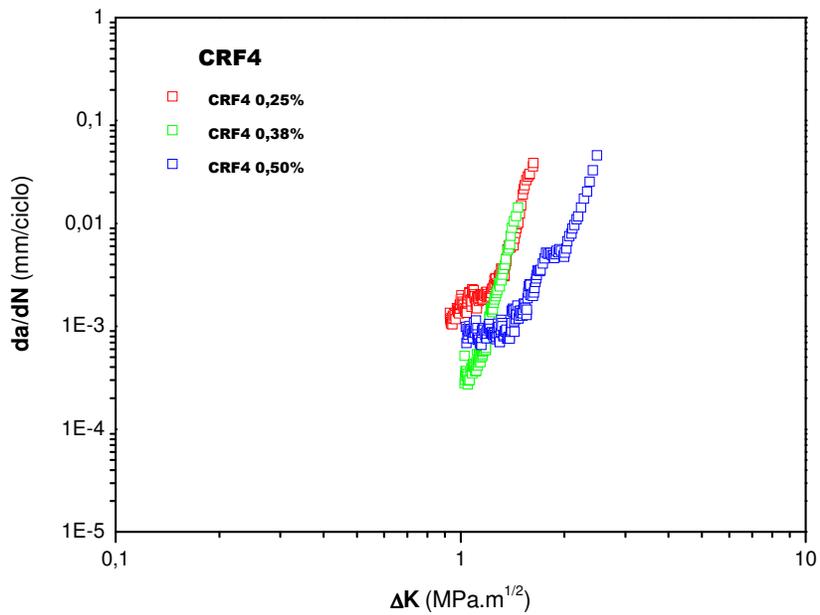


Figura 4.8 – Curvas médias de propagação de trinca por fadiga em função de ΔK do CRF4, com os três teores utilizados

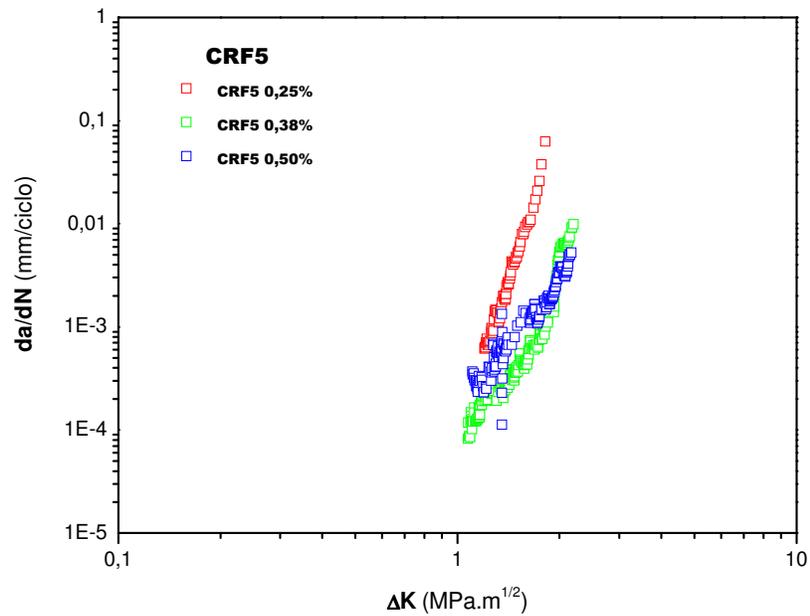


Figura 4.9 – Curvas médias de propagação de trinca por fadiga em função de ΔK do CRF5, com os três teores utilizados

4.2.2 Estudo do comportamento carga monotônica – CMOD dos CRFs

Também com a finalidade de contribuir na análise, foram realizados ensaios para obtenção do comportamento carga monotônica – deslocamento de abertura da boca da trinca (CMOD) dos CRFs conforme as características descritas no item 3.1.2. Foram ensaiados seis corpos-de-prova, e extraídas curvas médias do diagrama carga monotônica - CMOD para todos os CRFs, que são apresentadas nas Figuras 4.10, 4.11, 4.12, 4.13 e 4.14. Posteriormente serão feitas também análises comparativas entre os compósitos envolvendo vários aspectos dos CRFs e do CR.

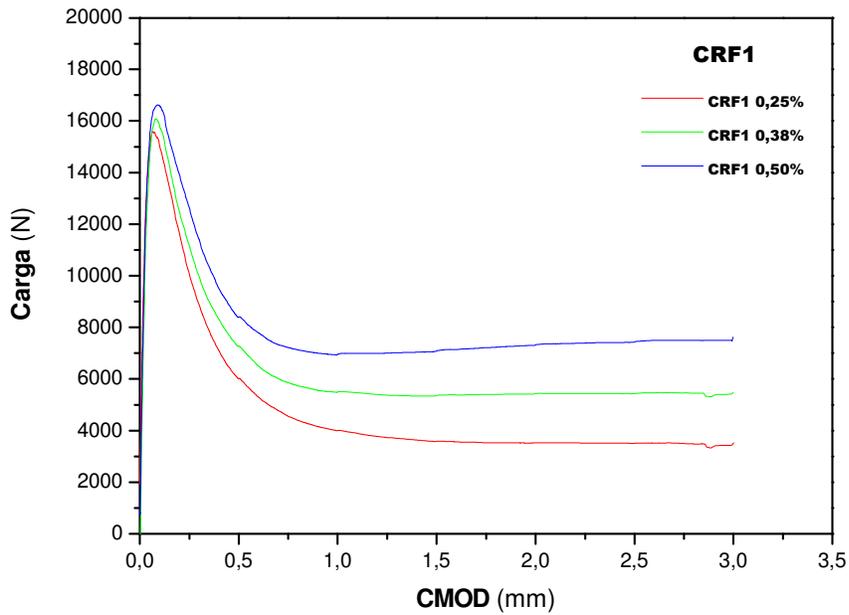


Figura 4.10 – Curvas médias do ensaio carga monotônica – CMOD do CRF1 com os três teores utilizados

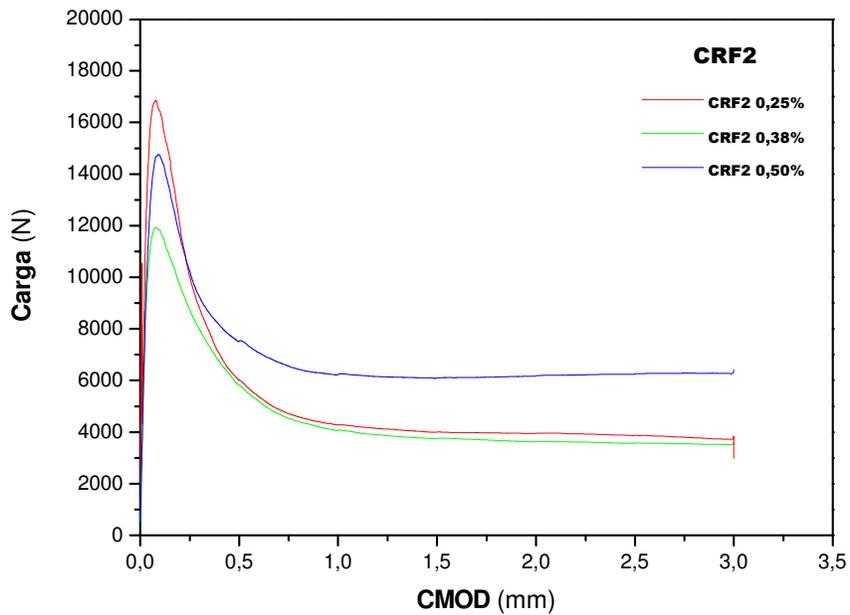


Figura 4.11 – Curvas médias do ensaio carga monotônica – CMOD do CRF2 com os três teores utilizados

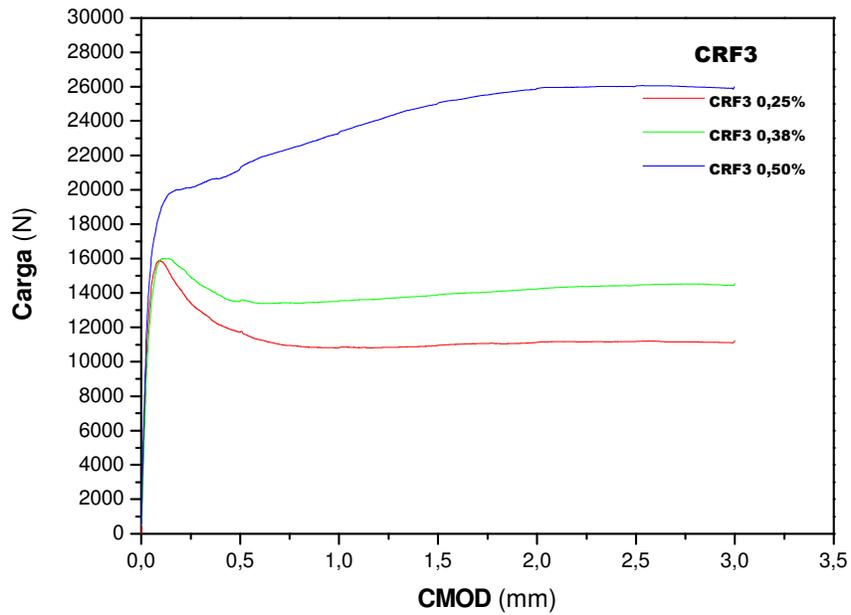


Figura 4.12 – Curvas médias do ensaio carga monotônica – CMOD do CRF3 com os três teores utilizados

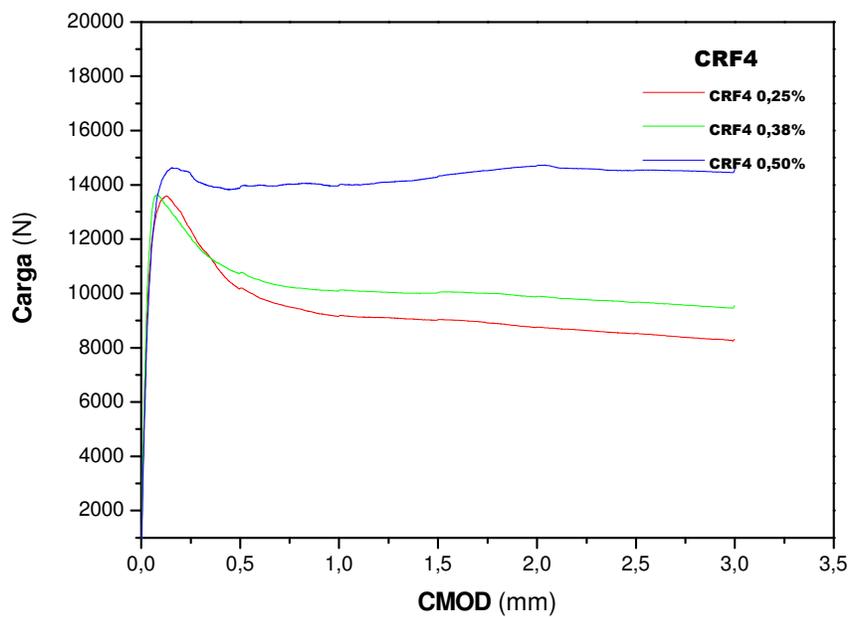


Figura 4.13 – Curvas médias do ensaio carga monotônica – CMOD do CRF4 com os três teores utilizados

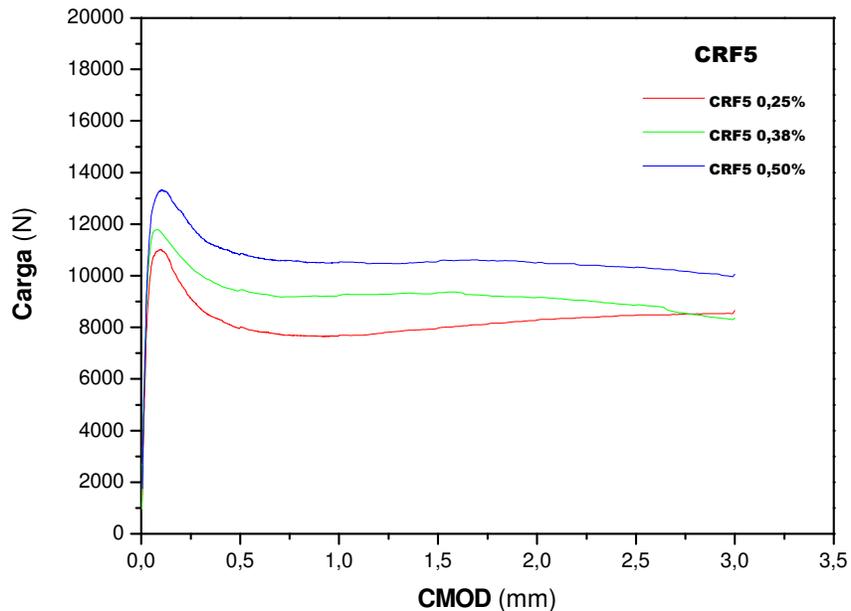


Figura 4.14 – Curvas médias do ensaio carga monotônica – CMOD do CRF5 com os três teores utilizados

4.3 Análise do comportamento dos CRFs à propagação de trinca por fadiga

Na seqüência, para analisar de forma comparativa a contribuição da adição de baixos teores de fibras no comportamento dos CRFs à propagação de trinca por fadiga, foram construídos gráficos comparativos entre o CR e os CRFs, visando auxiliar na discussão sobre o objetivo principal deste trabalho.

4.3.1 Comparação dos CRFs com o CR

Observam-se na Figura 4.15, ao se comparar o desempenho do CRF1 com os três teores da fibra sintética F1 adicionadas, indicações de que para o teor de 0,25% não há deslocamento nem mudança de inclinação da curva de propagação de trinca por fadiga em relação ao CR. No caso do teor de 0,38% há um deslocamento, porém a inclinação da curva se mostra muito próxima à do CR, e para o caso do teor de 0,50% observa-se o deslocamento e mudança de inclinação da curva em relação ao CR.

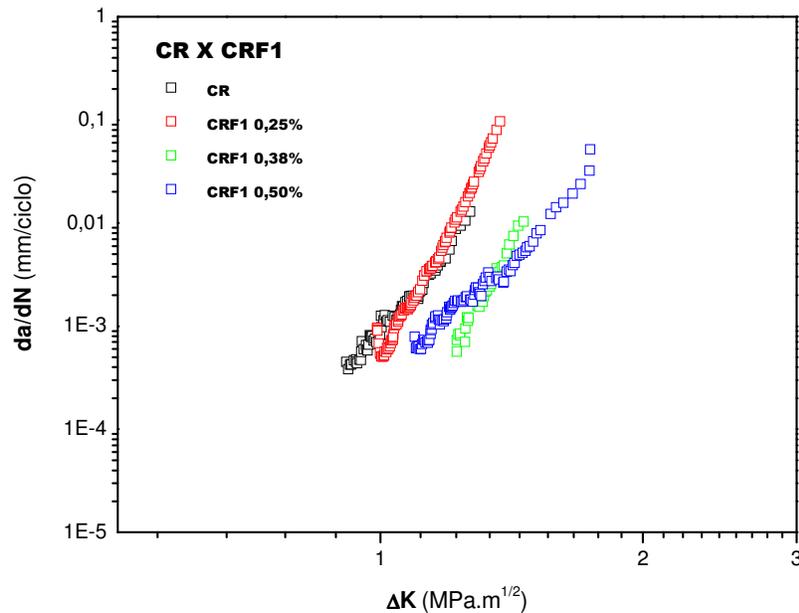


Figura 4.15 – Curvas de propagação de trinca por fadiga do CR e dos três teores de fibras do CRF1

Assim, observa-se que para o CRF1 não se vê contribuição para melhoria da resistência à propagação da trinca por fadiga, para a adição de 0,25% da fibra sintética F1. No entanto, para os teores de 0,38% e 0,50%, há uma transição de comportamento com deslocamento da curva para o teor de 0,38% e deslocamento e mudança de inclinação da curva para o teor de 0,50%. O deslocamento e a mudança de inclinação como observado no CRF1 provocam alteração nos parâmetros C_F e m_F da Equação 2.8 de Paris, indicando mudança de comportamento do material à propagação da trinca em relação ao CR.

Na Figura 4.16 são apresentadas as curvas de propagação de trinca por fadiga do CRF2, com a adição dos três teores, e também do CR. Observa-se que para todos os teores, as curvas mantêm-se praticamente com a mesma inclinação, com deslocamento desprezível da curva de propagação de trinca por fadiga do CR, podendo-se apontar que não há contribuição de melhoria de desempenho com a utilização dessa fibra em relação ao CR.

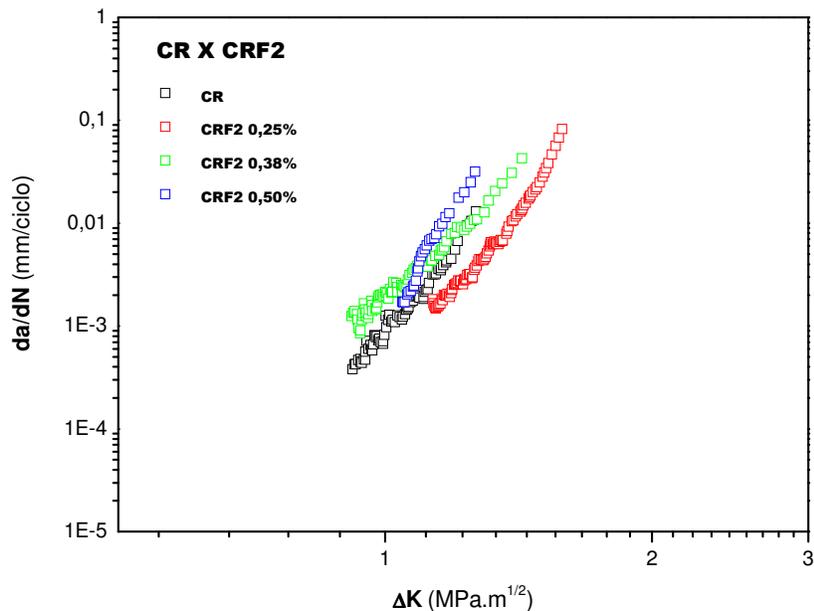


Figura 4.16 – Curvas de propagação de trinca por fadiga do CR e dos três teores de fibras do CRF2

A fibra sintética F2 difere da fibra sintética F1 no comprimento, 38 mm e 54 mm respectivamente, e na quantidade de fibras por quilo: 314770 e 221000 respectivamente. Apesar do aumento de 42% na quantidade de fibras por quilo, os resultados apontam que o comprimento maior da fibra sintética F1, também de 42%, apresenta melhor eficiência no resultado da resistência à propagação da trinca do que a fibra sintética F2, indicando para esse caso que o comprimento da fibra é uma variável importante a ser observada, podendo essa variável estar ligada à ancoragem da fibra na matriz de concreto.

A Figura 4.17 mostra o comportamento do CRF3 que utiliza fibras metálicas, e também com os mesmos teores utilizados nos CRF1 e CRF2. Para o teor de 0,25% a curva, apesar de mais sinuosa, apresenta seu posicionamento e sua inclinação próximas da curva do CR. O teor de 0,38% mostra deslocamento da curva sem modificação na sua inclinação, e para o caso do teor de 0,50% ocorre tanto deslocamento como a mudança de inclinação da curva, indicando alteração no comportamento. Assim como observado no caso do CRF1, para os teores de 0,38% e 0,50%, há uma transição de comportamento com o deslocamento da curva para o teor de 0,38% e um

deslocamento e mudança de inclinação da curva para o teor de 0,50%. Assim, tanto o deslocamento como a mudança de inclinação como a observada provocam alteração nos parâmetros C_F e m_F da Equação 2.8 de Paris, indicado alteração no comportamento do CRF3 à propagação da trinca por fadiga em relação ao CR, assim como observado no CRF1.

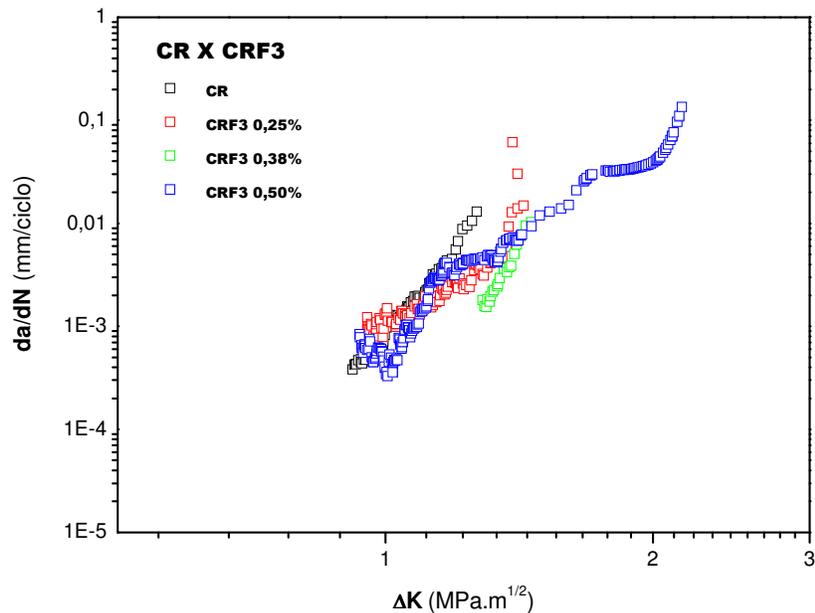


Figura 4.17 – Curvas de propagação de trinca por fadiga do CR e dos três teores de fibras do CRF3

Comparando as curvas obtidas do CRF3 com as curvas obtidas para o CRF1 e para CRF2, observa-se que no caso do CRF1 e do CRF2 as curvas se mostram mais retilíneas, enquanto que as curvas dos três teores do CRF3 se mostram mais sinuosas. Essas diferenças podem ser motivadas por fatores como: comprimento das fibras, quantidade de fibras por quilo, módulo de elasticidade e resistência à tração da fibra. As fibras metálicas F3 e as fibras sintéticas F1 apresentam comprimentos muito próximos: 60 mm e 54 mm, respectivamente, porém, quando se avalia a quantidade de fibras por quilo, a diferença é significativa: 4600 e 221000, respectivamente. As fibras metálicas F3 e as fibras sintéticas F1 apresentam módulo de elasticidade muito diferentes: 210 GPa e 5 GPa respectivamente, e resistências à tração não muito diferentes: 1050 MPa e 620-758 MPa respectivamente.

Um dos fatores que interferem na forma de propagação de trinca por fadiga dos CRFs é a quantidade de fibras por quilo. Assim, no caso das fibras sintéticas, como há uma quantidade de fibras por quilo maior do que nas fibras metálicas, e considerando ainda se tratar de baixos teores adicionados, observa-se que a curva mais retilínea é condizente com o aspecto da trinca conforme se vê na Figura 4.18, que mostra as trincas nos corpos-de-prova do CRF2 e do CRF3, com teor de fibra de 0,38%, onde se observa o aspecto diferente entre as trincas após o ensaio com carga cíclica. Por outro lado, no caso das fibras metálicas, observa-se que a curva mais sinuosa é condizente com o aspecto da trinca, conforme também mostra a Figura 4.18.



(a)



(b)

Figura 4.18 – Aspecto das trincas após o ensaio cíclico no CRF2 (a) e CRF3 (b) em corpos-de-prova ensaiados com carregamento cíclico

Por outro lado, o módulo de elasticidade e a resistência à tração das fibras metálicas podem propiciar uma maior resistência à propagação de trinca por fadiga, uma vez que se observa, nos três teores de fibras metálicas utilizadas no CRF3, que houve deslocamento e mudança de inclinação na curva de propagação de trinca por fadiga em relação ao CR. Assim, em que pese a quantidade de fibras por quilo ser maior no CRF1, no caso do CRF3 o módulo de elasticidade e a resistência à tração da fibra se mostraram como fatores influentes no comportamento do material.

Da mesma forma que o CRF3, o CRF4 apresenta modificações nas curvas de propagação de trinca por fadiga em relação ao CR, conforme se observa na Figura 4.19. Para os teores de 0,25% e 0,38%, as curvas apresentam deslocamentos sem modificações de inclinação em relação à curva do CR, apesar da curva do CRF4, com teor de 0,25%, apresentar inicialmente sinuosidade, no entanto, ao longo de seu desenvolvimento, se aproxima da curva do CRF4, com teor de 0,38%. No entanto, para o CRF4, com teor de 0,50%, ocorre tanto o deslocamento como a mudança de inclinação da curva, provocando alteração nos parâmetros C_F e m_F da Equação 2.8 de Paris, indicando alteração no comportamento do material à propagação da trinca por fadiga em relação ao CR, assim como observado nos CRF1 e CRF3.

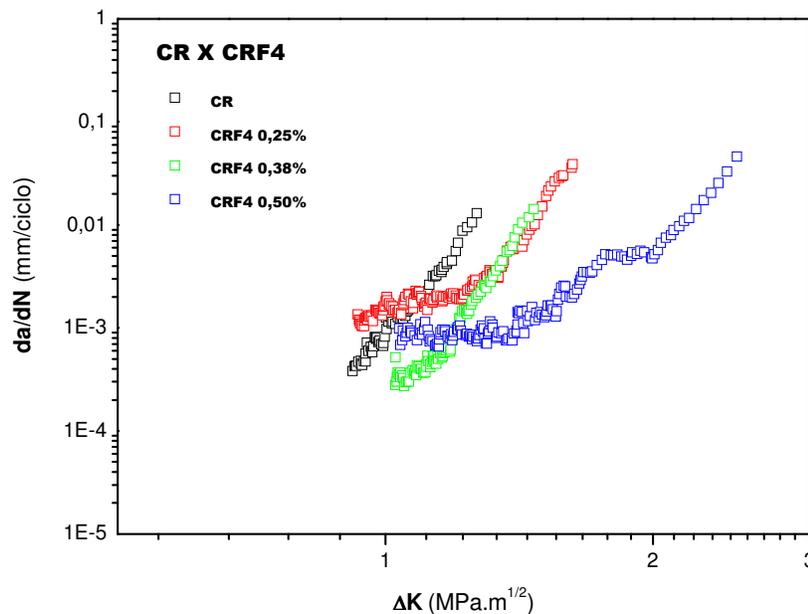


Figura 4.19 – Curvas de propagação de trinca por fadiga do CR e dos três teores de fibras do CRF4

A Figura 4.20 mostra as curvas obtidas para o CRF5, que utiliza fibras metálicas F5. Na análise comparativa com CR, esse CRF é o que mais se mostra com alterações no posicionamento das curvas em relação ao CR. No caso do CRF5, com teor de 0,25%, há deslocamento da curva sem modificação na inclinação. Já para o CRF5, com teores de 0,38% e 0,50%, há tanto deslocamento como modificação na inclinação da curva.

As fibras metálicas F5 utilizadas diferem das outras fibras metálicas F3 e F4 em seu comprimento (35 mm) e na quantidade de fibras por quilo (14500), quantidade essa 3,2 vezes mais que a fibra metálica F3 e 4,5 vezes mais que a fibra metálica F4, mostrando assim a influência significativa da quantidade de fibras por quilo na resistência à propagação de trinca por fadiga do CRFA.

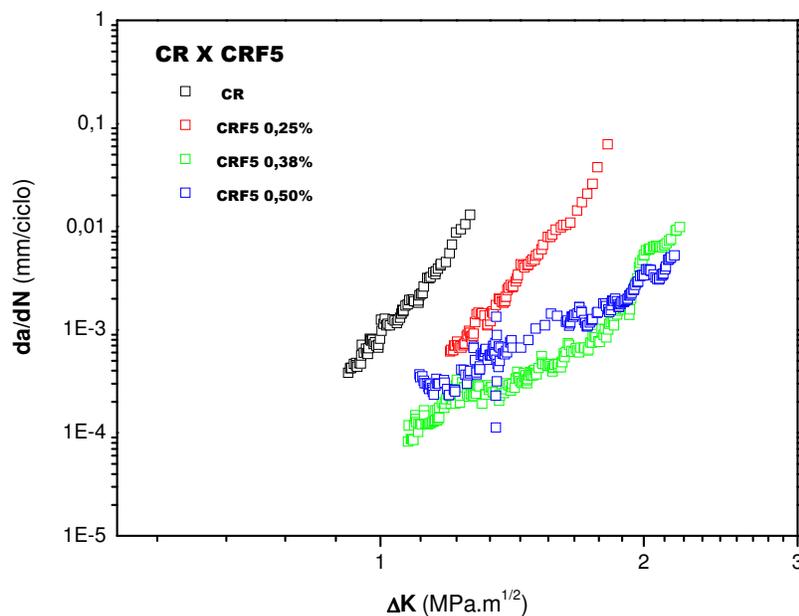


Figura 4.20 – Curvas de propagação de trinca por fadiga do CR e dos três teores de fibras do CRF5

Avaliando-se os cinco CRFs, observa-se que no caso das fibras sintéticas a melhoria de desempenho foi governada pelo comprimento das fibras (F1: 54 mm e F2: 38 mm), indicando que o fator ancoragem é importante para esse tipo de fibra, prevalecendo sobre o fator quantidade de fibras por quilo e também sobre a superfície de contato que é a mesma para as duas fibras. No caso das fibras metálicas, o fator quantidade de fibras por quilo governou o desempenho, indicando que o fator ancoragem também é importante, uma vez que a superfície de contato fibra matriz, no caso da fibra metálica F5, é superior às das fibras metálicas F3 e F4.

Por outro lado, para teores baixos de fibras como os utilizados neste trabalho, a indicação de melhoria de desempenho se mostrou para os teores de 0,50% nos CRF1, CRF3, CRF4 e CRF5, sendo que no CRF5 os teores de 0,25% e 0,38% também apontaram indicações de melhoria na resistência à propagação de trinca do material, mostrando que os fatores quantidade de fibras por quilo, módulo de elasticidade e resistência à tração da fibra se mostram os mais favoráveis do que todas as outras fibras. Assim, a análise sobre os efeitos da ancoragem da fibra na matriz de concreto é um fator importante a ser explorado para melhor entender o comportamento do CRF à propagação de trinca por fadiga.

4.3.2 Comparação entre os CRFs com o mesmo teor para todos os tipos de fibras

Quando se faz a comparação dos cinco tipos CRFs com teores de fibras de 0,25%, nota-se que a curva do CRF1 é praticamente coincidente com a curva do CR, as curvas do CRF2, CRF3 e CRF4 estão próximas entre si e com deslocamento em relação à curva do CR e a curva do CRF5 mostra um deslocamento mais pronunciado em relação ao CR. Em todas as situações não há modificação significativa na inclinação das curvas, conforme se observa na Figura 4.21.

Mesmo considerando que há variações entre as curvas, essas variações são pouco significativas, uma vez que são pequenos deslocamentos das curvas, praticamente sem mudança de inclinação, indicando a pouca influência desse teor na resistência à propagação da trinca por fadiga de todos os CRFs com teor de 0,25%.

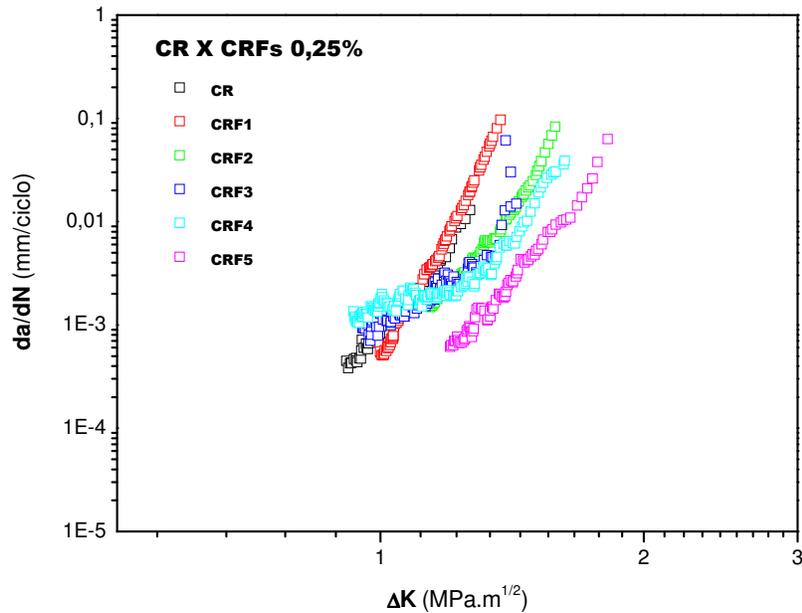


Figura 4.21 – Curvas de propagação de trinca por fadiga do CR e dos CRFs com teor de fibras de 0,25%

A Figura 4.22 mostra as curvas dos CRFs com teor de 0,38% comparadas com o CR. Nota-se que os CRF1, CRF3 e o CRF4 se comportam igualmente quanto à propagação da trinca por fadiga, mostrando suas curvas praticamente sobrepostas e deslocadas em relação à curva do CR. O CRF2 apresenta curva praticamente coincidente com a curva do CR, mostrando não haver nenhuma alteração em seu comportamento pela adição dessas fibras.

No entanto, o CRF5 mostra de forma acentuada um deslocamento e mudança de inclinação da curva em relação às curvas do CR e dos demais CRFs, indicando alteração no desempenho quanto à resistência à propagação da trinca por fadiga para esse teor de fibras.

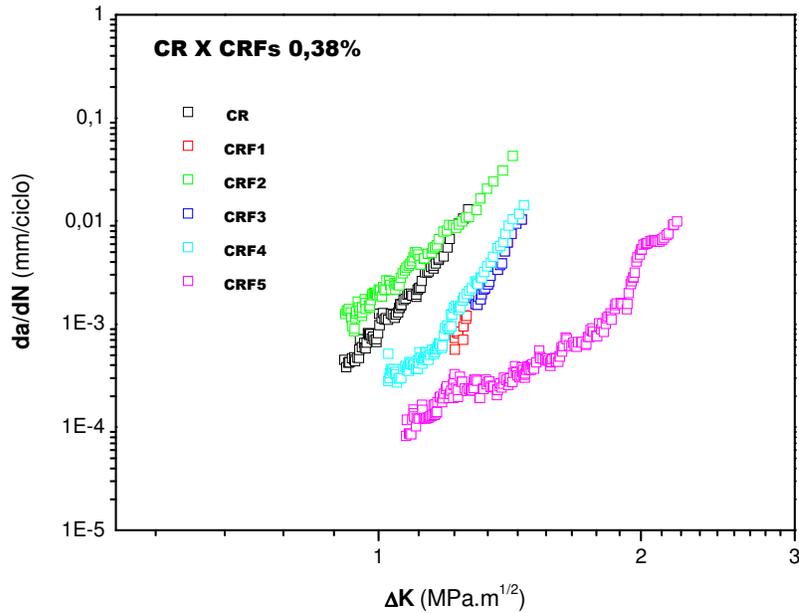


Figura 4.22 – Curvas de propagação de trinca por fadiga do CR e dos CRFs com teor de fibras de 0,38%

Na Figura 4.23 se observa que, exceto o CRF2 que mantém seu comportamento muito próximo com o CR, os demais CRFs mostram deslocamento e mudança de inclinação das curvas em relação ao CR. Ressalta-se que, como já observado anteriormente, o CRF1 apresenta uma curva mais retilínea e o CRF3, o CRF4 e o CRF5 mostram mais sinuosidade em suas curvas.

No entanto pode-se dizer que o teor de 0,50%, exceto para o CRF2, é um teor importante para se avaliar, pois ele mostrou mudança de comportamento nos CRFs. Por outro lado os teores de 0,25 % e 0,38% somente mostraram no CRF5 algum indicativo de melhoria de desempenho à propagação de trinca por fadiga em relação aos demais.

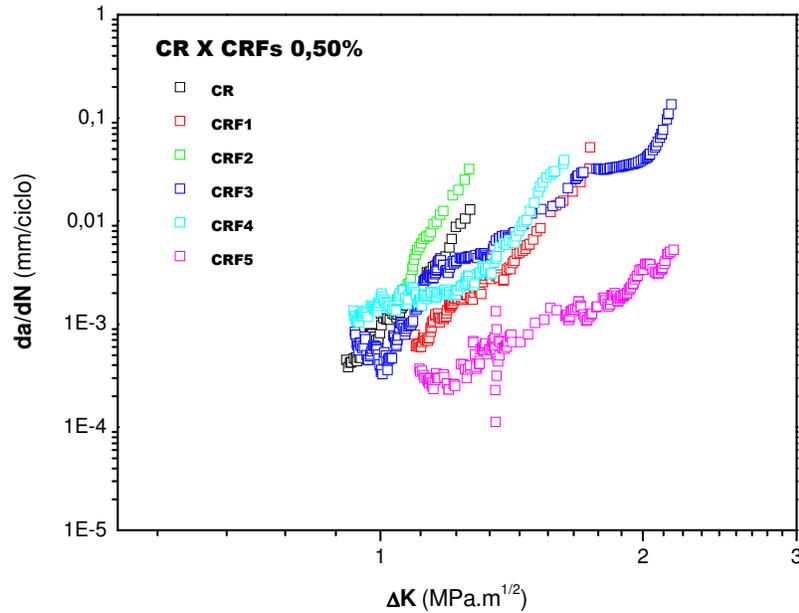


Figura 4.23 – Curvas de propagação de trinca por fadiga do CR e dos CRFs com teor de fibras de 0,50%

4.3.3 Comparação entre os CRFs com mesmo material e mesmo teor

Visando também poder contribuir na avaliação, foram comparadas curvas de propagação de trinca por fadiga dos CRFs com mesmo material das fibras (sintéticas e metálicas) e para os três teores de fibras utilizados. Assim, a Figura 4.24 compara os CRFs feitos com fibras sintéticas F1 e F2, com teor de fibras de 0,25%.

Nota-se que não há praticamente alteração significativa no comportamento dos CRFs, indicando a desprezível contribuição desses tipos de fibras com esses teores no desempenho à propagação de trinca por fadiga dos CRF1 e CRF2, com teor de 0,25%, em relação ao CR.

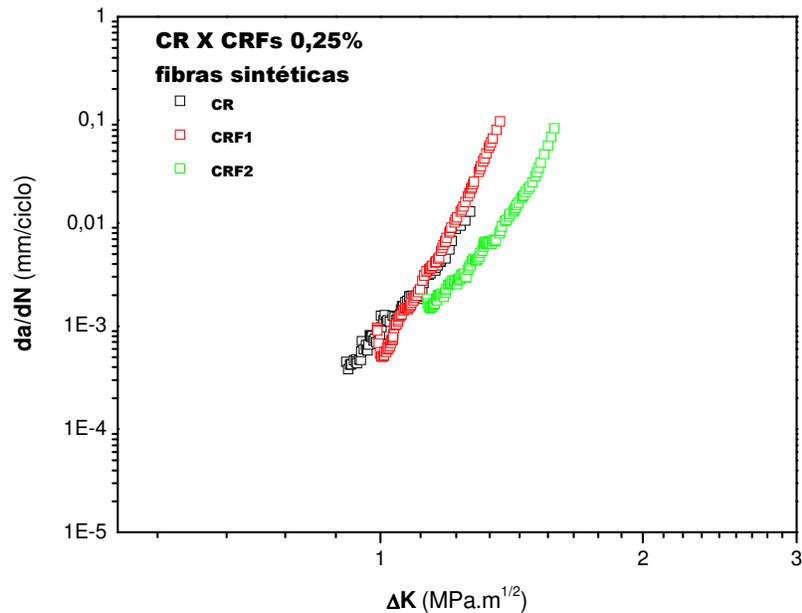


Figura 4.24 – Curvas de propagação de trinca por fadiga do CR e dos CRFs com fibras sintéticas com teor de fibras de 0,25%

Observando a Figura 4.25, que compara também o CRF1 e o CRF2 com adições das fibras sintéticas F1 e F2, porém com teor de fibras de 0,38%, nota-se que a curva do CRF1 apresenta deslocamento, sem modificação de inclinação em relação ao CR, indicando modificação no comportamento do material.

Por outro lado, o CRF2 mostra um comportamento muito próximo do CR, confirmando o que anteriormente já se apontava que a adição das fibras sintéticas F2 não apresenta resultado significativo na melhoria de desempenho do material à propagação de trinca por fadiga. Como a diferença entre a fibra sintética F2 e a fibra sintética F1 está no comprimento, 38 mm e 54 mm, respectivamente, e na quantidade de fibras por quilo, 314700 e 22100 respectivamente, a alteração do comprimento da fibra parece ser mais vantajosa do que o aumento de quantidade, para as fibras sintéticas utilizadas neste trabalho, conforme já apontado anteriormente.

Como a fibra sintética F2 tem seu comprimento reduzido em relação à fibra sintética F1, a fibra F2 perde eficiência de ancoragem, uma vez que para as fibras sintéticas ela ocorre ao longo da fibra de forma mais significativa. Mesmo tendo uma quantidade de fibras maior do que a fibra sintética F1, que implica na mesma superfície de contato, isso não é suficiente para garantir desempenho, indicando que o comprimento menor da fibra sintética F2 prejudica seu comportamento à propagação de trinca por fadiga em relação à fibra sintética F1.

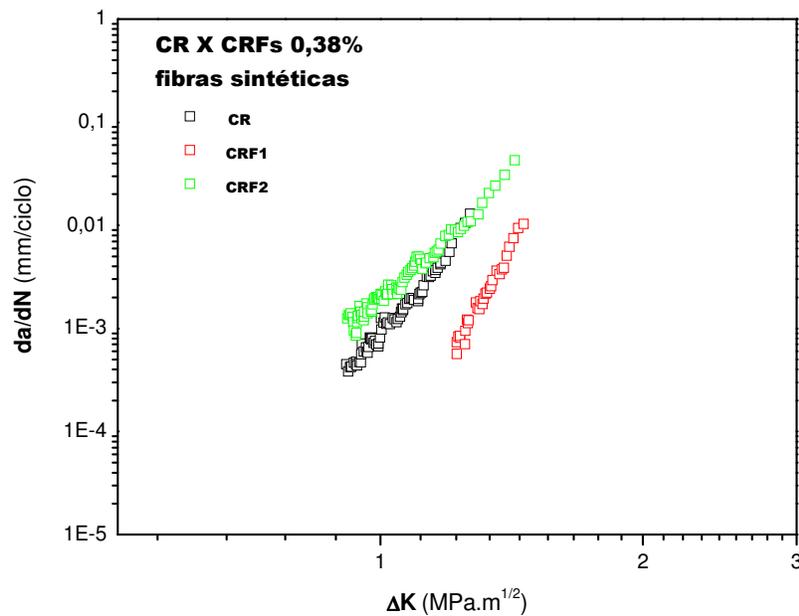


Figura 4.25 – Curvas de propagação de trinca por fadiga do CR e dos CRFs com fibras sintéticas com teor de 0,38%

A Figura 4.26 mostra os mesmos CRF1 e CRF2 analisados anteriormente, no entanto com a adição de teores de 0,50%. Observa-se, da mesma forma como se apresenta para o teor de 0,25% e 0,38%, que o desempenho do CRF2 se mostra como o do CR, não caracterizando nenhuma alteração no comportamento do material. Assim como se mostrou no teor de fibras de 0,38%, o CRF1, com teor de 0,50%, indica alteração em seu comportamento em relação ao CR. Nota-se que, ao passo que para o teor de 0,38% há somente um deslocamento da curva do CRF1 em relação ao CR, no caso do teor de fibras de 0,50% há deslocamento e indicação de modificação de inclinação da curva, mostrando uma alteração de comportamento maior do que o observado para o teor de 0,38%.

Essa análise confirma a indicação de melhor desempenho do CRF1 em relação ao CRF2 apontado anteriormente, bem como confirma a indicação de que os teores de 0,50% podem se mostram como teor importante como mínimos para as adições de fibras, visando a melhoria do desempenho à fadiga.

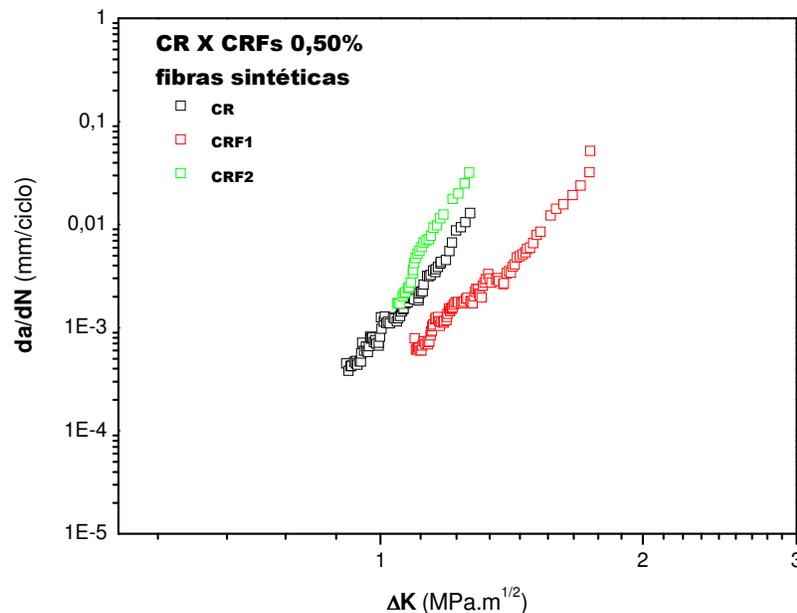


Figura 4.26 – Curvas de propagação de trinca por fadiga do CR e dos CRFs com fibras sintéticas com teor de fibras de 0,50%

Da mesma forma como avaliado para os CRFs com as fibras sintéticas, na seqüência são feitas comparações entre os CRFs feitos com as fibras metálicas F3, F4 e F5, com teor de 0,25%.

A Figura 4.27 compara os CRFs feitos com fibras metálicas F3, F4 e F5, com teor de fibras de 0,25%, com o CR. Nota-se que há deslocamento da curva do CRF3 e do CRF4, porém em determinados trechos essas curvas se mantêm muito próximas da curva do CR. No caso do CRF5 observa-se que há um deslocamento mais pronunciado da curva em relação à curva do CR. Em que pese o CRF5 apontar esse deslocamento, assim como para o caso das fibras sintéticas, pode-se dizer que a adição do teor de 0,25% de fibras metálicas também não apresenta melhoria significativa de desempenho à propagação de trinca por fadiga dos CRFs em relação ao CR.

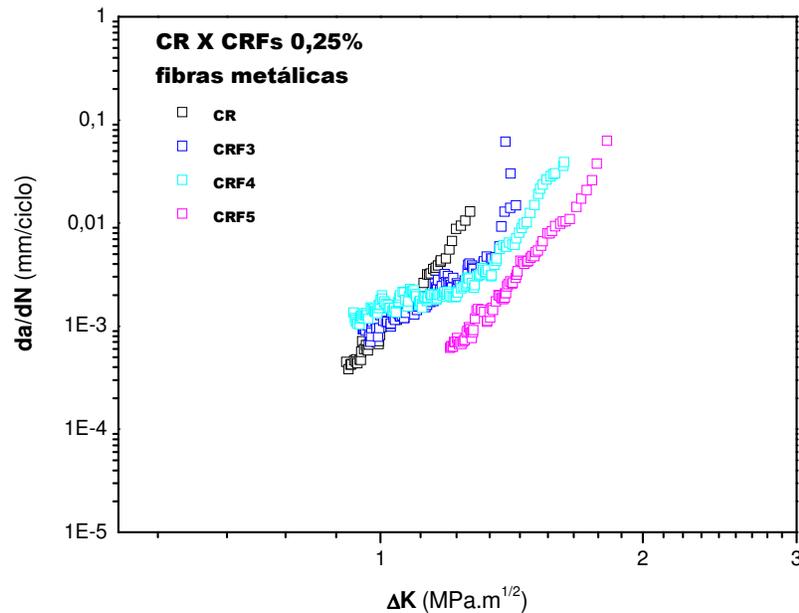


Figura 4.27 – Curvas de propagação de trinca por fadiga do CR e dos CRFs com fibras metálicas com teor de fibras de 0,25%

No caso do teor de 0,38% para os CRFs com fibras metálicas, como se observa na Figura 4.28, o CRF3 e o CRF4 mostram suas curvas deslocadas em relação à curva do CR, porém, sem indicação de modificação na inclinação das curvas. O CRF5 apresenta sua curva com maior deslocamento em relação ao CR do que os CRF3 e CRF4, bem como mostra mudança de inclinação em relação ao CR e também em relação aos CRF3 e CRF4. Observa-se que há indicação de alteração de comportamento do material, não muito significativa para os CRF3 e CRF4, porém, de forma mais acentuada do que mostravam esses dois CRFs para o teor de 0,25%. Já para o CRF5, ao passo que para o teor de 0,25% mostrava somente um deslocamento da curva em relação ao CR, para o teor de 0,38% há deslocamento maior da curva em relação à sua situação com 0,25%, e também mostra indicação de mudança de inclinação da curva, apontando para uma mudança de comportamento do material para esse tipo e teor de fibras utilizadas.

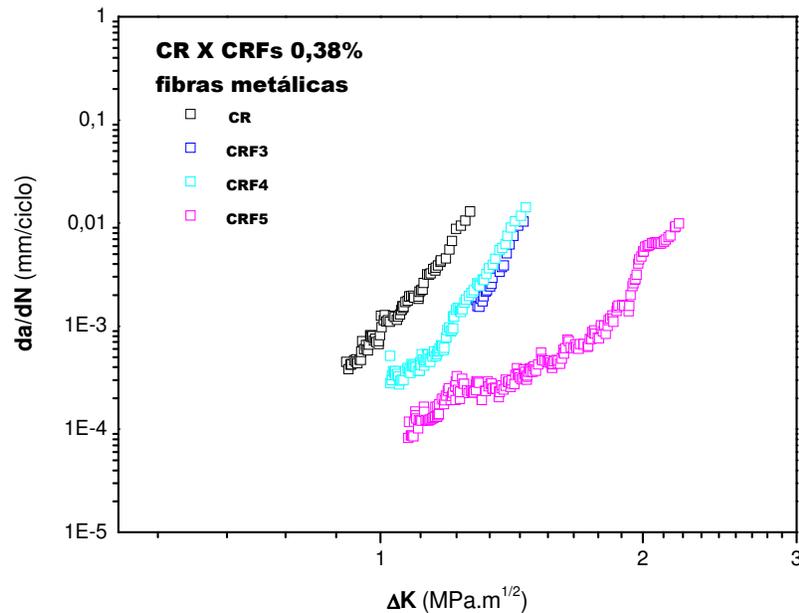


Figura 4.28 – Curvas de propagação de trinca por fadiga do CR e dos CRFs com fibras metálicas com teor de fibras de 0,38%

A Figura 4.29 apresenta as curvas de propagação de trinca por fadiga para os CRF3, CRF4 e CRF5 com teor de 0,50%. Nela pode-se notar que os CRF3 e CRF4 mostram uma alteração na forma da curva em relação aos teores de 0,25% e 0,38%, indicando de forma não muito clara o deslocamento da curva e a mudança de inclinação de suas curvas. Assim, é possível que para esses tipos e teores de fibras utilizados, que a quantidade de fibras por quilo pode estar influenciando no desempenho do material, não propiciando uma melhoria de desempenho de forma mais pronunciada. Pode-se ainda supor que para teores superiores a 0,50%, essas fibras possam apresentar melhor desempenho à propagação de trinca por fadiga.

O CRF5, assim como já indicava para os teores de 0,25% e 0,38%, mostra sua curva de propagação de trinca por fadiga de forma clara, com deslocamento e mudança de inclinação em relação ao CR, apontando que esse tipo de fibra com teor de 0,50% apresenta melhoria de resistência à propagação de trinca por fadiga nos concretos por ela reforçados.

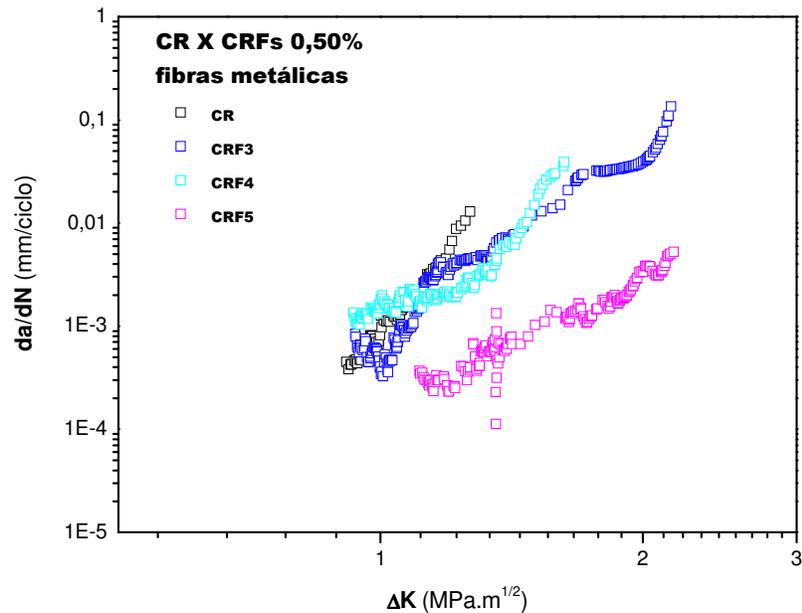


Figura 4.29 – Curvas de propagação de trinca por fadiga do CR e dos CRFs com fibras metálicas com teor de fibras de 0,50%

4.3.4 Comparação entre os CRFs com comprimentos de fibras similares

Na seqüência apresentam-se as curvas de propagação de trinca por fadiga dos CRFs segundo o comprimento da fibra, cuja finalidade é contribuir também na análise do objetivo deste trabalho, comparando, independentemente do material da fibra, o efeito de seu comprimento no desempenho à propagação de trinca por fadiga.

Cabe aqui ressaltar que, conforme RITCHIE (1999), no caso de compósitos cerâmicos, o crescimento da trinca é uma competição entre mecanismos de dano microestrutural *intrínseco* (dano) que ocorre a partir da ponta da trinca e mecanismos *extrínsecos* (escudo) que ocorre primeiramente antes da ponta da trinca, retardando seu crescimento. Como as fibras atuam como mecanismo *extrínseco*, o fator comprimento da fibra é importante por estar ligado à ancoragem da fibra à matriz.

A ancoragem das fibras na matriz pode ser entendida esquematicamente como a soma de três parcelas: adesão (resistência à separação dos dois materiais), atrito (resistência provocada pela existência de pressão transversal exercida pela matriz sobre a fibra) e mecânica (resistência decorrente da presença de saliências na superfície da fibra).

As fibras sintéticas (polipropileno) utilizadas neste trabalho são constituídas de um feixe de microfilamentos que cria durante a mistura dos materiais uma série de pontas ao longo da fibra, conforme mostra a Figura 4.30. Assim, avaliando-se as parcelas da ancoragem anteriormente descritas, pode-se dizer que essa ancoragem é garantida pela adesão e pelo atrito, sendo a parcela de aderência mecânica não muito eficiente, uma vez se tratar de um material com módulo de elasticidade muito baixo, oferecendo assim pouca resistência à deformação pelas saliências provocadas pelas pontas das fibras, que ocorrem ao longo de toda fibra.



Figura 4.30 – Aspecto das fibras sintéticas com as pontas que atuam como ancoragem mecânica da fibra na matriz de concreto

As fibras metálicas (aço) utilizadas neste trabalho apresentam seção circular bem definida ao longo de seu comprimento, tendo dobras em suas extremidades. Assim, avaliando-se a ancoragem anteriormente descrita, ela se manifesta nas três parcelas, sendo a sua maior eficiência obtida na ancoragem mecânica proporcionada pelas dobras nas extremidades, que são deformadas no arrancamento, conforme mostra a Figura 4.31.



Figura 4.31 – Aspecto das fibras metálicas (aços) com as ancoragens nas extremidades deformadas após ensaio

As Figuras 4.32, 4.33 e 4.34 apresentam as curvas de propagação de trinca por fadiga dos CRF1, CRF3 e CRF4, com comprimentos de fibras de 54 mm, 60 mm e 60 mm respectivamente, e teores de fibras adicionadas à matriz de 0,25%, 0,38% e 0,50%. As fibras sintéticas F1, em virtude de sua quantidade de fibras por quilo, apresentam uma superfície de contato da ordem de 20 vezes maior do que a fibra metálica F3, e 24 vezes maior do que a fibra metálica F4, conseguindo reforçar o CRF1 para resistir à propagação de trinca por fadiga da mesma forma que os CRF3 e CRF4, para os teores de 0,38% e 0,50%, mostrando-se ligeiramente inferior para o teor de 0,25%.

Dessa forma, há indicações de que as fibras sintéticas F1, metálicas F3 e metálicas F4, utilizadas neste trabalho, são similares quanto à resistência à propagação de trinca por fadiga para os teores de 0,25%, 0,38% e 0,50%.

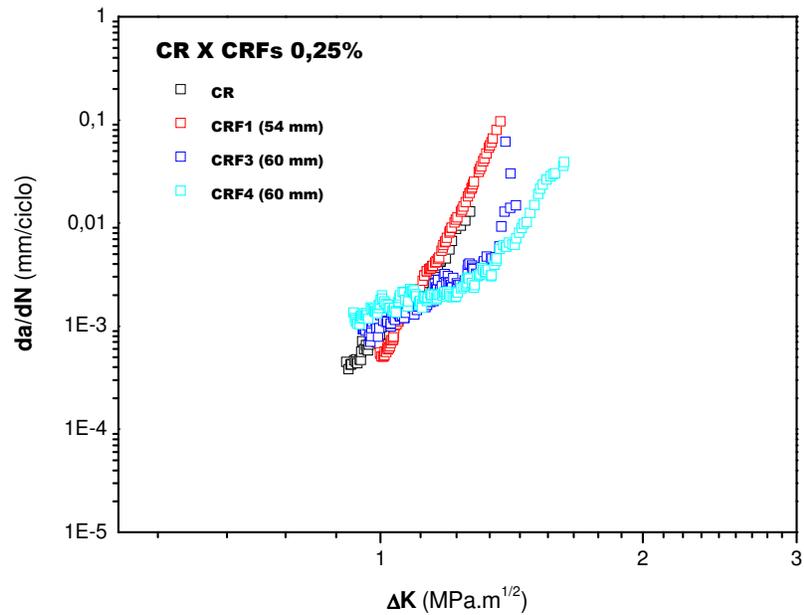


Figura 4.32 – Curvas de propagação de trinca por fadiga do CR e dos CRFs com fibras de comprimentos similares (sintéticas: 54 mm e metálicas: 60 mm), com teor de fibras de 0,25%

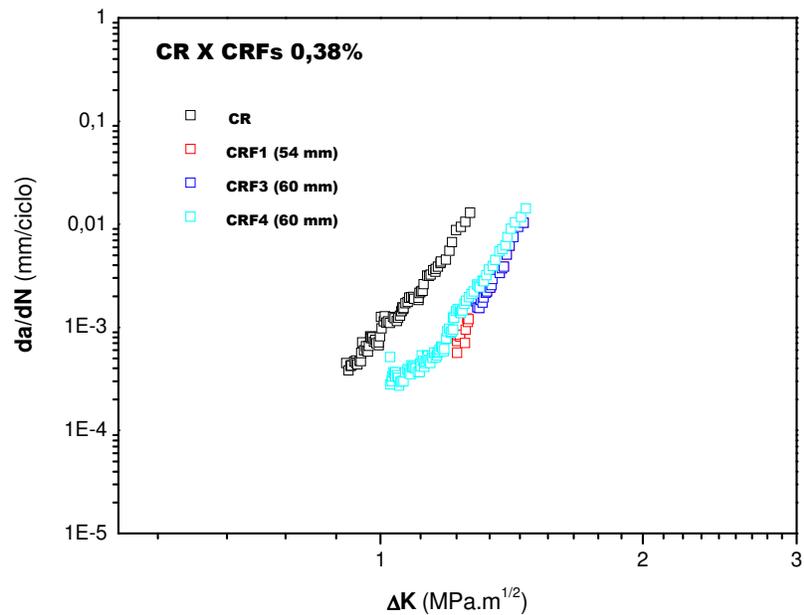


Figura 4.33 – Curvas de propagação de trinca por fadiga do CR e dos CRFs com fibras de comprimentos similares (sintéticas: 54 mm e metálicas: 60 mm), com teor de fibras de 0,38%

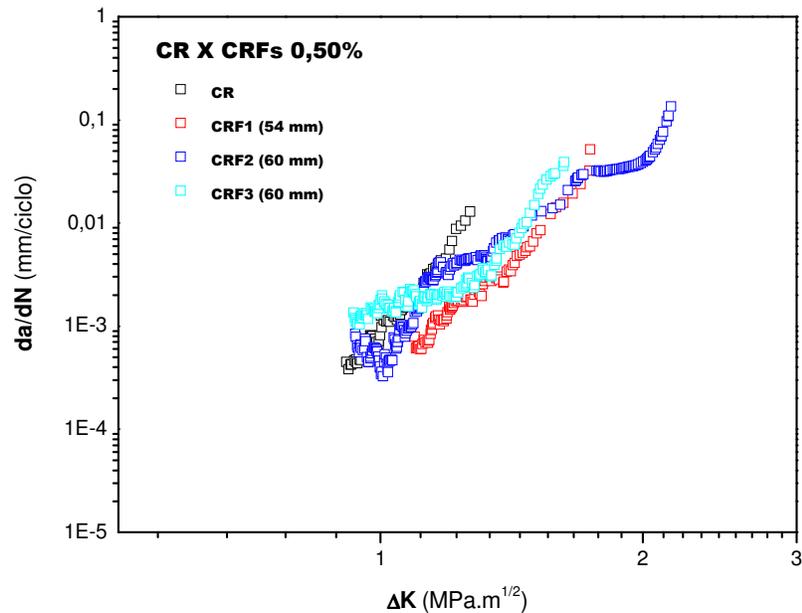


Figura 4.34 – Curvas de propagação de trinca por fadiga do CR e dos CRFs com fibras de comprimentos similares (sintéticas: 54 mm e metálicas: 60 mm), com teor de fibras de 0,50%

Quando se observa as Figuras 4.35, 4.36 e 4.37, nota-se que no CRF2 com fibras sintéticas F2 e no CRF5 com fibras metálicas F5, com comprimentos de 38 mm e 35 mm respectivamente, o efeito comprimento da fibra interfere de forma significativa. A fibra sintética F2 apresenta menor capacidade de reforço do que a fibra metálica F5, uma vez que o CRF5, mesmo tendo uma fibra menor em seu comprimento, aumenta seu desempenho não só em relação ao CRF2, como também a todos os outros CRFs ensaiados neste trabalho. Isso se deve à eficiência da ancoragem mecânica proporcionada pelas dobras nas extremidades das fibras metálicas F5 e também pela maior quantidade de fibras por quilo em relação às fibras metálicas F3 e F4, com aumento da superfície de contato da ordem de 35% e 62% respectivamente.

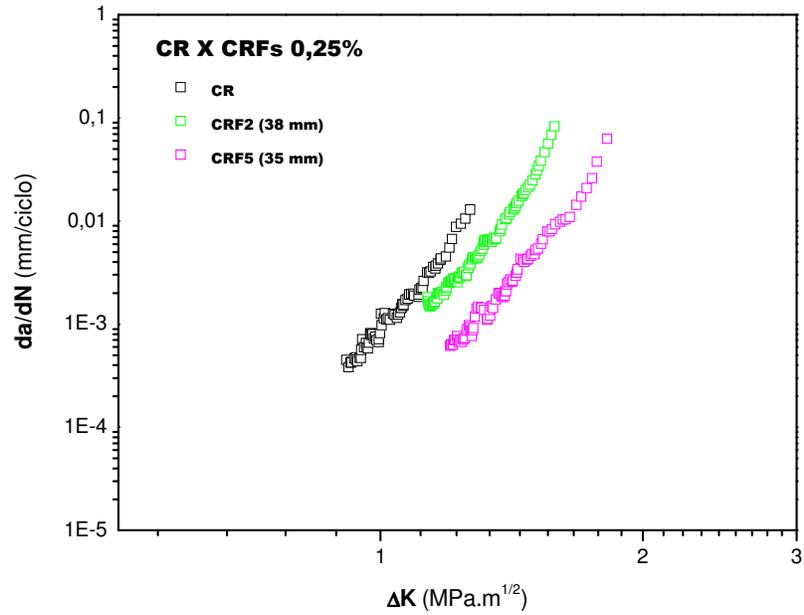


Figura 4.35 – Curvas de propagação de trinca por fadiga do CR e dos CRFs com fibras de comprimentos similares (sintéticas: 38 mm e metálicas: 35 mm), com teor de fibras de 0,25%

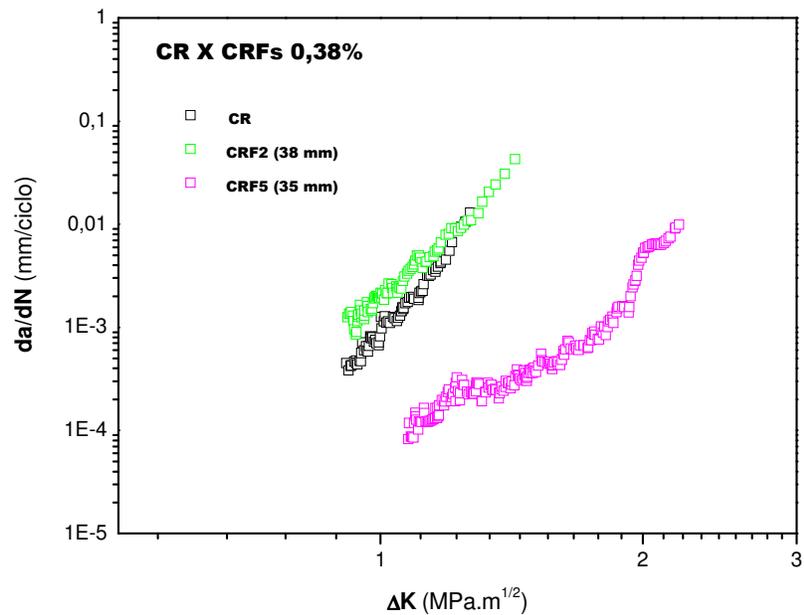


Figura 4.36 – Curvas de propagação de trinca por fadiga do CR e dos CRFs com fibras de comprimentos similares (sintéticas: 38 mm e metálicas: 35 mm), com teor de fibras de 0,38%

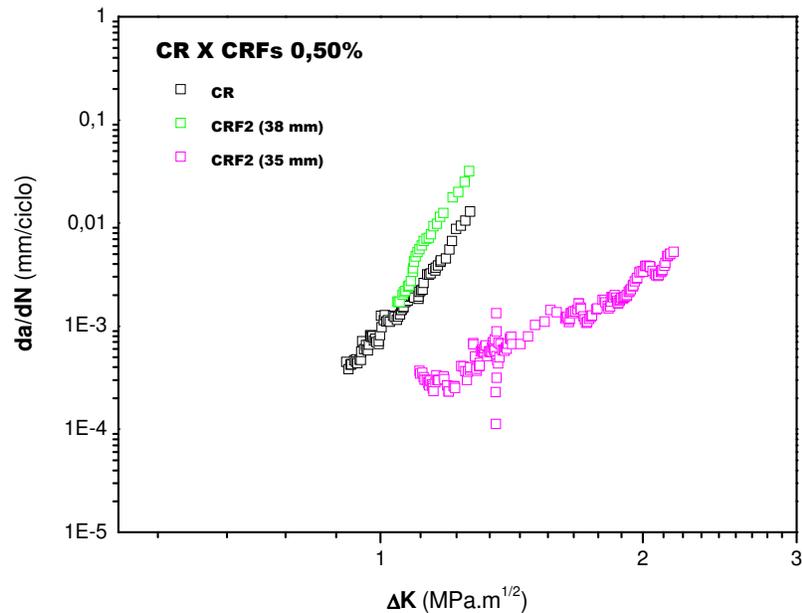


Figura 4.37 – Curvas de propagação de trinca por fadiga do CR e dos CRFs com fibras de comprimentos similares (sintéticas: 38 mm e metálicas: 35 mm), com teor de fibras de 0,50%

4.4 Análise do comportamento carga monotônica – CMOD dos CRFs

Da mesma forma como analisado para o comportamento à propagação de trinca por fadiga, visando poder avaliar comparativamente a contribuição da adição de baixos teores de fibras no comportamento carga monotônica – CMOD dos CRFs, foram construídos gráficos comparativos entre o CR e os CRFs, visando também auxiliar na discussão sobre o objetivo principal deste trabalho.

4.4.1 Comparação entre os CRFs e o CR

As Figuras 4.38, 4.39, 4.40, 4.41 e 4.42 mostram os gráficos do CR e dos CRFs ensaiados, onde se pode observar comparativamente as curvas médias do CR com cada CRF com seus respectivos teores de fibras.

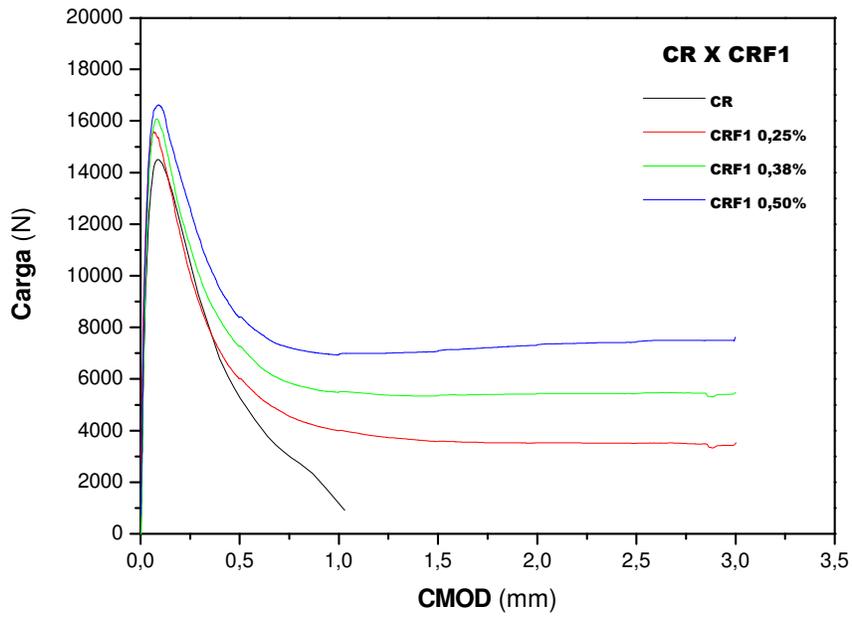


Figura 4.38 – Curvas carga monotônica – CMOD do CR e dos três teores de fibras do CRF1

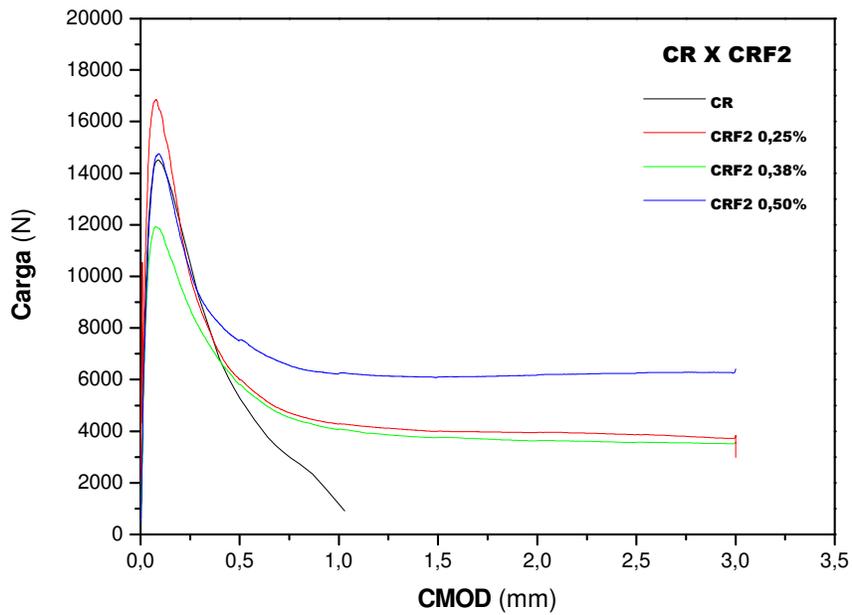


Figura 4.39 – Curvas carga monotônica – CMOD do CR e dos três teores de fibras do CRF2

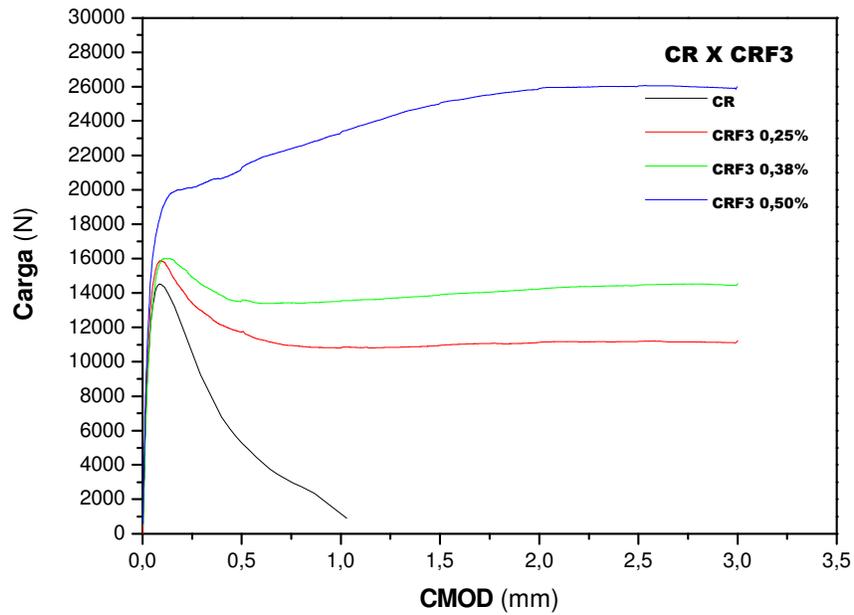


Figura 4.40 – Curvas carga monotônica – CMOD do CR e dos três teores de fibras do CRF3

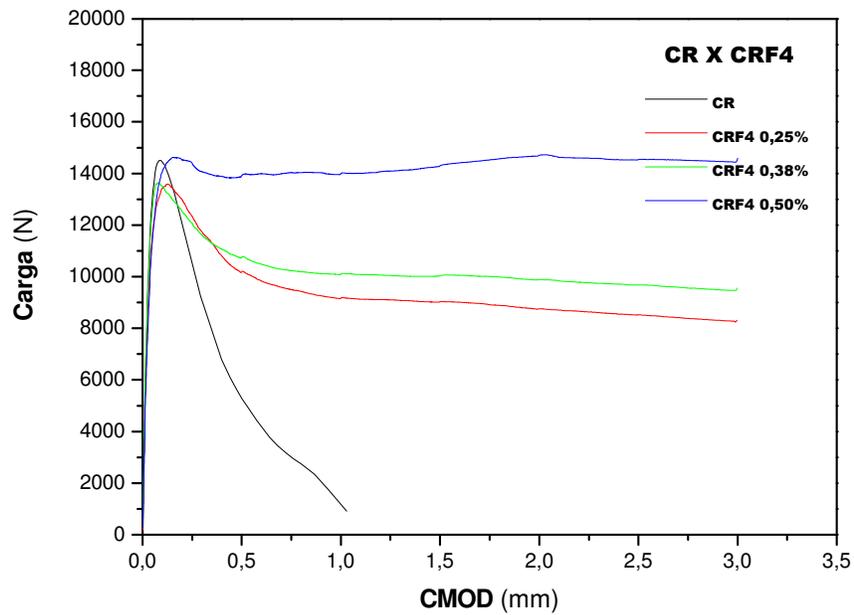


Figura 4.41 – Curvas carga monotônica – CMOD do CR e dos três teores de fibras do CRF4

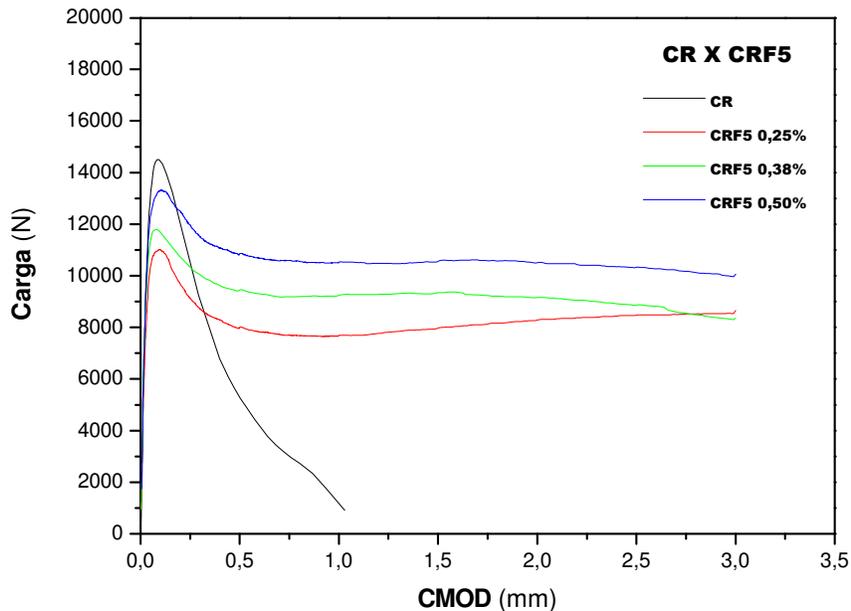


Figura 4.42 – Curvas carga monotônica – CMOD do CR e dos três teores de fibras do CRF5

Observa-se por meio das curvas carga monotônica – CMOD que o desempenho dos CRFs em relação ao CR é significativamente superior. Aqui não será propósito quantificar esse desempenho, uma vez que as curvas por si mostram essa melhoria de desempenho. No entanto, a discussão comparativa entre os CRFs se faz necessária e, conforme se observa nas curvas, o desempenho dos compósitos aumenta à medida que se aumentam os teores de fibras adicionadas, para todos os casos de CRFs. Esse fato mostra que há diferença de comportamento quando os CRFs são submetidos à carga monotônica em relação à carga cíclica.

No entanto, nos casos dos CRFs com fibras sintéticas, quando submetidos a cargas cíclicas, somente para o CRF1 há indicações de aumento de desempenho associado ao aumento do teor de fibras adicionadas. Para o CRF2, em todos os teores de fibras adicionadas, não há indicações de aumento de desempenho associado ao aumento do teor de fibras adicionadas. Nos casos do CRF3 e do CRF4, que apresentam melhor desempenho entre os CRFs com fibras metálicas, quando se observam as curvas carga monotônica – CMOD, são estas que indicam menor desempenho entre os CRFs com fibras metálicas quando solicitadas às cargas cíclicas. Por outro lado, o CRF5, que dentre os CRFs com fibras metálicas apresenta menor desempenho quando se observa a curva

carga monotônica – CMOD é a curva que indica melhor desempenho quando solicitadas às cargas cíclicas.

4.4.2 Comparação entre os CRFs com o mesmo teor para todos os tipos de fibras

Nesta análise, a partir dos mesmos teores de fibras, serão discutidos os desempenhos de todos os CRFs, comparando-os entre si, não sendo feita a discussão em relação ao CR uma vez que o desempenho melhor dos CRFs são significativos.

A Figura 4.43 mostra que para teores de 0,25%, o CRF3, o CRF4 e o CRF5 apresentam patamares de manutenção de carga, após a ruptura da matriz, em torno de 11000 N no CRF3 e no CRF5, e 9000 N no CRF4, significativamente superiores aos patamares dos CRF1 e CRF2, que se situam em torno de 4000 N. Isso mostra que para esse teor a diferença entre os tipos de fibras sintéticas e metálicas é significativa quanto ao comportamento carga monotônica – CMOD, avaliados em corpos-de-prova prismáticos.

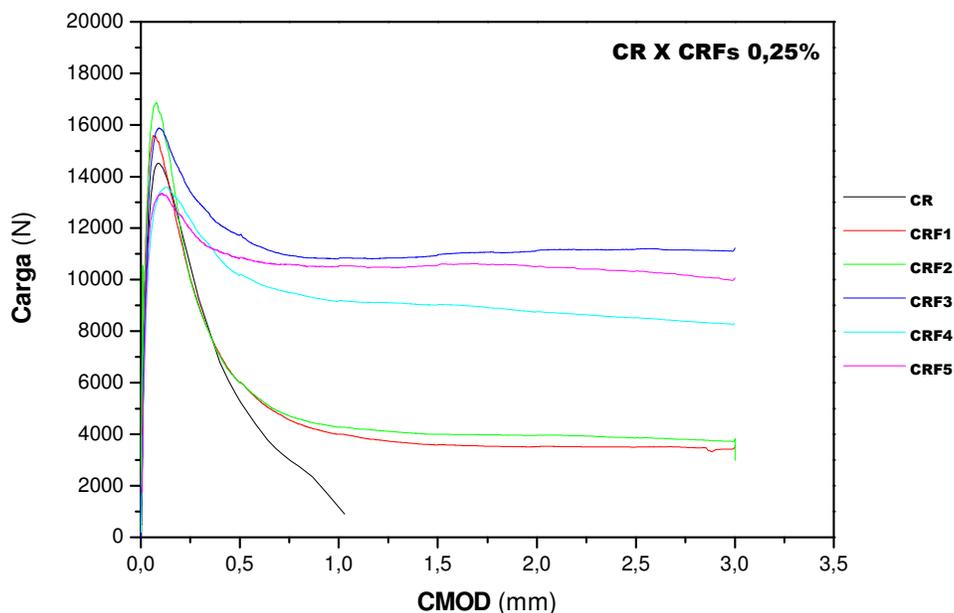


Figura 4.43 – Curvas carga monotônica – CMOD do CR e dos CRFs com teor de fibras de 0,25%

A Figura 4.44 mostra que, para teores de 0,38%, em comparação com os teores de 0,25%, o patamar de manutenção de carga após a ruptura da matriz ficou no patamar de 4000 N para o CRF2, aumentou para o patamar de 6000 N para o CRF1, caiu para um patamar de 9000 N no CRF5, aumentou para um patamar de 10000 N para o CRF4 e aumentou para um patamar de 14000 N para o CRF3.

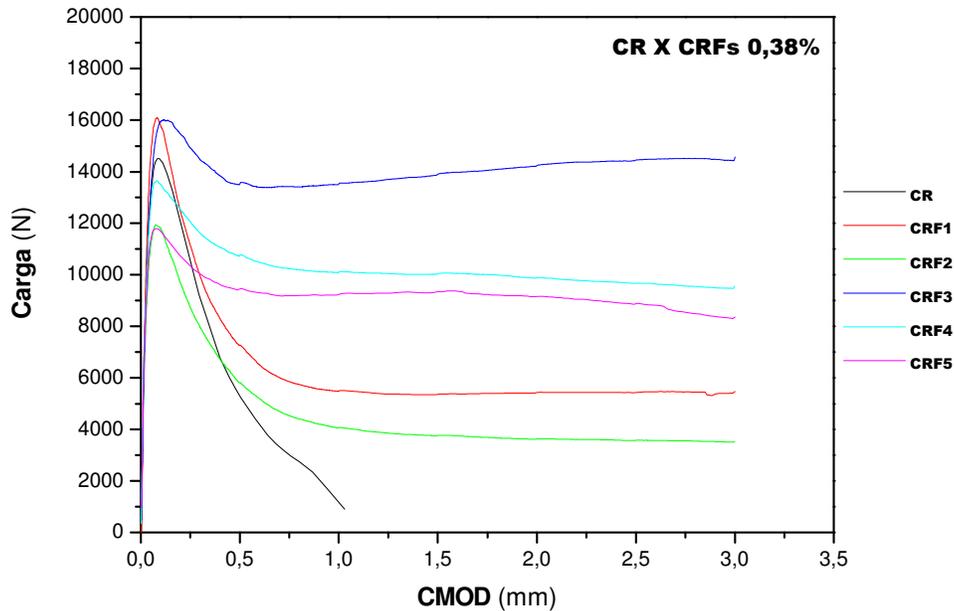


Figura 4.44 – Curvas carga monotônica – CMOD do CR e dos CRFs com teor de fibras de 0,38%

A Figura 4.45 mostra que, para teores de 0,50%, em relação aos teores menores, o patamar de manutenção de carga após a ruptura da matriz aumentou para um patamar de 6000 N para o CRF2, aumentou para o patamar de 7500 N para o CRF1, se manteve num patamar de 9000 N para o CRF5, aumentou para um patamar de 14000 N para o CRF4 e aumentou para um patamar médio de 24000 N para o CRF3.

Observa-se que, quanto ao comportamento carga monotônica – CMOD, as fibras metálicas, quando comparadas pelo mesmo teor, apresentam melhor desempenho em relação às fibras sintéticas, indicando não haver equivalência de desempenho quando comparadas pelo mesmo teor de fibras adicionadas.

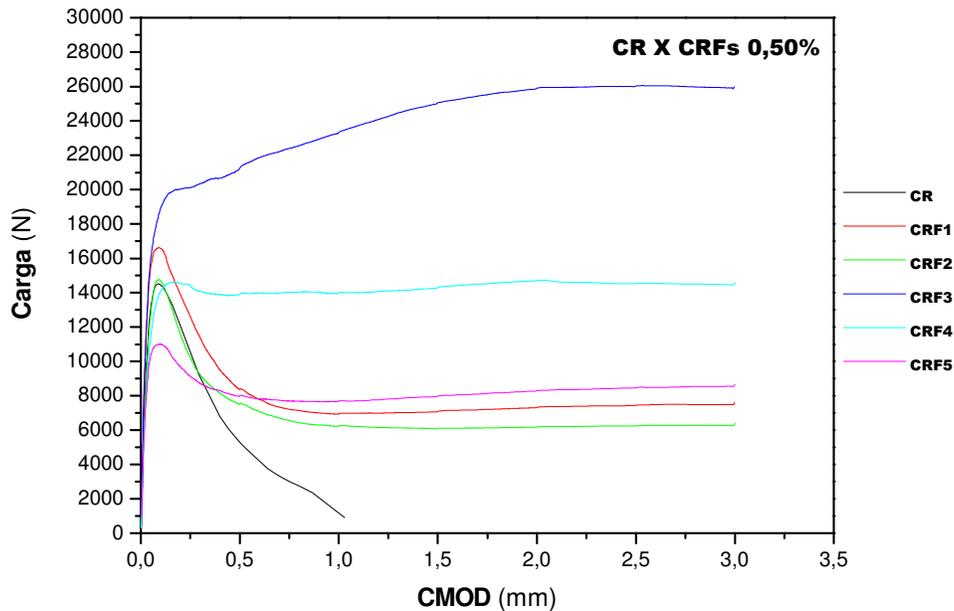


Figura 4.45 – Curvas carga monotônica – CMOD do CR e dos CRFs com teor de fibras de 0,50%

4.4.3 Comparação entre os CRFs com mesmo material e mesmo teor

Analisou-se também o comportamento carga monotônica – CMOD dos CRFs com fibras do mesmo material e com iguais teores de fibras adicionadas, visando avaliar o desempenho quando comparadas entre si.

No caso do CRF1 e do CRF2, ambos reforçados com fibras sintéticas, se observa que para o teor de 0,25% não há diferença significativa de desempenho, ficando para ambos o patamar de manutenção de carga após a ruptura da matriz e em torno de 4000 N, conforme se observa na Figura 4.46. Para o teor de 0,38% o desempenho do CRF1 melhora, indicando um patamar em torno de 6000 N, enquanto que o CRF2 não apresenta melhoria significativa de desempenho, mantendo patamar em torno de 4000 N, conforme se observa na Figura 4.47. Para o teor de 0,50% há uma melhora de desempenho para ambos, apresentando o CRF1 um patamar em torno de 8000 N e o CRF2 um patamar de 6000 N, conforme se observa na Figura 4.48.

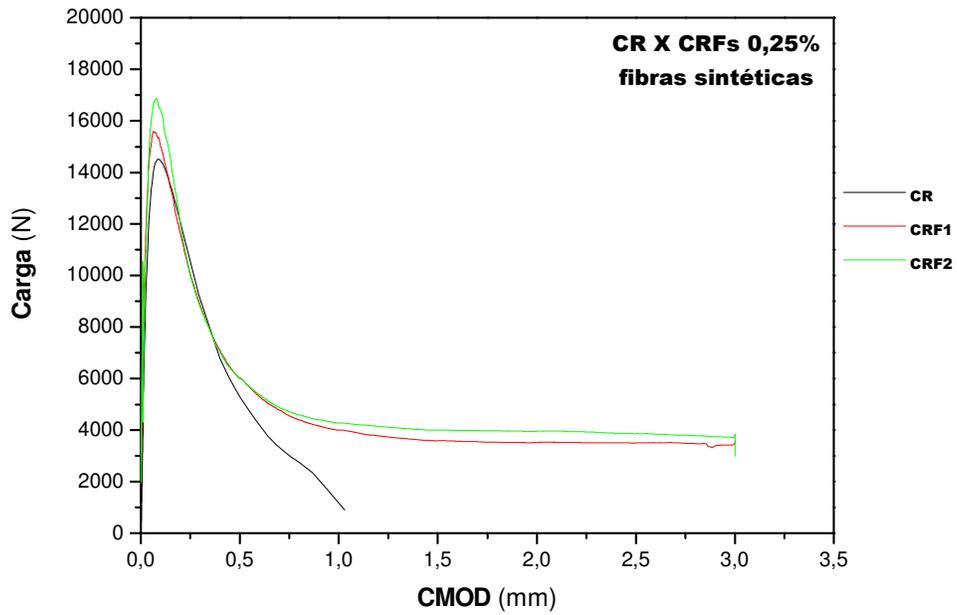


Figura 4.46 – Curvas carga monotônica – CMOD do CR e dos CRFs com fibras sintéticas com teor de fibras de 0,25%

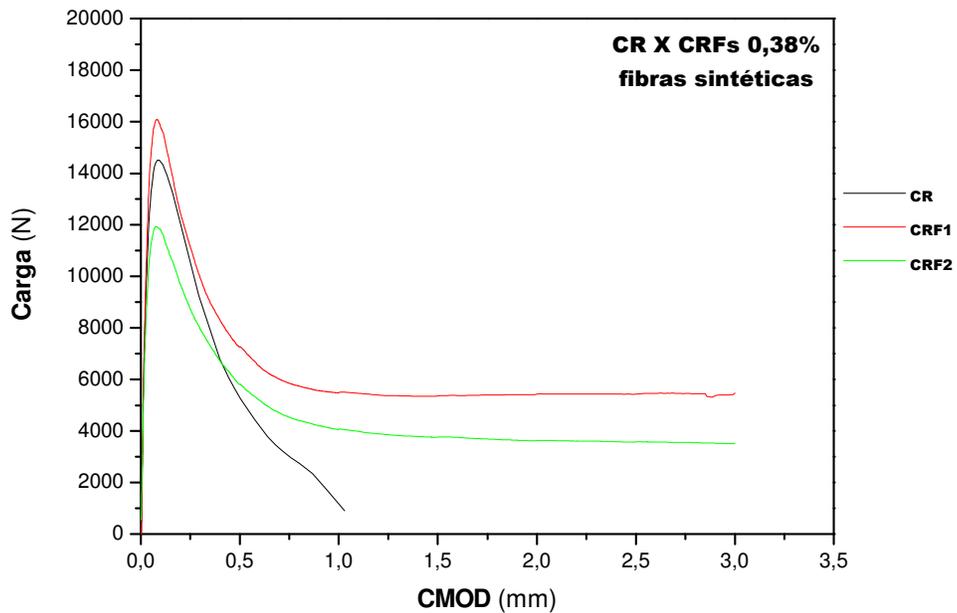


Figura 4.47 – Curvas carga monotônica – CMOD do CR e dos CRFs com fibras sintéticas com teor de fibras de 0,38%

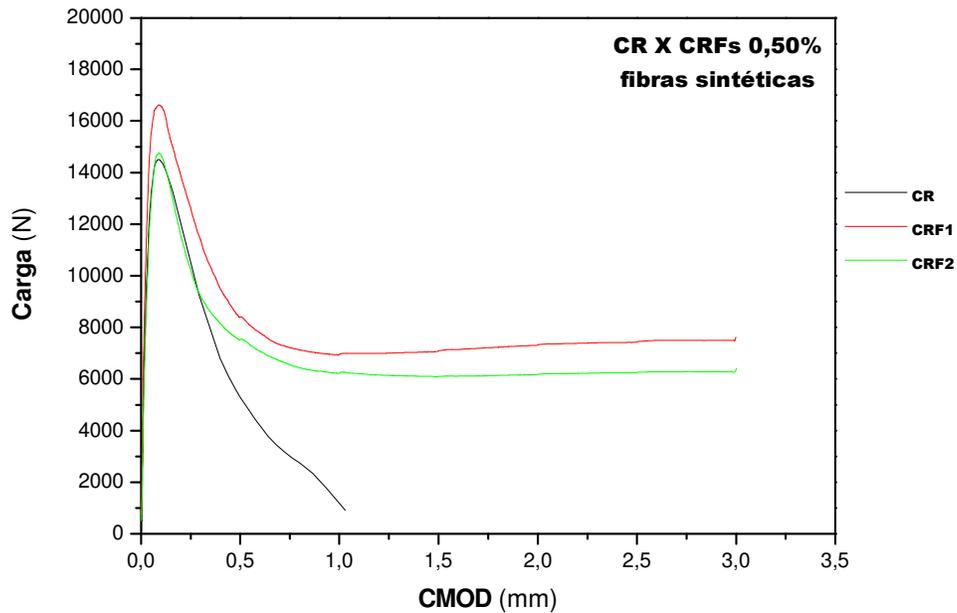


Figura 4.48 – Curvas carga monotônica – CMOD do CR e dos CRFs com fibras sintéticas com teor de fibras de 0,50%

No caso do CRF3, do CRF4 e do CRF5, reforçados com fibras metálicas se observa que para o teor de 0,25% não há diferença significativa de desempenho, ficando o CRF3 e o CRF5 num patamar de manutenção de carga após a ruptura da matriz de concreto em torno de 11000 N, enquanto que para o CRF4 em torno de 9000, conforme se observa na Figura 4.49. Para o teor de 0,38% se observa uma melhora significativa do desempenho do CRF3, aumentando para um patamar de 14000 N, enquanto que o CRF4, aumentou para um patamar de 10000 N e o CRF5 manteve seu patamar em torno de 9000N, conforme se observa na Figura 4.50. Para o teor de 0,50% a melhora significativa do CRF3 continua, atingindo um patamar médio de 24000N, enquanto que o CRF4 aumentou para um patamar de 14000 N e o CRF5 manteve seu patamar em torno de 9000N, conforme se observa na Figura 4.51.

Nota-se que os CRF3 e CRF4 apresentam melhora significativa de desempenho à medida que se aumentam os teores de fibras adicionadas, em especial o CRF3. Tal melhora de desempenho significativo já não ocorre com o CRF5.

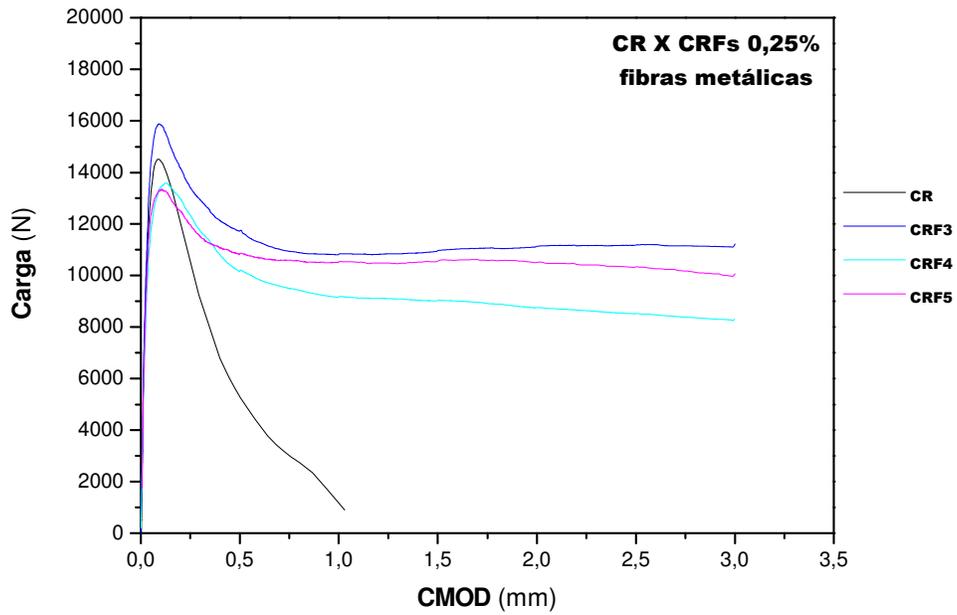


Figura 4.49 – Curvas carga monotônica – CMOD do CR e dos CRFs com fibras metálicas com teor de fibras de 0,25%

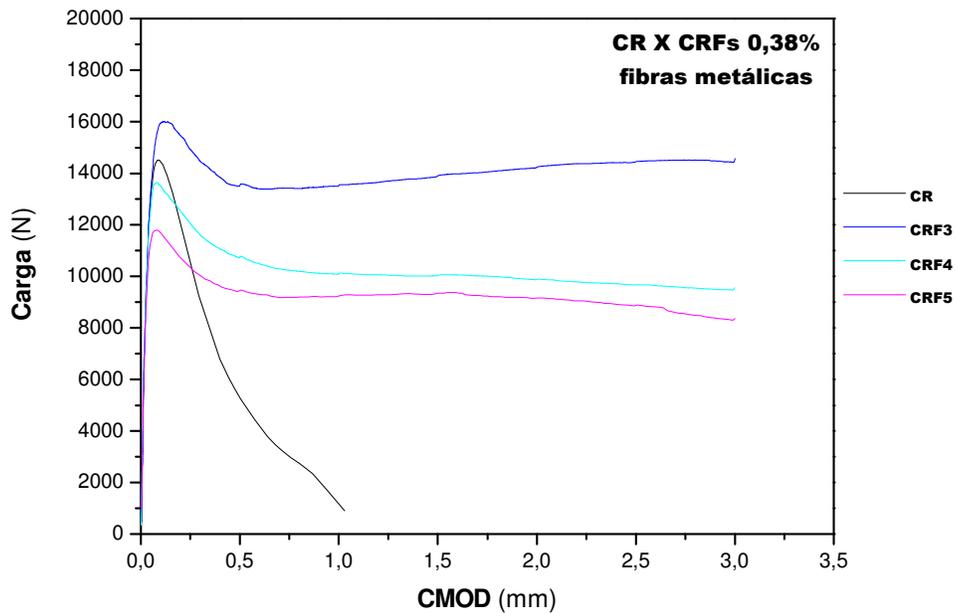


Figura 4.50 – Curvas carga monotônica – CMOD do CR e dos CRFs com fibras metálicas com teor de fibras de 0,38%

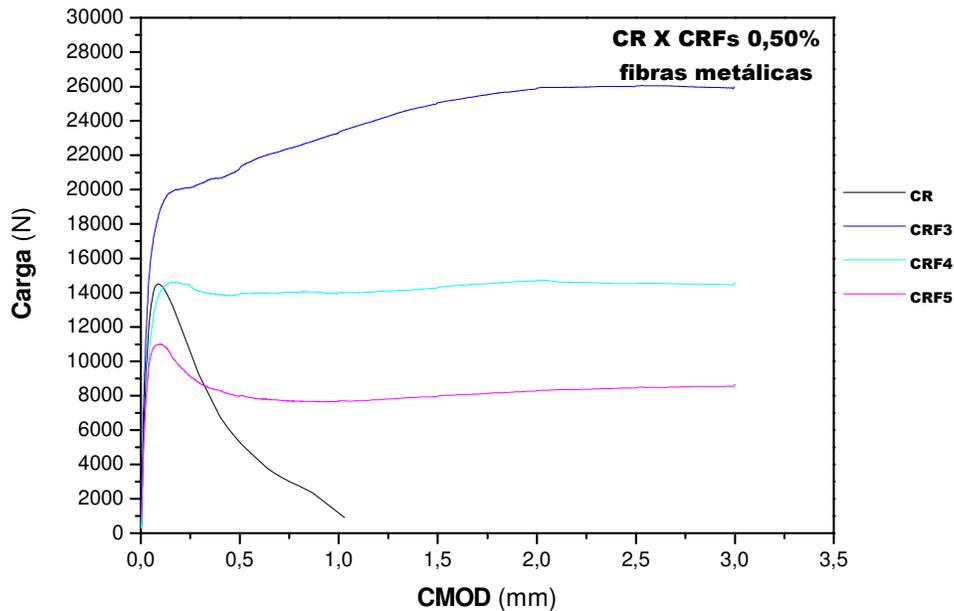


Figura 4.51 – Curvas carga monotônica – CMOD do CR e dos CRFs com fibras metálicas com teor de fibras de 0,50%

Pode-se observar que os CRFs, com fibras metálicas F3, F4 e F5, quando comparadas com os mesmos teores, apresentam maior tenacidade do que os CRFs com fibras sintéticas F1 e F2. Isso é notado nas curvas carga monotônica – CMOD, pela manutenção de carga após a ruptura da matriz de concreto dos CRFs com fibras metálicas, em patamares superiores aos verificados nos CRFs com fibras sintéticas. Essa melhor eficiência pode ser creditada a uma série de fatores, envolvendo a resistência à tração da fibra, o módulo de elasticidade e a ancoragem mecânica proporcionada pelas dobras nas extremidades das fibras metálicas, que contribuem de forma intensa, resistindo ao arrancamento da fibra. Por outro lado, as fibras sintéticas estudadas apresentam resistência à tração e módulo de elasticidade inferiores às das fibras metálicas, e sistema de ancoragem que depende, com maior intensidade, das ancoragens por adesão e atrito que se desenvolvem ao longo do comprimento da fibra, uma vez que ancoragem mecânica é baixa, devido ao módulo de elasticidade do material.

4.4.4 Comparação entre os CRFs com comprimentos de fibras similares

Da mesma forma como analisado para a influência do comprimento das fibras no desempenho à propagação de trinca por fadiga, na seqüência são apresentadas as curvas carga monotônica - CMOD segundo o comprimento da fibra, comparando, independentemente do material da fibra, o efeito de seu comprimento no desempenho à ação de carga monotônica.

As Figuras 4.52, 4.53 e 4.54 apresentam as curvas carga monotônica - CMOD dos CRF2 e CRF5, com comprimentos de fibras de 38 mm e 35 mm respectivamente, e teores de fibras adicionadas à matriz de 0,25%, 0,38% e 0,50%. As Figuras 4.55, 4.56 e 4.57 apresentam as curvas carga monotônica - CMOD dos CRF1, CRF3 e CRF4, com comprimentos de fibras de 54 mm, 60 mm e 60 mm respectivamente, e teores de fibras adicionadas à matriz de 0,25%, 0,38% e 0,50%.

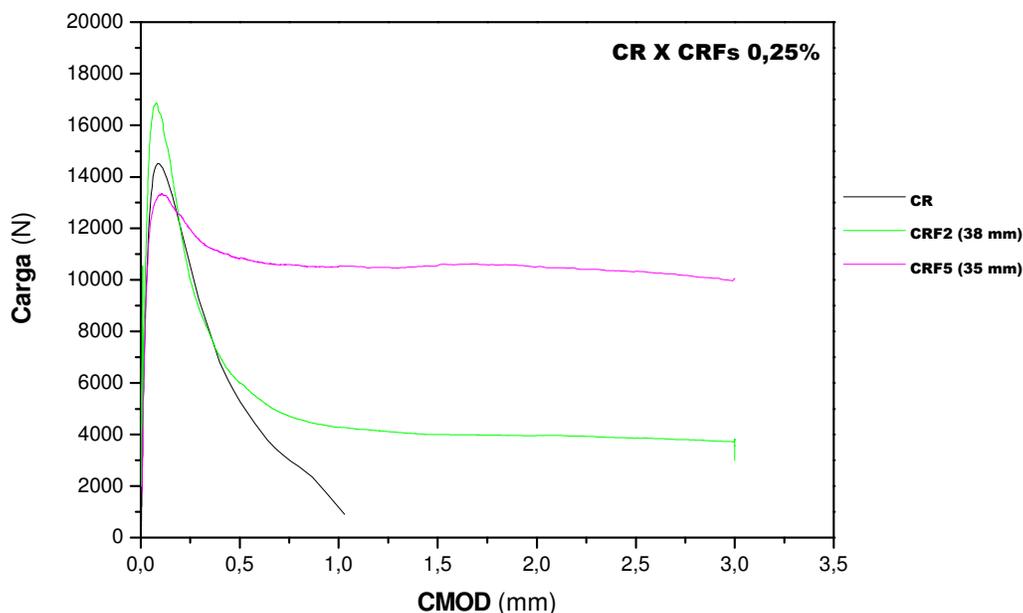


Figura 4.52 – Curvas carga monotônica - CMOD do CR e dos CRFs com fibras de comprimentos similares (sintéticas: 38 mm e metálicas: 35 mm), com teor de fibras de 0,25%

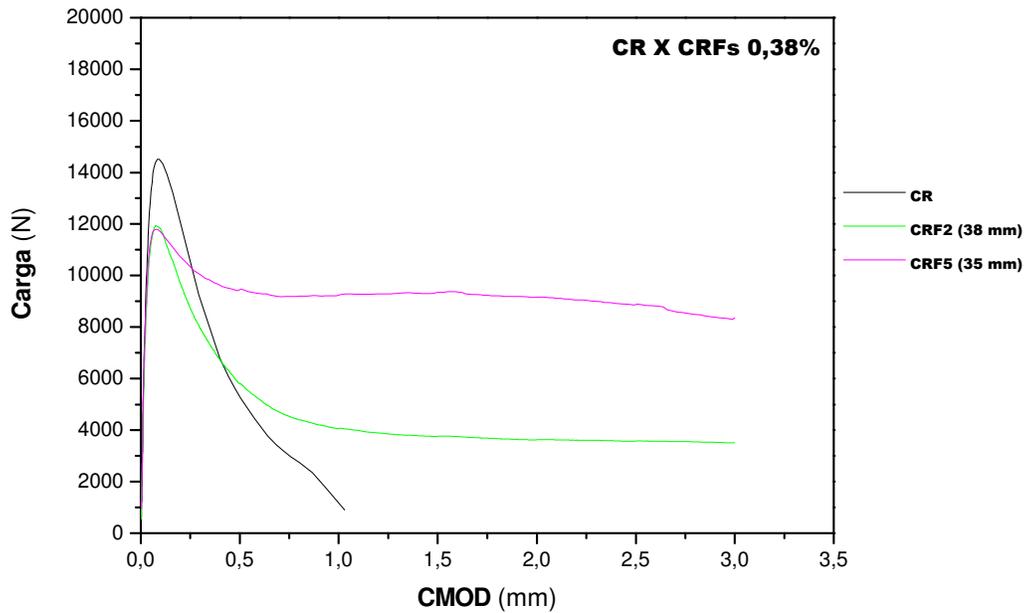


Figura 4.53 – Curvas carga monotônica - CMOD do CR e dos CRFs com fibras de comprimentos similares (sintéticas: 38 mm e metálicas: 35 mm), com teor de fibras de 0,38%

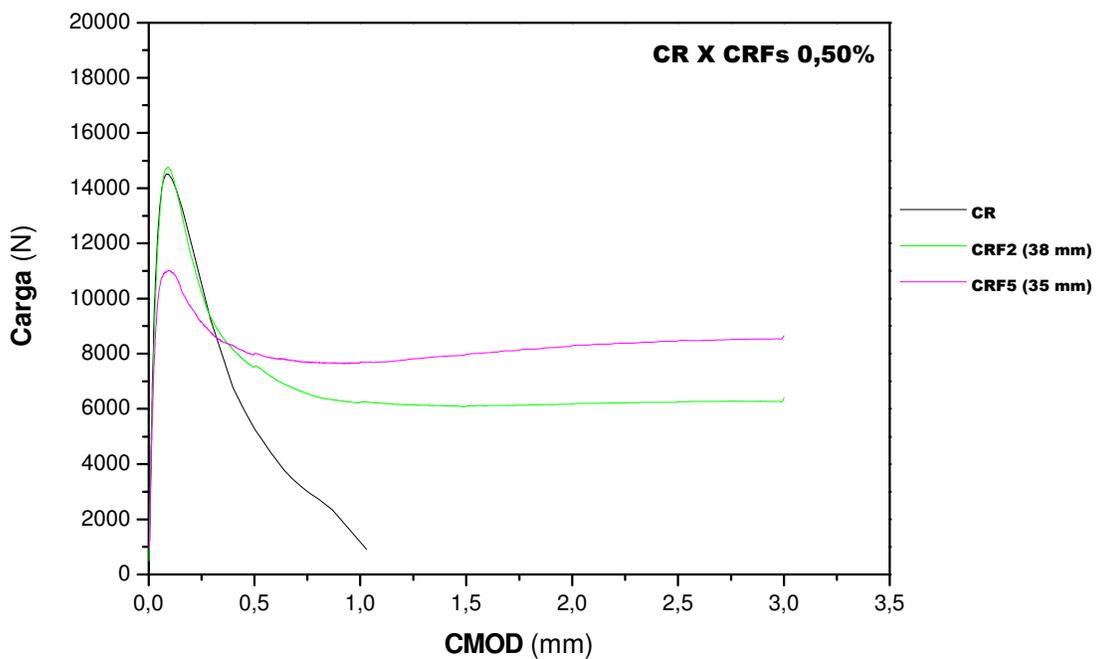


Figura 4.54 – Curvas carga monotônica - CMOD do CR e dos CRFs com fibras de comprimentos similares (sintéticas: 38 mm e metálicas: 35 mm), com teor de fibras de 0,50%

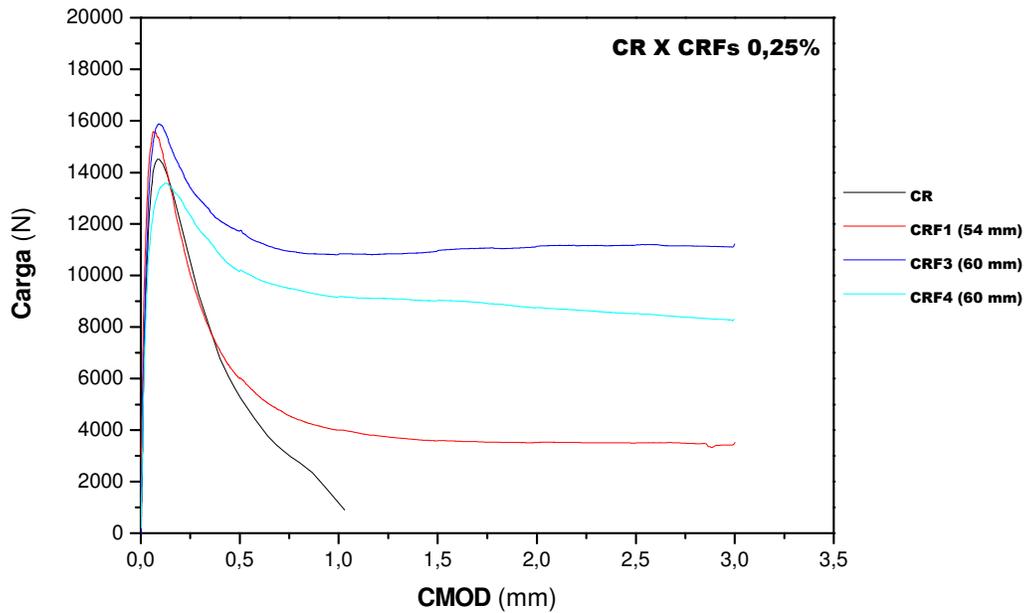


Figura 4.55 – Curvas carga monotônica - CMOD do CR e dos CRFs com fibras de comprimentos similares (sintéticas: 54 mm e metálicas: 60 mm), com teor de fibras de 0,25%

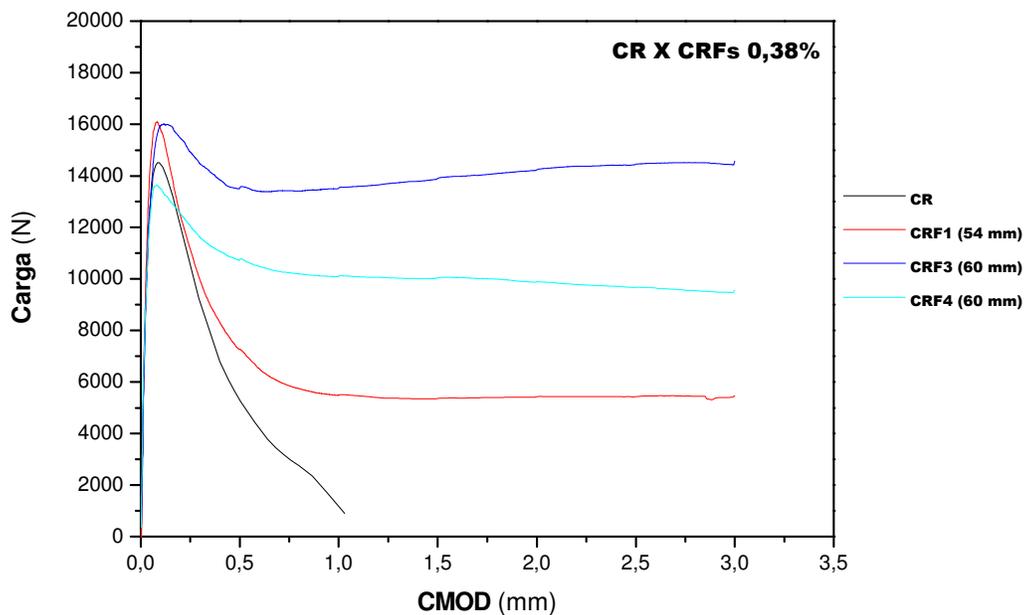


Figura 4.56 – Curvas carga monotônica - CMOD do CR e dos CRFs com fibras de comprimentos similares (sintéticas: 54 mm e metálicas: 60 mm), com teor de fibras de 0,38%

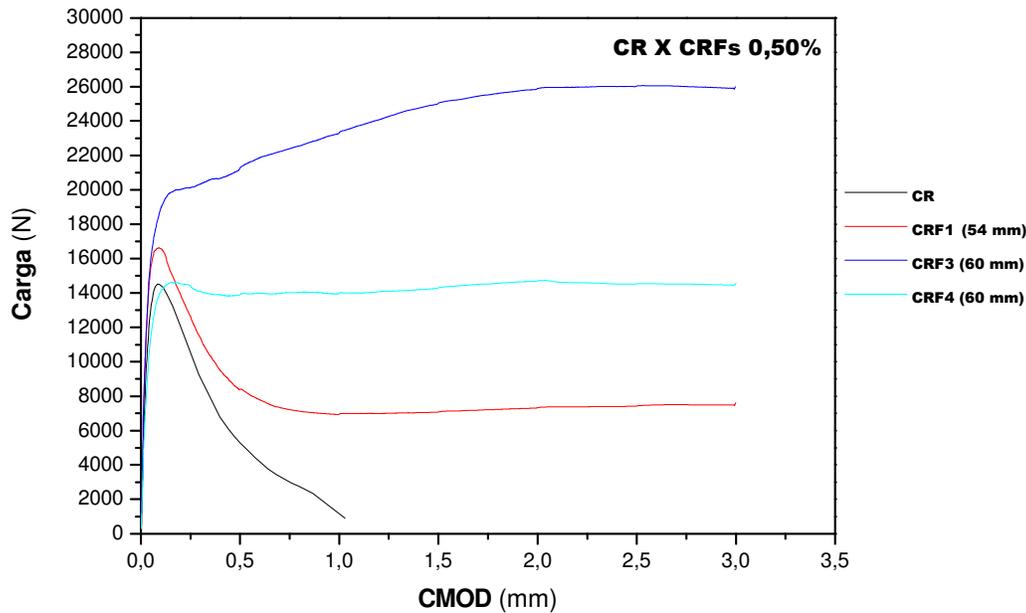


Figura 4.57 – Curvas carga monotônica - CMOD do CR e dos CRFs com fibras de comprimentos similares (sintéticas: 54 mm e metálicas: 60 mm), com teor de fibras de 0,50%

Como apontado por RITCHE (1999), no caso dos materiais cerâmicos, o mecanismo de avanço da ponta da trinca por fadiga é idêntico ao do avanço da ponta da trinca por carga monotônica. No entanto, o descarregamento cíclico promove acelerado crescimento da trinca pela degradação do efeito de escudo na parte anterior à ponta da trinca (mecanismo extrínseco). A tensão que solicita a aderência aumenta rapidamente com a abertura da trinca, durante o descolamento do agregado, seguindo um gradual decréscimo do atrito enquanto o arrancamento do agregado ocorre. Ambos os processos contribuem para a tenacidade. No entanto, uma maior energia é dissipada no atrito do arrancamento.

Assim, no caso dos CRFs com fibras metálicas sobre carregamento cíclico, há um decréscimo da capacidade de resistência da zona de escudo pela redução da aderência mecânica da fibra, uma vez que eles dependem de forma significativa da aderência mecânica. A melhoria de desempenho dos CRFs com fibras metálicas às ações monotônicas para baixos teores não se confirma quando solicitado à ações cíclicas, não se mostrando com alterações significativas no seu desempenho para os baixos teores, exceto o verificado para o CRF5.

Por outro lado, nos CRFs reforçados com fibras sintéticas, como as ancoragens por adesão e por atrito que ocorrem ao longo das fibras são mais significativas do que a ancoragem mecânica, e como a degradação da aderência sob ações cíclicas afeta mais a aderência mecânica do que as demais, há uma certa garantia de que os CRFs reforçados com fibras sintéticas se comportem quanto à propagação da trinca de forma muito parecidas quando submetidos às ações monotônica e cíclica, não havendo tanta disparidade entre as melhorias de desempenho.

Dessa forma, em que pese a proximidade de comportamento à propagação de trinca por fadiga entre os CRFs utilizados neste trabalho e apontadas anteriormente, no que se refere à tenacidade, há grandes diferenças entre os CRFs com fibras sintéticas e os CRFs com fibras metálicas, com significativa vantagem para os CRFs com fibras metálicas, quando se avalia o comportamento carga monotônica – CMOD, obtidos em corpos-de-prova prismáticos

4.5 Estudo macroscópico da seção fraturada do CR e dos CRFs

A Figura 4.58 mostra imagem obtida da seção de ruptura de um corpo-de-prova do CR submetido a carga cíclica, onde se observa o aspecto macroscópico da superfície.

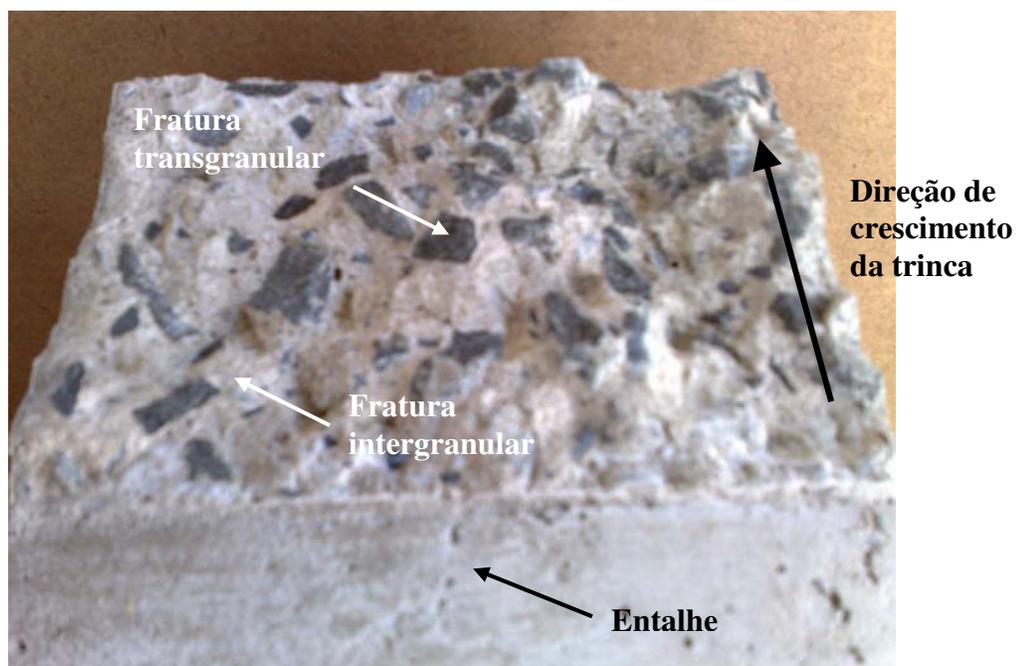


Figura 4.58 – Imagem da seção fraturada de corpo-de-prova de propagação de trinca por fadiga do CR

A Figura 4.59 mostra imagem obtida da seção de ruptura de um corpo-de-prova do CR submetido a carga monotônica, onde se observa o aspecto macroscópico da superfície.



Figura 4.59 – Imagem da seção fraturada de corpo-de-prova de carga monotônica - CMOD do CR

Observa-se pelas Figuras 4.58 e 4.59 que o aspecto macroscópico da seção fraturada do corpo-de-prova submetido a carga cíclica é o mesmo da seção fraturada do corpo-de-prova submetido a carga monotônica. Nota-se que a trinca caminha de forma intergranular, contornando o agregado graúdo em algumas posições da seção fraturada, e em alguns pontos a trinca é transgranular, caminhando através da ruptura do agregado graúdo.

Nas Figuras 4.60 e 4.61 são apresentadas as imagens da seção de fratura de corpos-de-prova dos CRF1 e CRF2, submetidos a carregamento cíclico, onde se observa a característica macroscópica de ruptura, com fratura intergranular e transgranular, mostrando-se de forma muito parecida com as seções de fratura do CR para carregamentos cíclico e monotônico, mostradas nas Figuras 4.58 e 4.59. Também se observa que as fibras sintéticas estão na maioria rompidas, rupturas essas provocadas pelo processo cíclico.

Outro ponto a se observar é que a seção de fratura mostra um relevo mais plano, muito próximo ao aspecto mostrado pela seção de ruptura do CR, tanto para carregamento cíclico como monotônico, indicando comportamento mais uniforme do material.



Figura 4.60 – Imagem da seção fraturada de corpo-de-prova de propagação de trinca por fadiga do CRF1 – 0,50%



Figura 4.61 – Imagem da seção fraturada de corpo-de-prova de propagação de trinca por fadiga do CRF2 – 0,50%

As Figuras 4.62, 4.63 e 4.64 mostram as imagens da seção fraturada de corpos-de-prova dos CRF3, CRF4 e CRF5, submetidos a carregamento cíclico, onde também se observa a característica macroscópica de ruptura, com fratura intergranular e transgranular, assim como apontado anteriormente para o CR e para os CRFs reforçados com fibras sintéticas, tanto para carregamento cíclico como para carregamento monotônico. Também se observa que as fibras metálicas não apresentam ruptura, em sua maioria, e suas extremidades estão retificadas, descaracterizando suas dobras, retificação essa provocada pelo arrancamento das fibras no processo cíclico.

No entanto, ao se observar macroscopicamente as superfícies de fratura do CRF3 e do CRF4, mostradas nas Figuras 4.62 e 4.63, em relação às superfícies de fratura do CRF1 e CRF2, mostradas nas Figuras 4.60 e 4.61, elas apresentam seus relevos mais “acidentados”, indicando comportamento menos uniforme do material à carga cíclica, quando comparadas ao CR e aos CRFs com fibras sintéticas. Tal fato pode estar ligado à menor quantidade de fibras por quilo dessas fibras.



Figura 4.62 – Imagem da seção fraturada de corpo-de-prova de propagação de trinca por fadiga do CRF3 – 0,38%



Figura 4.63 – Imagem da seção fraturada de corpo-de-prova de propagação de trinca por fadiga do CRF4 – 0,38%



Figura 4.64 – Imagem da seção fraturada de corpo-de-prova de propagação de trinca por fadiga do CRF5 – 0,38%

A Figura 4.64 mostra a imagem da seção fraturada de corpos-de-prova submetidos a carregamento cíclico do CRF5, onde se nota que sua superfície de fratura apresenta relevo menos acidentado em relação aos CRF3 e CRF4, indicando comportamento mais homogêneo à carga cíclica do que os CRF3 e CRF4. As fibras metálicas utilizadas no CRF5 apresentam quantidade de fibras por quilo em torno de 3 vezes mais do que as fibras metálicas F3 e F4.

As Figuras 4.65 e 4.66 mostram as imagens das seções fraturadas dos CFR1 e CRF2, submetidos a carregamento monotônico. Da mesma forma, como observado para carregamento cíclico, do ponto de vista macroscópico as seções de ruptura apresentam fratura intergranular e transgranular, com fibras rompidas e com sua superfície de fratura apresentando relevo mais plano do que os CRFs reforçados com fibras metálicas, indicando comportamento mais uniforme do material quando submetido a carregamento monotônico.



Figura 4.65 – Imagem da seção fraturada de corpo-de-prova de carga monotônica - CMOD do CRF1 0,38%



Figura 4.66 – Imagem da seção fraturada de corpo-de-prova de carga monotônica - CMOD do CRF2 0,38%

As Figuras 4.67, 4.68 e 4.69 mostram as imagens macroscópicas da seção fraturada dos CRF3, CRF4 e CRF5. Nela se observam também fraturas intergranular e transgranular, as fibras apresentam-se em sua maioria com suas extremidades retificadas, descaracterizando as dobras. Essa retificação é provocada pelo arrancamento das fibras, no caso de carregamento monotônico.



Figura 4.67 – Imagem da seção fraturada de corpo-de-prova de carga monotônica - CMOD do CRF3 0,38%



Figura 4.68 – Imagem da seção fraturada de corpo-de-prova de carga monotônica - CMOD do CRF4 0,38%



Figura 4.69 – Imagem da seção fraturada de corpo-de-prova de carga monotônica - CMOD do CRF5 0,38%

Nota-se também que, macroscopicamente as superfícies de fratura do CRF3, CRF4 e do CRF5 apresentam seus relevos mais “acidentados”, indicando comportamento menos uniforme do material quando é relativo a carregamento monotônico.

Capítulo 5

Conclusões e Sugestões para Próximos Trabalhos

5.1 Conclusões

Este trabalho teve como objetivo principal o estudo da influência dos tipos e teores de fibras no comportamento à propagação de trinca por fadiga de concretos reforçados com baixos teores de fibras ($\leq 0,5\%$), em relação ao concreto de resistência convencional, sem reforço com fibras. As características da matriz de concreto foram as mesmas do concreto de resistência convencional, sem reforço com fibras. Foram utilizados dois tipos de fibras sintéticas (polipropileno) e três tipos de fibras metálicas (aço), com três teores – dosagens para as fibras de polipropileno: 0,25% - 2,25 kg/m³, 0,38% - 3,5 kg/m³ e 0,50% - 4,5 kg/m³ e para as fibras de aço: 0,25% - 20 kg/m³, 0,38% - 30 kg/m³ e 0,50% - 40 kg/m³.

Dentro das condições estabelecidas para este trabalho e com base nos resultados experimentais obtidos, é possível apontar a seguir algumas conclusões importantes sobre a propagação de trinca por fadiga nos concretos reforçados com baixos teores de fibra, bem como de outros fatores que apresentam ligação com o assunto.

- 1) Na avaliação do desempenho à propagação de trinca por fadiga dos concretos reforçados com fibras sintéticas, o melhor resultado que se obteve quanto à resistência à propagação de trinca por fadiga ocorreu com a adição de 0,50% de fibras sintéticas de 54 mm, apresentando indicações de alteração no deslocamento e na inclinação da curva de propagação, que interferem nos parâmetros C_F e m_F da equação de Paris.
- 2) Na avaliação do desempenho à propagação de trinca por fadiga dos concretos reforçados com fibras metálicas, o melhor resultado que se obteve quanto à resistência à propagação de trinca por fadiga ocorreu com a adição de 0,50% de fibras de aço de 35 mm, apresentando indicações de alteração no deslocamento e na inclinação da curva de propagação. Os parâmetros C_F e m_F da equação de Paris indicam para esse caso que seus valores levam a um melhor desempenho quanto à propagação de trinca por fadiga, quando comparado com os demais concretos reforçados com fibras de aço e com o concreto reforçado com fibras sintéticas de 54 mm.
- 3) Também se pode concluir que os concretos reforçados com fibras metálicas de 60 mm apresentam desempenho similar ao concreto reforçado com fibras sintéticas de 54 mm para todos os teores estudados, quanto à propagação de trinca por fadiga. Por outro lado, o concreto reforçado com fibras sintéticas de 38 mm não se mostrou com capacidade de resistir à propagação de trinca por fadiga em relação ao concreto simples, para nenhum dos teores estudados.
- 4) Na análise de desempenho dos concretos reforçados com fibras sob ação de carga monotônica se observa que os três concretos reforçados com fibras metálicas apresentam aumento significativo da tenacidade, obtida pela manutenção de carga após a ruptura da matriz, em relação ao concreto simples e aos concretos reforçados com fibras sintéticas, ensaiados em corpos-de-prova prismáticos de seção quadrada. No entanto, quando se avalia a capacidade de resistência à propagação de trinca por fadiga, a resistência somente é maior para o caso da adição das fibras metálicas de 35 mm, que dentre as fibras metálicas apresentou menor tenacidade. Tal fato também vem ao encontro do apontado

por RITCHIE (1999) de que o descarregamento cíclico promove acelerado crescimento da trinca pela degradação do efeito de escudo na parte anterior à ponta da trinca (mecanismo extrínseco). Assim, essa degradação pode ocorrer para os CRFs com fibras metálicas, provavelmente proporcionada pela ancoragem mecânica das deformações nas extremidades das fibras que, se mostra favorável para tenacidade sob carregamento monotônico e desfavorável para resistir à propagação de trinca sob carregamento cíclico.

- 5) O teor de fibras também pode ser considerado importante para melhoria de resistência à propagação de trinca por fadiga e isso pôde ser observado nos resultados experimentais obtidos neste trabalho. Teores de 0,50% se mostraram como melhores, indicando que, quando se tem expectativa de que a resistência à fadiga deve ser considerada, é conveniente utilizar-se teor mínimo 0,50% para qualquer tipo de fibra.
- 6) Também pode-se apontar que, com adições de fibras de 0,50%, tanto para fibras metálicas como sintéticas, é possível aumentar a vida útil da estrutura, bem como aumentar o espaçamento de ações de manutenção necessárias à estrutura, nas aplicações estruturais em que ações cíclicas sejam atuantes.
- 7) Assim como apontado por RITCHIE (1999), o mecanismo de avanço da ponta da trinca por fadiga é macroscopicamente igual ao mecanismo de avanço por carga monotônica. Esse fato pôde ser constatado pela análise macroscópica da seção fraturada do concreto simples e dos concretos reforçados com fibras, cujas fraturas intergranular e transgranular se manifestaram da mesma forma para os dois tipos de carregamento.
- 8) A adição de fibras, como as utilizadas neste trabalho, interferem na superfície de fratura dos concretos. Nos concretos reforçados com fibras sintéticas, as superfícies de ruptura se mantêm com as mesmas características do concreto simples, apresentando um relevo mais plano, tanto para cargas cíclicas como para cargas monotônicas. Nos concretos reforçados com fibras metálicas, as superfícies de ruptura apresentam um relevo mais “acidentado” em relação ao concreto simples e aos concretos reforçados com fibras sintéticas, para as situações de cargas cíclicas e cargas monotônicas, com exceção para uma situação de

concreto reforçado com fibras metálicas (comprimento = 35 mm), que apresenta da ordem de três vezes mais fibras por quilo que as outras fibras de aço (comprimento = 60 mm), indicando que há influência do material e da quantidade de fibras por quilo no comportamento dos concretos reforçados com fibras.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

As investigações sobre fadiga em concretos reforçados com baixos teores de fibras não são muito exploradas. No entanto, esses teores são muito utilizados em estruturas submetidas a carregamentos cíclicos, como, por exemplo, os pavimentos. Assim, sugerem-se como trabalhos futuros:

- 1) Aprofundar os estudos sobre propagação de trinca por fadiga nos concretos reforçados com baixos teores de fibras, estudando o efeito da variação das matrizes de concreto no desempenho à propagação de trinca por fadiga;
- 2) Estudar os efeitos das ancoragens das fibras metálicas e sintéticas no comportamento dos concretos reforçados com fibras submetidos às cargas cíclica e monotônica, procurando estabelecer correlações entre os concretos reforçados com fibras;
- 3) Estudar o estabelecimento de parâmetros de projeto para aplicações em estruturas de concreto submetidas a carregamento cíclico.
- 4) Estudar o estabelecimento de critérios para previsão de vida útil, visando ações de manutenção das estruturas de concreto.

Referências Bibliográficas

ACCETTI, K. M.; PINHEIRO, L. M. Tipos de fibras e propriedades do concreto com fibras. In: 42º Congresso Brasileiro do Concreto, 2000, Fortaleza, Brasil. *Anais...* São Paulo: IBRACON, 2000.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI manual of concrete: State-of-the-art report on fiber reinforced concrete. (ACI 544.1R-82). ACI Committee 544, Detroit, USA: 1982.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *C1018*. Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading). Philadelphia 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *E 399*. Standard test method for plane-strain fracture toughness of metallic materials. Philadelphia 1983.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *E 606*. Standard practice for strain-controlled fatigue testing. Philadelphia 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *E 647*. Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates. Philadelphia 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *E-1823*. Standard terminology relating to fatigue and fracture testing. Philadelphia, 2005.

ANDERSON, T.L. *Fracture mechanics: fundamentals and applications*. 2.ed. Boca Raton: CRC Press, 1995, 688p.

ARMELIN, H.S. *Contribuição ao estudo do concreto projetado por via seca com fibras de aço destinado ao revestimento de túneis NATM*. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1992, 140p. Dissertação (Mestrado).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12142: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão em corpos de prova prismáticos: método de ensaio*. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8522: Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão*. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7222: Argamassa e Concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro, 2003.

BASTOS, P.S.S. *Análise experimental de dormentes de concreto protendido reforçados com fibras de aço*. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1999, 255p. Tese (Doutorado).

BATSON, G.; BALL, C.; BAILEY, L.; LANDERS, E.; HOOKS, J. Flexural fatigue strength of steel fiber reinforced concrete beams. *ACI Journal*, v.69, n.11, p.673-677, 1972.

- BAUER, L. A. F.; NORONHA, M. A. A.; BAUER, R. J. *Concreto armado com fibras*. Campinas: Concrelix Engenharia de Concreto, 1987. (Boletim n. 7).
- BENTUR, A.; MINDESS, S. *Fibre reinforced cementitious composites*. London e New York: Elsevier Applied Science, 1990.
- BRANCO, C. A. G. M. *Mecânica dos materiais*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1985. Cap. 14: Fadiga dos metais, p.903-1047.
- BRANCO, C. A. G. M. *Fadiga de estruturas soldadas*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1986. Cap. 2: Introdução ao estudo da fadiga, p.137-192.
- CACHIM, P. B. *Análise experimental e numérica do comportamento do betão estrutural sob ações de fadiga com aplicação a pavimentos*. Cidade do Porto: Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, 2004, 239p. Tese (Doutorado).
- CALLISTER Jr., W. D. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução*. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos S.A., 2002, 589p.
- CARNIO, M.A. *Análise em regime plástico de placas de concreto reforçado com fibras de aço sobre base elástica*. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil, Universidade de Campinas, 1998, 103p. Dissertação (Mestrado).
- CASANOVA, P.; ROSSI P.; SCHALLER, Analysis and design of steel fiber reinforced concrete beams. *ACI Structural Journal*, v.94, n.5, p.595-602, 1997.
- CECCATO, M. R., *Estudo da trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras de aço*. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1998. 98p. Dissertação (Mestrado).
- CERVO, T. C. *Estudo da resistência à fadiga de concretos de cimento portland para pavimentação*. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2004. 220p. Tese (Doutorado).

- CHAMA NETO, P. J. *Avaliação de desempenho de tubos de concreto reforçados com fibras de aço*. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2002. 87p. Dissertação (Mestrado).
- DIETER, G. E. *Mechanical metallurgy*. SI Metric Edition. McGraw-Hill, 1988.
- ENTE NAZIONALE ITALIANO DI UNIFICAZIONE *UNI 11039-1*: Calcestruzzo rinforzato com fibre de acciaio – Definizioni, cassificazione e designazione. Milano, 2003.
- FIGUEIREDO, A. D. de. *Parâmetros de controle e dosagem do concreto projetado com fibras de aço*. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1997. 342p. Tese (Doutorado).
- GAVA, G. P. *Análise teórica-experimental do comportamento à flexão de vigas de concreto reforçado com fibras de aço*. Florianópolis: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2006. 277p. Tese (Doutorado).
- GDOUTOS, E. E. *Fracture mechanics: an introduction*. In: Solid mechanics and its applications, v. 14. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993.
- GUIMARÃES, A. E. P. *Análise de pilares de concreto de alta resistência com adição de fibras metálicas submetidos à compressão centrada*. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1999. 145p. Tese (Doutorado).
- GUIMARÃES, M. C. N. *Análise dos critérios para quantificação da tenacidade dos concretos reforçados com fibras de aço*. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2001. 192p. Dissertação (Mestrado).
- HERTZBERG, R. W. *Deformation and fracture mechanics of engineering materials*. 4. ed. New York: John Wiley & Sons, 1996. Chapter 13: Fatigue crack propagation, p.591-698.
- HILSDORF, H.K.; KESLER, C.E. Fatigue strength of concrete under varying flexural stresses. *ACI Proceedings*, v. 63, n. 10, p.1059-76, 1966.

- HSU, T. T. C. Fatigue of plain concrete. *ACI Journal*, p.292-305, July-Aug 1981.
- JOHNSTON, C.D.; ZEMP, R.W. Flexural fatigue performance of steel fiber reinforced concrete – Influence of fiber content, aspect ratio and type. *ACI Materials Journal*, v. 88, n.4, p.374-83, 1991.
- JUN, Z.; STANG, H. Fatigue performance in flexure of fiber reinforced concrete. *ACI Materials Journal*, v.95, n.1, p.58-67, 1998.
- LI, V. C.; MATSUMOTO, T. Fatigue crack growth analysis of fiber reinforced concrete with effect of interfacial bond degradation. *Cemente and Concrete Composites*, v.20, p.339-351, 1998.
- LOPES, J. T. B. *Influência da presença de fases frágeis e da temperatura nas propriedades de propagação de trinca por fadiga do aço inoxidável duplex UNS S31803*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas, 2006. 155p. Tese (Doutorado).
- LOU, J.; BHALERAO, K.; SOBOYEJO, A. B. O. An investigation of the effects of mix strength on the fracture and fatigue behavior of concrete mortar. *Journal of Materials Science*, v.41, n.21, p.6973-6977, 2006.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008, 573p.
- MURDOCK, J. W.; KESLER, C.E. Effect of range of stress on fatigue strength of plain concrete beams. *ACI Proceedings*, v.30, n.2, p.221-231, 1958.
- NAAMAN, A.; HAMMOUND, H. Fatigue characteristics of high performance fiber-reinforced concrete. *Cement & Concrete Composites*, v.20, n.5, p. 353-63, 1998.
- NAGABHUSHANAM, M.; RAMAKRISHNAN, V.; VONDRAN, G. Fatigue strength of fibrillated polypropylene fiber reinforced concretes. *Transportation Research Record*, n.1226, p.36-47, 1989.

- NANNI, A. Pseudoductility of fiber reinforced concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v.3, n.1, p.78–90, 1991.
- NUNES, N. L. *Estudo da influência da geometria da fibra de aço na tenacidade à flexão dos compósitos de matriz de concreto*. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1998. 193p. Dissertação (Mestrado)
- OLIVEIRA, P. L.; PINHEIRO, L. M. Análise de critérios de fadiga para pavimentos de concreto. In: 42º Congresso Brasileiro do Concreto, 2000, Fortaleza, Brasil. *Anais...* São Paulo: IBRACON, 2000.
- PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. *PCA/66*. Thickness design for concrete pavements. Chicago, 1966.
- PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. *PCA/84*. Thickness design for concrete highway and street pavements. Chicago, 1984.
- PARIS, P.C. ERDOGAN, F. A critical analysis of crack propagation laws. *Journal of Basic Engineering*, v.85, p. 528-534, 1963.
- PINTO JR, N. O.; MORAES, A. A. Concreto reforçado com fibras de aço CRFA. In: 38ª Reunião do IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto, 1996, Ribeirão Preto, Brasil. *Anais...* São Paulo: IBRACON, 1996.
- RAMAKRISHNAN V.; WU, G.Y.; HOSALLI G., Flexural fatigue strength, endurance limit and impact strength of fiber reinforced concretes. *Transportation Research Record*, n. 1226, p.17-24, 1989.
- RAMAKRISHNAN V.; LOKVIK, B.J. Flexural fatigues strength of fiber reinforced concrete. In: NAAMAN, A. E.; REINHARDT, H. W. *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*. London: E&FN Spon, 1992. p.271-285
- RAMSAMOOJ, D. V. Analytical model for fatigue crack propagation in concrete. *Journal of Testing and Evaluation*, v.30, n.4, p.340-349, 2002.

RITCHIE, R. O. Mechanisms of fatigue-crack propagation in ductile and brittle solids. *International Journal of Fracture*, v.100, p.55-83, 1999.

SHAH, S. P.; SWARTZ, S. E.; OUYANG, G. *Fracture Mechanics of Concrete: applications of fracture mechanics to concrete, rock, and other quasi-brittle material*. New York: John Wiley & Sons, 1995.

SHING, S. P.; MOHAMMADI, Y.; MADAN, S. K. Flexural fatigue strength of steel fibrous concrete containing mixed steel fibres. *Journal of Zhejiang University*, v.7, p.1329-1335, 2006.

SHINGLEY, J. E. *Mechanical Engineering Design*. 7. ed. Mc-Graw Hill, 1988

STANG, H.; JUN, Z. Experimental determination of fatigue crack growth in fiber reinforced concrete. In: SILVA GOMZEZ *et al. Recent Advances in Experimental Mechanics*, 1994. p.1347-1352.

TEZUKA, Y. *Concreto armado com fibras*. São Paulo: ABCP, 1987.

WEI, S.; JIANMING, G.; YUN Y. Study of the fatigue performance and damage mechanism of steel fiber reinforced concrete. *ACI Materials Journal*, v.93, n.3, p.206-211, 1999.

WÖHLER, A. Versuche über die Festigkeit der Eisenbahnwagenachsen. *Zeitschrift für Bauwesen* 10; English Summary (1867). *Engineering* 4, 160-1, 1860.