



Eduardo de Figueiredo Campello

**Comportamento em fadiga de compósitos cimentícios
reforçados por polpa de bambu**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica do Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio.

Orientador: Fathi Aref Ibrahim Darwish
Co-orientador: Marcos Venicius Soares Pereira
Rio de Janeiro,

dezembro de 2006



Eduardo de Figueiredo Campello

Comportamento em fadiga de compósitos cimentícios reforçados por polpa de bambu

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica do Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Fathi Aref Ibrahim Darwish

Orientador

Universidade Federal Fluminense – UFF

Prof. Marcos Venicius Soares Pereira

Co-orientador

Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia – PUC-Rio

Prof. Luiz Carlos Mendes

Universidade Federal Fluminense – UFF

Profa. Cheila Gonçalves Mothé

Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial de Pós-Graduação do Centro Técnico Científico da
PUC-Rio

Rio de Janeiro, 22 de dezembro de 2006

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

Eduardo de Figueiredo Campello

Graduado em Engenharia Metalúrgica, em 2003 pela PUC-Rio.

Ficha Catalográfica

Campello, Eduardo de Figueiredo

Comportamento em fadiga de compósitos cimentícios reforçados por polpa de bambu / Eduardo de Figueiredo Campello ; orientador: Fathi Aref Ibrahim Darwish ; co-orientador: Marcos Venícius Soares Pereira. – 2006.

93 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais e Metalurgia)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

Inclui bibliografia

1. Ciência dos Materiais e Metalurgia – Teses. 2. Comportamento em fadiga. 3. Matriz cimentícia. 4. Polpa de bambu. 5. Compósitos fibrosos. 6. Fractografia. I. Darwish, Fathi Aref Ibrahim. II. Pereira, Marcos Venicius Soares. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia. VI. Título.

CDD: 669

A todos aqueles que me apoiaram durante a minha árdua caminhada, muito obrigado...

“ A alegria está na luta, na tentativa, no sofrimento envolvido. Não na vitória propriamente dita” (Mahatma Gandhi)

Agradecimentos

Ao Prof Fathi Darwish por não medir esforços para a execução deste trabalho.

Ao Prof Marcos Venícius Soares Pereira por sua orientação e amizade durante toda a minha caminhada no curso.

Ao Prof. Khosrow Ghavami por permitir o uso de seu laboratório para a confecção dos corpos de prova.

A professora Cheila Gonçalves Mothé, por suas contribuições que permitiram melhorar este trabalho.

As amizades que fiz na PUC que tanto me apoiaram nos momentos difíceis, em especial ao Marcos Cotrim Serpa, Victor Surerus Leal Costa e Yoanka Galcerón Chacon.

Aos Funcionários dos laboratórios onde foram executadas as etapas experimentais. No LEM: José Nilson, Euclides, Evandro e Haroldo. No ITUC: Luciano, Bira, Roberto e Jorge. No laboratório de Metalografia ao Heitor.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

Resumo

Campello, Eduardo de Figueiredo; Darwish, Fathi Aref Ibrahim, **Comportamento em fadiga de compósitos cimentícios reforçados por polpa de bambu**. PUC-Rio, 2006. 93p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A utilização de materiais de construção civil a base de cimento reforçado com fibras vem aumentando rapidamente nos últimos anos. No Brasil um vasto programa experimental para avaliar o comportamento mecânico desses materiais através de ensaios de flexão monotônicos e de compressão, vem sendo desenvolvidos na PUC/RIO desde 1979. Este trabalho procura dar continuidade a essa linha de pesquisa, sendo o primeiro a estudar o comportamento em fadiga de compósitos cimentícios reforçados com polpa de bambu, através de curvas de vida-fadiga S-N e da cinética de crescimento de trincas. As curvas S-N foram levantadas para compósitos entalhados e não entalhados, contendo 6% em massa de polpa em relação a massa de cimento. Essas curvas foram modeladas, com base nas propriedades mecânicas básicas levantadas nos ensaios de compressão e flexão. Com o objetivo de verificar a aplicabilidade da lei de Paris à cinética de crescimento de trincas de fadiga nesses compósitos, foi levantada a relação entre o comprimento da trinca a e o número de ciclos N durante a propagação estável da mesma, adotando-se teores de reforço de 6 e 14% em relação a massa de cimento. Finalmente as superfícies de fratura foram avaliadas por meio de microscópio eletrônico de varredura.

Palavras-chave

Comportamento em fadiga; matriz cimentícia; polpa de bambu; compósitos fibrosos; análise fractográfica.

Abstract

Campello, Eduardo de Figueiredo; Darwish, Fathi Aref Ibrahim **Fatigue behavior of cementitious composites reinforced by bamboo pulp**. PUC-Rio, 2006. 93p. MSc Dissertaion - Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The use of fiber reinforced cementitious composites as construction materials in civil engineering has rapidly grown in the last few years. In Brasil, a large experimental program for evaluating the mechanical behavior of these materials has been developed in PUC-RIO since 1979. The present study has the purpose of evaluating the fatigue behavior of cementitious composites by means of determining the S-N curves for notched and unnotched specimens. The fatigue curves were modeled using basic mechanical properties determined by means of compression and slow bend tests. With the purpose of verifying the applicability of Paris law to the fatigue crack growth kinetics, the crack length was determined as a function of the number of cycles N during stable crack propagation, for composites containing 6% and 14% weight percentage of bamboo pulp relative to the weight of cement. Finally, the fracture surface was analyzed by means of scanning electron microscopy.

Palavras-chave

Fatigue behavior; cementitious matrix; bamboo pulp; fiber composites; fractography

Sumário

1 Introdução	13
2 Revisão Bibliográfica	17
2.1. Utilização de fibras vegetais em compósitos	17
2.2. Fibras vegetais e seu uso na construção civil	21
2.2.1. Polpas obtidas a partir de fibras vegetais	23
2.3. Regra das Misturas	24
2.4. Fatores de eficiência relacionados ao comprimento e orientação das fibras	26
2.4.1. Modelos para fibras curtas ou particuladas	28
2.4.2. Influência das fibras no comportamento dos compósitos	29
2.4.3. Interações mecânicas entre fibras e a matriz cimentícia	30
2.4.4. Interações químicas entre fibras e matriz cimentícia	31
2.5. Comportamento em compressão de compósitos cimentícios	32
2.6. Comportamento em flexão de compósitos cimentícios	33
2.6.1. Comportamento em flexão de compósitos com e sem descontinuidades	35
2.7. Mecânica da fratura e sua aplicação em componentes estruturais	37
2.7.1. Fator de Intensidade de Tensões	39
2.8. Fadiga	40
2.8.1. Fatores que afetam a resistência à fadiga	43
2.8.1.1 Geometria do corpo de prova	45
2.8.1.2 Acabamento superficial	45
2.8.2. Curvas de Fadiga	46
2.8.3. Modelagem das curvas de Fadiga de alto ciclo	47
2.9. Propagação de trincas em carregamentos de amplitude constante	48
2.10. Determinação das curvas da/dN versus ΔK	49
3 Procedimento Experimental	52
3.1. Fabricação dos compósitos	52

3.1.1. Dispersão da polpa seca	52
3.1.2. Moldagem das placas de fibrocimento	53
3.1.3. Moldagem dos corpos de prova cilíndricos	55
3.1.4. Moldagem dos corpos de prova para ensaios de flexão	56
3.2. Ensaios mecânicos – Compressão	57
3.2.1. Ensaios de Flexão em corpos de prova não entalhados	58
3.2.2. Ensaios de flexão em corpos de prova entalhados	59
3.2.3. Ensaio de Fadiga	61
3.2.4. Ensaio de crescimento de trinca	62
3.3. Determinação das curvas da/dN versus ΔK	62
3.4. Análise Fractográfica e microestrutural	63
4 Resultados e Discussão	64
4.1. Ensaios de Compressão	64
4.2. Ensaios de Flexão	67
4.3. Ensaios de Fadiga – Levantamento de curvas S-N	71
4.3.1. Modelagem das curvas S-N	76
4.4. Cinética de crescimento de trincas de fadiga	77
4.5. Análise fractográfica e microestrutural	85
5 Conclusões	88
5.1 Propostas para trabalhos futuros	89
6 Referências Bibliográficas	90

Lista de figuras

Figura 2.1 – Esquema da estrutura de uma fibra de Madeira (Smook, 1989)	21
Figura 2.2 – Modelo de crescimento de trinca em compósito com fibras (Chawla, 1987)	30
Figura 2.3 – Viga carregada em flexão de três pontos	36
Figura 2.4 – Esquema que apresenta os parâmetros básicos de um ensaio de fadiga	44
Figura 2.5 – Exemplo de curva da/dN versus ΔK	50
Figura 3.1 – Polpa de bambu	53
Figura 3.2 – Dispersão da polpa	53
Figura 3.3 – Bomba de vácuo e câmara de moldagem	54
Figura 3.4 – Placa de fibrocimento	54
Figura 3.5 – Molde cilíndrico	55
Figura 3.6 – Prensagem do compósito	55
Figura 3.7 – Molde para a fabricação dos corpos de prova entalhados	56
Figura 3.8 – Punção utilizado na compactação dos corpos de prova	57
Figura 3.9 – Esquema dos corpos de prova utilizados nos ensaios de flexão	57
Figura 3.10 – Ensaio de flexão em corpo de prova não entalhado	59
Figura 3.11 – Exemplo para determinação do módulo de elasticidade em flexão (Dos Anjos, 2002)	60
Figura 3.12 – Ensaio de flexão em corpo de prova com entalhe	60
Figura 4.1 – Variação da deformação com a tensão para o compósito CPB6SR	65
Figura 4.2 – Variação da deformação com a tensão para o compósito CPB14SR	65
Figura 4.3 – Esquema típico de um corpo de prova ensaiado em compressão	66

Figura 4.4 – Diagrama típico para compósito não entalhado com 6% em peso de polpa	67
Figura 4.5 – Diagrama típico para compósito entalhado com 6% em peso de polpa	67
Figura 4.6 - Diagrama típico para compósito entalhado com 14% em peso de polpa	68
Figura 4.7 – Superfície de corpo de prova de 14% de reforço	70
Figura 4.8 – Curva σ_a -N para corpos de prova não entalhados de 6% de polpa	73
Figura 4.9 – Curva σ_a -N para corpos de prova entalhados com 6% de polpa	75
Figura 4.10 – Curva σ_a -N para compósito suaves com 6% de reforço	76
Figura 4.11 – Curva $a \times N$ para o compósito de 6% de reforço	78
Figura 4.12 – Curva $a \times N$ para o compósito de 14% de reforço	79
Figura 4.13 – Diagrama representativo da cinética de crescimento de trincas de fadiga para o compósito de 6%	81
Figura 4.14 Diagrama representativo da cinética de crescimento de trincas de fadiga para o compósito de 14%	82
Figura 4.15 - Diagrama representativo do crescimento da trinca de fadiga para o compósito entalhado de 6%	83
Figura 4.16 - Diagrama representativo do crescimento da trinca de fadiga para o compósito entalhado de 14%	84
Figura 4.17 – Esquema apresentando a forma de propagação da trinca nos compósitos de 6% (à esquerda) e no de 14%	84
Figura 4.18 – Distribuição das fibras na superfície de fratura do CPB6SR	85
Figura 4.19 – Distribuição das fibras na superfície de fratura do CPB14SR	86
Figura 4.20 - Aspecto das fibras rompidas após os ensaios de flexão no CPB6SR	86
Figura 4.21 - Esquema exemplificando a presença de pequenas incrustações na superfície das fibras sem refino	87

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Produção mundial de placas de fibrocimento (milhões de m ² /ano) (Heinricks et al, 2000).	19
Tabela 2.2 – Relação entre a energia de produção por unidade de tensão (Ghavami, 1992).	22
Tabela 2.3 – Relação entre a resistência à tração e o peso específico (Ghavami, 1992).	23
Tabela 2.4 - Fatores de eficiência em função da orientação das fibras (Fujiyama, 1997).	27
Tabela 2.5 – Modelo para determinação das características mecânicas básicas de compósitos com distribuição aleatória de fibras (Cox, 1962)	28
Tabela 3.1 – Cargas utilizadas no ensaio cíclico.	61
Tabela 4.1 – Valores dos limites de resistência à compressão, módulo de elasticidade e razão de Poisson para os compósitos.	66
Tabela 4.2 – Valores médios do módulo de elasticidade, carga última e tensão máxima para o compósito de 6% de polpa sem entalhe.	69
Tabela 4.3 – Valores da carga última levantados para os corpos de prova entalhados de 14% de reforço.	70
Tabela 4.4 – Número de ciclos para falha em função da amplitude de carga para compósitos de 6% de reforço sem entalhe.	72
Tabela 4.5 – Número de ciclos para falha em função da amplitude de carga para compósitos de 6% de reforço entalhados.	74
Tabela 4.6 – Dados referentes ao crescimento de trincas de fadiga para compósito de 6% de reforço	78
Tabela 4.7 – Dados referentes ao crescimento de trincas de fadiga para compósitos de 14% de reforço	79
Tabela 4.8 – Valores de da/dN versus ΔK para o compósito de 6% de reforço.	81
Tabela 4.9 – Valores de da/dN versus ΔK para o compósito de 14% de reforço.	82
Tabela 4.10 – Valores das constantes C e m para as microestruturas	83