



Janaína Brescansin

**Comportamento à Fratura de Compósitos de Matriz
Cimentícia Reforçada com Polpa de Bambu.**

Dissertação de Mestrado

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

Orientadores: Fathi Aref Ibrahim Darwish
Khosrow Ghavami

Rio de Janeiro, fevereiro de 2003.

Janaína Brescansin

Comportamento à Fratura de Compósitos de Matriz Cimentícia Reforçada com Polpa de Bambu.

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

Prof. Fathi Aref Ibrahim Darwish

Orientador

Departamento de Ciência dos Materiais e
Metalurgia - PUC-Rio

Prof. Khosrow Ghavami

Co-Orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Marcos Venícius Pereira

Departamento de Ciência dos Materiais e
Metalurgia - PUC-Rio

Prof. Clelio Thaumaturgo

Instituto Militar de Engenharia - IME

Prof. Felipe José da Silva

Instituto Militar de Engenharia - IME

Prof. Ney Augusto Dumont

Coordenador Setorial do Centro Técnico
Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 18 de fevereiro de 2003.

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

Janaína Brescansin

Graduou-se em Engenharia Civil na UDESC - Joinville (Universidade do Estado de Santa Catarina) em 2001.

Ficha Catalográfica

Brescansin, Janaína

Comportamento à Fratura de Compósitos de Matriz Cimentícia Reforçada com Polpa de Bambu/ Janaína Brescansin; orientadores: Fathi Aref Ibrahim Darwish, Khosrow Ghavami. Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, 2002.

[12], 72 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado) - Pontifícia universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia.

Incluí referências bibliográficas.

1. Ciência dos materiais e metalurgia – Teses. 2. Compósitos fibrosos. 3. Matriz cimentícia. 4. Polpa de bambu. 5. Comportamento à fratura. 6. Integral J. 7. Análise fractográfica. I. Darwish, Fathi Aref Ibrahim. II. Ghavami, Khosrow. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia. IV. Título.

CDD: 669

"...por onde for quero ser seu par...."

Anderson obrigada por ter sido meu par.

Agradecimentos

Ao Professor Fathi pela dedicação, pelo bom humor, e principalmente por ter se mostrado um grande amigo nos momentos difíceis.

Ao Professor Ghavami pela confiança e por não medir esforços para a execução deste trabalho.

Esse trabalho afastou-me ainda mais de casa, mas o amor e apoio dos meus pais, Antonio e Maria Brescansin, e dos meus irmãos, Ricardo e Janieli foi incondicional. As cartas, os telefonemas e os e-mails trouxeram-me alegria, boas recordações, e ânimo para continuar. Dedico este trabalho à vocês.

Aos amigos feitos aqui no departamento, principalmente a Ana Luiza e Mônica por tornarem esta caminhada mais agradável.

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 CETEM: Otávio; no Laboratório de Metalografia; ao Marcelo e ao Paulão o mestre das fotografias. Meu muito obrigada.

Ao CNPq e a FAPERJ pelo apoio financeiro.

Resumo

Brescansin, Janaína. Comportamento à Fratura de Compósitos de Matriz Cimentícia Reforçada com Polpa de Bambu. . Rio de Janeiro, 2003. 84p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O uso de todos os tipos de amianto na construção civil tem diminuído drasticamente devido a problemas sérios de saúde associados a sua manipulação. De fato é previsto banir totalmente o seu uso, dentro de um curto espaço de tempo, nos países desenvolvidos bem como nos em desenvolvimento. Na necessidade de se encontrar um substituto adequado para o amianto, tem-se pesquisado compósitos de argamassa reforçada com fibras vegetais e polpas celulósicas. Devido ao processo de polpação, que remove as impurezas não celulósicas, como a lignina e a hemicelulose, diminuindo o ataque às fibras, sem a necessidade de recorrer a modificações na matriz cimentícia, as polpas celulósicas podem ser o substituto ideal para o amianto.

Assim sendo, o principal objetivo desta dissertação é determinar experimentalmente as características mecânicas e os parâmetros de fratura de compósitos de matriz cimentícia reforçada por polpa de bambu refinada e sem refino. As polpas celulósicas foram utilizadas nas porcentagens de 8 e 14% em relação à massa do cimento, porcentagens estas que, conforme a literatura, são associadas à otimização da energia absorvida no ensaio de flexão.

A avaliação do comportamento mecânico dos compósitos considerados neste trabalho foi realizada através de ensaios de compressão e impacto, bem como de flexão em três pontos em espécimes não entalhados e em outros contendo entalhes de raios de curvatura diferentes. Propriedades mecânicas, tais como módulo de elasticidade, resistência à compressão, ao impacto e à flexão, bem como integral J na carga máxima, são apresentadas e discutidas em termos de aspectos microestruturais e fractográficos dos corpos de prova ensaiados.

Palavras-chave

Comportamento à Fratura; Integral J; Análise Fractográfica; Compósitos Fibrosos; Matriz Cimentícia; Polpa de Bambu.

Abstract

Brescansin, Janaina. Fracture Behavior of Cementitious Matrix Composites Reinforced by Bamboo Pulp. Rio de Janeiro, 2003. 84p. MSc Dissertation - Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

As handling and manipulation of asbestos pose grave health hazards, its use in civil construction has been drastically dwindling and will in fact be completely prohibited, in a few years, in developed countries. With the need arising to find an adequate substitute, vegetable fibers and cellulosic pulps have been considered to be viable alternatives. Taking into account the fact that the process for pulp production entails the removal of impurities, such as lignin and hemicellulose, cellulosic pulps seem to be the ideal substitute to asbestos, as their use does not necessitate modifications in the cementitious matrix.

Accordingly, the purpose of this work is to experimentally determine basic mechanical characteristics and pertinent fracture parameters of bamboo pulp reinforced cement. Refined and non-refined pulps were used in the proportions of 8 and 14 % of the weight of dry cement. These percentages were adopted as they imply, according to literature, in optimizing the energy absorbed by the composite in bend loading.

Evaluation of the mechanical behavior of the composites considered in this work was realized by means of compression and impact testing. Three point bend tests were also carried out using unnotched as well as notched specimens of different notch root radii. Mechanical properties such as modulus of elasticity, compressive, impact and bend strengths, and J integral at maximum load are presented and discussed in terms of pertinent microstructural and fractographic aspects of test specimens.

Keywords

Fracture Behavior; J Integral; Fractography; Fiber Composites; Cementitious Matrix; Bamboo Pulp.

Sumário

1 Introdução	14
2 Revisão Bibliográfica	17
2.1. Retrospectiva do uso de compósitos reforçados por fibras	17
2.2. Compósitos reforçados com polpas celulósicas	19
2.2.1. Processos de polpação	20
2.2.2. Microestrutura	21
2.3. Matriz cimentícia	23
2.3.1. Composição química do cimento	23
2.3.2. Microestrutura da pasta de cimento	24
2.4. Cimento amianto	25
2.5. Micromecânica dos compósitos fibrosos	27
2.5.1. Regra das misturas	29
2.5.2. Comportamento à compressão	32
2.5.3. Comportamento no impacto	33
2.5.4. Comportamento à flexão	35
2.6. Mecânica da fratura	37
2.6.1. Mecânica da fratura não linear – Integral J	38
2.6.2. Efeito das descontinuidades na resistência	40
3 Procedimento Experimental	41
3.1. Produção dos compósitos	41
3.1.1. Dispersão da polpa seca	41
3.1.2. Moldagem das placas	42
3.1.3. Moldagem dos corpos de prova cilíndricos	43
3.1.4. Moldagem dos corpos de prova prismáticos para flexão	45
3.1.5. Moldagem dos corpos de prova prismáticos para impacto	46
3.2. Ensaaios	47
3.2.1. Ensaio de compressão	47

3.2.2. Ensaio de Flexão	48
3.2.3. Ensaio de impacto	50
3.2.4. Análise fractográfica e microestrutural	51
4 Resultados e Discussão	52
4.1. Ensaio de Compressão	52
4.2. Ensaio de Impacto	57
4.3. Ensaio de Flexão em três pontos	58
4.4. Ensaio de Flexão em três pontos em barras entalhadas	62
4.4.1. Fator de concentração de tensão (K_{σ})	65
4.4.2. Fator de concentração de tensão (K_{σ}) estimado teoricamente	67
4.5. Integral J	71
4.6. Análise Fractográfica e Microestrutural	73
5 Conclusões	81
5.1. Sugestões para futuras pesquisas	82
6 Referências Bibliográficas	84

Lista de figuras

Figura 2-1 Esquema estrutural das fibras vegetais em geral (Coutts & Warden, 1992).	22
Figura 2-2 Esquema da celular de bambu (Wai, Nanko and Murakami, 1985).	22
Figura 2-3 Mineral asbesto bruto (INCA, 2002).	25
Figura 2-4 Microestrutura da fibra de asbesto.	26
Figura 2-5 Curva esquemática carga-deflexão do concreto reforçado com fibras de polipropileno (Kobayashi & Cho, 1981).	36
Figura 2-6 Esquema do corpo de prova sujeito a dobramento.	39
Figura 2-7 Esquema de correção dos deslocamentos para o ensaio de flexão em três pontos.	39
Figura 2-8 Esquema do correção para cada espécie no ensaio de flexão em três pontos.	40
Figura 3-1 Equipamento utilizado para a dispersão da polpa.	42
Figura 3-2 Câmara de moldagem e recipiente e bomba.	43
Figura 3-3 Moldagem e compactação dos corpos de prova cilíndricos.	44
Figura 3-4 Lixadeira de cinta.	44
Figura 3-5 Molde prismático com entalhe.	46
Figura 3-6 Detalhe dos punções para compactação do corpos de prova.	46
Figura 3-7 Serra circular para corte e detalhe do corpo de prova.	47
Figura 3-8 Ensaio de flexão para corpos de prova sem entalhe.	49
Figura 3-9 Ensaio de flexão para corpos de prova com entalhe.	50
Figura 3-10 Ensaio de impacto.	51
Figura 4-1 Variação da deformação com a tensão para o compósito CP8R.	53
Figura 4-2 Variação da deformação com a tensão para o compósito CP14R.	53
Figura 4-3 Variação da deformação com a tensão para o compósito	

CP8SR.	54
Figura 4-4 Variação da deformação com a tensão para o compósito CP14SR.	54
Figura 4-5 Espécime ensaiado e detalhe da ligação matriz-fibra.	56
Figura 4-6 Superfície de fratura para os espécimes CP8SR e CP14SR respectivamente.	57
Figura 4-7 Carga-deslocamento para matriz cimentícia reforçada com polpa.	58
Figura 4-8 Valores do Módulo de Elasticidade com suas devidas variações.	60
Figura 4-9 Valores da Carga Máxima com suas devidas variações.	60
Figura 4-10 Valores da Tensão Máxima com suas devidas variações.	61
Figura 4-11 Superfície de fratura de espécime sem entalhe (CP8R).	62
Figura 4-12 Curva carga-deslocamento para espécimes CP8R com entalhes.	63
Figura 4-13 Curva carga-deslocamento para espécimes CP14R com entalhes.	63
Figura 4-14 Superfície de fratura de espécime entalhado.	64
Figura 4-15 Valores de K_{σ} com suas devidas variações.	66
Figura 4-16 Variação carga-deformação na ponta do entalhe para o espécime CP8R.	66
Figura 4-17 Variação carga-deformação na ponta do entalhe para o espécime CP14R.	67
Figura 4-18 Sistema de coordenadas (Creager & Paris, 1967).	68
Figura 4-19 Comparação do fator K_{σ} com $\rho^{-1/2}$ para CP8R.	70
Figura 4-20 Comparação do fator K_{σ} com $\rho^{-1/2}$ para CP14R.	70
Figura 4-21 Valores de J_{max} com suas devidas variações.	72
Figura 4-22 Variação da Integral J com o raio de curvatura (CP8R e CP14R).	72
Figura 4-23 Arranjo das fibras no interior da matriz (CP8SR).	73
Figura 4-24 Compósito com 8% de polpa refinada (CP8R).	74
Figura 4-25 Compósito com 8% de polpa sem refino (CP8SR).	74
Figura 4-26 Detalhe da interface micro fibra-matriz (CP8R) após ensaios	

de ruptura.	75
Figura 4-27 Micrografia da superfície da polpa sem refino.	76
Figura 4-28 Micrografia da superfície da polpa refinada.	77
Figura 4-29 Diagrama esquemático da estrutura da parede celular primária de uma célula vegetal (Pais & Barroso, 1999).	77
Figura 4-30 Diagrama esquemático da estrutura de uma microfibrila de celulose (Pais & Barroso, 1999).	77
Figura 4-31 Incrustações em fibras de polpa sem refino.	78
Figura 4-32 Incrustações em fibras de polpa refinada.	79
Figura 4-33 Detalhe dos cristais na superfície de polpa refinada.	79
Figura 4-34 Espectro fornecido pelo EDS.	80

Lista de tabelas

Tabela 2-1 Composição química e resistência à tração da madeira e do bambu.	21
Tabela 2-2 Propriedade mecânica do cimento-amianto (Petrucci, 1978)	27
Tabela 2-3 Fatores de eficiência referente a orientação das fibras (Rodrigues, 1999)	30
Tabela 4-1 Valores dos limites de resistência à compressão, módulo de elasticidade e razão de Poisson para os compósitos.	55
Tabela 4-2 Resultados experimentais dos ensaios de impacto.	57
Tabela 4-3 Valores do módulo de elasticidade, carga máxima e tensão máxima obtidos a partir do ensaio de flexão.	60
Tabela 4-4 Comparação entre os resultados obtidos dos ensaios de flexão deste trabalho e o de Dos Anjos (2002).	61
Tabela 4-5 Valores da carga máxima em termos do raio de curvatura para CP8R e CP14R.	64
Tabela 4-6 Fator concentrador de tensão (K_σ) determinado experimentalmente em função de ρ para CP8R e CP14R.	65
Tabela 4-7 Integral J na carga máxima, J_{max} , em função do raio de curvatura, ρ , para CP8R e CP14R.	71