



Camilo Andrés Rusinque Guatibonza

**DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA TENACIDADE DO
BAMBU DO MODO I (K_{IC}) E MODO II (K_{IIC})**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. Khosrow Ghavami

Rio de Janeiro

Julho de 2009

Camilo Andrés Rusinque Guatibonza

**DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA TENACIDADE DO
BAMBU DO MODO I (K_{IC}) E MODO II (K_{IIc})**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Khosrow Ghavami

Orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Paulo Gonçalves

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Normando Perazzo Barbosa

Universidade Federal da Paraíba

Prof. Conrado de Souza Rodrigues

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas de Gerais

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 24 de julho de 2009

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

Camilo Andrés Rusinque Guatibonza

Graduou-se em Engenharia Civil na Universidade Nacional da Colômbia, em dezembro de 2004.

Ficha Catalográfica

Rusinque Guatibonza, Camilo Andrés

Determinação experimental da tenacidade do bambu do modo I (K_{IC}) e do modo II (K_{IIc}) / Camilo Andrés Rusinque Guatibonza ; orientador: Ghavami, Khosrow. – 2009.

69 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Materiais não convencionais. 3. Bambu. 4. Fratura. 5. Tenacidade. 6. Propagação de trincas. 7. Mecânica da fratura. 8. Modo. I. Khosrow, Ghavami. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

Dedico a feliz conclusão desta dissertação aos meus pais, que me ensinaram o valor do trabalho, sacrifícios e deram para mim o ânimo para levar até o final este logro, a minha irmã quem é o combustível da sua lâmpada que guia seu caminho e a Pato que se encaminhou comigo nesta aventura que agora vemos terminada.

Agradecimentos

Especialmente ao meu orientador, o professor Khosrow Ghavami que atendeu minha necessidade de conhecimento e paixão pela engenharia.

A CAPES e FAPERJ por sua ajuda econômica durante minha vida no Brasil.

Ao Euclides e a Evandro, laboratoristas do Laboratório de Estruturas e Materiais– LEM da PUC-Rio por sua ajuda, tempo e boas idéias para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao João Krause por seus conselhos oportunos, imaginação e vontade.

A minha família por dois anos de ausência.

A Patrícia.....por tudo.

E a Deus pelo espírito e força para continuar.

Resumo

Rusique Guatibonza, Camilo Andrés; Ghavami, Khosrow. **Determinação Experimental da Tenacidade do Bambu do Modo I (K_{IC}) e Modo II (K_{IIc})**. Rio de Janeiro, 2009. 69p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Durante as últimas três décadas, as pesquisas científicas sobre bambu como material de engenharia concentraram-se na caracterização física e mecânica nos níveis macro, meso, micro e alguns trabalhos no nível nano-estrutural. As práticas de uso de bambu inteiro mostram ao longo do tempo trincas na superfície que são provocadas por razão da variação da umidade, da temperatura e entalhes gerados durante o processo de fabricação de peças estruturais. A presença das trincas tem grande influência na resistência desses elementos. Este aspecto do comportamento do bambu ainda é assunto de estudo na fase inicial. O presente trabalho apresenta os resultados da pesquisa teórico-experimental realizada para a determinação dos valores característicos dos fatores de intensidade de tensões, K_C , e as taxas de dissipação de energia, G_C , para os modos I e II, utilizando metodologias experimentais aplicadas aos materiais compósitos. Foi estudada a espécie *Dendrocalamus Giganteus* da parte basal do bambu do campus da PUC-Rio. A dimensão do corpo-de-prova tinha seção transversal retangular de 10x10mm e 100 mm de comprimento do vão livre com entalhes induzidos. Os corpos-de-prova foram submetidos à flexão em quatro pontos para diferentes valores de tamanho de entalhe. São apresentados os resultados de carga-deslocamento na metade do comprimento e as deformações relativas nas faces externa, interna e lateral dos corpos-de-prova. Os valores das taxas dissipação de energia e fatores de intensidade de tensões foram calculados a partir da curva de carga - deslocamento.

Palavras - chave

Materiais não convencionais, bambu, fratura, tenacidade, propagação de trincas, mecânica da fratura, modo I, modo II, K_{IC} , K_{IIc} .

Abstract

Rusique Guatibonza, Camilo Andrés; Ghavami, Khosrow (Advisor). **Experimental Determination of Fracture Toughness of Mode I (K_{IC}) and Mode II (K_{IIC}) do Bamboo.** Rio de Janeiro, 2009. 69p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

During the last three decades, the research on bamboo as engineering material was carried on through the physical and mechanic characterizations in the levels macro, meso, micro and some works in the nano-structural level. In practice, the use of entire bamboo shows cracks on the surface throughout the time, that are provoked by variation of the moisture, the temperature and notches generated during the process of manufacture of structural parts. The crack presence has influences on the resistance of these elements. This aspect of the bamboo behaviour is still subject of study in the initial phase. This work presents the results of a theoretical and experimental research for the determination of the characteristic values of the intensity stress factors, K_C , and the release energy, G_C , for modes I and II, using methodologies applied to the composites materials. It was studied the basal part of the specie *Dendrocalamus Giganteus* of the Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro campus (PUC-Rio). The specimens had rectangular shape with transversal section of 10x10mm and 100mm of length with notch; each one was tested in four points bend for different values of notch size. The results correspond to curves load-displacement in the half span; and strain in the external, internal and lateral sides of the specimen. The values of release energy and intensity stress factors have been calculated from the curve load-displacement.

Keywords

No conventional materials, bamboo, fracture, toughness, crack propagation, fracture mechanics, mode I, mode II, K_{IC} , K_{IIC} .

Sumário

1 INTRODUÇÃO	15
1.1. Objetivos da dissertação	17
1.2. Descrição da dissertação.	18
2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA	19
2.1. O bambu como material compósito	21
2.1.1. Análises Micro-mecânica do Bambu	22
2.1.2. Análise Macro-mecânica do Bambu	25
2.2. Mecânica da fratura	27
2.2.1. Definições e conceitos básicos	27
2.2.2. Tenacidade à fratura K_C	29
2.2.3. Taxa de dissipação de energia critica G_C	32
2.3. Procedimentos Experimentais	34
3 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	36
3.1. Material Utilizado	36
3.2. Umidade	37
3.3. Determinação do Módulo de Elasticidade	37
3.4. Determinação da Resistência ao cisalhamento	39
3.5. Equipamentos	40
3.6. Corpos-de-prova para ensaios de fator de intensidade de tensões	43
3.6.1. Fator de Intensidade de Tensões sob Modo I num Ensaio de Tração simples.	43
3.6.2. Fator de Intensidade de Tensões sob Modo I e II num Ensaio 4-ENF.	45
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	50
4.1. Modulo de Elasticidade	50
4.2. Resistência ao Cisalhamento	51
4.3. K_{IC} por ensaio de Tração Simples	52
4.4. K_{IC} por ensaio 4-ENF	54
4.5. K_{IIC} por ensaio 4-ENF	57

5 CONCLUSÕES	61
6 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	63
APENDICE A	67

Lista de figuras

Figura 1-Imagem digital da seção transversal de um colmo de bambu.	15
Figura 2- Propagação de trincas em colmos de bambu.	16
Figura 3-Distribuição de tensões tangenciais ao longo da borla do furo de Kirs.	20
Figura 4-Esquema do modelo estudado por Inglis em 1913.	20
Figura 5- Modos de deslocamento da superfície de fratura num corpo trincado.	21
Figura 6-Definição do eixo radial x ao longo da espessura do bambu.	23
Figura 7-Fatias da seção do bambu para o processamento digital de imagens.	23
Figura 8-Relação entre a fração volumétrica de fibras e a posição na espessura no bambu.	24
Figura 9-Processo de avaliação do modulo de elasticidade para a fibra e a matriz do bambu..	24
Figura 10-Fração volumétrica vs. modulo de elasticidade para o calculo de E_m e E_{ff} .	25
Figura 11-Modelo de homogeneização do valor da tensão media de um compósito.	25
Figura 12-Esquema de uma lamina unidirecional especialmente ortotrópica.	26
Figura 13-Tipo de fratura.	28
Figura 14-Tipo de fratura.	29
Figura 15-Estado de tensões na ponta de uma trinca.	31
Figura 16-Corpo-de-prova trincado sob ensaio de tração.	32
Figura 17-Diagrama energético de um corpo-de-prova trincado.	33
Figura 18- Corpo-de-prova para ensaios para determinação do módulo de elasticidade	37
Figura 19- Ensaio de tração simples para a determinação do modulo de elasticidade.	38
Figura 20-Detalhe do tratamento das extremidades dos corpos-de-prova para evitar o deslocamento com as garras durante o ensaio de tração.	38
Figura 21- Esquema do corpo-de-prova para ensaios de corte.	40
Figura 22-,Ensaio de corte para a determinação da resistência ao cisalhamento.	40
Figura 23- Maquina de ensaios EMIC DC3000.	41
Figura 24- Células de carga.	41

Figura 25- Microscópio para obtenção de imagens digitais	42
Figura 26- Garras.	42
Figura 27- Dispositivo para ensaios de flexão.	43
Figura 28-Dimensões do corpo-de-prova para determinação das propriedades à fratura no modo I com um ensaio de tração simples.	44
Figura 29-Ensaio de tração para a determinação da tenacidade à fratura sob modo I, K_{Ic} .	44
Figura 30- Detalhe do modo de propagação da fissura num ensaio de tração simples para a determinação do fator de intensidade de tensões.	45
Figura 31-Dimensões dos corpos-de-prova para ensaios de flexão para determinação das propriedades à fratura.	46
Figura 32-Ensaio de flexão 4-ENF.	46
Figura 33- Esmagamento ocorrido no ensaio de flexão.	47
Figura 1-Detalhe da trinca induzida para os ensaios para de flexão para a determinação da tenacidade sob modo I.	47
Figura 2-Detalhe da trinca induzida para os ensaios de flexão para a determinação da tenacidade sob modo II.	47
Figura 3-Localização de todos os strain gages nas faces do corpo-de-prova.	48
Figura 37-Determinação da carga crítica (P_C) num ensaio 4-ENF.	49
Figura 38- Tensão vs. Deformação para ensaio de Tração Simples para a determinação do módulo de elasticidade.	50
Figura 39-Ensaio de corte para a determinação da tensão ao corte.	51
Figura 4-Detalhe do modo de fratura nos ensaios de tração simples.	54
Figura 41- Carga-Deformação para a determinação da carga crítica no ensaio 4-ENF para o modo I.	55
Figura 42-Ensaio 4-ENF para Modo I.	56
Figura 43-Regressão linear para a determinação da flexibilidade do espécime com $a=35\text{mm}$.	57
Figura 44- Carga VS. Deslocamento num ensaio 4-ENF para o modo II e determinação do carregamento crítica P_C .	58
Figura 45- Detalhe do processo de ensaio 4-ENF para obtenção do fator de intensidade de tensões sob modo II.	58
Figura 46- Deslocamento nos extremos do corpo-de-prova.	59
Figura 47-Curva Flexibilidade vs. Comprimento de Trinca	59
Figura 48-Relação entre a taxa de dissipação de energia e o comprimento de trinca.	60

Lista de tabelas

Tabela 1-Relação entre a resistência à tração e o peso específico de alguns materiais.	16
Tabela 2-Quantidade de energia por volume e resistência de alguns materiais.	17
Tabela 3- Caracterização geométrica do <i>Dendrocalamus giganteus</i> utilizado na pesquisa.	36
Tabela 4-Resultados dos ensaios de tração simples para módulo de elasticidade.	50
Tabela 5-Resumo de dados obtidos nos ensaios ao corte.	52
Tabela 6-Valores obtidos pelo ensaio de tração simples para KIC.	52
Tabela 7-Valores de KIC de alguns materiais.	53
Tabela 8-Resultados de obtidos de KIC.	54
Tabela 9-PC e KIC em função da posição do entalhe inicial induzido.	55
Tabela 10-Resultados das flexibilidades e cargas críticas para os espécimes ensaiados.	57
Tabela 11-Resultado experimentais e teóricos da tenacidade à fratura sob modo II.	60
Tabela 12-Valores da tenacidade à fratura sob modo II para diferentes madeiras.	60

Lista de Símbolos

a	=	Comprimento da trinca
C	=	Flexibilidade
C_{ij}	=	Componentes da matriz de rigidez
ε	=	Deformação
E_1	=	Módulo de elasticidade no eixo principal 1
E_2	=	Módulo de elasticidade no eixo principal 2
E_f	=	Módulo de elasticidade das fibras
E_m	=	Módulo de elasticidade da matriz
$f(a/t)$	=	Fator de forma
FEN	=	Face endodérmica
FEX	=	Face exodérmica
FLT	=	Face lateral
$g(B,t)$	=	Função da geometria do espécime
G_{12}	=	Módulo de cisalhamento
γ_{12}	=	Deformação de cisalhamento
G_C	=	Taxa de dissipação de energia crítica
G_f	=	Módulo de cisalhamento das fibras
G_{IC}	=	Taxa de dissipação de energia crítica para o modo I
G_{IIC}	=	Taxa de dissipação de energia crítica para o modo II
G_m	=	Módulo de cisalhamento da matriz
γ_s	=	Energia de superfície
K_C	=	Fator de intensidade de tensões crítico
K_{IC}	=	Fator de intensidade de tensões crítico para o modo I
K_{IIC}	=	Fator de intensidade de tensões crítico para o modo II
L	=	Luz do vão
m	=	Rigidez
MC	=	Teor de umidade
ν_{12}	=	Coeficiente de Poisson
ν_f	=	Coeficiente de Poisson das fibras
ν_m	=	Coeficiente de Poisson da matriz
P	=	Carga
P_c	=	Carga crítica
Q_{ij}	=	Componentes da matriz de rigidez da lâmina
r	=	Raio da ponta da trinca

σ	=	Tensão
σ_c	=	Tensão crítica
S_{ij}	=	Relações tensão - deformação
σ_t	=	Resistência à tração
t	=	Espessura do corpo-de-prova
τ_{12}	=	Tensão de cisalhamento
TSCE	=	Ensaio de tração simples com entalhe
TSSE	=	Ensaio de tração simples sem entalhe
u	=	Deslocamento
U	=	Energia potencial
U_r	=	Energia de deformação liberada
U_s	=	Energia absorvida
V_f	=	Fração volumétrica das fibras
V_m	=	Fração volumétrica da matriz
W	=	Trabalho
Ψ	=	Função de Airy