

## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1. Modulo de Elasticidade

O modulo de elasticidade é calculado a partir da regressão linear da curva Tensão – Deformação, onde a pendente da dita curva corresponde ao modulo de elasticidade indicado na. A Figura 1 mostra as curvas para quatro corpos-de-prova e a Tabela 1 indica os valores de tensão máxima e modulo de elasticidade obtido.

CP	TENSÃO MAX. (MPa)	MODULO DE ELASTICIDADE (GPa)
TSSE-01	118.08	10.90
TSSE-02	97.40	11.51
TSSE-03	69.75	11.20
TSSE-04	117.13	11.51
<b>MEDIA</b>	<b>110.87</b>	<b>11.31</b>
<b>DESVIO PADRÃO</b>	<b>22.66</b>	<b>0.29</b>

Tabela 1-Resultados dos ensaios de tração simples para módulo de elasticidade.

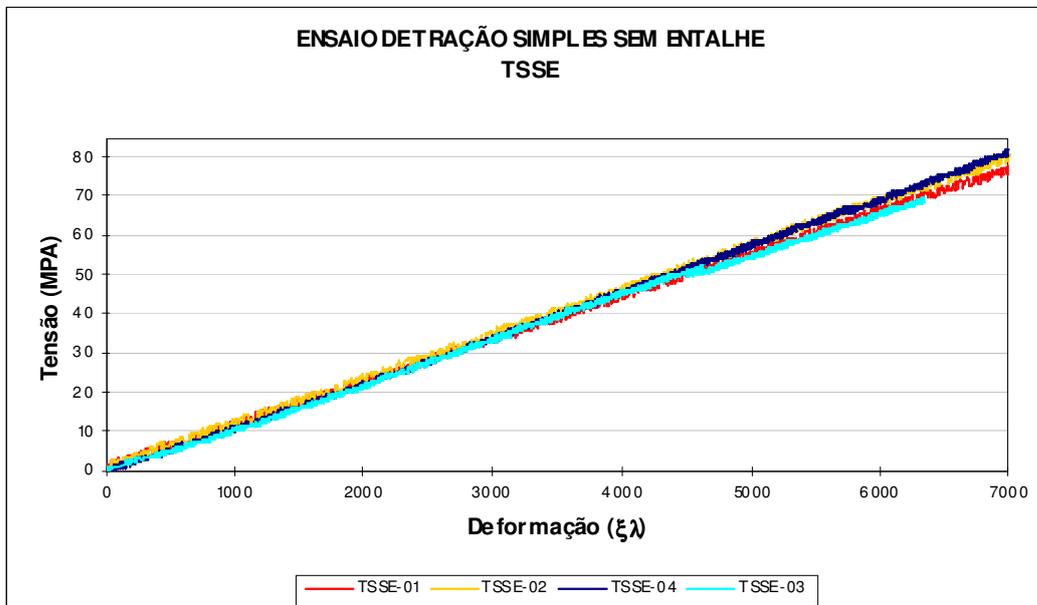


Figura 1- Tensão vs. Deformação para ensaio de Tração Simples para a determinação do módulo de elasticidade.

Os valores obtidos são comparados com os encontrados por Ghavami e Marinho (2002) que estabeleceram para o módulo de elasticidade à tração de segmentos da base dos bambus das espécies *Dendrocalamus Giganteus* 15,11 GPa. A diferença dos valores encontrados com os valores mencionados pode estar na seção transversal dos segmentos usados, as condições de umidade e presença de fungos nas amostras utilizadas. Em outros trabalhos com *Dendrocalamus giganteus* brasileiro, foram encontrados valores da ordem de 10 a 15 GPa (Lima et AL, 1996) e de 17,5 GPa encontrado por Ghavami e Marinho (2001).

#### 4.2. Resistência ao Cisalhamento

O ensaio de corte interlaminar é feito com fatias de espessura de aproximadamente 3mm, ensaiada aplicando uma carga axial de tração paralela à fibra até a falha do corpo-de-prova. Assim é estabelecida a tensão máxima ( $\tau_{max}$ ) ao corte para cada fatia, como a relação entre a carga máxima e a área transversal afetada pelo corte e a tensão média ( $\tau_{pro}$ )

A Figura 2 mostra o procedimento de ensaio e a forma de falha do teste a corte.

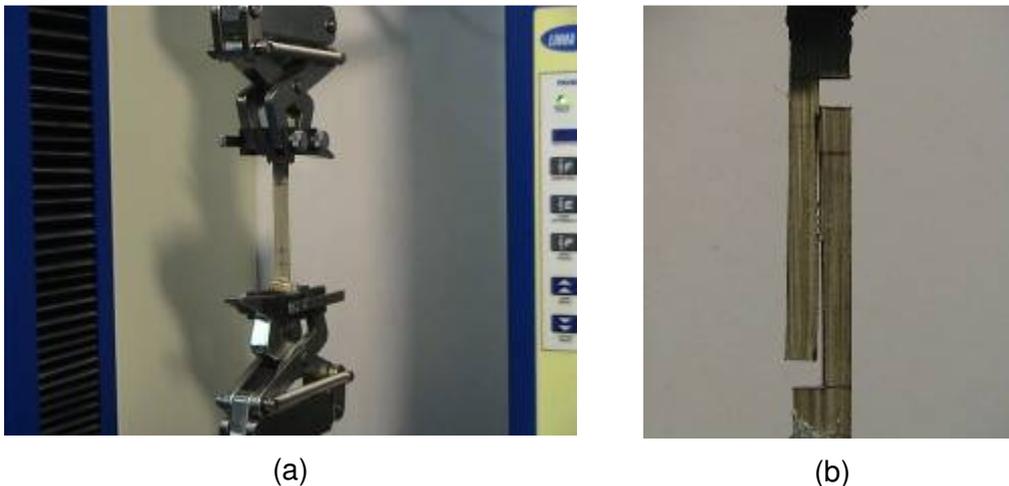


Figura 2-Esquema do ensaio de corte para a determinação da tensão ao corte. (a) Montagem do ensaio. (b) Falha do espécime.

Devido aos entalhes induzidos como foi indicado na **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** o espécime falha por cisalhamento numa área vertical por uma zona de lignina que permite estabelecer a resistência

máxima ao corte. O valor obtido é muito similar ao valor médio encontrado na pesquisa de Ghavami e Marinho em 2001 que obtiveram um valor característico (ou médio) de 3,46 MPa.

FATIA	$\tau_{Max}$ (MPa)	$\tau_{Pro}$ (MPa)
A1	3.35	3.75
A2	4.50	
A3	3.42	
B1	3.14	3.35
B2	3.08	
B3	3.82	
C1	3.55	3.23
C2	3.87	
C3	2.27	
D1	5.29	4.79
D2	4.29	
<b>Media</b>		<b>3.78</b>

Tabela 2-Resumo de dados obtidos nos ensaios ao corte.

### 4.3.K<sub>IC</sub> por ensaio de Tração Simples

A Tabela 3 apresenta os valores de  $P_C$ ,  $\sigma_C$  e  $K_{IC}$  avaliado a partir da equação 2.35 utilizando o fator de forma dado pela equação 4.1 (Amada e Untao, 2001), tal fator de forma é aplicável a corpos-de-prova como o indicado na **!Error! No se encuentra el origen de la referencia.** sob carregamento uniaxial de tração.

$$f(\gamma) = 1.99 - 0.4\gamma + 18.7\gamma^2 - 38.5\gamma^3 + 53.85\gamma^4; \quad \gamma = \frac{a}{w} \quad (1.1)$$

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot f(\gamma)$$

CP	a (mm)	w (mm)	a/w	f(a/w)	$\sigma_C$ (MPa)	$K_{IC}$ (MPa-m <sup>1/2</sup> )
TSCE-01	1	8.67	0.12	1.21	132.87	8.98
TSCE-02	1	8.94	0.11	1.20	107.50	7.23
TSCE-03	1	8.82	0.11	1.20	112.21	7.56
TSCE-04	2	8.67	0.23	1.45	28.97	3.32
TSCE-05	2	8.97	0.22	1.43	29.78	3.37
TSCE-06	2	8.36	0.24	1.47	27.99	3.26
TSCE-07	4	8.40	0.48	2.62	43.13	12.67
TSCE-08	4	8.71	0.46	2.49	43.29	12.07
TSCE-09	4	9.27	0.43	2.29	43.02	11.06
TSCE-10	5	9.17	0.55	3.30	39.21	16.20
TSCE-11	5	9.58	0.52	3.04	38.54	14.69
TSCE-12	5	9.31	0.54	3.20	38.62	15.50
TSCE-13	6	8.40	0.71	6.33	37.80	32.86
TSCE-14	6	8.67	0.69	5.78	35.72	28.37

TSCE-15	6	8.56	0.70	6.00	36.46	30.02
---------	---	------	------	------	-------	-------

Tabela 3- Valores obtidos pelo ensaio de tração simples para  $K_{IC}$ .

Foi observado que, para os ensaios com comprimento de trinca induzida de 1mm, foram obtidas tensões maiores que 100 MPa, valores similares aos obtidos nos ensaios de tração simples sem entalhe utilizados para a determinação do módulo de elasticidade. Este comportamento é devido a que o comprimento do entalhe é muito menor e não tem propagação, levando o corpo-de-prova a falhar por tração das fibras. Assim, para a análise são descartados os dados para entalhe de 1mm.

O valor médio de  $K_{IC}$  corresponde a  $13.81 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ , que representa um valor baixo na relação com outros materiais e inclusive com os valores de tenacidade para o bambu encontrados na literatura (Tabela 4). Este comportamento pode ser devido à incerteza que se tem para a determinação do instante no que começa a propagação da fissura e a que a propagação não ocorre em sentido do plano do entalhe, já que se apresenta uma propagação perpendicular ao dito plano, comportamento não coincidente com o indicado por Amada & Untao (2001), que obtiveram tenacidade de  $56 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  sendo um valor similar ao encontrado para aço e materiais metálicos. A diferença dos resultados pode ser devido à diferença de umidade dos corpos-de-prova que para os espécimes utilizados neste trabalho tinha um valor de 12.73% e que para os ensaios de Amada e Untao não é especificada. Além disso, os resultados de Amada indicam a observação da propagação da fissura no sentido do plano do entalhe inicial sem mudança da direção da fratura. A Tabela 4 mostra valores médios do fator de intensidade de tensões para o modo I de vários materiais (Amada e Untao, 2001)

MATERIAL	$K_{IC} \text{ (MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$
Aço de alta resistência	57
Titanio	38.5
Aluminio	34
Plástico	2.0-10.
Madeira <i>Spruce</i>	7
Bambú Mosso	56.8

Tabela 4-Valores de  $K_{IC}$  de alguns materiais (Amada & Untao, 2001).

A Tabela 5 mostrar os valores médios para o fator de forma, tensão no começo da propagação e tenacidade sob modo I para os comprimentos de trinca 2, 4, 5 e 6mm.

a/w	f(a/w)	$\sigma_c$ (MPa)	$K_{IC}$ (MPa·m <sup>1/2</sup> )
0.23	1.45	28.91	3.32
0.46	2.47	43.15	11.93
0.53	3.18	38.79	15.46
0.70	6.04	36.66	30.42

Tabela 5-Resultados de obtidos de  $K_{IC}$ .

A Figura 3, mostra a forma da fratura observada durante a execução dos ensaios a tração simples. Pode-se notar que a fissura induzida tem uma pequena propagação até encontrar a zona de lignina mais próxima cuja resistência é da ordem de 4MPa (valor muito menor que a resistência das fibras), por onde se propaga uma fissura vertical no sentido do alinhamento das fibras.

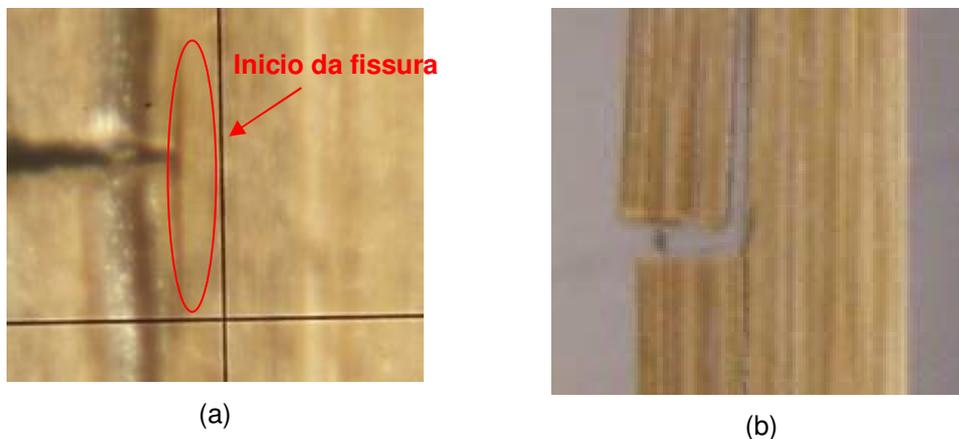


Figura 3-Detalhe do modo de fratura nos ensaios de tração simples, (a) Começo da propagação, (b) Fratura por cortante.

A diferença do comprimento da fissura induzida não muda a forma da fratura e em todos os casos se gera uma fissura no sentido paralelo às fibras que se propaga no sentido da aplicação da carga, mas incrementa o fator de intensidade de tensões.

#### 4.4. $K_{Ic}$ por ensaio 4-ENF

Neste tipo de ensaio o corpo-de-prova não apresenta uma fratura caracterizada pelo modo I, já que de forma similar que para o ensaio de tração simples, a fissura muda de direção iniciando uma fratura horizontal dentro da zona de lignina mais próxima à ponta do entalhe.

Para estabelecer o instante de início da propagação da fissura durante a execução do ensaio, foi escolhido como referência os resultados das deformações registradas pelos strain gages 4 e 5 indicados na **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, pois no momento que começa a nova fissura horizontal, o carregamento sobre os extensômetros é liberado e as leituras das deformações mostram um ponto de inflexão deixando em evidência o valor da carga crítica. A Figura 4 mostra como foi determinada a carga crítica para os ensaios 4-ENF para o modo I.

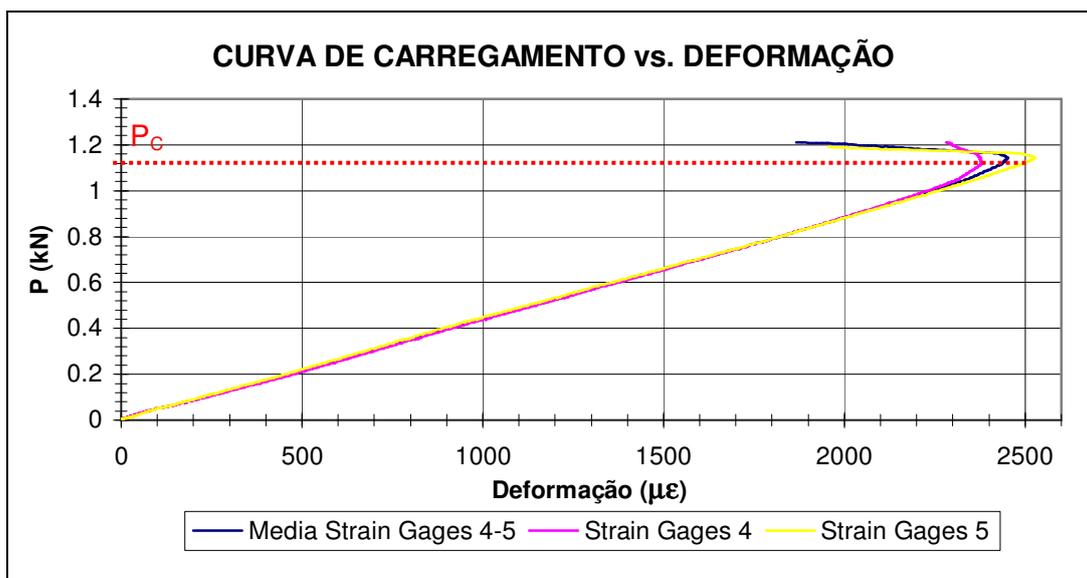


Figura 4- Carga-Deformação para a determinação da carga crítica no ensaio 4-ENF para o modo I.

A Tabela 6 apresenta os valores de  $P_C$  de acordo com a face no qual foi inserido o entalhe inicial. Os resultados indicam um aumento da carga crítica quando a fissura se encontra na fase exodérmica. Nos casos onde o entalhe fica na fase endodérmica e lateral,  $P_C$  muda ligeiramente correspondendo a 77% de  $P_C$  na fase exodérmica.

POSIÇÃO DO ENTALHE INICIAL	$P_c$ (kN)	$K_{Ic}$ (MPa·m <sup>1/2</sup> )
FEX	1.29	16.38
FEN	1.02	12.96
FLT	0.96	12.23
<b>MEDIA</b>	<b>1.09</b>	<b>13.86</b>
<b>DESVIO PADRÃO</b>	<b>0.18</b>	<b>2.22</b>

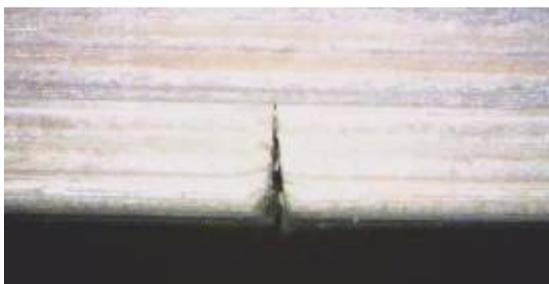
Tabela 6- $P_c$  e  $K_{Ic}$  em função da posição do entalhe inicial induzido

Utilizando a formulação indicada pela equação (4.2) e substituindo  $P$  por  $P_c$ , obtém-se o valor da tenacidade à fratura para o modo I com um espécime num ensaio 4-ENF, onde o fator de forma para este tipo de ensaio foi adotado da literatura.

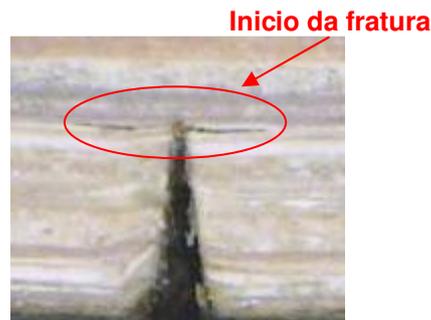
$$f(\gamma) = \frac{3\sqrt{\gamma} \left[ 1.99 - \gamma(1-\gamma)(2.15 - 3.93\gamma + 2.7\gamma^2) \right]}{2(1-2\gamma)\sqrt{(1-\gamma)^3}}; \quad \gamma = a/w \quad (1.2)$$

$$K_I = \frac{PL}{B\sqrt{W^3}} \cdot f(\gamma)$$

Os resultados para o fator de intensidade de tensões determinados pelo ensaio 4-ENF não concordam com os obtidos pelo ensaio de tração simples, devido à incerteza na determinação do instante de início da propagação da fissura e da carga crítica no ensaio a tração.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5-Ensaio 4-ENF para Modo I. (a) Entalhe inicial. (b) Começo da propagação da fissura horizontal. (c) Fratura. (d) Detalhe de execução do ensaio.

A Figura 5 mostra o processo de fratura observado nos ensaios à flexão em quatro pontos para a determinação da tenacidade sob modo I. A Figura 5 (a) mostra o estado inicial do ensaio com o entalhe inicial de 1mm. A Figura 5 (b) apresenta o instante no que a fissura muda de orientação e começa a propagação no sentido horizontal. A Figura 5 (c e d) mostram a forma de fratura correspondente a uma falha pelo cortante sem apresentar propagação da fissura no sentido do plano do entalhe inicial (plano vertical).

#### 4.5.K<sub>IIC</sub> por ensaio 4-ENF

Os ensaios para a determinação da tenacidade a fratura sob modo II correspondem a ensaios do tipo 4-ENF para corpos-de-prova com trincas horizontais, como a indicada na **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** com diferentes comprimentos de trinca iniciais (35, 45, 55 e 65mm). Dos ensaios feitos para cada comprimento de entalhe foi estabelecido o valor do carregamento crítico ( $P_c$ ) e o valor da flexibilidade ( $C$ ) do espécime seguindo o procedimento indicado no capítulo 3. A flexibilidade é obtida como o inverso da pendente (Figura 6), calculada com uma regressão linear da curva Carga vs. Deslocamento. Os resultados obtidos estão resumidos na Tabela 7 onde o valor de  $m$  representa a pendente das curvas. A Figura 7 mostra como foi determinada a carga crítica.

a (mm)	m (kN/mm)	C (mm/kN)	P <sub>c</sub> (kN)
35	0.56	1.80	0.67
35	0.50	2.00	0.72
45	0.46	2.19	0.64
45	0.47	2.13	0.66
55	0.42	2.38	0.70
55	0.41	2.42	0.67
65	0.39	2.58	0.58
65	0.39	2.59	0.60

Tabela 7-Resultados das flexibilidades e cargas críticas para os espécimes ensaiados.

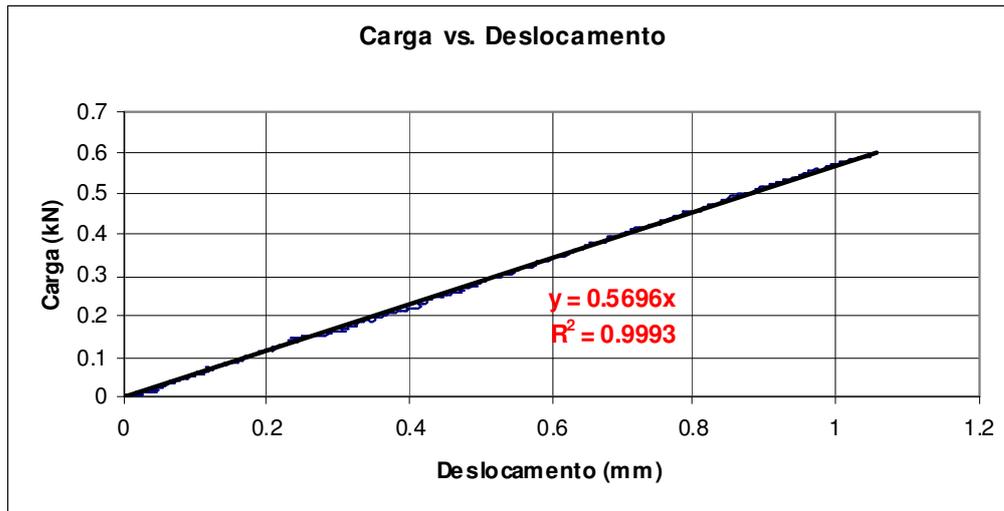


Figura 6-Regressão linear para a determinação da flexibilidade do espécime com  $a=35\text{mm}$ .

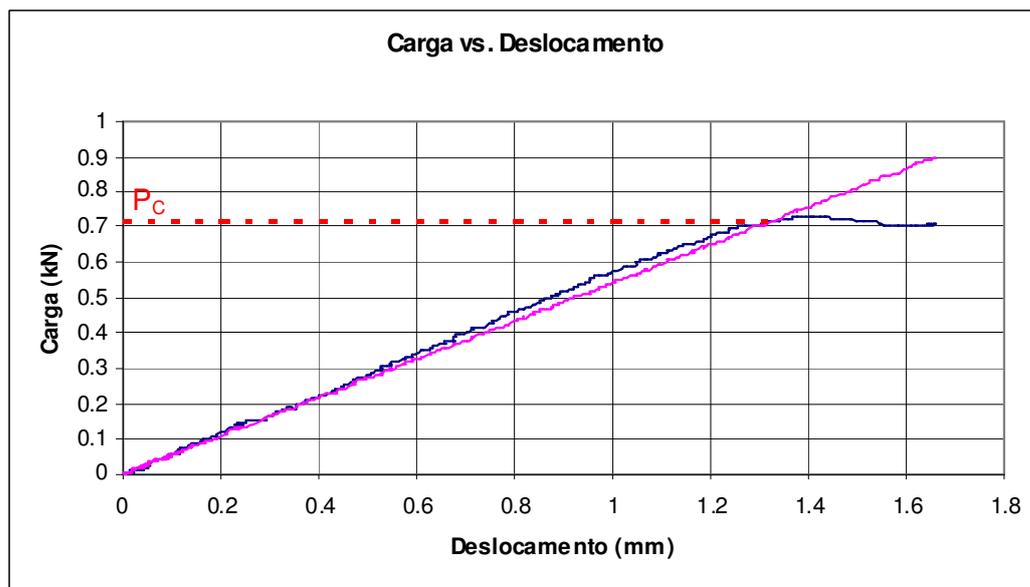


Figura 7- Carga VS. Deslocamento num ensaio 4-ENF para o modo II e determinação do carregamento crítica  $P_C$ .

Foram desenhados traços verticais sob o corpo-de-prova com uma separação de 5mm para ajudar na visualização com o microscópio do processo de propagação da fissura, já que, como se observa na Figura 8, os traços marcados vão se deslocando e deixando em evidência a incremento na fissura. Dito comportamento também foi observado nos extremos do espécime já que a parcela superior do corpo foi se movimentando com respeito à parcela inferior (Figura 9).

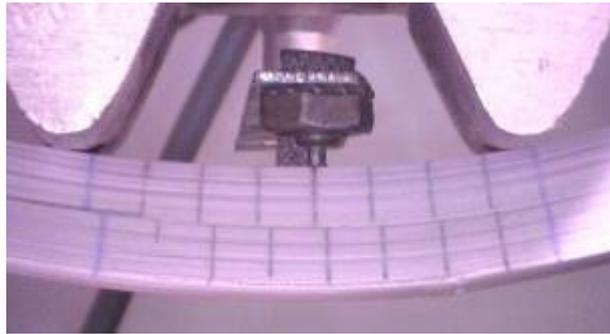


Figura 8- Detalhe do processo de ensaio 4-ENF para obtenção do fator de intensidade de tensões sob modo II.



Figura 9- Deslocamento nos extremos do corpo-de-prova.

Com os dados médios obtidos para cada comprimento de trinca foi determinada a curva de variação da flexibilidade em função do comprimento de entalhe. A partir desta curva foi calculado o melhor ajuste linear, obtendo uma reta com pendente de 2,28% valor que indica a relação  $\frac{\partial C}{\partial a}$  que é necessária para o cálculo da taxa de dissipação de energia (Equação 2.42).

Aplicando a teoria clássica de análise de vigas, foi determinado o valor da flexibilidade para cada corpo-de-prova e calculado o valor de  $G_{IIc}^{**}$ . Assim na Tabela 8 apresentam-se os resultados experimentais e teóricos para a análise de fratura sob modo II. O valor do fator de intensidade de tensões é calculado a partir da equação 2.44.

A Figura 10 mostra o incremento da flexibilidade de sistema em função do aumento do comprimento da trinca. Isto é válido porque a que a inércia da seção transversal muda dependendo do comprimento do entalhe induzido.

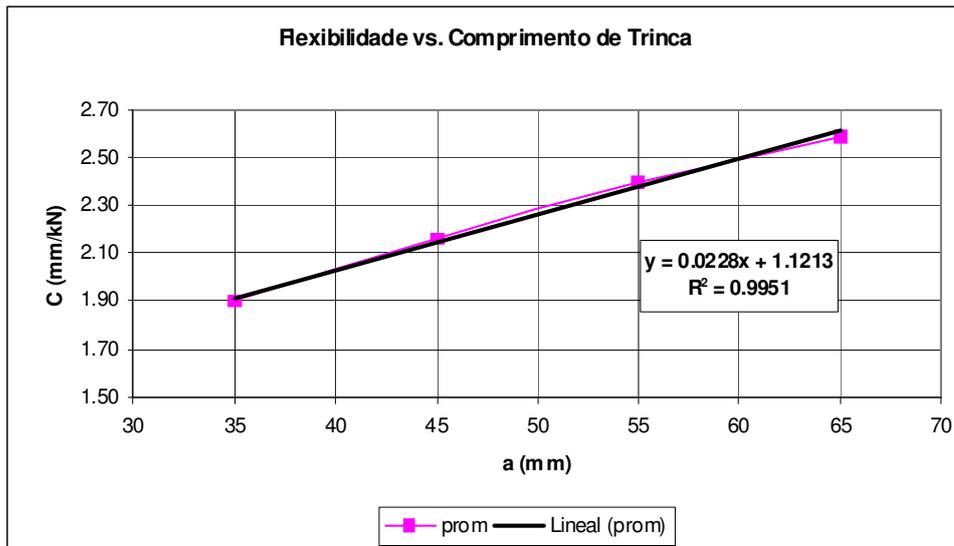


Figura 10-Curva Flexibilidade vs. Comprimento de Trinca

Com os dados obtidos se estabelece uma curva que relaciona o comprimento de trinca com a taxa de dissipação de energia que deixa ver uma pequena variação de  $G_{IIc}$  na medida em que se incrementa o comprimento da fratura, mas que pode ser definido como uma variação constante dado o valor obtido do desvio padrão (Figura 11).

a (mm)	C (mm/kN) Media	Pc (kN)	$G_{IIc}^*$ (kJ/m <sup>2</sup> )	$G_{IIc}^{**}$ (kJ/m <sup>2</sup> )	$K_{IIc}$ (MPa·m <sup>1/2</sup> )
35	1.90	0.70	0.51	0.55	2.27
45	2.16	0.65	0.43	0.43	2.08
55	2.40	0.68	0.48	0.48	2.20
65	2.59	0.59	0.37	0.39	1.93
		Media	0.45	0.46	2.12
		$\sigma$	0.06	0.07	0.15

Tabela 8-Resultado experimentais e teóricos da tenacidade à fratura sob modo II.

O valor médio do fator de intensidade de tensões sob modo II é similar aos valores encontrados na literatura para ensaios feitos em madeiras altamente fibrosas e que apresentam um comportamento parecido ao observado pelo bambu na fratura sob modo II. A Tabela 9 apresenta os resultados de  $K_{IIc}$  para diferentes tipos de madeiras.

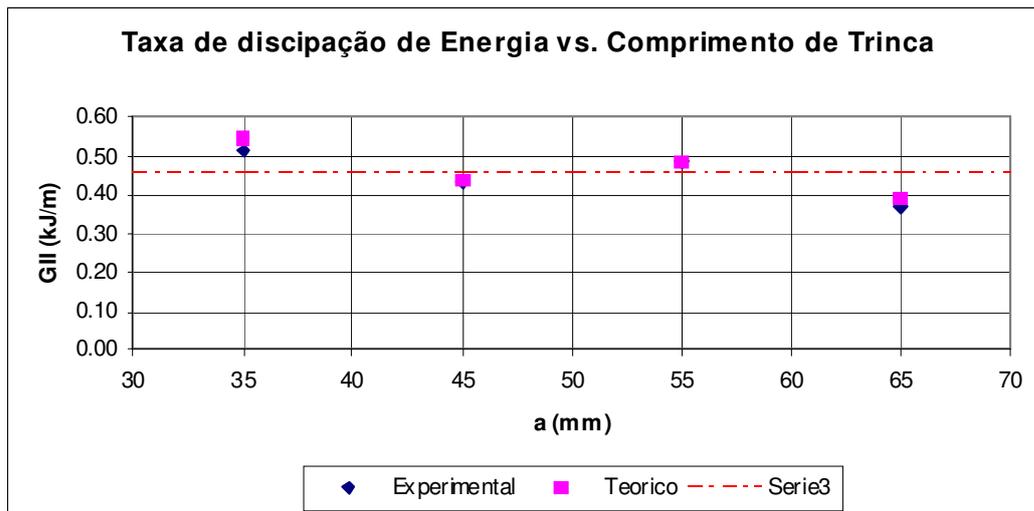


Figura 11-Relação entre a taxa de dissipação de energia e o comprimento de trinca.

Material	$K_{Ic}$ (MPa·m <sup>1/2</sup> )
Douglas-Fir	2.24
Scotch pine	1.33
Balsa	0.28
Western Hemlock	2.24
Dendrocalamus	2.12

Tabela 9-Valores da tenacidade à fratura sob modo II para diferentes madeiras.