

3 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

A presente pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM) do Departamento de Engenharia Civil da PUC - Rio, com o objetivo de estabelecer as propriedades à fratura e a tenacidade do bambu, procurando os valores característicos dos fatores de intensidade de tensões K_C , e taxas de dissipação de energia de deformação G_C , para os modos I e II.

3.1. Material Utilizado

Neste trabalho foi utilizado bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus* oriundo dos jardins da PUC – Rio, cortados no mês de março de 2008, aproximadamente 40cm acima do nível do solo. Para facilitar o transporte dos colmos cada bambu foi dividido em segmentos de 3m de comprimento aproximadamente e armazenados em posição vertical no LEM durante um período de 3 semanas, para se realizar sua caracterização física e mecânica.

Para cada vara de três metros, foram numerados os colmos, registrando seu comprimento entre nós e calculados os diâmetros externo e interno do topo e da base a partir da medição do perímetro e da média aritmética de oito leituras da espessura obtidas com o paquímetro, como feito por Ghavami & Marinho (2001). Os resultados da caracterização geométrica do bambu utilizado estão descritos na Tabela 1, onde a última linha indica a o valor médio.

	DIÂMETRO EXTERNO (mm)	ESPESSURA (mm)	COMPRIMENTO INTERNODAL (mm)
	99.22	14.22	280
	99.5	12.82	300
	96.79	14.38	340
	99.52	13.52	355
	100.46	15.68	385
	98.71	13.26	400
	97.01	14.72	415
	98.11	14.74	425
Media	98.67	14.17	362.50
Desvio Padrão	1.28	0.93	53.25

Tabela 1- Caracterização geométrica do *Dendrocalamus giganteus* utilizado na pesquisa.

3.2.Umidade

A determinação do teor de umidade foi feita segundo o procedimento da norma ISO/TC 165 N315 Date: 2001-12-07. Foram preparadas amostras de 25 mm de comprimento por 25 mm de largura aproximadamente com espessura igual à espessura da parede do colmo; cada amostra foi pesada e levada ao forno a uma temperatura de 102°C para secagem.

Após 24 horas de iniciado o processo de secagem deve ser registrado o novo peso de cada amostra em intervalos de duas horas até se obter uma diferença inferior de 0.01 g entre duas medições consecutivas.

Sendo m_o o peso inicial da amostra e m o peso após a secagem, o teor de umidade MC de cada amostra é calculado com a equação 3.1:

$$MC(\%) = \frac{m_o - m}{m} \times 100 \quad (3.1)$$

A medição do teor de umidade foi feita para três amostras. Estes ensaios foram realizados no Instituto de Ensayos e Investigaciones (IEI) da Universidade Nacional da Colômbia.

3.3.Determinação do Módulo de Elasticidade

Foi determinado o modulo de elasticidade do bambu selecionado dos colmos da base segundo as normas ISO/DIS 22157 por meio de um ensaio de tração simples paralela à fibra. As deformações foram obtidas utilizando-se strain gages colados na zona central do corpo-de-prova. Os corpos-de-prova foram identificados com a seguinte nomenclatura: TSSE (*Tração Simples Sem Entalhe*). As dimensões do corpo-de-prova são mostradas na Figura 1.

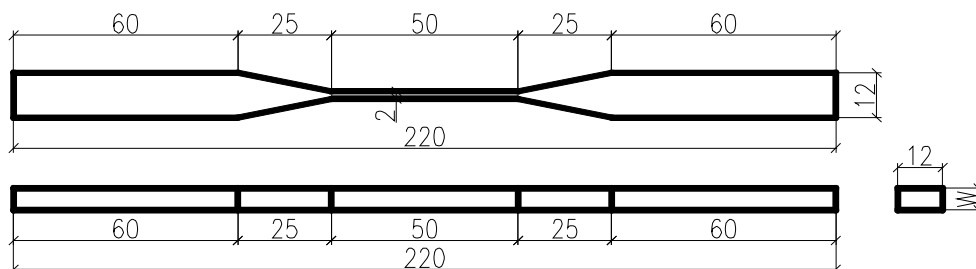


Figura 1- Esquema do corpo-de-prova para ensaios para determinação do módulo de elasticidade

O ensaio de tração simples é mostrado na Figura 2, indicando a localização do strain gage no trecho do meio da zona de estrição do corpo-de-prova. Durante o ensaio foram registrados os valores de carga, deslocamento vertical e deformação para determinar a curva Tensão - Deformação para cada espécime.

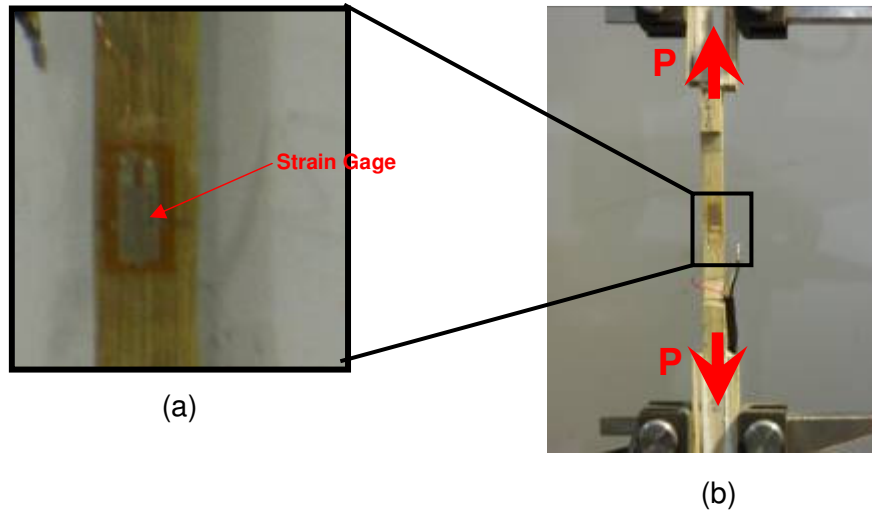


Figura 2- Ensaio de tração simples para a determinação do módulo de elasticidade. (a) Detalhe do Strain Gage. (b) Montagem do ensaio.

Durante o processo de ensaio, foi preciso procurar a melhor forma de garantir que o espécime não deslizasse, assim foram feitos ensaios de prova com diferentes elementos colados nas pontas do corpo-de-prova que ficariam em contato com as garras. Para isto foram preparados espécimes com chapas de alumínio (Figura 3 (a)), chapas de madeira e com chapas de compensado (Figura 3 (b)).



Figura 3-Detalhe do tratamento das extremidades dos corpos-de-prova para evitar o deslocamento com as garras durante o ensaio de tração. (a) Espécime com chapa de alumínio. (b) Espécime com chapa de compensado.

Os corpos tratados com chapas de alumínio apresentaram um bom comportamento, mas o efeito dependia da rugosidade lograda com os traços feitos na superfície da chapa. Mas tal efeito não era constante e em alguns ensaios não melhorou a fricção entre o espécime e as garras.

As amostras nas quais foram usadas chapas de madeira não apresentaram comportamentos adequados, já que a pressão das garras sob as pontas do corpo-de-prova quebravam as chapas de madeira permitindo o deslocamento do espécime levando a resultados errôneos.

Para os testes com chapas de compensado foram obtidos os melhores resultados já que a resistência à compressão deste material é baixa produzindo um esmagamento na chapa melhorando o agarre e evitando o deslocamento entre as garras e o corpo-de-prova.

Do mesmo jeito foram testados diferentes tipos de colas para a adesão das chapas aos espécimes. Foram usadas colas epóxicas, colas para madeiras, massas plásticas e colas especiais para materiais porosos.

A cola que apresentou melhor comportamento foi a cola epóxica já que não apresentou desprendimentos nem deslocamentos entre a amostra e as chapas. Nos testes com colas para madeira foram observados deslocamentos excessivos devido à flexibilidade do produto; para as provas com massas plásticas e colas para materiais porosos os resultados não foram os melhores devido a que ditos produtos ficam frágeis após da secagem e se quebram facilmente com o incremento da pressão das garras deixando o corpo-de-prova sem aderência e fricção permitindo deslocamentos excessivos durante o ensaio.

3.4.Determinação da Resistência ao cisalhamento

Foram realizados ensaios de corte interlaminar em fatias de aproximadamente 3mm de espessura com o fim de estabelecer a resistência ao corte e a sua variação com respeito à fração volumétrica ao longo da espessura da parede do colmo. O procedimento de ensaio seguiu os passos propostos por Ghavami & Souza (2000), que modificaram o corpo-de-prova indicado pela norma ISO N314, propondo um espécime mais simples como o mostrado na Figura 5.

As fatias foram cortadas com estilete num processo muito cuidadoso para garantir uma espessura constante. A espessura foi medida com paquímetro ao longo do corpo em seis pontos com os quais são definidas a espessura média e calculada a área submetida às tensões cisalhantes. A Figura 4 indica as

dimensões do corpo-de-prova e os cortes transversais A e B inseridos no espécime com a finalidade de gerar a zona de cisalhamento de aproximadamente 60mm de comprimento, a qual é levada até a falha por meio de um ensaio de tração simples.

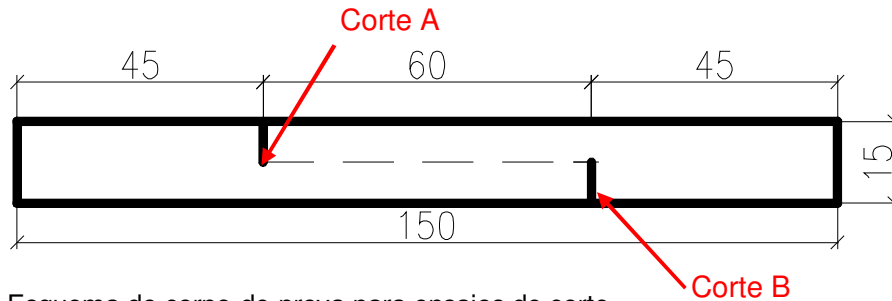


Figura 4- Esquema do corpo-de-prova para ensaios de corte.

Os corpos-de-prova tiveram um tratamento similar ao indicado nos ensaios de tração simples para a determinação do módulo de elasticidade com a introdução de chapas de compensado coladas com cola epóxica nos pontos de contato com as garras, para evitar o deslocamento dos espécimes.

Os corpos-de-prova são indicados pela nomenclatura ECI-A1 (*Ensaio de Corte Interlamina*) onde A corresponde ao espécime e 1 à fatia ensaiada.

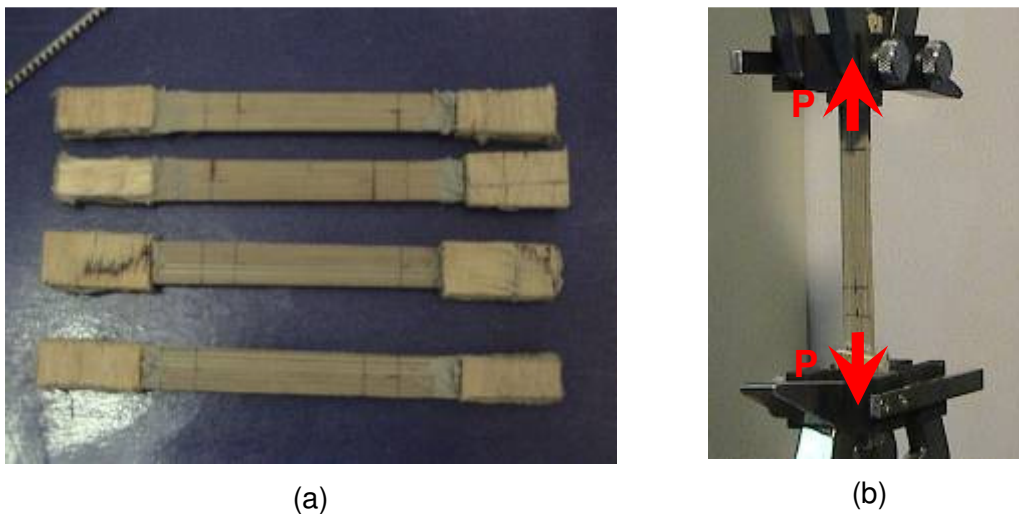


Figura 5- Ensaio de corte para a determinação da resistência ao cisalhamento. (a) Corpos-de-prova. (b) Montagem do ensaio.

3.5.Equipamentos

Os ensaios foram realizados numa máquina servo hidráulica EMIC DC3000 (Figura 6) micro processada tipo bi fuso de bancada com capacidade de 30kN especialmente projetada para ensaios de compressão, tração e flexão,

com Faixa de Velocidades: 0,01 a 1000 mm/min. A máquina (Figura 6) conta com um sistema automático para o registro da carga aplicada por meio de uma célula de carga e os deslocamentos verticais por um sensor Óptico com resolução de 0,01 mm. O equipamento permite escolher o procedimento de aplicação da carga i.e, em função da taxa de carga no tempo ou pela taxa de deslocamento no tempo. Para os ensaios, foi controlada a carga por meio do incremento da carga em função do deslocamento.



Figura 6- Máquina de ensaios EMIC DC3000.

A Figura 7 mostra as células de carga utilizadas na montagem dos ensaios. Já que a célula de carga da EMIC não podia ser utilizada no equipamento de aquisição de dados, foi necessário acoplar uma célula de carga externa de 50kN de capacidade, como a mostrada na Figura 9 (b), para a obtenção da carga aplicada. A dita célula foi calibrada especialmente para o registro das cargas dos ensaios num intervalo de até 5kN.

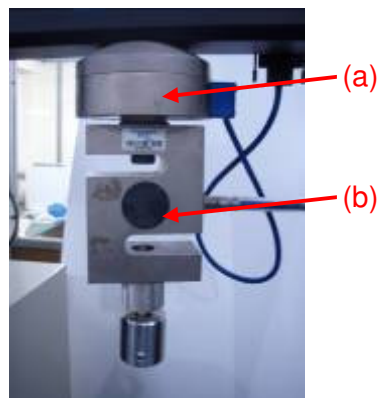


Figura 7- Células de carga. (a) Célula da máquina de 30kN. (b) Célula acoplada de 50kN.

Pelo fato de não haver um clip-gage compatível com a máquina de ensaios para o registro das deformações, foi preciso utilizar um equipamento de

aquisição de dados da National Instruments que permite a obtenção de leituras de carga, deslocamentos e deformações por strain-gages.

Foram também utilizados LDVT com intervalo de leitura de 50mm para a medição dos deslocamentos verticais. Os LDVT foram utilizados nos ensaios de flexão para a obtenção das deflexões no meio do vão da amostra.

Nos ensaios para a determinação dos fatores de intensidade de tensões foi utilizado um microscópio digital Celestron HDM213 de 1.3mp para captura de fotografias e vídeos (Figura 8).



Figura 8- Microscópio para obtenção de imagens digitais

Foram usados um par de garras auto travante por efeito de alavanca, para ensaios de tração com capacidade máxima 500kgf com recartilhado plano fino para corpos de prova planos com largura máxima 32mm e espessura máxima 10mm, Figura 9 (a).

Também usou-se um par de garras auto travante por efeito cunha para ensaios de tração com capacidade máxima de 2000kgf, com pré aperto por sistema de rosca, com recartilhado plano fino para corpos de prova planos com largura máxima 40mm e espessura 0 a 5 mm, Figura 9 (b).



(a)

(b)

Figura 9- Garras. (a) por efeito de alavanca. (b) por efeito cunha.

Na Figura 10 pode se ver o dispositivo para ensaio de flexão/dobramento, para corpo de prova com largura máxima de 100mm, distância entre apoios ajustável de 16 a 250mm, raio de curvatura dos apoios e cutelo de aplicação de carga 3,5mm e capacidade máxima de 2000kgf, para os ensaio de flexão em quatro ponto foi utilizado um dispositivo especial para distribuir o carregamento em duas cargas concentradas.

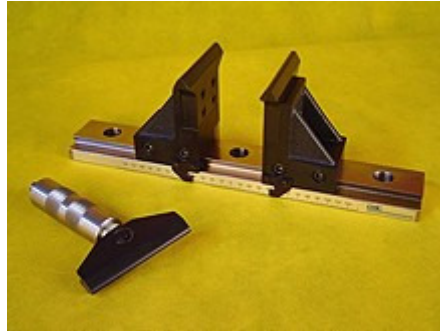


Figura 10- Dispositivo para ensaios de flexão.

3.6. Corpos-de-prova para ensaios de fator de intensidade de tensões

Os corpos-de-prova para a determinação das propriedades à fratura foram extraídos da base do bambu *Dendrocalamus giganteus*, pois nesta seção têm-se as maiores espessuras o que permite obter espécimes mais uniformes e regulares. As amostras foram preparadas no laboratório do LEM da PUC-Rio num procedimento de corte manual com serras tipo fita, estilete, lixas e ferramentas próprias para trabalhos de marcenaria.

Foram utilizados dois tipos de corpos-de-prova, um para ensaios de tração para a determinação do fator de intensidade de tensões sob modo I, e outro para ensaios de flexão em quatro pontos (4ENF) para fator de intensidade de tensões sob modos I e II.

3.6.1. Fator de Intensidade de Tensões sob Modo I num Ensaio de Tração simples.

Na Figura 11 vê-se a geometria do corpo-de-prova para os ensaios de tração utilizados para a determinação do fator de intensidade de tensões para o modo I. O espécime é cortado longitudinalmente ao colmo do bambu tentando-se ter uma espessura constante ao longo do corpo-de-prova similar às amostras para a determinação do módulo de elasticidade. No desenho, a espessura (t)

corresponde à espessura de parede do colmo e o comprimento do entalhe induzido é representado pela variável a .

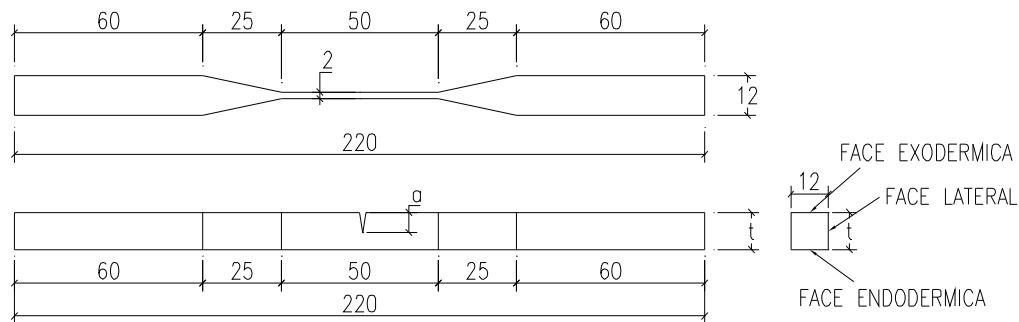


Figura 11-Dimensões do corpo-de-prova para determinação das propriedades à fratura no modo I com um ensaio de tração simples (Amada & Untao, 2001).

Foram preparados corpos-de-prova com entalhes induzidos na face exodérmica (EFEX) com comprimento inicial de 1, 2, 4, 5 e 6mm feitos com um estilete de 0.5mm de espessura. No total foram feitos três corpos-de-prova para cada comprimento de entalhe para um total de 15 espécimes.

O ensaio de tração é realizado aplicando-se uma carga axial longitudinal no sentido das fibras do bambu (Figura 12), com uma velocidade de deslocamento de 1mm/min. Antes do ensaio foram determinados os valores médios de largura e espessura da zona de estrição para o cálculo da área da seção transversal do corpo-de-prova. Durante o ensaio foi registrada a carga (P), o tempo (t) e o instante no qual se inicia a propagação das fissuras (t_i).

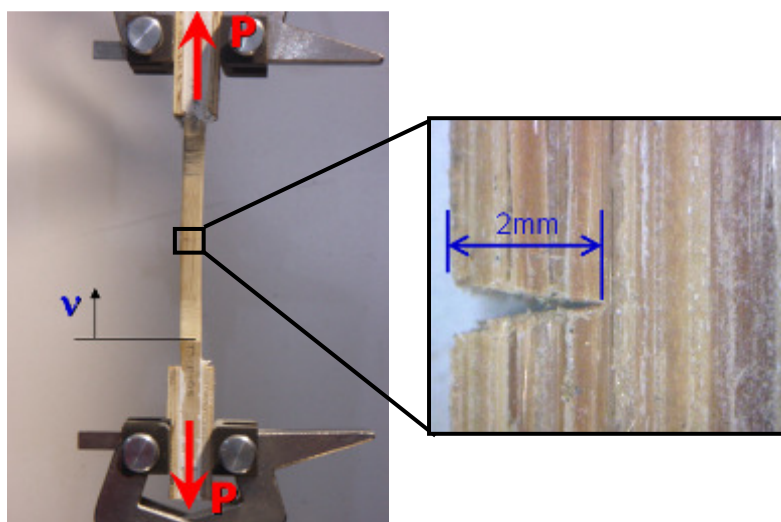


Figura 12-Ensaio de tração para a determinação da tenacidade à fratura sob modo I, K_{IC} .

A determinação do instante de início da propagação da fissura horizontal, i.e, da propagação no plano do entalhe foi difícil de estabelecer devido à trinca não se propagar no sentido do plano, mas muda de direção e se propaga verticalmente. A Figura 13 indica como a fissura que inicialmente correspondia a um entalhe horizontal, muda para ter uma propagação vertical no sentido da orientação das fibras e especialmente por uma faixa de concentração de lignina a qual tem baixa resistência.



Figura 13- Detalhe do modo de propagação da fissura num ensaio de tração simples para a determinação do fator de intensidade de tensões.

Os ensaios foram executados até a falha do espécime para observar o comportamento do elemento fraturado.

3.6.2.Fator de Intensidade de Tensões sob Modo I e II num Ensaio 4-ENF.

Para os ensaios de flexão para a determinação das propriedades à fratura, foram utilizados dois tipos de espécimes, o primeiro com entalhe vertical no meio do elemento, para o modo I e o segundo com entalhe horizontal coincidente com o eixo neutro da seção, para o modo II. A Figura 14 mostra a geometria dos corpos-de-prova mencionados.

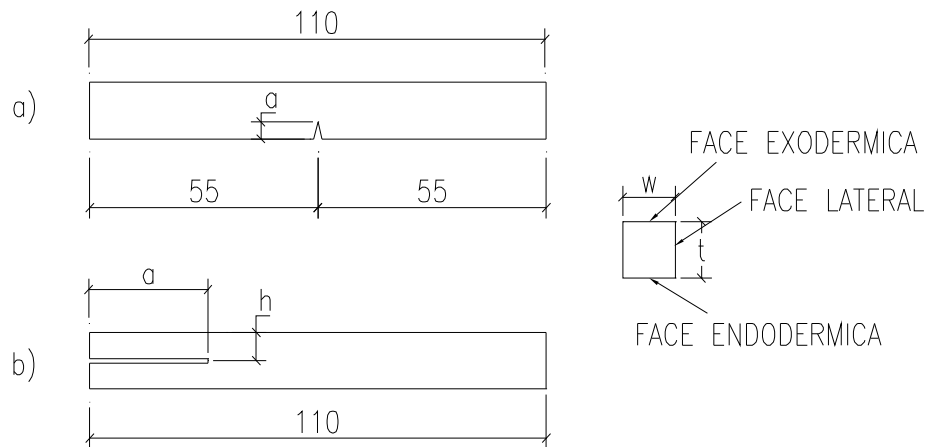


Figura 14-Dimensões dos corpos-de-prova para ensaios de flexão para determinação das propriedades à fratura. a) Modo I, b) Modo II.

Os ensaios foram executados como ensaios de flexão em quatro pontos, i.e, como uma viga simplesmente apoiada com duas cargas concentradas como mostra a Figura 15.

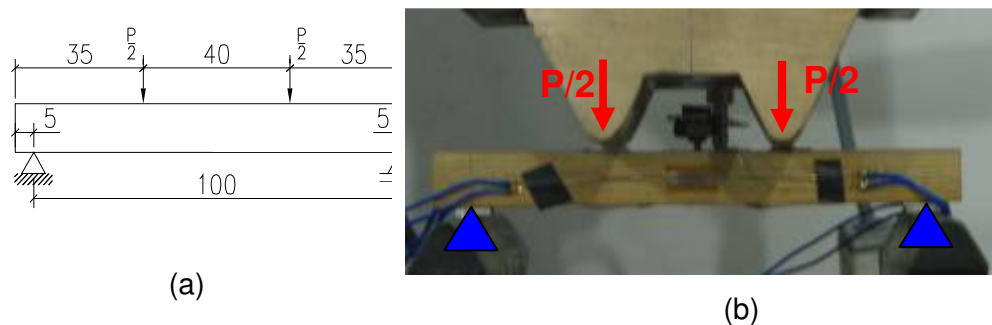


Figura 15-Ensaio de flexão 4-ENF. (a) Esquema do ensaio 4-ENF para modo II. (b) Fotografia do ensaio onde pode se observar a forma de aplicação da carga, as condições de apoio e os strain gages colados na cara lateral do corpo-de-prova

Foram realizados ensaios iniciais que permitiram observar falhas de material por esmagamento nos pontos de aplicação do carregamento e nos apoios do espécime (Figura 16). Assim, foi preciso colar com cola epóxica chapas de alumínio de 2mm de espessura para evitar o esmagamento nos pontos indicados.



Figura 16- Esmagamento ocorrido no ensaio de flexão.

O comprimento dos entalhes nos espécimes para modo I é de 1mm (Figura 17) e para o modo II varia de 35mm até 65mm (Figura 18) a partir do apoio, estes são feitos com estilete de 0.5mm de espessura. Para o modo I foram preparados nove corpos-de-prova, três para cada posição de entalhe induzido, i.e, na face exodérmica, endodérmica e lateral. Nos ensaios para modo I foram registrados os dados de carga aplicada (P), deslocamento vertical no meio do vão da viga (v) e leituras de deformação na face superior, inferior e num ponto perto da ponta do entalhe.

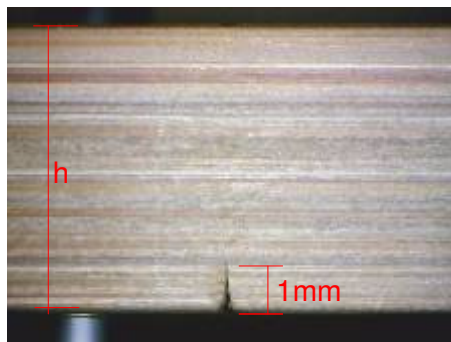


Figura 17-Detalhe da trinca induzida para os ensaios de flexão para a determinação da tenacidade sob modo I.

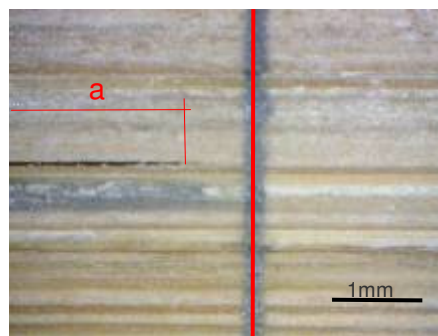


Figura 18-Detalhe da trinca induzida para os ensaios de flexão para a determinação da tenacidade sob modo II.

Para os testes para o fator de intensidade de tensões sob modo I foram utilizados strain-gages colados nos pontos de maiores deformações na face superior e inferior do corpo-de-prova para registrar as deformações durante o ensaio e assim poder estabelecer o instante no qual as deformações nos extensômetros ficam nulas e indicava o ponto de carga crítica. A Figura 19 indica a posição dos extensômetros elétricos utilizados.

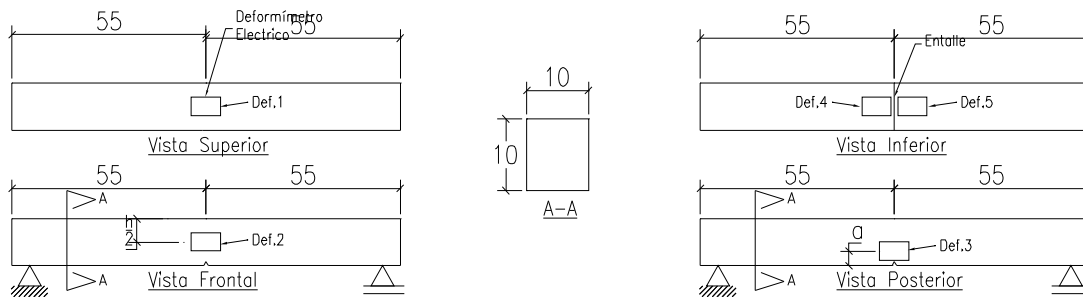


Figura 19-Localização de todos os strain gages nas faces do corpo-de-prova (Dimensões em mm).

Para o modo II foram feitos oito espécimes, dois por cada comprimento de entalhe. Os ensaios 4-ENF correspondem a testes de flexão de vigas simplesmente apoiadas solicitadas por duas cargas concentradas com os quais é possível determinar o carregamento crítico. Foi registrada a carga e a deflexão no meio do vão. A Figura 15, mostra um esquema da configuração do ensaio. A carga foi controlada para ser aplicada a uma velocidade de 0.5mm/min.

Os valores da carga crítica para o modo II é determinada a partir da curva experimental Carga aplicada vs. Deflexão, na qual é desenhada a melhor linha reta que define a zona elástica e determina a flexibilidade (C) (reta AB) como mostra a Figura 20 (a). Depois é desenhada a linha AB' cuja pendente corresponde ao 105% da pendente da reta AB (Tanaka et. All, 1995).

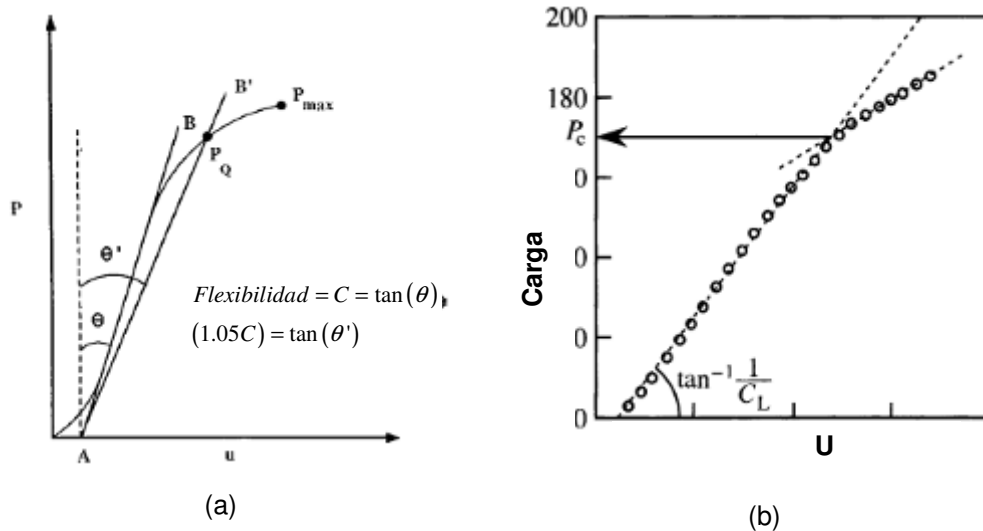


Figura 20-Procedimento para a determinação da carga crítica (P_c) e a flexibilidade (C), a partir de uma curva Carga (P) vs. Deslocamento Vertical (U) num ensaio 4-ENF.

Se a carga máxima P_{\max} se encontra dentro das duas linhas AB e AB' , $P_c = P_{\max}$. Se P_{\max} fica por fora das linhas AB e AB' , $P_c = P_Q$. Se $P_{\max}/P_Q < 1.1$, $P_c = P_Q$; mas se $P_{\max}/P_Q > 1.1$, P_c corresponde ao ponto de intersecção das duas retas desenhadas sobre os segmentos lineares da curva Carga aplicada vs. Deslocamento vertical, como mostra a Figura 20 (b) (Yoshihara, 2004).