

TESE
340

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

"TÉCNICAS EXPERIMENTAIS NECESSÁRIAS
À DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA MECÂNICA DA FRATURA
APLICÁVEIS AOS MATERIAIS FRÁGEIS"



TULIO PINAUD MADRUGA

CLASS	DATA

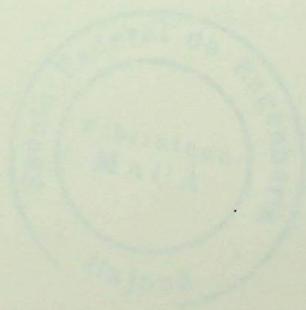
... do Departamento de Medicina, pelo qual ...
... do Curso de Medicina:

... Professor ... pelo ...
... ministrados em ...
... a ... a oportunidade de
aprovação:

... Professor ...
... a ...

... e seus filhos, pela ...
... a ...

... pais, pelo ...
... a ...



Aos meus pais,
minha mulher e
meus filhos.

CLASS. 620.178(043a2)

CUT. M 178+

TO MBO 340

AGRADECIMENTOS

O autor expressa os seus agradecimentos:

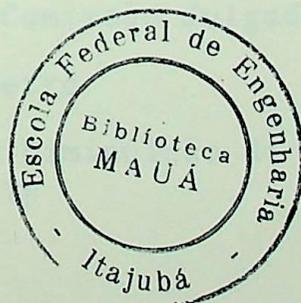
ã Escola Federal de Engenharia de Itajuba, particularmente ao Departamento de Mecânica, pelo apoio prestado durante o desenvolvimento do Curso de Mestrado;

ao Professor Law Lin Tang, pelos ensinamentos de grande profundidade técnica e humana, ministrados em suas belíssimas aulas e nas longas conversas em que tive a oportunidade de aproveitar;

ao Professor Ricardo Damião Sales Goz, pela orientação paciente, inteligente e amiga deste trabalho;

ã minha mulher e meus filhos, pela tranquilidade que me permitem ter, tornando possível a realização deste trabalho;

aos meus pais, pelas lições de vida, ministradas desde o berço, que com firmeza e carinho traçaram em mim o rumo dos valores que ainda hoje norteiam minha vida.



ÍNDICE DE ASSUNTOS

1 - INTRODUÇÃO	
1.1 - Objetivo do Trabalho	1
1.2 - Mecânica da Fratura	3
1.3 - Análise de Tensões de uma Trinca	7
2 - TÉCNICAS EXPERIMENTAIS	
2.1 - Generalidades	12
2.2 - Natureza Estatística da Resistência Mecânica	12
2.3 - Tenacidade a Fratura	15
2.4 - Determinação do Módulo de Elasticidade	31
2.5 - Trabalho de Fratura	39
3 - OPERAÇÃO DE ENSAIO NA MÁQUINA INSTRON	
3.1 - Introdução	48
3.2 - Execução de um Ensaio de Flexão	51
4 - CONCLUSÃO	
4.1 - Filosofia do Projeto	65
4.2 - Determinação dos Parâmetros	66
4.3 - Limitações do Processo	67
BIBLIOGRAFIA	68
ANEXO I - Pronunciamento da Comissão Julgadora	70
ANEXO II- Folha de Julgamento da Comissão Julgadora	71
ANEXO III - Calibração do Extensômetro	72
ANEXO IV - Avaliação do Efeito da Diminuição de W na Execução do Ensaio de γ_F	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.1 - Placa plana, contendo defeito, sob tensão.	4
Fig.2 - Modelos básicos de propagação de trincas.	7
Fig.3 - Distribuição de tensões na ponta da trinca.	8
Fig.4 - Zona plástica na ponta da trinca.	10
Fig.5 - Variação da tenacidade a fratura com a espessura.	11
Fig.6 - Gráfico de Weibull.	15
Fig.7 - Placa trincada internamente.	17
Fig.8 - Placa com duas trincas.	18
Fig.9 - Placa com uma trinca.	18
Fig.10 - Placa simplesmente trincada em flexão.	19
Fig.11 - Produção de pré-trinca por penetração de uma cunha num entalhe.	20
Fig.12 - Entalhe triangular para produção de pré-trinca.	21

Fig.13 - Curva carga P versus deflexão f, mostrando o ponto onde corta a reta de rigidez previamente estabelecida para um CP trincado.	21
Fig.14 - Montagem de um ensaio de flexão em quatro pontos.	22
Fig.15 - Corpo de prova retangular a ser submetido a ensaio de flexão a quatro pontos.	24
Fig.16 - Produção de uma pré-trinca em ensaio de flexão a 4 pontos através propagação controlada da trinca.	26
Fig.17 - Curva de deformação elástica, um ensaio de flexão a 4 pontos, mostrando a curva esperada conforme a posição dos apoios e do corpo de prova.	31
Fig.18 - Ensaio de trabalho de fratura.	43
Fig.19 - Peso do papel menos o correspondente a área sob a curva.	45
Fig.20 - Peso do papel correspondente a área sob a curva.	46
Fig.21 - Sistema de carga em flexão.	50

ÍNDICE DE FOTOGRAFIAS

- Foto 1 - Corpo de prova, após fratura, mostrando entalhe em V e a pré-trinca. 27
- Foto 2 - Vista geral da máquina de teste universal INSTRON, modelo TTDM e do registrador XY tipo ZSK-2, fabricado pela Rohde e Scharz. 48
- Foto 3 - Montagem do disco de corte em retífica plana, protegido por caixa de acrílico que envolve uma mesa magnética. 55
- Foto 4 - Amostra de alumina sobre um bloco de aço, descolando após retífica, mediante efeito do calor cedido pelo aquecedor elétrico Corning PC 351 Hot Plate Stirrer. 56
- Foto 5 - Caixa de segurança e fixação da célula de carga. 57
- Foto 6 - Célula de carga de 500 kgf. 58
- Foto 7 - Dispositivo de carregamento montado sobre a célula de carga. 59
- Foto 8 - Dispositivo de carregamento montado com o extensômetro. 60

Foto 9 - Elementos constituintes do extensômetro.

61

Foto 10 - Vista geral do registrador xy.

63

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Objetivo do Trabalho

O engenheiro mecânico necessita conhecer as respostas que os materiais usados no projeto fornecem as diversas solicitações envolvidas no desempenho da estrutura. Para obter estas respostas são necessárias uma sistemática de raciocínio teórico, fundado em sistema de equações que o representem e, estar suportado por dados sobre as propriedades dos materiais, definidas por seus parâmetros.

O material frágil, notadamente os cerâmicos, tem suscitado muito interesse ultimamente, dado as aplicações em locais que exijam alta resistência ao desgaste, notadamente turbinas de motores, ferramentas de corte, etc. Via de regra deseja-se que o material frágil exiba alta resistência mecânica, rigidez e durabilidade adequada ao serviço a que se destina.

Aplicar responsavelmente materiais frágeis ao projeto de estruturas mecânicas exige o conhecimento da mecânica de sua fratura, que fornece as equações necessárias ao conhecimento de seu desempenho. Este estudo atinge hoje um elevado nível de sofisticação, analisando a fratura em função de uma trinca que nucleia e se propaga até atingir a fratura, quando submetido a um determinado nível crítico de tensões. Podemos então definir a fratura como sendo a fragmentação ou separação de um corpo sob tensão, resultante da acumulação de danos no material, na forma de trincas, que nucleiam e se propagam. O conhecimento do processo de propagação da trinca

nos permite saber a resistência residual de um material em função do tamanho da trinca existente, qual o tamanho da trinca tolerável para a carga esperada em serviço; quanto tempo leva uma trinca para crescer de um certo tamanho inicial até um tamanho crítico, qual o tamanho do defeito pré-existente tolerável no momento em que a estrutura entra em serviço e com que frequência deve ser inspecionada.

Para que as equações representem fielmente o comportamento do material é de suma importância estarem compostas de dados corretos. É necessário então que tenhamos, a par do desenvolvimento teórico existente, um sofisticado sistema de técnicas experimentais que permitam, rápida e eficientemente, definir métodos e procedimentos com a finalidade de determinar as propriedades desses materiais. Este trabalho é um esforço neste sentido, em que as técnicas experimentais existentes na bibliografia foram estudadas, testadas e somadas a experiência pessoal do autor sendo desenvolvidas e grupadas de forma objetiva visando a permitir ao leitor sua aplicação imediata. A importância do trabalho fica aumentada se considerarmos o fato de que estes materiais, de uso relativamente recente em nosso meio industrial, não tem estabelecido pelo fabricante os parâme-

tros necessários à aplicação da mecânica da fratura, ficando a cargo do engenheiro projetista sua determinação. Podemos até sugerir um procedimento de rotina para determinação de propriedades, de um lote de matéria prima que esteja para ser usada, por considerarmos que elas dependem da forma, dimensão e distribuição estatística do defeito. Desta forma, a elevada confiabilidade dos dados empregados aumentariam a segurança da estrutura em serviço, permitindo a diminuição de custos por emprego de dimensões otimizadas de matéria prima.

1.2 - Mecânica da Fratura

A origem da mecânica da fratura remonta, segundo Lawn e Wilshaw (1), a 1913 quando Inglis estudou a concentração de tensões em uma placa plana, Fig.1, na qual introduziu defeitos na forma de trincas. Então, para uma cavidade elíptica, mostrou que a tensão se concentrava de acordo com

$$\sigma_{\max} = \sigma \left(1 + \frac{2a}{b} \right) \quad (1)$$

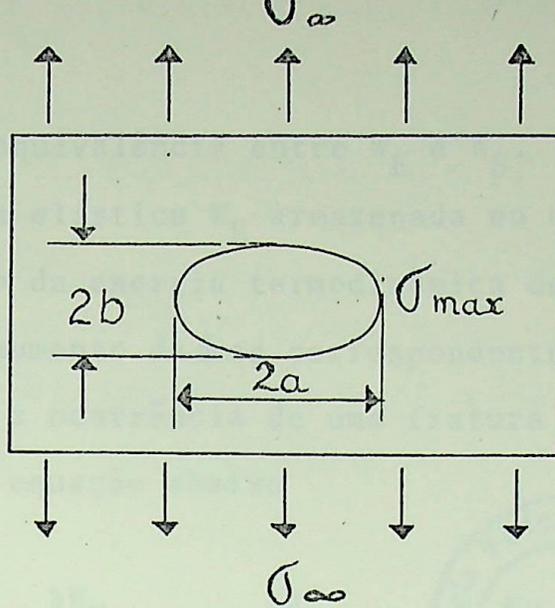


Fig.1 - Placa plana, contendo defeito, sob tensão.

em que σ_{\max} é a tensão concentrada na ponta do defeito, a e b dimensões do defeito e σ_{∞} a tensão de projeto. Tal procedimento, entretanto, é de difícil realização prática, devido a dificuldade de se medir a e b .

Em 1920 Griffith (1) (2) postulou a existência, nos sólidos frágeis, de uma população de micro-defeitos, causadores da concentração de tensões (3), as quais podem chegar ao valor da força coesiva teórica, quando os materiais são submetidos a um carregamento. Isto acontecendo, significa a propagação da trinca, que aumenta de tamanho. Assim, temos a criação de nova superfície de trinca, de energia superficial W_S , correspondente a uma energia consumida na fratura, que tem que ser compensada pela diminuição da energia elástica W_E armazenada no corpo, liberada na propagação da trinca (4). Sendo W_T a energia total do sistema, em que o trabalho feito pelo movimento de cargas externas é negligenciado (material frágil), temos:

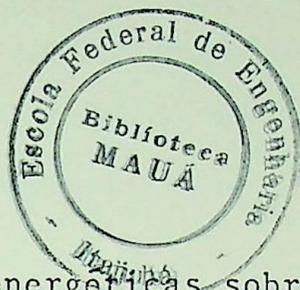
$$W_T = W_E + W_S \quad (2)$$

Sendo a o tamanho da trinca, teremos uma trinca estável se

$$\frac{\partial W_T}{\partial a} = 0 \quad (3)$$

que significa uma equivalência entre W_E e W_S . Se a diminuição da energia mecânica elástica W_E armazenada no material for maior que o aumento da energia termodinâmica de superfície, que aumenta com o aumento da área correspondente a propagação da trinca, teremos a ocorrência de uma fratura catastrófica. Isto é expresso pela equação abaixo

$$-\frac{\partial W_E}{\partial a} < \frac{\partial W_S}{\partial a} \quad (4)$$



Fundado nestas considerações energéticas sobre a fratura e nas observações de Inglis, Griffith estabeleceu uma equação que relaciona os parâmetros do material, o defeito existente e a tensão máxima que o material pode resistir sem se fraturar (5).

$$\sigma_c = \frac{1}{Y} \left(\frac{2E \gamma_s}{a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

em que σ_c é a tensão crítica a partir da qual haverá fratura, E é o módulo de elasticidade, γ_s a energia específica de superfície e Y um fator de forma. Esta equação estabelece um critério para predizer o comportamento do corpo à fratura, face as leis de conservação de energia. É uma equação de grande importância na análise da resistência mecânica do material. Se tivermos dois materiais de igual classificação pelas normas existentes, que apresentem entretanto diferentes valores de a , eles terão diferentes níveis de resistência a tensão σ_c .

Devemos notar que os materiais, embora frágeis, antes de se fraturarem, apresentam uma deformação plástica que se acentua na ponta da trinca, aumentando a resistência a sua propagação. Griffith levou em conta um trabalho realizado de deformação plástica γ_p . Então, a equação (5) passou a ter a seguinte forma:

$$\sigma_c = \frac{1}{Y} \left(\frac{2E(\gamma_s + \gamma_p)}{a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

A mecânica da fratura nos fornece também uma equação que relaciona o defeito do material com dimensão a submetidos a uma tensão de projeto σ , com um parâmetro do material, que é o fator de tenacidade, K

$$K = Y \sigma \sqrt{a} \quad (7)$$

Para uma situação crítica, teremos σ_c como sendo a tensão crítica, a partir da qual ocorrerá fratura e K_c , fator crítico de tenacidade a fratura, então a eq.(7) fica

$$K_c = Y \sigma_c \sqrt{a} \quad (8)$$

Ao mesmo tempo em que Griffith desenvolvia suas idéias, Irwin (6) usou um termo de energia elástica por unidade de comprimento do aumento da trinca G e estabeleceu a relação

$$\sigma = \frac{1}{Y} \sqrt{\frac{EG}{a}} \quad (9)$$

Comparando (6) e (9) podemos ver que

$$G = 2(\gamma_s + \gamma_p) \quad (10)$$

No ponto de instabilidade, a taxa de diminuição da energia elástica G , considerada como uma força motriz para a propagação da trinca, aumenta para um valor crítico G_c , acima do qual ocorrerá fratura.

1.3 - Análise de Tensões em uma Trinca

A fratura de um sólido trincado pode ser analisada com base em conceitos da teoria da elasticidade. Westergaard (7), fundado na teoria da elasticidade e variáveis complexas, considerando que o campo de tensão no entorno da trinca pode ser dividido fundamentalmente em 3 tipos, descritos na figura 2 abaixo, encontrou o fator de intensidade de tensão K como função da tensão aplicada e do comprimento de trinca a .

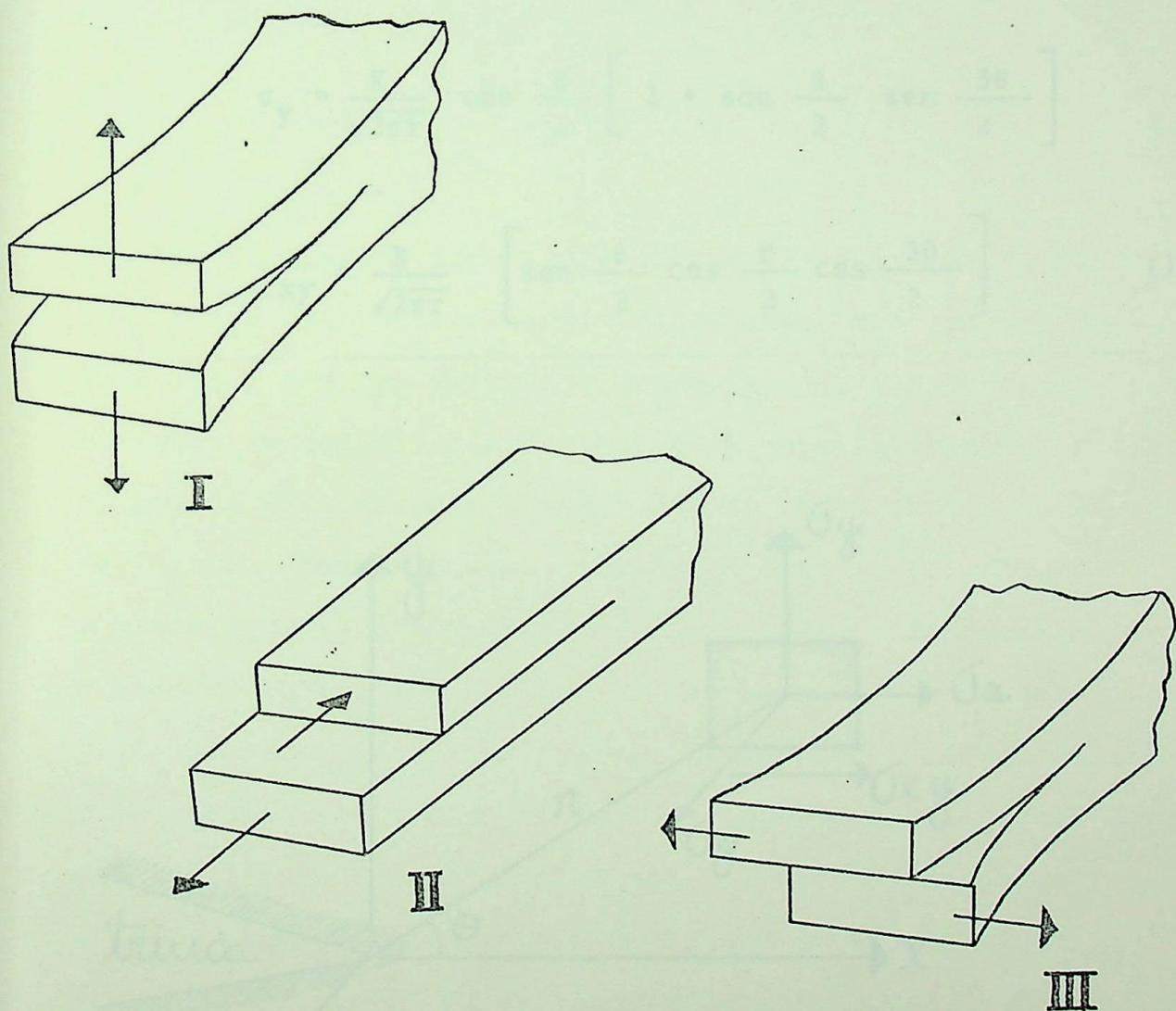


Fig.2 - Modelos básicos de propagação de trincas.

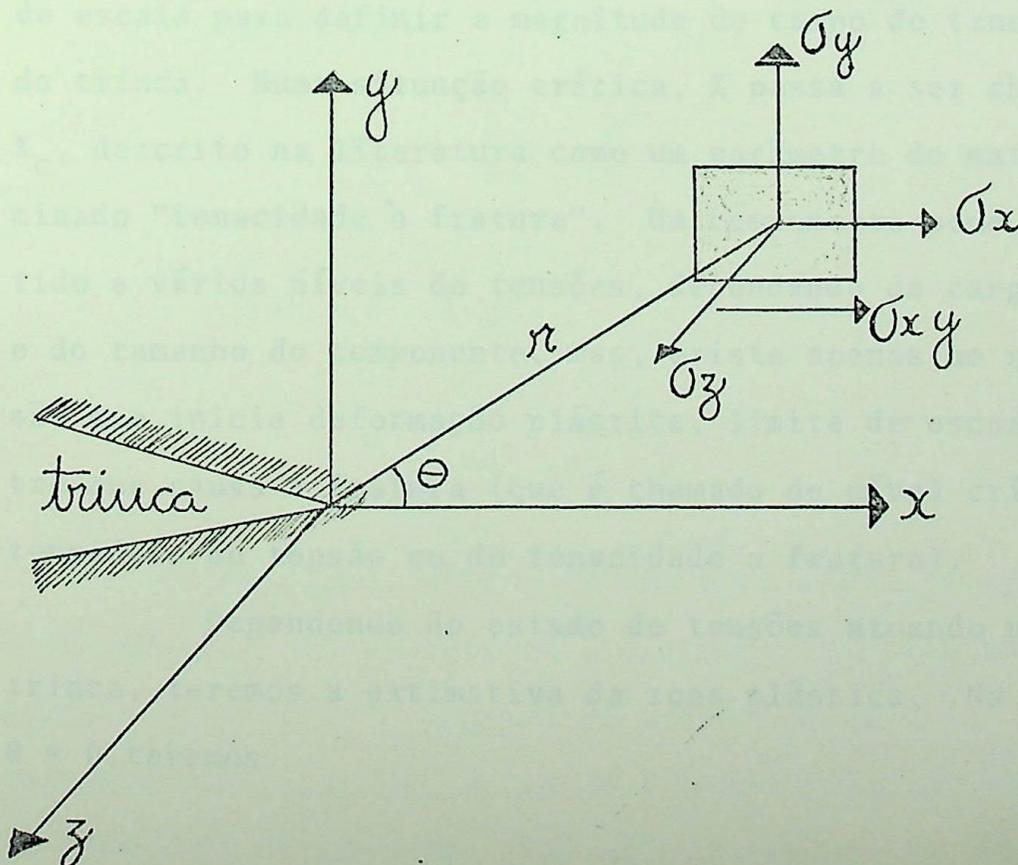
O modo I, em que a superfície da trinca move-se perpendicularmente ao carregamento é o encontrado na maioria das situações (8) o que justifica serem as aplicações experimentais do presente trabalho obtidas através um carregamento desse tipo.

A distribuição de tensões na ponta de uma trinca, conforme mostrado na fig.3, tem a seguinte expressão:

$$\sigma_x = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \operatorname{sen} \frac{3\theta}{2} \right]$$

$$\sigma_y = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \operatorname{sen} \frac{3\theta}{2} \right]$$

$$\sigma_{xy} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \left[\operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right] \quad (11)$$



Das eqs. 11 podemos notar que a tensão local aumenta a medida que r diminui, atingindo níveis extremamente elevados quando r se aproxima de zero. Isto é evitada pela ocorrência de deformação plástica na ponta da trinca. A região plástica é pequena, desenvolve-se na ponta da trinca e é circundada pela região elástica. Se tivermos uma carga aplicada na direção Y , a região plástica desenvolverá uma deformação positiva ϵ_y e tende a desenvolver deformação negativa ϵ_x e ϵ_z , tal que

$$\epsilon_y + \epsilon_x + \epsilon_z = 0 \quad (12)$$

Uma característica importante das eqs.11 é o fato da distribuição de tensões no entorno da trinca dependerem apenas dos parâmetros r e θ . A diferença entre um material e outro está no fator de intensidade de tensões K , que serve como um fator de escala para definir a magnitude do campo de tensão na ponta da trinca. Numa situação crítica, K passa a ser chamado de K_c , descrito na literatura como um parâmetro do material denominado "tenacidade à fratura". Um componente pode estar submetido a vários níveis de tensões, dependendo da carga aplicada e do tamanho do componente, mas, existe apenas um nível de tensão que inicia deformação plástica, limite de escoamento, e outro que causa a fratura (que é chamado de nível crítico de intensidade de tensão ou de tenacidade a fratura).

Dependendo do estado de tensões atuando na ponta da trinca, teremos a estimativa da zona plástica. Na eq.11, para $\theta = 0$ teremos

$$\sigma_y = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \quad (13)$$

que nos permite traçar um círculo definindo a zona plástica na ponta da trinca, conforme mostrado na fig.4, explicitando 13 em função de r. O limite entre a região plástica e a elástica nos fornece o valor de σ_{ys} . Então, podemos, encontrar o valor de r_y , raio da zona plástica, tanto para deformação como tensão plana.

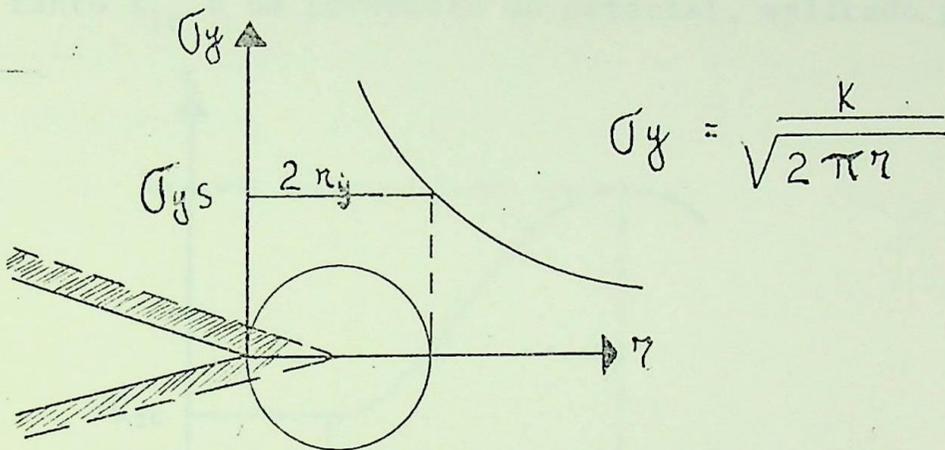


Fig.4 - Zona plástica na ponta da trinca.

tensão plana

$$r_y \approx \frac{1}{2\pi} \frac{K^2}{\sigma_{ys}^2} \quad (14)$$

deformação plana

$$r_y = \frac{1}{6\pi} \frac{K^2}{\sigma_{ys}^2} \quad (15)$$

Em deformação plana, estima-se uma zona plástica menor porque o estado triaxial de tensões a diminui. Considerando que a tenacidade a fratura depende do volume do material capaz de se deformar plasticamente antes da fratura e que o volume depende da espessura da amostra, podemos concluir que K_c varia com a

espessura do corpo de prova que está sendo testado. Se o CP é fino, prevalecerá condição de tensão plana e o material apresentará uma tenacidade máxima. Se a espessura aumenta, prevalecendo a condição de deformação plana, a tenacidade cai a um nível menor que o valor da tensão plana, chamado K_{IC} , conforme mostra a fig.5. Qualquer aumento de espessura que ocorra não altera mais o valor limite de K_{IC} , que permanece constante para qualquer aplicação em engenharia. Portanto K_{IC} é um parâmetro do material, aplicado para qualquer

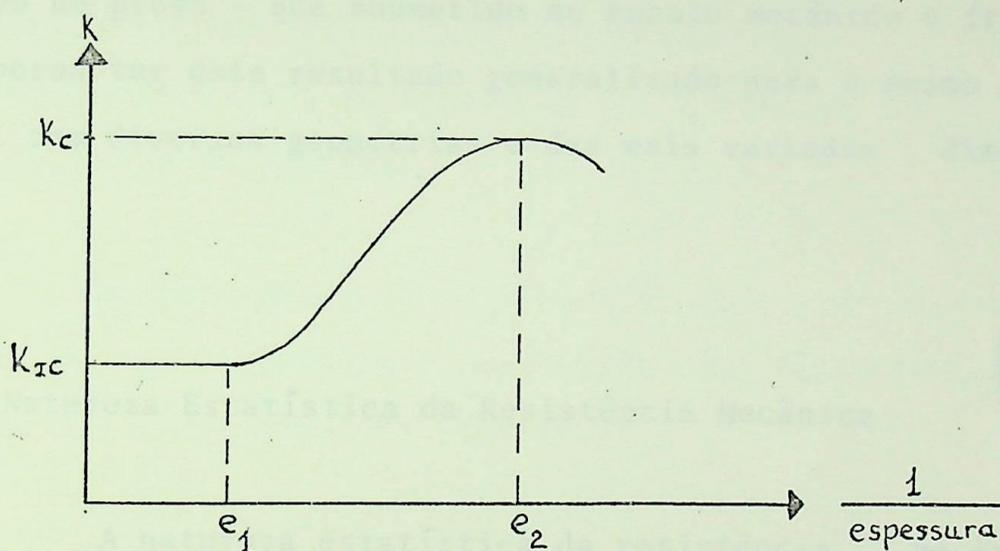


Fig.5 - Variação da tenacidade a fratura com a espessura.

espessura acima do crítico, como mostrado na fig.5. Relações empíricas desenvolvidas por Brown e Srawley (9) nos informam que ocorrerá deformação plana quando a espessura e do corpo de prova for:

$$e_1 \geq 2,5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (16)$$

Valores típicos de K_{IC} não são fornecidos habitualmente pela nossa indústria, necessitando que o projetista realize ensaios a fim de determiná-los.

2 - TÉCNICAS EXPERIMENTAIS

2.1 - Generalidades

A trinca que se propagará, causadora da fratura, será aquela de maior tamanho que estiver disposta de maneira mais favorável a concentração de tensões em sua extremidade. Assim a teoria requer um tratamento estatístico que caracterize a resistência de um volume básico de material - o corpo de prova - que submetido ao ensaio mecânico e fraturado possa ter este resultado generalizado para o mesmo material com diversas geometrias e das mais variadas dimensões.

2.2 - Natureza Estatística da Resistência Mecânica

A natureza estatística da resistência mecânica foi estudada por Weibull (10) em 1939 considerando que existe uma série de micro-defeitos que provocam a fratura de materiais frágeis, todos com tamanhos, formas e posições diferentes. Esta distribuição estatística do defeito provoca uma distribuição estatística da resistência mecânica. A fratura pode ser causada por um pequeno defeito na região de maior tensão ou por um grande defeito numa região de menor tensão.

Weibull considerou um risco de fratura B e uma probabilidade de falha P , para um volume V de material e disse que:

$$P = 1 - \exp(-BV) \quad (17)$$



em que B é dado por:

$$B = \int_V n_1(\sigma) dV + \int_S n_2(\sigma) dS \quad (18)$$

em que V e S são os volume e superfície da amostra $n_1(\sigma)$ e $n_2(\sigma)$ são funções relativas a probabilidades de falha a uma tensão σ . Em geral σ é uma função da posição da amostra. Lewis e Oyler (11) sugerem que $n_1(\sigma)$ e $n_2(\sigma)$ sejam relativos a natureza e distribuição de trincas no interior e na superfície da amostra.

Weibull desenvolveu a equação (17) e a colocou na forma de uma distribuição, conhecida como "distribuição de Weibull", com a seguinte expressão:

$$P = 1 - \exp \left[- \frac{V}{V_0} \left(\frac{S}{S_0} \right)^m \right] \quad (19)$$

onde S é a resistência mecânica do corpo prova, V volume, V_0 e S_0 são parâmetros escolhidos, e m é um parâmetro adimensional, chamado "módulo de Weibull", utilizado para comparar a qualidade do material. Quanto maior o valor de m mais homogênea é a resistência mecânica do material, sendo portanto de melhor qualidade.

O melhor uso da teoria de Weibull consiste na obtenção de um gráfico $\log \log 1/1-P$ versus $\log S$ em que podemos conhecer o valor da resistência mecânica para uma determinada probabilidade de falha.

Desenvolvendo a equação (19) teremos:

$$1 - P = \exp \left\{ - \frac{V}{V_0} \left(\frac{S}{S_0} \right)^m \right\} \quad (20)$$

fazendo $V = \text{constante}$ vem:

$$1 - P = \exp - \left(\frac{S}{S_0} \right)^m \quad (21)$$

$$\frac{1}{1 - P} = \exp \left(\frac{S}{S_0} \right)^m \quad (22)$$

$\log \log 1/1-P = \log \log e + m \log S - m \log S_0$. A equação (22) é uma reta em que o coeficiente é dado por

$$\log \log e - \log \log S_0$$

Assim obtemos o gráfico do seguinte aspecto

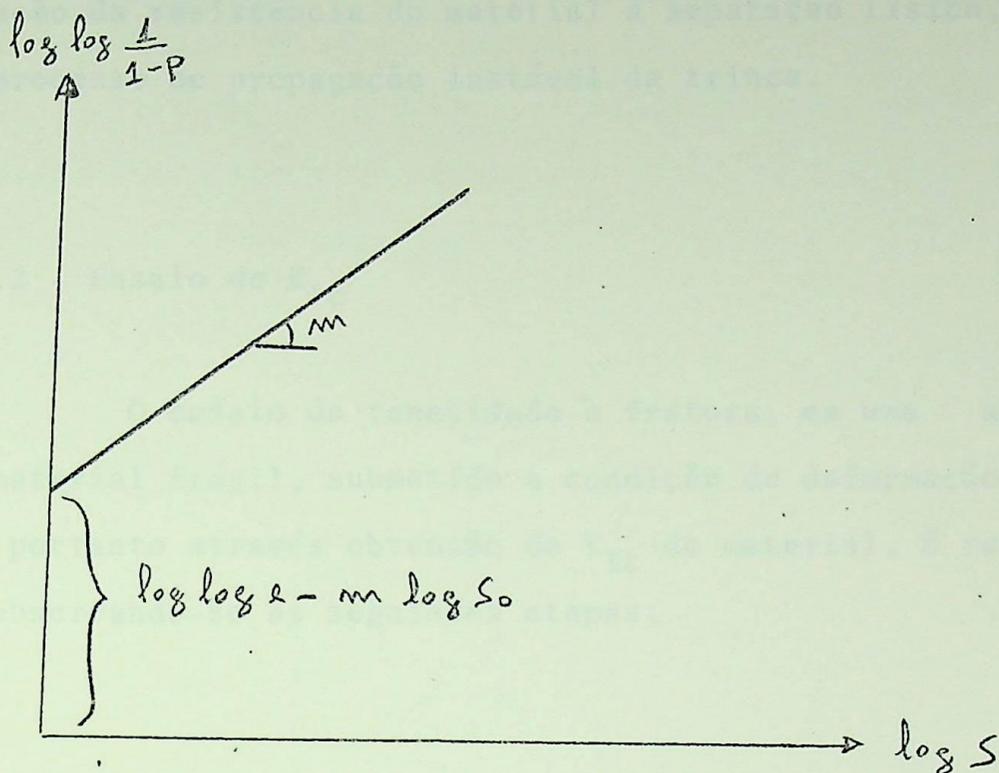


Fig 6 - GRÁFICO de WEIBULL

2.3 - Tenacidade a Fratura

2.3.1 - Generalidades

O fator de "tenacidade à fratura" é um parâmetro chave da mecânica da fratura, sendo intrínseco do material. Sua determinação, definida através ensaio em um corpo de prova, pode ser generalizada para o material embora o ensaio caracterize um certo tipo de pré-trinca, através de um fator de forma γ , conhecido como "calibração da amostra".

Podemos dizer que a tenacidade a fratura é uma indicação da resistência do material à separação física, por um processo de propagação instável da trinca.

2.3.2 - Ensaio de K_{IC}

O ensaio de tenacidade à fratura, em uma amostra de material frágil, submetido a condição de deformação plana, portanto através obtenção de K_{IC} do material, é realizado observando-se as seguintes etapas:

1. Calibração da amostra

O fator de tenacidade à fratura K_{IC} , é proporcional a uma função de forma definida segundo as dimensões e formato do corpo de prova e do tamanho da trinca que irá causar a fratura. As relações entre K_{IC} e as características do corpo de prova são descritas através calibração da amostra. Vários métodos matemáticos ou experimentais de análise de tensões são usados na obtenção da calibração da amostra (12). Todos envolvem simplificações sobre a configuração da amostra, distribuição de cargas ou ambos. O uso da calibração da amostra

permite obter K_{IC} praticamente livre de erros. As expressões matemáticas que se seguem, indicadoras da calibração, foram obtidas em (13), (14) permitindo possibilidade de erro na ordem de 1%.

Para um corpo de prova trincado internamente onde a relação $2a/w$, conforme fig.6, esteja entre 0 e 0,7 teremos uma função de forma dada por

$$Y = 1,77 + 0,227 \left(\frac{2a}{w} \right) - 0,510 \left(\frac{2a}{w} \right)^2 + 2,700 \left(\frac{2a}{w} \right)^3 \quad (17)$$

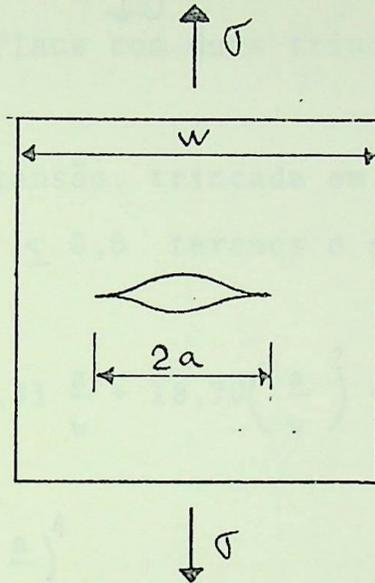


Fig. 7 - Placa trincada internamente.

Se a relação $\frac{2a}{w}$ estiver entre 0 e 0,6, podemos simplificar (17) para:

$$Y = 1,77 + 1 - 0,1 \left(\frac{2a}{w} \right) + \left(\frac{2a}{w} \right)^2 \quad (18)$$

Para uma placa em tensão com duas trincas, conforme mostra a fig.7, teremos o seguinte valor para a função de forma

$$Y = 1,98 + 0,36 \left(\frac{2a}{w} \right) - 2,12 \left(\frac{2a}{w} \right)^2 + 3,42 \left(\frac{2a}{w} \right)^3 \quad (19)$$

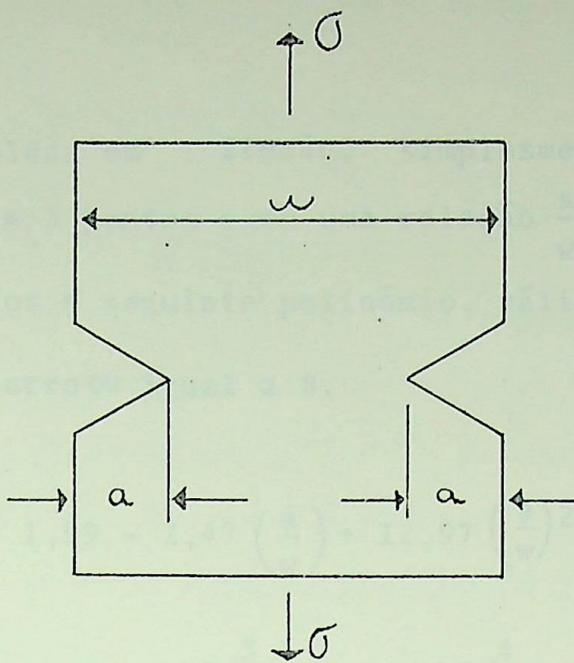


Fig. 8 - Placa com duas trincas.

Para uma placa em tensão, trincada em apenas um lado, conforme fig.8, para $0 \leq \frac{a}{w} \leq 0,6$ teremos o seguinte polinômio:

$$Y = 1,99 - 0,41 \frac{a}{w} + 18,70 \left(\frac{a}{w} \right)^2 - 38,48 \left(\frac{a}{w} \right)^3 + 53,85 \left(\frac{a}{w} \right)^4 \quad (20)$$

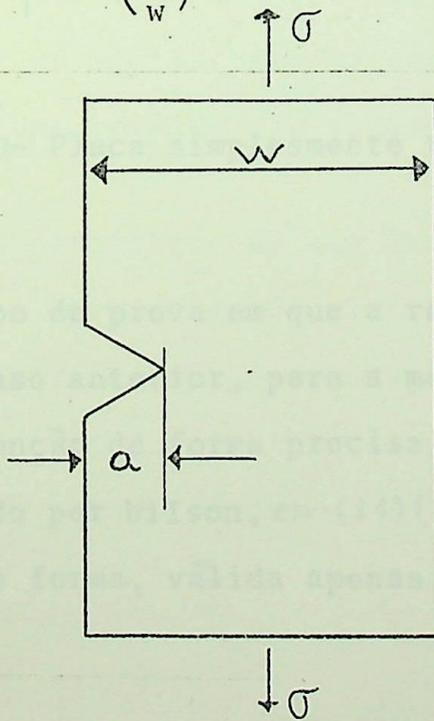


Fig.9 - Placa com uma trinca.

Para uma placa em flexão, simplesmente trincada, submetida a flexão em 3 pontos e com uma relação $\frac{a}{w}$ variando entre 0,2-0,6, teremos o seguinte polinômio, válido para a relação $\frac{t}{w}$ igual a quatro ou igual a 8.

$$Y = 1,99 - 2,47 \left(\frac{a}{w}\right) + 12,97 \left(\frac{a}{w}\right)^2 - 23,17 \left(\frac{a}{w}\right)^3 + 24,80 \left(\frac{a}{w}\right)^4 \quad (21)$$

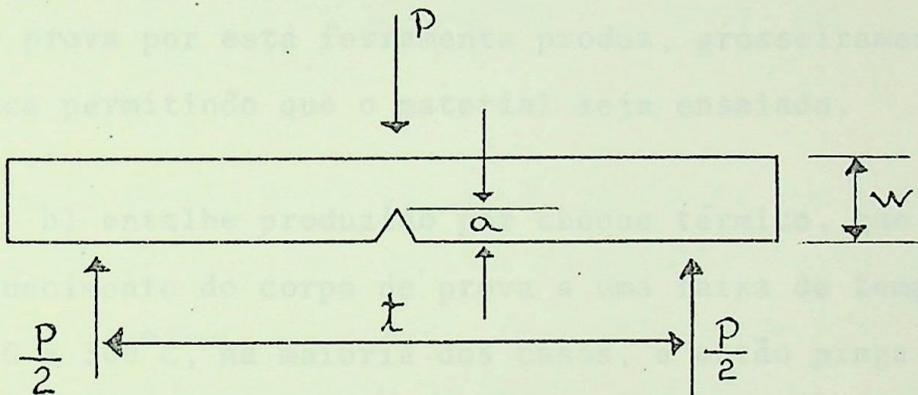


Fig.10- Placa simplesmente trincada, em flexão.

Para um corpo de prova em que a relação $\frac{a}{w}$ seja maior que 0,6, limite do caso anterior, para a mesma trinca mostrada na fig. 10 nova função de forma precisa ser definida. Este trabalho foi realizado por Wilson, em (14)(15) que estabeleceu a seguinte função de forma, válida apenas para ensaio de flexão em 4 pontos:

$$Y(x) = 0,635 \left[x (1 - x^3) \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (22)$$

onde

$$x = \frac{a}{w}$$

2. Produção da pré-trinca

Na eq.(8), verificamos que o fator de forma Y , como visto no parágrafo anterior, é determinado para uma certa configuração do corpo de prova e σ_c pode ser medido num ensaio de flexão. Falta-nos, portanto, estabelecermos um valor de a para conhecermos K_{Ic} , que é uma propriedade do material. Existem vários métodos para a produção da pré-trinca, dos quais destacamos:

a) entalhe produzido por ferramenta, normalmente disco de serra diamantado, de pequena espessura. O corte do corpo de prova por esta ferramenta produz, grosseiramente, uma pré-trinca permitindo que o material seja ensaiado.

b) entalhe produzido por choque térmico, que consiste no aquecimento do corpo de prova a uma faixa de temperatura entre 200 a 300°C, na maioria dos casos, e então pinga-se uma gota de água na região onde se deseja a pré-trinca. Obtem-se, normalmente uma relação a/w variando entre 0,15 a 0,60.

c) penetração de uma cunha num entalhe previamente realizada por ferramenta de corte, conforme mostra a fig.11. Deve-se comprimir o corpo de prova, segundo um eixo onde se deseja que a pré-trinca seja interrompida. Este procedimento evita uma quebra catastrófica.

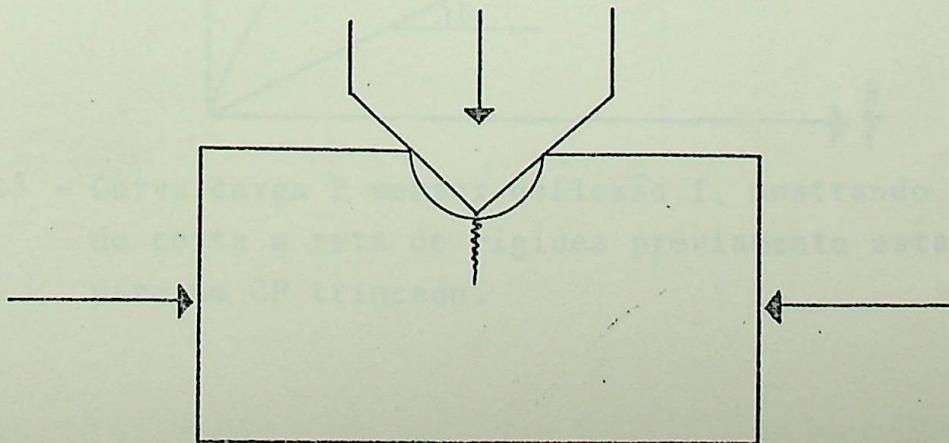


Fig.11 - Produção de pré-trinca por penetração de uma cunha num entalhe.

d) produção de uma pré-trinca, através ensaio de flexão em quatro pontos, num corpo de prova entalhado em V, em baixa velocidade de ensaio. O entalhe é produzido por meio de corte, no meio do corpo de prova inclinado de 15° , em ambos os lados, limitando-se o avanço de forma a apresentar uma forma triangular, como mostrado na fig.12. Uma vez o corpo de prova entalhado, realizamos um ensaio de flexão em quatro pontos, a uma

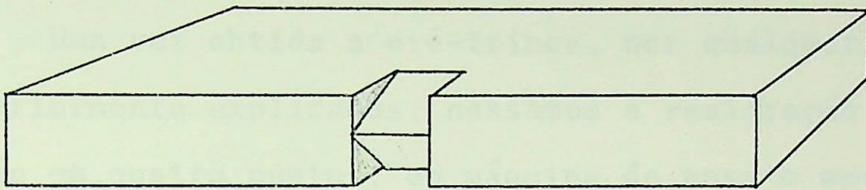


Fig.12 - Entalhe triangular para produção de pré-trinca.

velocidade de ensaio muito baixa, de tal forma que a trinca começa a se formar na parte superior do entalhe e propaga-se até um ponto previamente escolhido. Para determinar este ponto, calculamos a rigidez do corpo de prova trincado, que num gráfico de carga versus deflexão é uma reta e interrompemos o ensaio quando a curva, na sua parte descendente, cortar a reta (fig. 13).

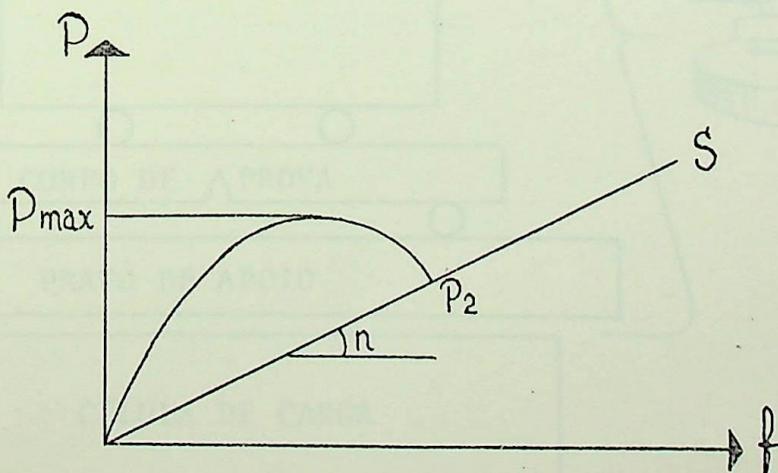
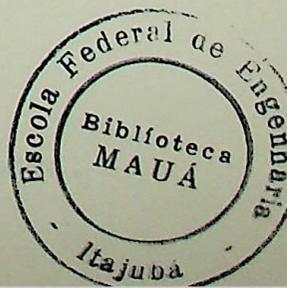


Fig.13 - Curva carga P versus deflexão f , mostrando o ponto onde se corta a reta de rigidez previamente estabelecida para um CP trincado.



Podemos afirmar, então, que neste instante, temos um corno de prova trincado, cujo valor da trinca é o estabelecido pelo cálculo da rigidez. Após o ponto P_{max} ocorre no material uma propagação controlada da trinca que é interrompida ao parar o ensaio, quando P_2 é atingido.

3. Realização do ensaio

Uma vez obtida a pré-trinca, por qualquer dos métodos anteriormente explicados, passamos a realização do ensaio de flexão em quatro pontos, em máquina de ensaio mecânico, com uma montagem como a mostrada na Fig.14, que deve ter suas informações registradas em registrador tipo xy. Vamos obter assim

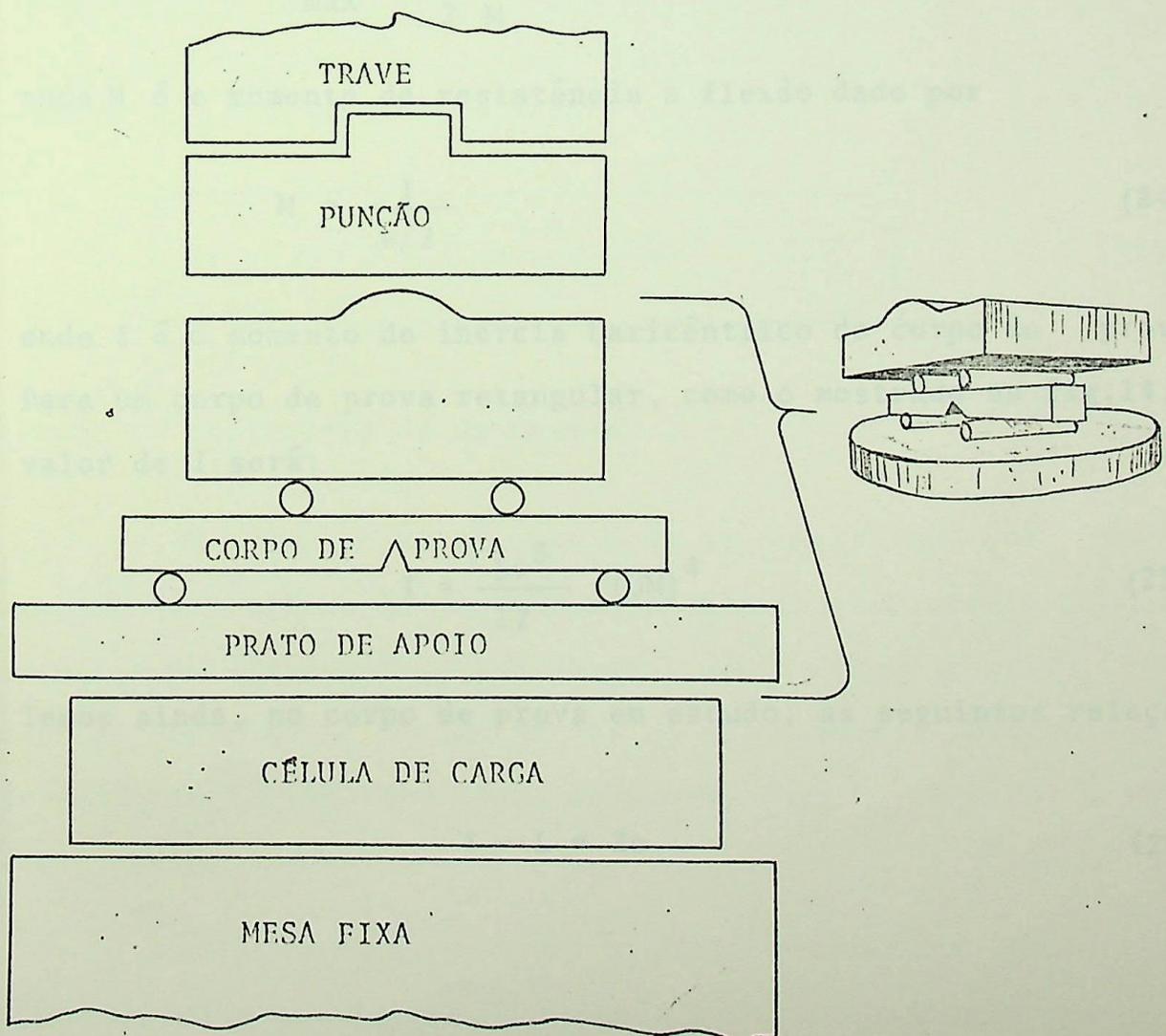


Fig.14 - Montagem de um ensaio a flexão em quatro pontos.

o valor da carga máxima que causou a ruptura e o valor da deflexão correspondente.

4. Avaliação dos resultados

De posse do fator de forma Y , do valor da pré-tensão a que irá causar a fratura do material, da carga máxima P_{\max} e da deflexão correspondente f_{\max} , podemos obter o valor de K_{Ic} do material ensaiado, através das seguintes relações:

a - tensão máxima

A tensão máxima σ_{\max} é dada pela fórmula

$$\sigma_{\max} = \frac{P_{\max} \cdot e}{2 M} \quad (23)$$

onde M é o momento de resistência a flexão dado por

$$M = \frac{I}{w/2} \quad (24)$$

onde I é o momento de inércia baricêntrico do corpo de prova. Para um corpo de prova retangular, como o mostrado na fig.14, o valor de I será:

$$I = \frac{bw^3}{12} \quad (\text{UM})^4 \quad (25)$$

Temos ainda, no corpo de prova em estudo, as seguintes relações:

$$t - L = 2e \quad (26)$$

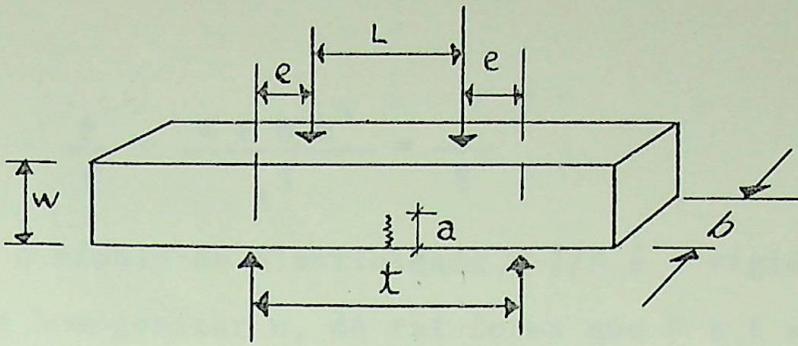


Fig.15 - Corpo de prova retangular a ser submetido a ensaio de flexão a quatro pontos.

Substituindo (25) em (24) teremos:

$$M = \frac{2bw^3}{12w} = \frac{bw^2}{6} \quad (27)$$

e substituindo em (23),

$$\sigma_{\max} = \frac{e P_{\max} 6}{2 b w^2} = \frac{3 e P_{\max}}{b w^2} \quad (28)$$

e então K_{Ic} vai ser obtido por:

$$K_{Ic} = Yf \left(\frac{a_0}{w} \right) \frac{3 e P_{\max}}{b w^2} \sqrt{a_c} \quad (29)$$

2.1.3 Realização de um Ensaio

O primeiro passo, produção da pré-trinca, foi feito através do processo de propagação da trinca, num ensaio quasi-estático de flexão em quatro pontos, sendo corpo de prova uma alumina contendo na ordem de 23% em fase vítrea, confeccionado de forma retangular, tendo como dimensões $b = 3,7 \text{ mm}$, $w = 6,3 \text{ mm}$.

Estebelecemos, no gráfico carga x deflexão, duas retas correspondentes as rigidez do material, respectivamente sem e com trinca. A inclinação de cada reta n , é dada pela fórmula

$$n = \frac{P}{f} = \frac{4 E b w^3}{t^3} = \frac{1}{S} \quad (30)$$

onde E é o módulo de elasticidade e 1/S é a rigidez. Há necessidade de homogenizar n, de tal forma que P e f sejam obtidos em milímetros. Para tanto devemos determinar a escala do trabalho. Na escala correspondente a carga, fazemos uma simples relação entre carga em newtons e distância percorrida pelo registrador, na vertical, em milímetros. Na escala correspondente a deflexão, devemos estabelecer uma relação entre milímetros de deflexão natural, ocorrida no corpo de prova e milímetros de deflexão registrados no papel. Para tanto devemos conhecer a sensibilidade usada no registrador, dada em milivolts por milímetros. A deflexão, medida através um extensômetro cujo sinal é transmitido ao registrador precisa levar em conta a calibração desse extensômetro, obtida através "curva de calibração", e medida em milivolts por microns. Então, teremos a seguinte relação: (Anexo III)

$$1\text{mm de deflexão natural} = \frac{\text{sensibilidade do registrador}}{10 \times \text{calibração do extensômetro}} \text{ mm no papel}$$

Assim, o valor da inclinação da reta correspondente a rigidez será:

$$n = \frac{4Eb w^3}{t^3} \frac{P(\text{em mm}) \times 10 \text{ calibração do extensômetro}}{\text{sensibilidade do registrador}} \quad (31)$$

O ângulo θ será obtido pelo arc tg n. Assim podemos obter θ , para o corpo sem trinca e com trinca. No caso ensaiado, tivemos:

$$\theta_1 = 75,96^\circ \quad (\text{para o material sem trinca})$$

$$\theta_2 = 19,65^\circ \quad (\text{para o material com trinca})$$

Assim foi obtido o gráfico da fig.16 .

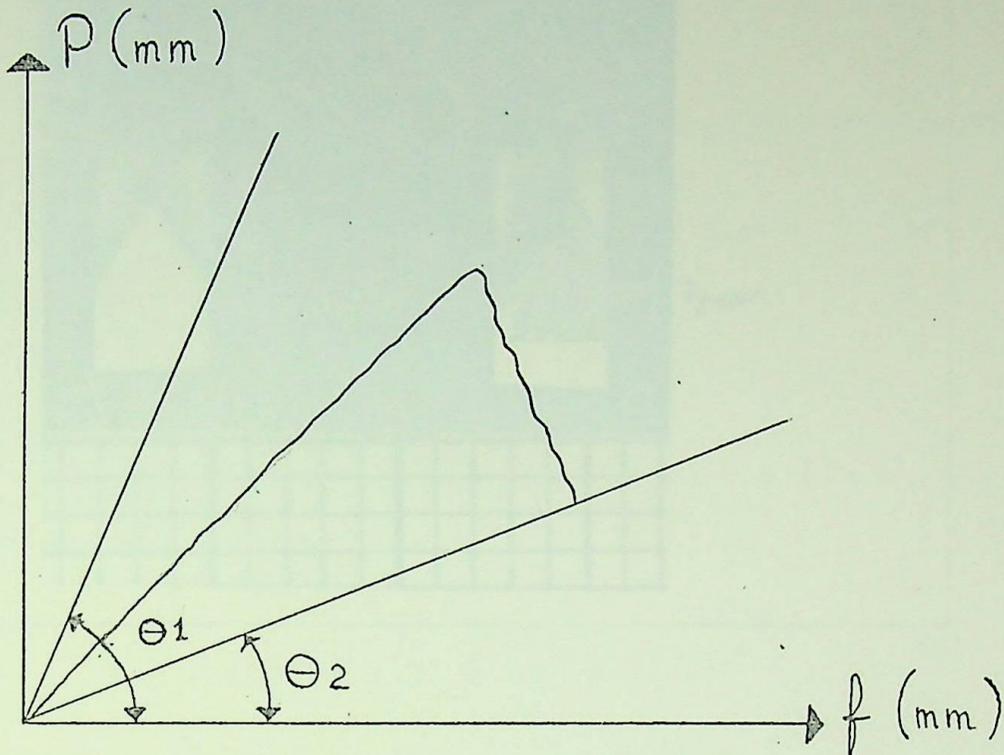


Fig.1 6- Produção de uma pré-trinca em ensaio de flexão a 4 pontos, através propagação controlada da trinca.

Este resultado me permite afirmar que a dimensão w do corpo de prova, devido a trinca, passou a ser de 1,3 mm. Convém resaltar que o método foi comprovado através a introdução de um líquido penetrante que, após a quebra do material, mostrou ser realmente de 1,3 mm a altura w do material, conforme mostra a fotografia 1, apresentada a seguir:

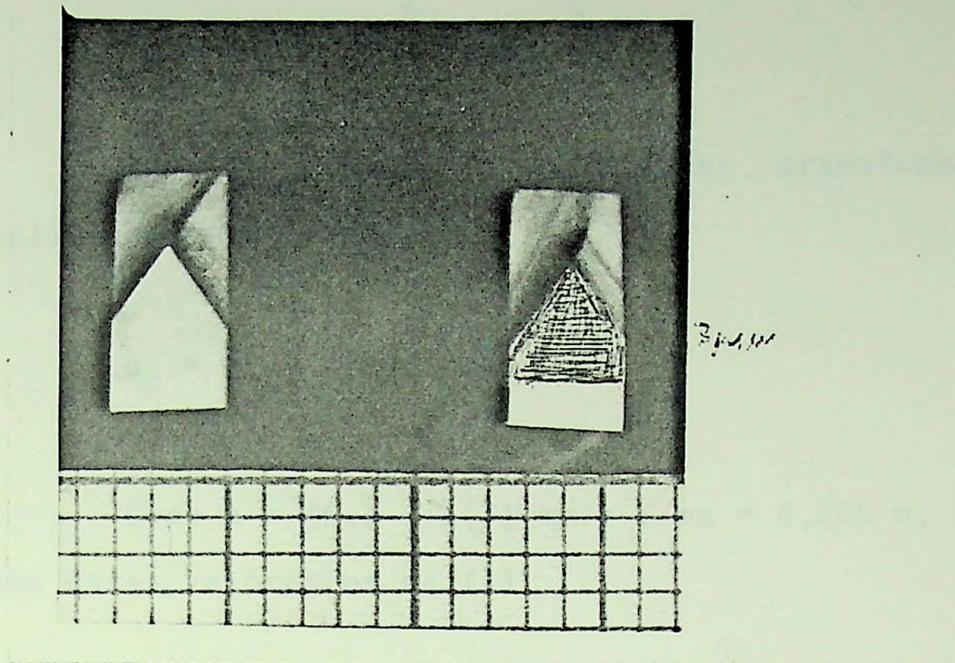


Foto 1 - Corpo de prova, após fratura, mostrando o entalhe em V e a pré-trinca.

Devemos conhecer a função de forma para um corpo de prova nas condições do que está sendo ensaiado. Verificamos que a relação a/w está entre 0,5 e 0,8, assim usamos a fórmula nº 22 e encontramos (32)

$$Y = 0,635 \left[0,79 (1 - 0,79)^3 \right]^{-1/2} = 1,01 \quad (32)$$

já que $X = \frac{a}{w} = \frac{5}{6,3} = 0,79$

A seguir, realizamos um ensaio também de flexão em quatro pontos, porém com uma distância t menor, para tornar o corpo de prova mais rígido e com maior velocidade de ensaio, para tornar a fratura instantânea e obtermos o valor de $\sigma_c = \sigma_{\max}$ através do uso da relação (28)

$$\sigma_c = \frac{3 e P_{\max}}{b w^2} = \frac{3 \times 0,0075 P_{\max}}{0,0037 \times 0,0013^2}$$

$$\sigma_c = 3,59 \times 10^6 P_{\max} \frac{N}{m^2}$$

Como P_{\max} obtido foi de 2,09 kg, transformando em N e aplicando em σ_c , temos:

$$\sigma_c = 7,37 \times 10^7 \frac{N}{m^2}$$

Como $a = (6,3 - 1,3) \text{ mm} = 5 \text{ mm} = 0,005 \text{ m}$, aplicando todos esses valores na eq.(8),

$$K_{Ic} = 1,01 \times 7,37 \times 10^7 \times \sqrt{0,005} = 5,27 \frac{MN}{m^{3/2}}$$

que é uma propriedade desse material.

3.1.4 Obtenção de K_{Ic} pela compliance

Este método é também aplicável ao ensaio realizado, uma vez que é válido para $0,5 < \frac{a}{w} < 0,9$.

Sabemos, de eq.8, que

$$K_{Ic} = Y \sigma \sqrt{a}$$

e fazendo $x = \frac{a}{w}$ temos $a = xw$ então a eq.8 fica

$$K_{Ic} = Y \sigma \sqrt{xw} \quad (33)$$

O valor de x é obtido através valores numéricos de $Z(x)$ na bibliografia existente, face a solução da equação abaixo:

$$Z(x) = \int_0^x Y^2(x') x' dx' \quad (34)$$

Para ensaio de flexão em 4 pontos, elevando ao quadrado a eq. 8 modificada, teremos

$$K_{Ic}^2 = \sigma_c^2 Y^2(x) w x \quad (35)$$

$$Y^2(x) x = \frac{K_{Ic}^2}{\sigma_c^2 w} \quad (36)$$

$$\sigma_c = \frac{3 P t}{2 b w^2} \quad (37)$$

substituindo 37 em 29, teremos

$$Y^2(x) x = \frac{4 K_{Ic}^2 b^2 w^4}{9 P^2 t^2 w} = \frac{4 K_{Ic}^2 b^2 w^3}{9 P^2 t^2} \quad (38)$$

Irwin (6) nos fornece a equação seguinte

$$K_{Ic} = \left(\frac{G_{Ic} E}{1 - \nu^2} \right)^{1/2} \quad (39)$$

onde G_{Ic} = taxa crítica de relaxamento de energia que aplicada em 38, dará:

$$Y^2(x) x = \frac{4 G_{Ic} E b^2 w^3}{9 P^2 t^2 (1 - \nu^2)} \quad (40)$$

da mecânica da fratura, podemos obter

$$G_{Ic} = \frac{P^2}{2 b w} \frac{d N(x)}{dx} \quad (41)$$

que substituída em 40 dará

$$Y^2(x) x = \frac{2 E b w^2}{9 t^2 (1 - \nu^2)} \frac{d N(x)}{dx} \quad (42)$$

A flexão máxima f_{\max} em 3 pontos é dada por

$$f_{\max} = \frac{P t^3}{48 E I} \quad (43)$$

e o valor da compliance para um corpo sem trinca é dado por:

$$N_0 = \frac{f}{P} = \frac{t^3}{4 E b w^3} \quad (44)$$

Substituindo 44 em 42, teremos:

$$Y^2(x) x = \frac{1}{18} \frac{t}{w(1-\nu^2)} \frac{1}{N_0} \frac{d N(x)}{dx} \quad (45)$$

rearrumando,

$$Y^2(x) x dx = \frac{t}{18w(1-\nu^2)} \frac{d N(x)}{N_0} \quad (46)$$

Substituindo 46 em 34 teremos:

$$Z(x) = \frac{t}{18w(1-\nu^2)N_0} \int_0^x dN(x) \quad (47)$$

$$Z(x) = \frac{t}{18w(1-\nu^2)N_0} (N - N_0) \quad (48)$$

onde N é a compliance do corpo trincado. O segundo membro da eq.(48) pode ser obtido experimentalmente, tendo então um valor numérico para $Z(x)$, que, levado as tabelas existentes, nos informam o valor de x , que aplicado na equação $K_{IC} = Y \sigma \sqrt{xw}$ nos fornece o valor de K_{IC} do material. Aplicando ao ensaio realizado, chegamos ao mesmo valor encontrado anteriormente.

2.4 - Determinação do Módulo de Elasticidade

2.4.1 - Generalidades

A conduta dos materiais sob deformação elástica é descrita através da lei de Hook, que determina a proporcionalidade direta entre tensão e deformação elástica. Os materiais dúcteis tem seu módulo de elasticidade levantados através ensaios tradicionais de tração, bastante difundidos. Em materiais frágeis, entretanto, é mais conveniente aplicar ensaios de compressão, devido ao elevado coeficiente de brandura desses materiais, na ordem de dois, em compressão quando comparados com seu valor em tração, na ordem de meio (16).

2.4.2 - Ensaio de Módulo de Elasticidade

As submetemos uma amostra de um corpo de prova, por exemplo de seção reta retangular, a um ensaio de flexão em quatro pontos, conforme mostra a fig.14, obtemos uma curva carga x deflexão, que varia conforme a posição em pé ou deitado do corpo de prova. O gráfico obtido no registrador terá o aspecto do mostrado na fig.17.

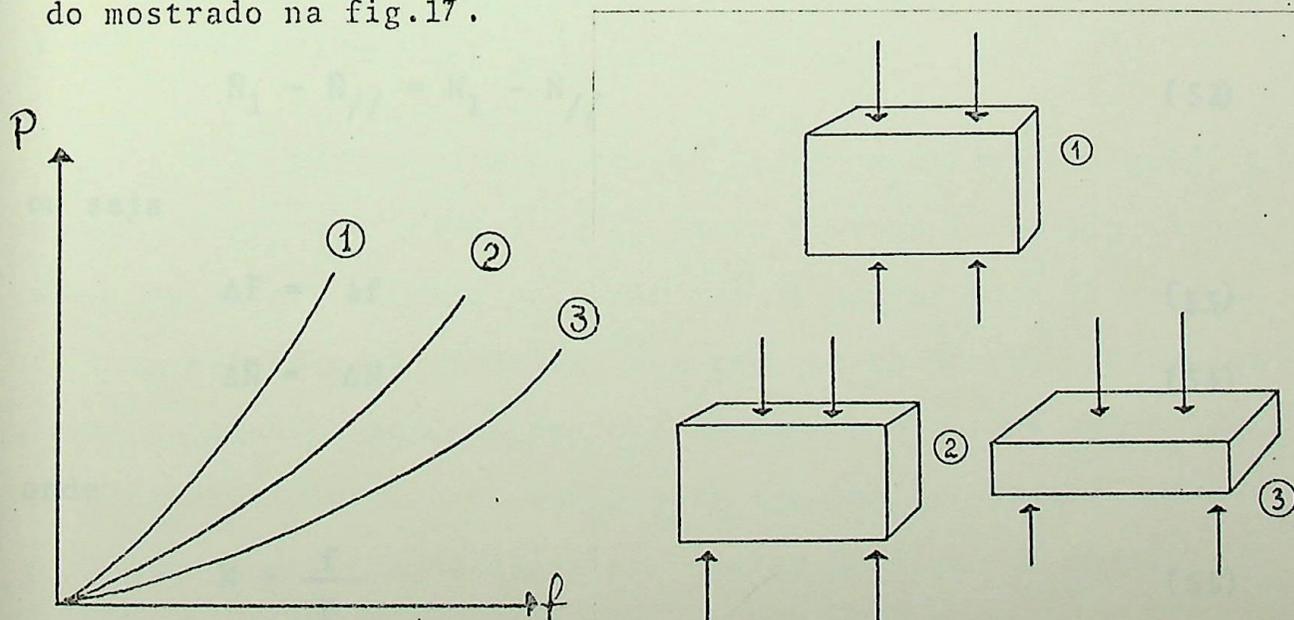


Fig.17 - Curva de deformação elástica, num ensaio de flexão a 4 pontos, mostrando a curva esperada conforme a posição dos apoios e do corpo de prova.

A curva (1) corresponde as deformações elásticas dos componentes da máquina e do dispositivo de medida. A curva(2) corresponde as deformações elásticas anteriormente citada e a deflexão do corpo de prova na posição de pé e a curva (3), idênticamente, apenas com o corpo de provas agora na posição deitado.

Na eq.(43), explicitando E, teremos:

$$E = \frac{Pt^3}{48 I f} \quad (49)$$

que aplicado ao corpo de prova retangular teremos (fig.15):

$$f = \frac{Pt^3}{4 E I} \left(1 - \frac{4}{3} \frac{e}{t} \right) \quad (50)$$

Sendo f a deflexão verdadeira e \tilde{f} a deformação medida e N a compliance verdadeira e \tilde{N} a compliance medida, adotando o índice 1 para o corpo de prova em pé e // para o corpo de prova deitado, teremos:

$$\tilde{f}_1 - \tilde{f}_{//} = f_1 - f_{//} \quad (51)$$

$$\tilde{N}_1 - \tilde{N}_{//} = N_1 - N_{//} \quad (52)$$

ou seja

$$\Delta \tilde{f} = \Delta f \quad (53)$$

$$\Delta \tilde{N} = \Delta N \quad (54)$$

onde

$$N = \frac{f}{p} \quad (55)$$

$$\bar{N} = \frac{\bar{f}}{P} \quad (56)$$

Aplicando em (50), teremos:

$$f_{//} = \frac{(t-e)^2 (t+2\ell) P}{48 E I} \quad (57)$$

ou ainda

$$f_{//} = \frac{(t-e)^2 (t+2\ell) P}{4 b w^3 E} \quad (58)$$

$$f_{//} = \frac{(t-e)^2 (t+2\ell) P}{4 b^3 w E} \quad (59)$$

$$N_{//} = \frac{(t-e)^2 (t+2\ell)}{4 b w^3 E} \quad (60)$$

$$N_1 = \frac{(t-e)^2 (t+2\ell)}{4 b^3 h E} \quad (61)$$

Podemos então obter o módulo de elasticidade dada através dois métodos:

1. método direto, em que se faz a diferença, graficamente, da curva 3 menos 1 ou da curva 2 menos 1, da fig.16, que dará uma reta. Devemos observar que os pontos mais confiáveis da reta são os mais elevados, uma vez que os pontos iniciais ficam sujeitos a acomodações existentes no dispositivo, logo ao se aplicar carga. O coeficiente angular da reta, que representa a deformação elástica apenas do corpo de prova já que eliminamos a deformação elástica da máquina e dispositivo quando efetuamos a diferença entre retas, é usado nas equa-

ções 60 e 61, que nos dão o valor de E. As deflexões observadas, colocadas nas eq. 58 e 59, também nos permite conhecer o valor de E.

2. Método indireto, que consiste em realizarmos a diferença das curvas 2 menos 3, que nos dá o valor de $\Delta \bar{N}$, sabendo que

$$\Delta \bar{N} = \bar{N}_1 - \bar{N}_{//} = N_1 - N_{//} \quad (62)$$

Através substituições, podemos ter:

$$N_{//} = \frac{\bar{N}_1 - \bar{N}_{//}}{N_1 - N_{//}} \cdot N_{//} = N \frac{N_{//}}{N_1 - N_{//}} =$$

$$= \Delta \bar{N} \frac{\frac{1}{bw^3}}{\frac{1}{b^3w} - \frac{1}{bw^3}} = \Delta \bar{N} \frac{1}{bw^3} \frac{1}{\frac{w^2 - b^2}{b^3w^3}}$$

$$= \Delta \bar{N} \frac{b^3w^3}{(w^2 - b^2) bw^3} = \Delta \bar{N} \frac{b^2}{w^2 - b^2}$$

então

$$N_{//} = \Delta \bar{N} \frac{b^2}{w^2 - b^2} \quad (63)$$

e analogamente

$$N_1 = \Delta \bar{N} \frac{w^2}{w^2 - b^2} \quad (64)$$

e a relação

$$\frac{N_1}{N_{//}} = \frac{w^2}{b^2} \quad (65)$$

Substituindo $N_{//}$ e N_1 por seus valores dados 60 e 61 teremos:

$$E = \frac{(t-e)^2 (t+2l) (w^2 - b^2)}{4 b^3 w^3 \Delta \tilde{N}} \quad (66)$$

3.2.3 - Realização de um Ensaio

Inicialmente, é conveniente marcar no corpo de prova as distâncias mostradas na fig.14, que no caso do presente ensaio foram:

$$e = 15 \text{ mm}$$

$$t = 45 \text{ mm}$$

$$b = 4 \text{ mm}$$

$$w = 7,09 \text{ mm}$$

A seguir, usando uma célula de carga de 500 kgf, o corpo de prova é ensaiado na máquina Instron, modelo T.TDM, com uma velocidade de 0,005 cm/min. Obtemos assim, registros em um registrador XY com sensibilidade de 2,5 mv/cm, uma carga de 29 kgf provocando uma deflexão registrada em 11,7 cm de papel. Usando uma sensibilidade de 1 mv/cm, obtivemos uma carga de 27,7 kgf com uma deflexão medida na folha em 27,6 cm e para a sensibilidade de 5 mv/cm tivemos uma carga de 28,2 kgf com 5,5 cm de deflexão.

Aplicando a fórmula 58 ou 59, conforme o caso teremos:

1) para uma sensibilidade de 2,5 mv/cm

a - corpo em pé

$$I = \frac{4 \times 7,19^2}{12} = 123,9 \text{ mm}^4$$

$$P = 29 \text{ kgf}$$

$$t = 45 \text{ mm}$$

$$e = 15 \text{ mm}$$

$$f = 11,7 \text{ cm} \times \frac{2,5 \text{ mv}}{\text{cm}} \times \frac{1}{2,25} \frac{\mu\text{m}}{\text{mv}} = 13 \mu\text{m}$$

O fator $\frac{1}{2,25}$ corresponde a curva de calibração do extensômetro, usado para medir a deflexão, que é obtida fazendo o extensômetro variar numa faixa de μm previamente estabelecida e lendo a correspondente variação em mv marcada no registrador. O anexo III mostra a curva de calibração.

$$E = \frac{30^2 \times (45+30) 29 \times 9,806 \times 10^9}{48 \times 13 \times 123,9} \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 248,26 \text{ GPa}$$

b - Corpo deitado

$$I = 38,35 \text{ mm}^4$$

$$f = \frac{37,3 \times 2,5}{2,25} \mu\text{m} = 41,44 \mu\text{m}$$

$$E = \frac{30^2 \times 75 \times 29 \times 9,806}{48 \times 41,44 \times 38,35} \times 10^9 \text{ N/m}^2 = 251,58 \text{ GPa}$$

c - módulo determinado pela diferença de rigidez entre o corpo deitado e o corpo em pé

$$\Delta N = \left(\frac{f_1}{P_{\text{deitado}}} \right) - \left(\frac{f_2}{P_{\text{em pé}}} \right) = \left(\frac{41,44}{29 \times 9,806} - \frac{13,00}{29 \times 9,806} \right) \mu\text{m/N}$$

$$\Delta N = 0,146 - 0,046 = 0,1 \text{ m/N}$$

Usando a fórmula 66, temos:

$$E = \frac{30^2 \times 75 \times (7,19^2 - 4,00^2)}{4 \times 4^3 \times 7,19^2 \times 0,1} \text{ N}/\mu\text{m} \therefore E = 253,22 \text{ GPa}$$

2) Para uma sensibilidade de 1 mv/cm

a - corpo em pé

$$f = \frac{27,6 \times 1}{2,22} \mu\text{m} = 12,4 \mu\text{m}$$

$$P = 27,7 \times 9,806 \text{ N} = 271,6 \text{ N}$$

$$E = \frac{30^2 \times 75 \times 271,6 \times 10^3 \times 10^6}{48 \times 12,4 \times 123,9} \text{ Pa} = 248,6 \text{ GPa}$$

b - corpo deitado

$$f = \frac{38,5 \times 1}{2,22} \mu\text{m} = 17,32 \mu\text{m}$$

$$P = 12,2 \times 9,806 \text{ N} = 119,63 \text{ N}$$

$$E = \frac{30^2 \times 75 \times 119,63}{48 \times 17,32 \times 38,55} \text{ GPa} = 251,96 \text{ GPa}$$

c - pela diferença entre as "rigidez"

$$\Delta N = \frac{17,32}{119,63} - \frac{12,4}{271,6} \text{ } \mu\text{m/N} = 0,1 \text{ } \mu\text{m/N}$$

$$E = \frac{30^2 \times 75 \times (7,19^2 - 4,00^2)}{4 \times 4^3 \times 7,19^3} \frac{1}{0,1} = 253,22 \text{ GPa}$$

3) Para uma sensibilidade de 5 mv/cm

a - corpo em pé

$$f = \frac{5,5 \times 5}{2,21} = 12,44 \text{ } \mu\text{m}$$

$$P = 28,2 \times 9,806 \text{ N} = 276,53 \text{ N}$$

$$E = \frac{30^2 \times 75 \times 276,53 \times 10^9}{48 \times 12,57 \times 123,9} = 249,71 \text{ GPa}$$

b - para o corpo deitado

$$f = \frac{18 \times 5}{2,21} \text{ } \mu\text{m} = 40,72 \text{ } \mu\text{m}$$

$$P = 28,6 \times 9,806 = 280,45 \text{ N}$$

$$E = \frac{30^2 \times 75 \times 280,45 \times 10^9}{48 \times 12,57 \times 123,9} \text{ GPa} = 251,23 \text{ GPa}$$

c - Pela diferença entre as compliance

$$\Delta N = \left(\frac{40,72}{280,45} - \frac{12,44}{276,53} \right) \mu\text{m/N} = 0,1 \mu\text{m/N}$$

$$E = \frac{30^2 \times 75 \times (7,19^2 - 4,00^2)}{4 \times 4^3 \times 7,19^3 \times 0,1} \text{ GPa} = 253,22 \text{ GPa}$$

Podemos observar que os valores diferem de um valor médio menor que 1%, sendo portanto confiáveis os valores obtidos.

As curvas de calibração e os valores obtidos no registrador, constam do anexo III ao presente trabalho.

2.4 - Trabalho de Fratura

2.4.1 Generalidades

Hertzberg (8) propôs descrever o processo de fratura em uma amostra, em termos de energia de fratura (γ_F). Um material pode ser considerado frágil se absorve pouca energia de fratura e tenaz se absorve muita energia. Isto porque o material frágil tem uma zona plástica muito pequena na proximidade da trinca, que absorve pouca energia de fratura enquanto que um material tenaz tem uma grande zona plástica na extremidade da trinca que absorve, na sua formação, muita energia de fratura.

A energia de superfície γ é definida como o trabalho necessário para formar uma unidade de área de nova superfície. Esta quantidade pode ser calculada e medida. Para um corpo de prova de seção reta A o trabalho de fratura necessário para quebrá-lo em duas partes é $2\gamma A$. A área fraturada porém não tem o valor da seção reta do corpo de prova. É sempre maior devido, no mínimo, a aspereza que sempre existe, tornando tortuoso este caminho A' , através da área fraturada.

Podemos afirmar então que:

$$\gamma A = \gamma_F A' \quad (67)$$

onde γ_F é o trabalho de fratura. A equação (67) está fundada em que áreas superficiais necessitam igual quantidade de trabalho de fratura para que sejam produzidas. Na realidade a igualdade da eq. (61) não é exata, devido a uma deformação plástica, embora pequena por ser o material rígido, associada ao processo.(17).

Na prática, o trabalho de fratura γ_F é obtido pela medida da quantidade de trabalho que a máquina de ensaio mecânico produziu na fratura controlada, a baixa velocidade de carregamento, num ensaio de flexão em quatro pontos:

3.3.2 Descrição do ensaio

Na mesma máquina, mesmo tipo de carregamento lento (também para assegurar fratura controlada) e um corpo de prova do mesmo material e igualmente de seção reta retangular, tudo isto referente ao ensaio de K_{IC} , foi realizado o ensaio para determinar o trabalho de fratura. Foi obtido então um gráfico da fig.17, que mostra o carregamento, até a fratura, versus deflexão do corpo de prova, onde a trinca é progressivamente desen -

volvidas até a total separação das faces da fratura. O melhor entalhe para se obter uma progressão lenta da trinca, dentre os vários testados, foi o mostrado na figura 11 e foto 1. Para este entalhe, foi avaliado o efeito sobre o ensaio da diminuição de W , de tal forma que uma diminuição de ΔW provoque uma diminuição de Δa , para o corpo de prova mostrado nas figuras 9 e 11.

A condição a ser analisada é a de minimizar P na curva $P \times \sigma$, que significa maior facilidade de ensaio. Verificamos então que uma diminuição de Δh provoca uma diminuição de ΔP , conforme mostrado no anexo IV. A máquina de corte, com disco de 0,075 mm deve avançar uma distância A , mostrada no anexo III, e o ensaio melhor realizado foi o que utilizou um ângulo α de 15° . Esta distância, é calculada dentro de uma relação $x = a/w$ entre 0,5 e 0,9, de forma a utilizar o fator de forma dado pela equação 22.

No ensaio de flexão, é recomendável o uso da amostra apoiada em roletes, com a finalidade de eliminar uma componente horizontal de força devido ao atrito. Coppola e Hasselman (18) realizaram um estudo comparativo do efeito da natureza do apoio da amostra sobre a medida de valores de trabalho de fratura e concluíram que o uso de apoios tipos roletes são os mais indicados para este tipo de ensaio.

O registrador, numa escala de 1,0 mv/cm e sob uma sensibilidade medida de 2,25 mv/m, marcou uma carga de 12,5 kg correspondente a 25 cm do papel. Assim, um centímetro no eixo das coordenadas representa

$$\frac{12,5}{25} \times 9,806 \text{ N} = 4,9 \text{ N}$$

onde 25 é o número total de centímetros marcados sob o mesmo eixo. No eixo das abscissas, um centímetro de papel representa $0,44 \times 10^{-4}$ cm de deflexão natural, obtida pela divisão da escala de trabalho do registrador pela sua sensibilidade, vezes um centímetro, que dá:

$$1 \text{ cm papel} = \frac{1 \text{ mv}}{\text{cm}} \times \frac{1}{2,25} \frac{\mu\text{m}}{\text{mv}} \times 1 \text{ cm} = 0,44 \times 10^{-4} \text{ cm}$$

A área medida sob a curva do gráfico da figura 18 pode ser avaliada através das relações entre os pesos da folha inteira e da área sob a curva. Assim, chamando

P_p = peso da folha inteira

P_c = peso da área sob a curva

A_p = área da folha inteira

A_c = área sob a curva

e considerando que o peso do papel é igual a espessura vezes o seu peso específico vezes a área e que o peso específico e a espessura são constantes, podemos estabelecer uma relação entre peso e área, tal que:

$$\frac{P_p}{P_c} = \frac{A_p}{A_c}$$



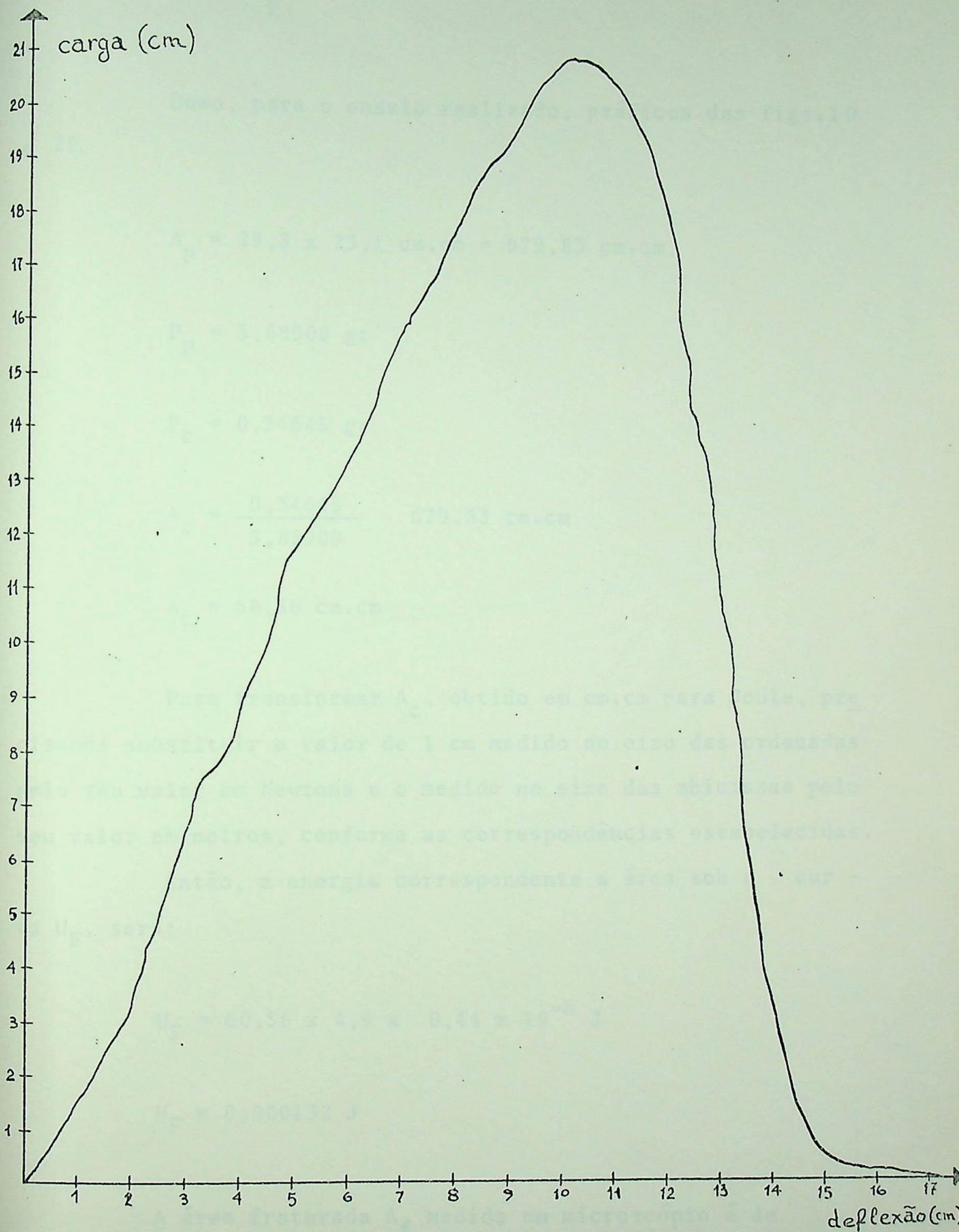


Fig.18 - Ensaio de trabalho de fratura.

$$A_c = \frac{P_c}{P_p} A_p$$

Como, para o ensaio realizado, gráficos das figs.19 e 20.

$$A_p = 29,3 \times 23,1 \text{ cm.cm} = 679,83 \text{ cm.cm}$$

$$P_p = 3,88909 \text{ gr}$$

$$P_c = 0,34645 \text{ gr}$$

$$A_c = \frac{0,34645}{3,88909} \cdot 679,83 \text{ cm.cm}$$

$$A_c = 60,56 \text{ cm.cm}$$

Para transformar A_c , obtido em cm.cm para Joule, precisamos substituir o valor de 1 cm medido no eixo das ordenadas pelo seu valor em Newtons e o medido no eixo das abscissas pelo seu valor em metros, conforme as correspondências estabelecidas.

Então, a energia correspondente a área sob a curva U_F , será:

$$U_F = 60,56 \times 4,9 \times 0,44 \times 10^{-6} \text{ J}$$

$$U_F = 0,000132 \text{ J}$$

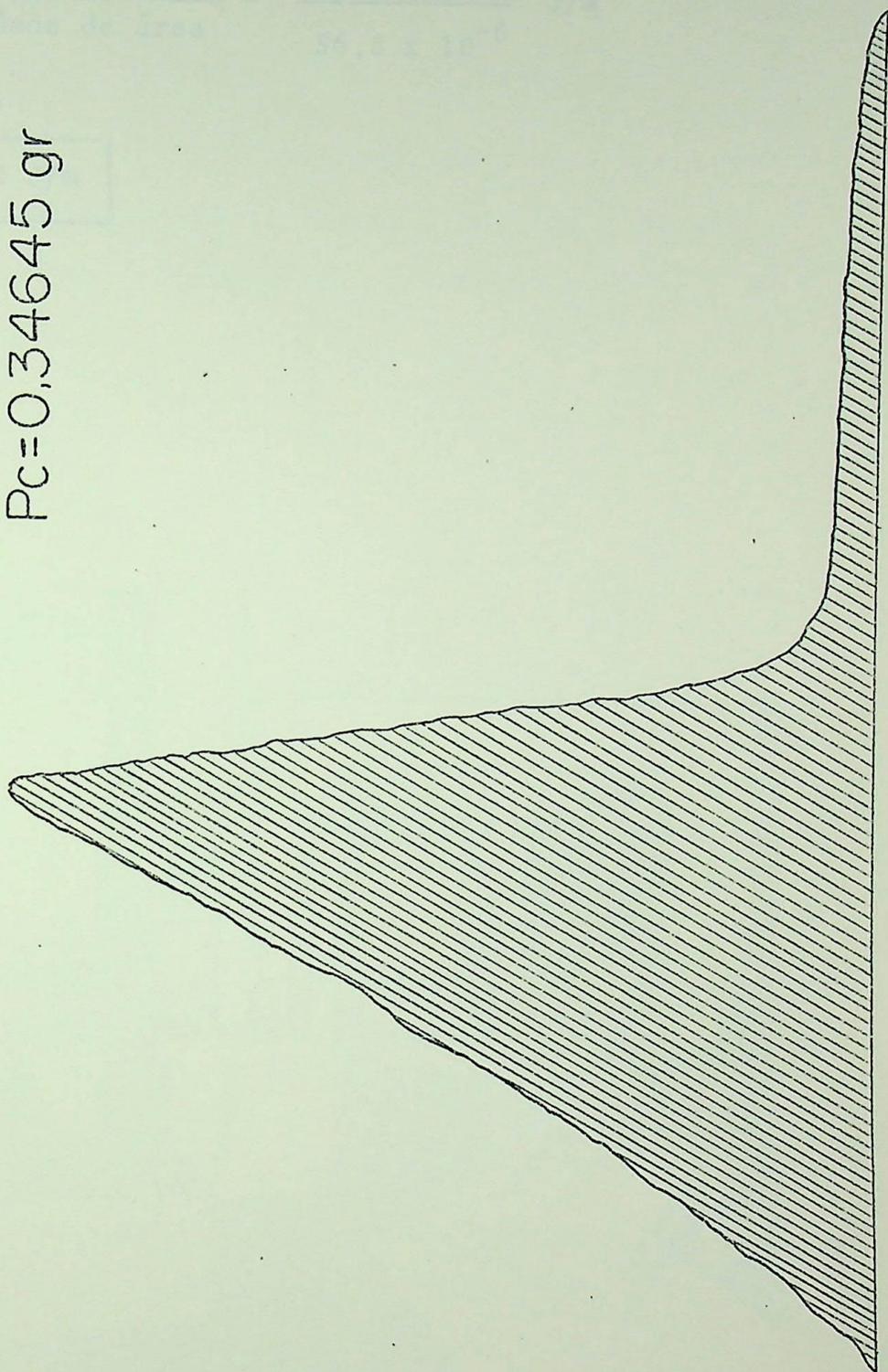
A área fraturada A_f medida em microscópio é de

$$A_f = 2 \times 4 \times 7,1 = 56,8 \text{ mm}^2 = 56,8 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

$P_p = 3.88909 \text{ gr}$

Fig. 19 - Peso do papel menos o correspondente a área sob a curva

$P_c = 0,34645 \text{ gr}$



O trabalho de fratura será:

$$W_F = \frac{\text{energia}}{\text{unidade de área}} = \frac{0,132 \times 10^{-3}}{56,8 \times 10^{-6}} \text{ J/m}$$

$$W_F = 2,32 \text{ J/m}$$

3 - OPERAÇÃO DE ENSAIO NA MÁQUINA INSTRON

3.1 - Introdução

Máquina de teste universal utilizada no presente trabalho foi de marca INSTRON, modelo TTDM, com capacidade até 10.000 kgf e com velocidade de cruzeta de 0,05 a 50 cm/min (Foto 2).

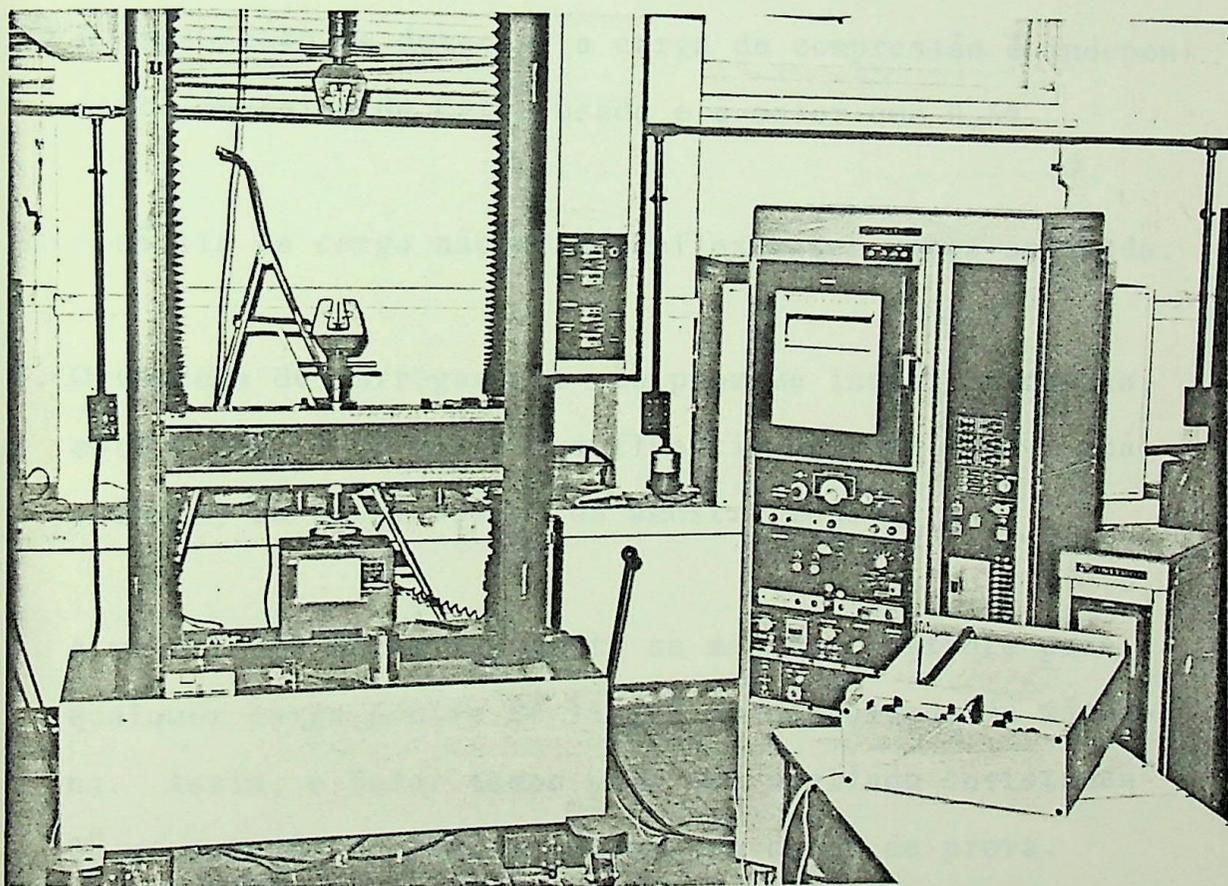


Foto 2 - Vista geral da máquina de teste universal INSTRON, modelo TTDM e do registrador XY tipo ZSK-2, marca Rohde e Schorz.

É uma máquina de elevada, sensibilidade produzida por meios eletrônicos de controle de carga, medidas por extensômetros de fios, ainda com a capacidade de registrar os dados obtidos, cujas principais características são as seguintes:

1. Por uso de células de carga intercambiáveis, os ensaios podem ser realizados com carga desde 2 gramas até na ordem de 10.000 kgf.
2. A capacidade de detectar a carga de compressão é independente da faixa de carga usada e é maior que 0,5%.
3. A célula de carga não exhibe deflexão sob carga aplicada.
4. O sistema de carregamento não promove inercia mecânica, motivo pelo qual ele não influencia através sua ação própria, as propriedades da amostra medida.
5. A velocidade de carregamento se mantém constante para qualquer carga dentro do limite de capacidade da máquina. Assim, o fator tempo pode ser avaliado corretamente em relação a características do corpo de prova.
6. O movimento da máquina pode ser iniciado, parado revertido quase instantaneamente, tanto manual como automaticamente.

O sistema de carga consiste basicamente em uma ponte de Wheatstone em que os braços são constituídos por extensômetros, operados por um oscilador de 390 ciclos, como mostrado na figura abaixo.

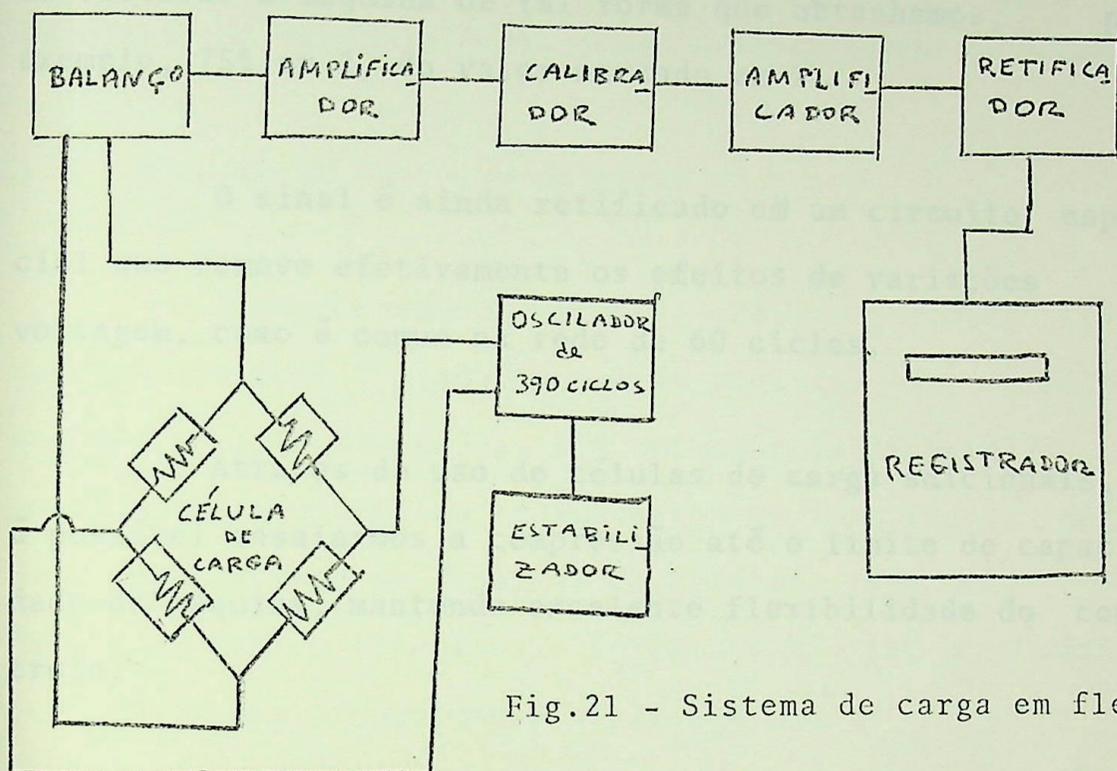


Fig.21 - Sistema de carga em flexão.

O resultado do sinal é amplificado por um circuito que permite o balanceamento dos extensômetros compensando, desta forma, o peso do dispositivo de fixação e da própria amostra. A calibração permite degraus de sensibilidade, que dá a cada célula de carga a possibilidade de escolha de uma escala de valores. Podemos assim, por exemplo, numa célula de 500 kgf, selecionar uma faixa de trabalho de 0 a 300 kgf, ocupando toda a faixa do papel ou mesmo, de 0 a 500 kgf, ocupando a mesma faixa. Tal capacidade da máquina permite uma escolha de forma a permitir melhor

clareza de leitura de dados obtidos. Existe ainda um controle adicional que permite variar a sensibilidade de cada faixa, continuamente, entre os diversos degraus. Assim, se na faixa 2 temos a marcação de dados na metade do comprimento obtido na faixa 1, existe ainda a possibilidade de calibrar a máquina de tal forma que obtenhamos, por exemplo, 75% em 2, do valor marcado em 1.

O sinal é ainda retificado em um circuito especial que remove efetivamente os efeitos de variações de voltagem, como é comum na rede de 60 ciclos.

Através do uso de células de carga adicionais, é possível ensaiarmos a compressão até o limite de capacidade da máquina, mantendo excelente flexibilidade do controle.

3 2 Execução de um Ensaio de Flexão

3.2.1- Determinação da faixa de utilização

Para execução de um ensaio de flexão, seja visando a obtenção de módulo de elasticidade, seja determinando K_{IC} , resistência a fratura, etc., devemos, inicialmente, selecionar a faixa de uso da máquina. Devemos avaliar a carga segundo a qual obteremos o valor desejado e calibrar a máquina de forma a aproveitar ao máximo, a área do papel disponível para registro. Tal providência redun

dará em maior confiabilidade da leitura, já que os valores estarão dispostos da maneira mais favorável possível.

Os dados disponíveis para o cálculo desta faixa serão os valores médios obtidos da literatura para o material em estudo, colocados em fórmulas que consideram a geometria do corpo de prova, como anteriormente mostrado.

3.2.2 - Preparação do corpo de prova

A preparação do corpo de prova é parte de real importância para o trabalho que se realiza. As medidas obtidas em suas dimensões, e a conseqüente capacidade de avaliá-las, influenciam sobremaneira os resultados obtidos. Isto porque as fórmulas de obtenção dependem, via de regra, destas dimensões. Devemos então ter o máximo cuidado em sua preparação e avaliação.

A peça deve ser cortada e retificada. A retificação é importante devido ao fato dos riscos de usinagem no corte de materiais frágeis, serem considerados microtrincas superficiais onde nucleiam e se propagam trincas, diminuindo a resistência do corpo.

Para materiais cerâmicos, que constituem a forma de materiais em que os frágeis dominam, o procedimento torna-se mais trabalhoso, tendo em vista que a fixação do material diretamente sobre a mesa magnética da máquina é impossível. Assim, necessitamos de fixar o mate

rial por colagem em um bloco metálico, e este então fixada à mesa magnética, seguindo a seguinte sequência de operações:

1. Obter um bloco metálico, de seção reta retangular, com os lados paralelos entre si dois a dois, preferencialmente de aço.
2. Limpar com um solvente (benzina, tricloro etileno, etc) a face em que o material vai ser fixado.
3. Limpar com solvente um ladrilho e colá-lo, com cola superbonder, na base metálica, deixando a face esmaltada na parte superior. A colagem deve ser efetuada de modo a que toda superfície em contato esteja unida por cola, isto porque uma bolha de ar pode agir como ponta de tensão podendo até durante a operação de corte, chegar a fraturar o ladrilho. Esperar, após colagem, na ordem de 10 minutos para secagem.
4. Colar, sobre o ladrilho, o material a ser cortado, com os mesmos cuidados e procedimentos descritos para a colagem do ladrilho ao bloco metálico.

5. Levar este conjunto à mesa magnética. Agora a fixação poderá ser efetuada por acionamento da alavanca de magnetização da mesa.

6. Montar na máquina disco de corte diamantado. Atualmente existe fabricado no País, um disco com espessura de 0,8 mm.

7. Ter o cuidado de, durante a operação, o disco cortar a peça e azulejo. Caso a penetração do disco atinja ao bloco de aço, a limalha ficará aderente ao disco diminuindo consideravelmente sua eficiência.

8. O líquido refrigerante usado é composto de 10 partes de água para uma parte de querosene.

9. Para proteger o operador contra respingos e ao mesmo tempo permitir um melhor aproveitamento do líquido refrigerante foi montado uma caixa de material plástico transparente, como a mostrada na foto 3. Vê-se no interior da caixa, o disco de corte montado, as mangueiras do sistema de refrigeração do corte e a placa metálica.

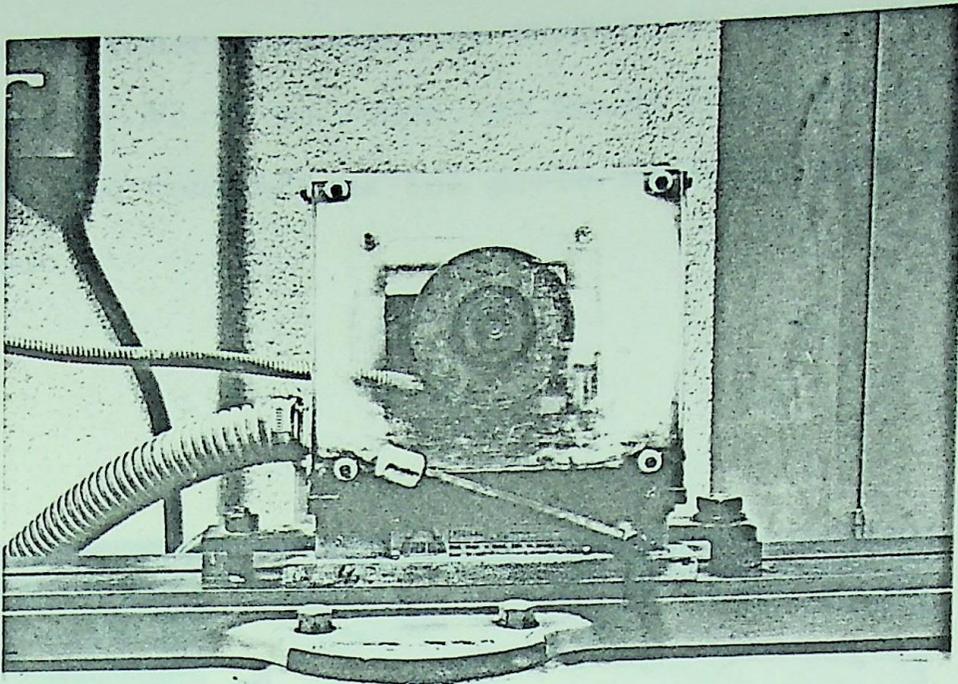


Foto 3 - Montagem de disco de corte em retífica plana, protegido por caixa de acrílico que envolve uma mesa magnética.

10. A descolagem é feita por aquecimento, deixando-se por aproximadamente 15 minutos o bloco de aço, azulejo e peça, numa temperatura da ordem de 300°C .

11. Após retificado, o corpo de prova necessita de retífica. As operações são semelhantes a de corte. Necessitamos apenas usar agora uma ferramenta de rebolo diamantado e podemos fixar a peça diretamente sobre o bloco de aço. A peça deve ser totalmente pintada na parte a ser retificada. O desaparecimento da tinta após diversos passes de pequena penetração significa que toda a sua superfície foi retificada. Na foto

4 menos o bloco de aço sobre uma superfície quente, no caso um aquecedor elétrico CORNING PC 351, Hot Plate Stirrer. Vê-se ao fundo, na mesma fotografia, um bloco de aço contendo na sua parte superior um ladrilho colado.

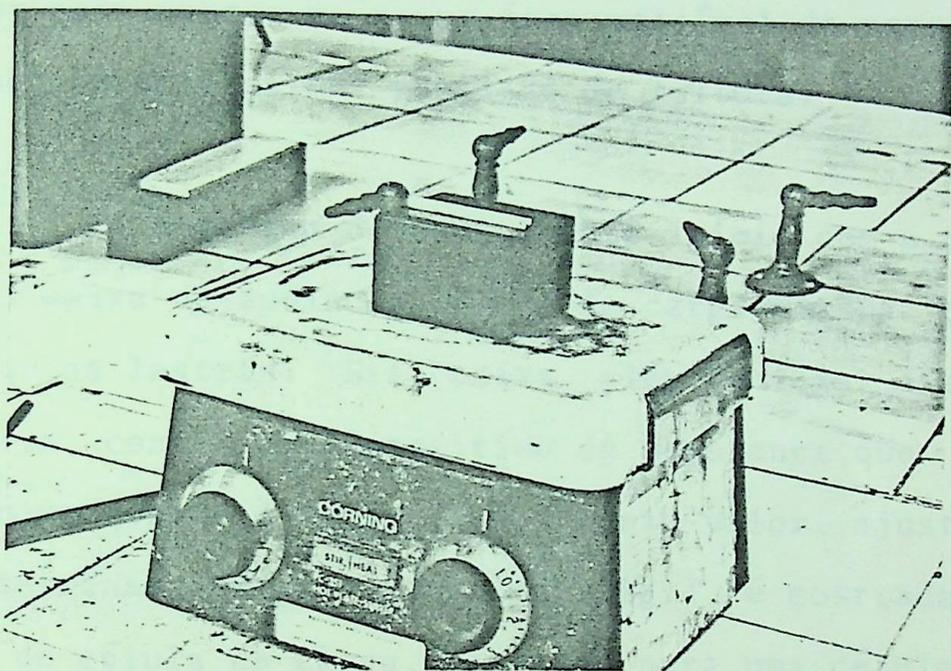


Foto 4 - Amostra de alumina sobre um bloco de aço, descolando, após retífica, mediante efeito do calor cedido pelo aquecedor elétrico Corning PC 351, Hot Plate Stirrer.

3 - Preparação do Equipamento para Ensaio

Para carga de compressão em 4 pontos, a fórmula da tensão depende da força exercida pela máquina e das dimensões da amostra. Como sabemos, a priori, a faixa de tensão esperada para a fratura do corpo de prova, utilizando estes valores, avaliamos a força segundo o qual a amostra deverá romper para então dimensionarmos o registrador para marcar na maior área possível do papel. Tal cuidado permite melhor precisão de leitura.

A montagem do equipamento inicia com a colocação da caixa de apoio da célula de carga em sua posição na máquina Instron. Esta caixa, além de fixar a célula de carga, contém um dispositivo de segurança que desliga a máquina quando a carga excede certo valor, ajustada para determinada carga. Assim, na fig.4, é mostrada uma caixa de célula de carga, ajustada para uma célula de 500 kg.

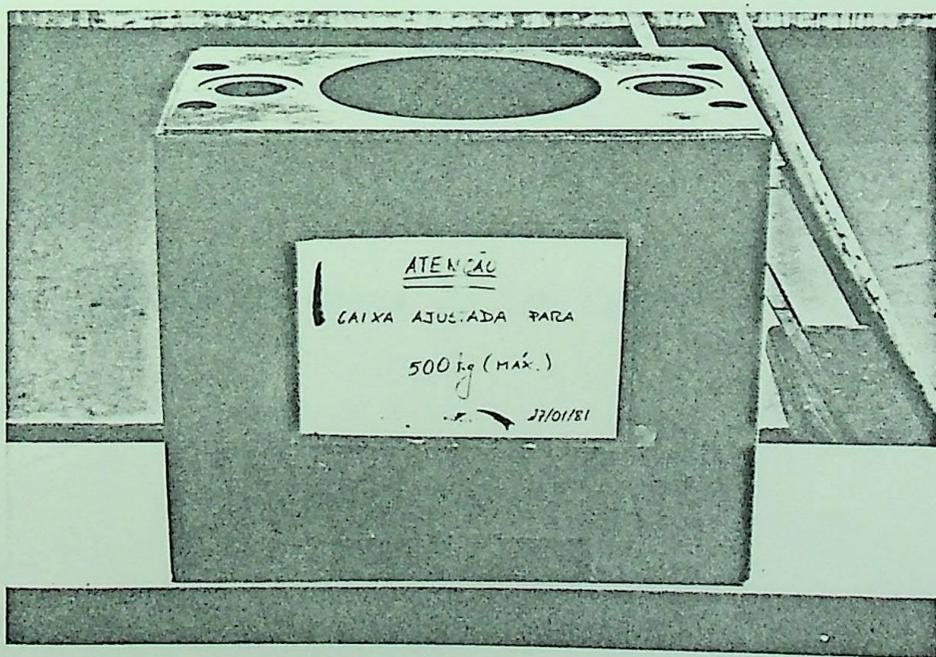


Foto.5 - Caixa de segurança e fixação de célula de carga.

Na foto 2, podemos reparar a célula de carga, montada na caixa, devidamente posicionada no dispositivo de carregamento da máquina Instron. Esta célula, mostrada na figura 6, é fixada na caixa por meio de parafusos e conectada eletricamente aos sensores da máquina de ensaio Instron, que fornecerá valores correspondentes ao carregamento.

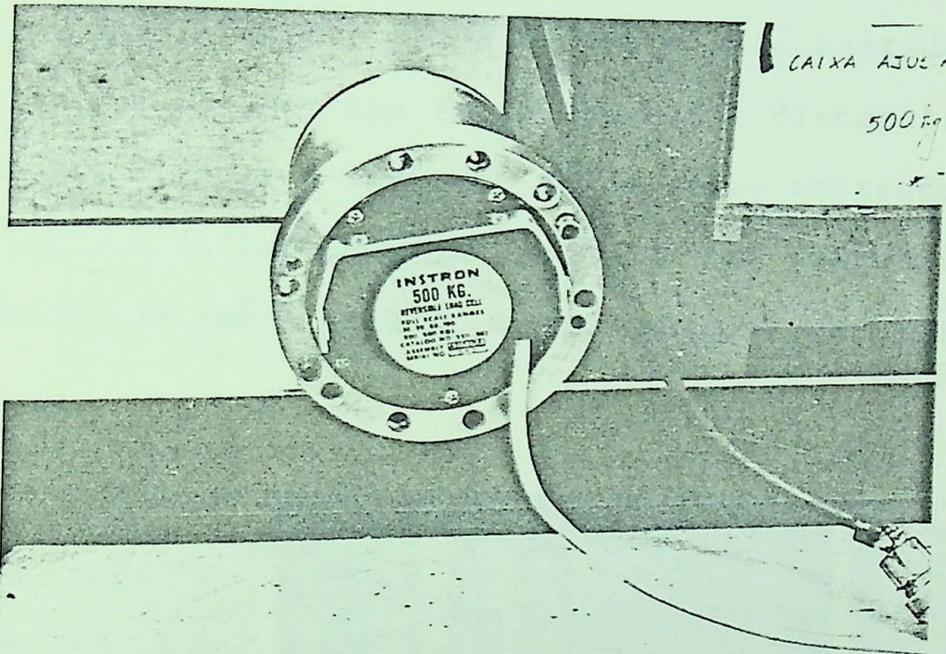


Foto 6 - Célula de carga de 500 kgf.

Sobre a célula de carga é montada uma placa contendo o dispositivo de apoio do corpo de prova. Este dispositivo, mostrado na fig.7, contém um vernier que é ajustado para as dimensões marcadas na amostra e cilindro de apoio, de forma a permitir a colocação do corpo de prova bem posicionado no equipamento de ensaio. Os cilindros de apoio constituem os corpos segundo os quais a peça se apoia e também sofre o carregamento. São, portanto, dois na parte inferior e nas extremidades da amostra e dois na parte central, como mostrada na fig.7, onde o corpo de prova está montado sobre dois cilindros que, por sua vez, estão sob o dispositivo de carregamento. Sobre o corpo de prova estão mostrados os dois cilindros de carregamento, montado num dispositivo que é contactado com o punção, no instante do carregamento.

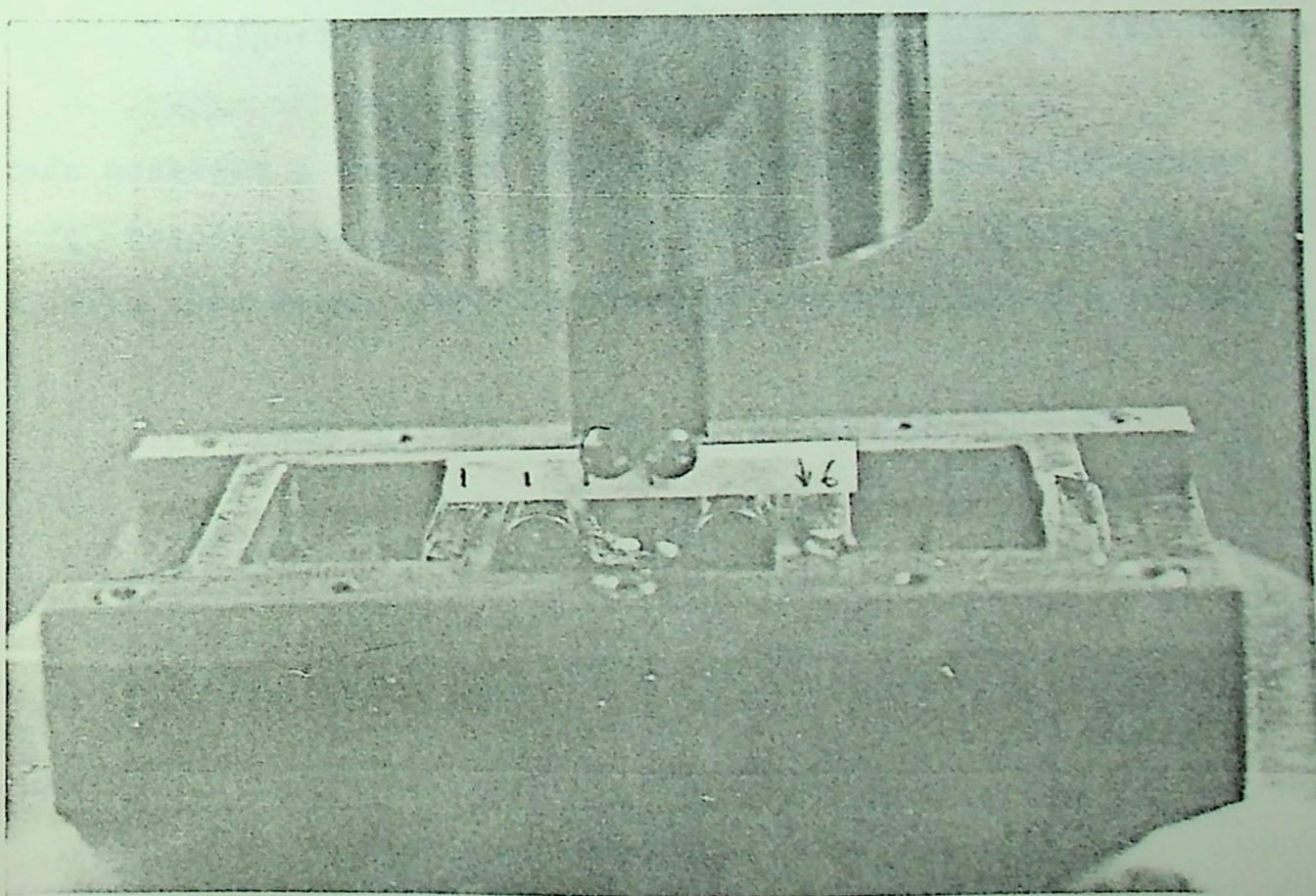


Foto 7- Dispositivo de carregamento montado sobre a célula de carga.

Todo o conjunto, mostrado na fig.7 é visto também na fig.8 onde se evidencia o detalhe de que o punção exerce força em apenas um ponto do dispositivo, ou seja, na esfera de aço apoiada em sua parte superior. Nesta figura é tam-

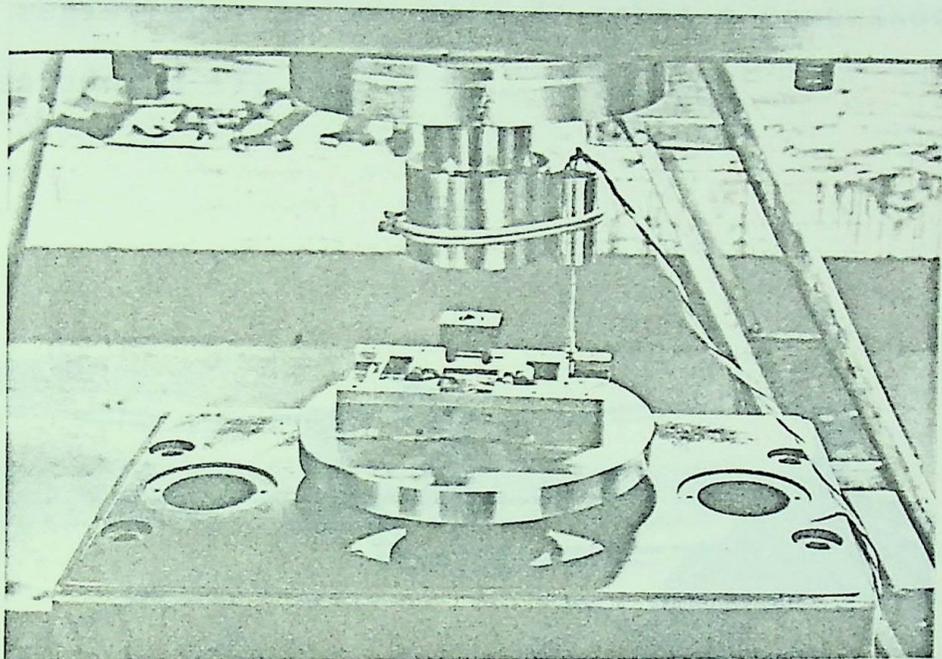


Foto 8 - Dispositivo de carregamento montado com o extensômetro.

bém mostrado o capacitor variável que constitui o extensômetro, responsável pelo sinal que permitirá a avaliação da deflexão causada no corpo de prova pelo carregamento exercido.

O conjunto do extensômetro mostrado na fig.9 é constituído de uma fonte constante de 6V, obtida por meio de baterias montadas no tubo que alimentou o sistema. O sinal varia conforme a penetração do eixo no cilindro ôco que é um capacitor. Este sinal é levado até ao registrador xy por meio de cabos e conectados como mostrado na fig. 10.

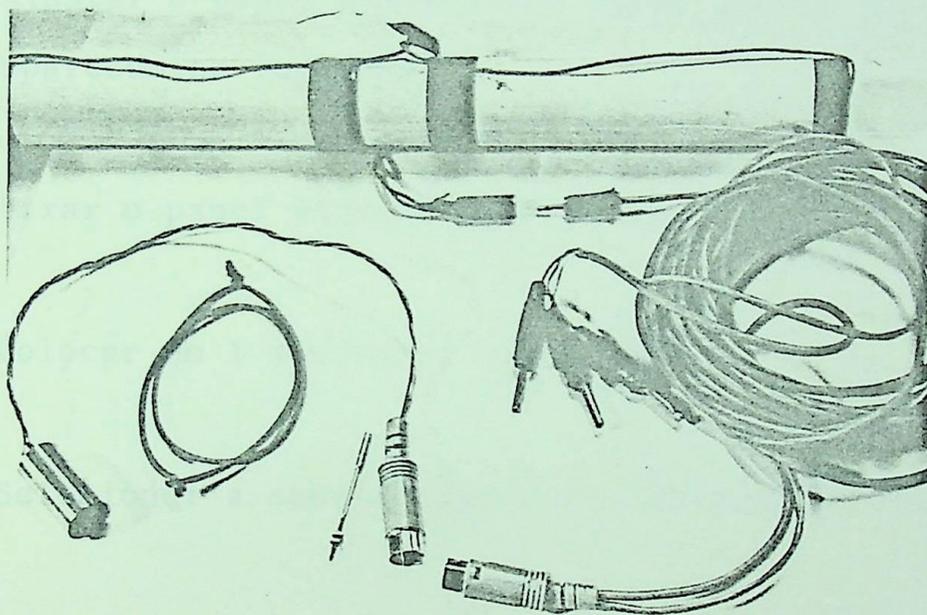


Foto .9 - Elementos constituintes do extensômetro.

Uma vez estando ligado ao registrador os sinais tanto do extensômetro (eixo do x) como o da máquina (eixo do y) que nos dão, respectivamente, a deflexão do corpo de prova e o valor da carga correspondente, necessitamos calibrar a máquina Instron, ajustando, para a célula de carga usada e a sensibilidade selecionada do registrador, um peso previamente conhecido, de forma a que o valor a ser registrado ocupe a maior parte possível do papel. As operações consistem em:

1. Ajustar o papel milimetrado pelos pontos luminosos que aparecem no registrador.
2. Fixar o papel eletrostáticamente.
3. Colocar em 1 o comando "LOAD CELL".
4. Selecionar a sensibilidade de trabalho no registrador.
5. Zerar o eixo y apertando na Instron o botão "zero check" e levar a pena para o ponto zero do papel.
6. Soltar o botão "zero check" e compensar a defasagem entre o registrador e máquina atuando no botão "balance", até a pena chegar à posição inicial.
7. Colocar sobre a célula de carga um peso conhecido e selecionar o espaço máximo a ser utilizado no papel.

Após o ajuste dos eixos x e y, estamos em condições de realizar o ensaio que consiste simplesmente em acionar o mecanismo de movimentação do punção até que o corpo de prova se rompa. O aparelho é do tipo

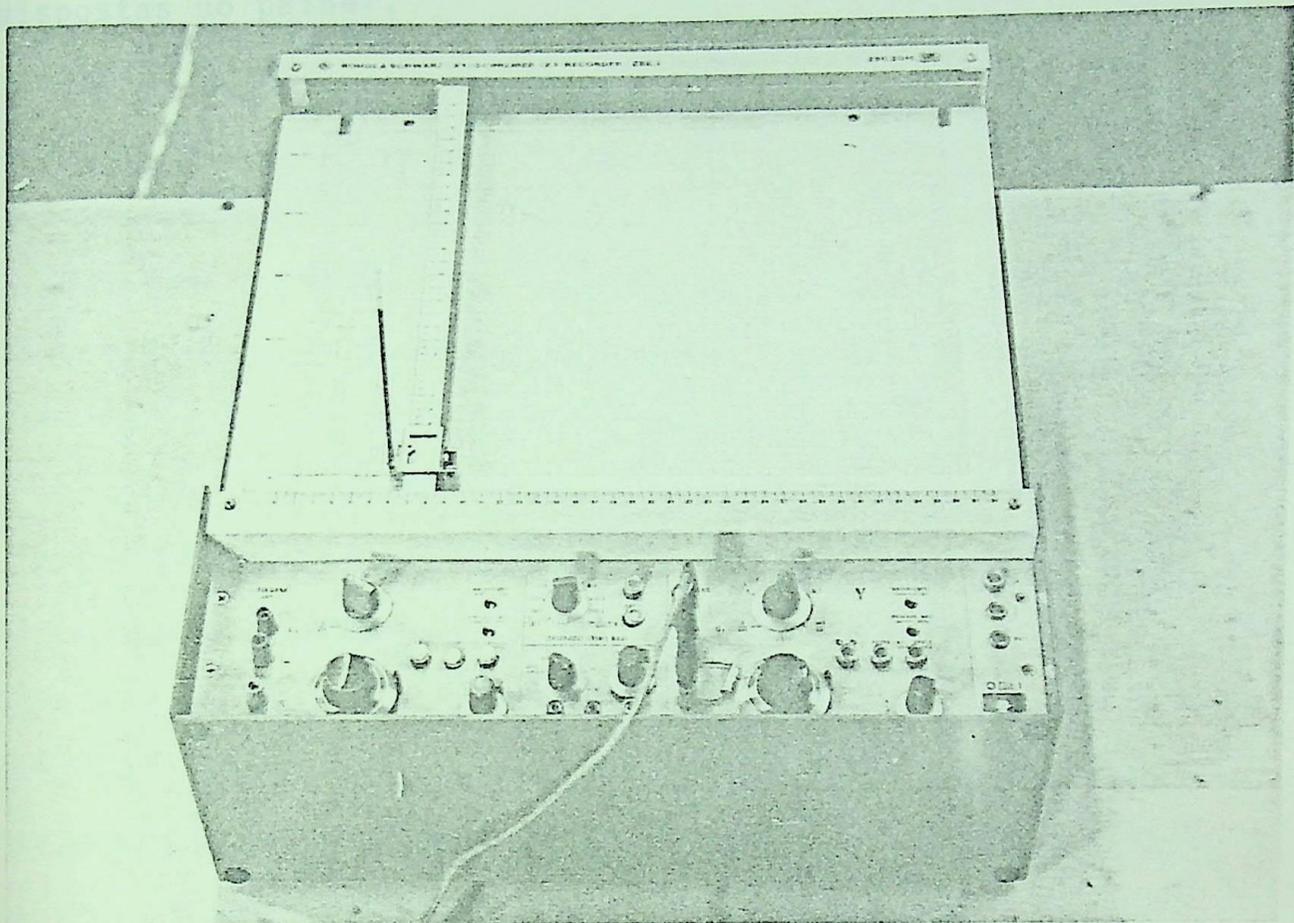


Foto . 10 - Vista geral do registrador xy.

ZSK-2, fabricado pela Rohde e Scharz, Alemanha. Admite uma variação de 10 v/cm a 11 V/cm que permite uma larga faixa de aplicação.

Os gráficos podem ser obtidos em diferentes cores, com a simples variação da pena. O papel é fixado eletrostaticamente, obedece ao formato DIN A3, com área de 297 x 420 mm.

O aparelho é operado pelo princípio de um potenciômetro auto-balanceado, que permite excelente linearidade.

As sobrecargas são indicadas por meio de lâmpadas dispostas no painel.

4 - CONCLUSÃO

4.1 - Filosofia do Projeto

O projeto visa a permitir, também, o uso seguro e econômico do material empregado na estrutura imaginada. Quando o material apresentar comportamento frágil, as equações da mecânica da fratura mencionadas no presente trabalho possibilitam conhecer o seu comportamento mecânico em função dos defeitos ou falhas que apresentem. A grande importância de se conhecer este comportamento é devido à natureza catastrófica da fratura frágil, que exige minucioso esquema de previsão, que varia em função de sua participação na manutenção da integridade e segurança da estrutura projetada. Tal previsão é estabelecida pelo controle dos defeitos internos ou de superfície. O tamanho do defeito, cujas origens mais comuns em materiais frágeis são os de superfície, geralmente provocados por riscos de usinagem, choque térmico, etc., e por isto relativamente fáceis de serem observados, é um dado que influencia grandemente a resistência do material. Os demais dados, parâmetros do material, estão descritos no decorrer do presente trabalho.

Cabe salientar que as equações de mecânica da fratura são também usadas em materiais dúcteis, sendo porém diferentes as técnicas de obtenção dos parâmetros.

4.2 - Determinação dos Parâmetros

A determinação dos parâmetros necessários ao uso das equações da mecânica da fratura aplicáveis aos materiais frágeis é realizada de maneira simples.

As técnicas experimentais descritas, embora pouco difundidas em nosso meio industrial, tanto pelo fabricante como pelo usuário de material, são realizadas de maneira simples, e em máquinas de ensaios comuns, exigindo, apenas, sofisticação de movimentos, como, por exemplo, baixa velocidade de ensaio, e capacidade de registrar com a sensibilidade exigida para a velocidade de resposta do equipamento à solicitação do ensaio. A maneira de fixar adotada no presente estudo, também pouco usual, foi descrita detalhadamente.

A necessidade, sentida pelo autor ao executar trabalho em alumina contendo fase vítrea, de estudar e desenvolver as técnicas aqui descritas, deu-se principalmente pela grande dificuldade de encontrar na literatura especializada, não apenas dos circulantes na comunidade industrial e científica mas também nas difundidas, em forma de propaganda, pelas firmas produtoras de materiais frágeis, os dados necessários ao uso das equações de Mecânica da Fratura.

Os ensaios foram descritos de forma objetiva, visando a permitir ao leitor a reprodução dos resultados obtidos. As equações necessárias à avaliação dos dados obtidos nos ensaios estão desenvolvidas de forma a permitir seu entendimento.

4.2 - Determinação dos Parâmetros

A determinação dos parâmetros necessários ao uso das equações da mecânica da fratura aplicáveis aos materiais frágeis é realizada de maneira simples.

As técnicas experimentais descritas, embora pouco difundidas em nosso meio industrial, tanto pelo fabricante como pelo usuário de material, são realizadas de maneira simples, e em máquinas de ensaios comuns, exigindo, apenas, sofisticação de movimentos, como, por exemplo, baixa velocidade de ensaio, e capacidade de registrar com a sensibilidade exigida para a velocidade de resposta do equipamento à solicitação do ensaio. A maneira de fixar adotada no presente estudo, também pouco usual, foi descrita detalhadamente.

A necessidade, sentida pelo autor ao executar trabalho em alumina contendo fase vítrea, de estudar e desenvolver as técnicas aqui descritas, deu-se principalmente pela grande dificuldade de encontrar na literatura especializada, não apenas dos circulantes na comunidade industrial e científica mas também nas difundidas, em forma de propaganda, pelas firmas produtoras de materiais frágeis, os dados necessários ao uso das equações de Mecânica da Fratura.

Os ensaios foram descritos de forma objetiva, visando a permitir ao leitor a reprodução dos resultados obtidos. As equações necessárias à avaliação dos dados obtidos nos ensaios estão desenvolvidas de forma a permitir seu entendimento.

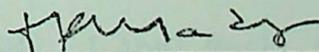
4.3 Limitações do processo

No decorrer do trabalho, verificamos que várias geometrias de trincas foram consideradas, com variação de equação para cada caso abordado. Assim, as respostas precisas obtidas do cálculo devem ser tratadas com cuidado porque (19):

- a - as geometrias de trincas raramente podem ser medidas com precisão
- b - pode haver anisotropia de tenacidade à fratura, cuja origem é metalúrgica, como por exemplo ocorre com chapas laminadas

4.4 Importância da determinação dos parâmetros se faz presente considerando que nem sempre os dados são fornecidos pelo fabricante, principalmente considerando que a tenacidade à fratura varia com o tipo de tratamento térmico empregado.

EFEI, Itajubá, MG, dez 1980

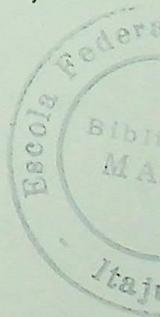


TULIO PINAUD MADRUGA

BIBLIOGRAFIA

1. B.R.Lawn and T.R.Wilshaw, Fracture of Brittle Solids, Cambridge Solid State Science Series, Cambridge University Press, 1975.
2. R.W.Davidge, Mechanical Behavior of Ceramics, Cambridge Solid State Science Series, Cambridge University Press, 1979.
3. L.W.Van Vlack, Propriedades dos Materiais Cerâmicos, Edgar Blücher Ed., SP, 1973.
4. R.W.Davidge and G.Tappin, Thermal Shock and Fracture in Ceramics, Trans. Ceram. Soc. 66 (1967) 405-422.
5. J.Cook and J.E.Gordon, A Mechanism for Control of Crack Propagation in all Brittle Systems, Proc. Roy. Soc. A282 (1964) 508.
6. G.R.Irwin, Fracturing of Metals, MIT Press, Cambridge (1950) 139.
7. H.M.Westergard, Trans. ASME, J.Appl.Mech. 61 (1939) 147.
8. R.W.Hertzeberg, Deformation and Fracture Mechanic of Engineering Materials, John Wiley Sons, USA.

9. W.F.Brown Jr. and J.E.Srowley, ASTM STP 410, 1966.
10. W.Weibull, Statistical Theory of Strength of Materials, Ing Vertskep Akod.Hendl. 151 (1939) 45-90.
11. D.Lweis III and S.M.Oylen, An Experimental Test of Weibull Scaling Theory, J.Am.Ceram.Soc., 59 (1936) 507-510.
12. H.Meredith and J.L.Pratt, The Obserserved Fracture Stress and Measured Values of K_{IC} in Comercial Policristalline Aluminas, Special Ceramics 6, The British Ceramic Research Association (1975) 107-122.
13. G.R.Irwin and J.A.Kios, "Critical Energy Rate Analysis of Fracture Strength", Welding Journal Research Supplement, 33 (1954) 193.
14. W.F.Brow Jr. and J.E.Srawley, "Plane Strain Crack Toughness Testing of High Strength Metalic Materials", ASTM and NASA, 1969, USA.
15. R.Hübner, "Ein Einfeches Verfahren zur Bestimmung gultiger Bruchzähigkertswerte von Hartmetallen Z.Werkstofftech, 9- (1978) 128-132.
16. Zolotorevski, V., Pruebas Mecânicas y propiedades de Los Metales, Ed. Mir Moscou 1976.
17. F.J.Clarke, H.E.Tattersall e G.Tappin, Toughness of Ceramics and Their Work of Fracture, Proc. Brit.Ceram.Soc. 6 (1966)
- 18 - J.A.Coppola and D.P.H.Hasselmann, On the Measurement of the Work-of-Fracture of Refractories, Am.Ceram.Soc.Bull. 52 7 (1973) 578.





Ministério da Educação e Cultura
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
Reconhecida Lei 3232 - 05/01/1917

A N E X O I

PRONUNCIAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, nomeada por Portaria nº 189 de 25 / 08 / 82, considerando o resultado do Julgamento da Prova de Defesa Pública da Dissertação de Mestrado intitulada: "TÉCNICAS EXPERIMENTAIS NECESSÁRIAS A DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA MECÂNICA DA FRATURA APLICÁVEIS AOS MATERIAIS FRÁGEIS"

apresenta pronunciamento no sentido de que a Comissão de Pós-Graduação da Escola Federal de Engenharia de Itajubá solicite ao DRA (Departamento de Registros Acadêmicos) a expedição do título de Mestre em Engenharia MECÂNICA na Área de Concentração de Conversão de Energia satisfeitas as demais exigências regimentais à TULIO PINAUD MADRUGA.

Itajubá, 28 de agosto de 1982

1º Examinador
Prof. Benedito Roberto dos Santos
CTA

2º Examinador
Prof. Júlio Navarro Santos
EFEI

3º Examinador
Prof. Ricardo Damião Sales Gõz
ORIENTADOR

4º Examinador



Ministério da Educação e Cultura
 ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

A N E X O II

FOLHA DE JULGAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA

Título da Dissertação: "TÉCNICAS EXPERIMENTAIS NECESSÁRIAS A DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA MECÂNICA DA FRATURA APLICÁVEIS AOS MATERIAIS FRÁGEIS"

Autor: TULIO PINAUD MADRUGA

JULGAMENTO

EXAMINADORES	CONCEITO	RUBRICA
1º	A (APROVAÇÃO)	<i>Benedito</i>
2º	A (APROVAÇÃO)	<i>Julio Navarro Santos</i>
3º	A (APROVAÇÃO)	<i>Ricardo</i>

Resultado médio: Conceito "A", ou seja Aprovado

Observações: _____

Itajubá, 28 de agosto de 1982

Benedito

1º Examinador
 Prof. Benedito Roberto dos Santos
 CTA

Julio Navarro Santos

2º Examinador
 Prof. Júlio Navarro Santos
 EFEI

Ricardo

3º Examinador
 Prof. RICARDO DAMIÃO SALES GÖZ
 ORIENTADOR

ANEXO III - CALIBRAÇÃO DO EXTENSÔMETRO

A calibração do extensômetro consiste no estabelecimento da relação entre o movimento vertical que ocorre face a deflexão do corpo de prova e o valor marcado no aparelho registrador.

Para estabelecermos esta relação, realizamos, mantendo constante a sensibilidade do registrador, repetidas vezes, a variação de um valor constante de movimento vertical e verificamos a marcação correspondente. A média dessas medidas é o fator de calibração.

Ao assim procedermos, encontramos o gráfico I, para uma calibração hipotética, considerando a sensibilidade do registrador de 5 mv/cm, com deslocamentos verticais de 20 μ m; encontramos um fator de calibração S, dado por

$$S = \frac{248}{180} = 1,378 \text{ mv/ m}$$

Se chamarmos de:

d= distância percorrida no registrador, em cm

f= deflexão do extensômetro real, em m

F_x = sensibilidade do registrador na direção x, em mv/cm

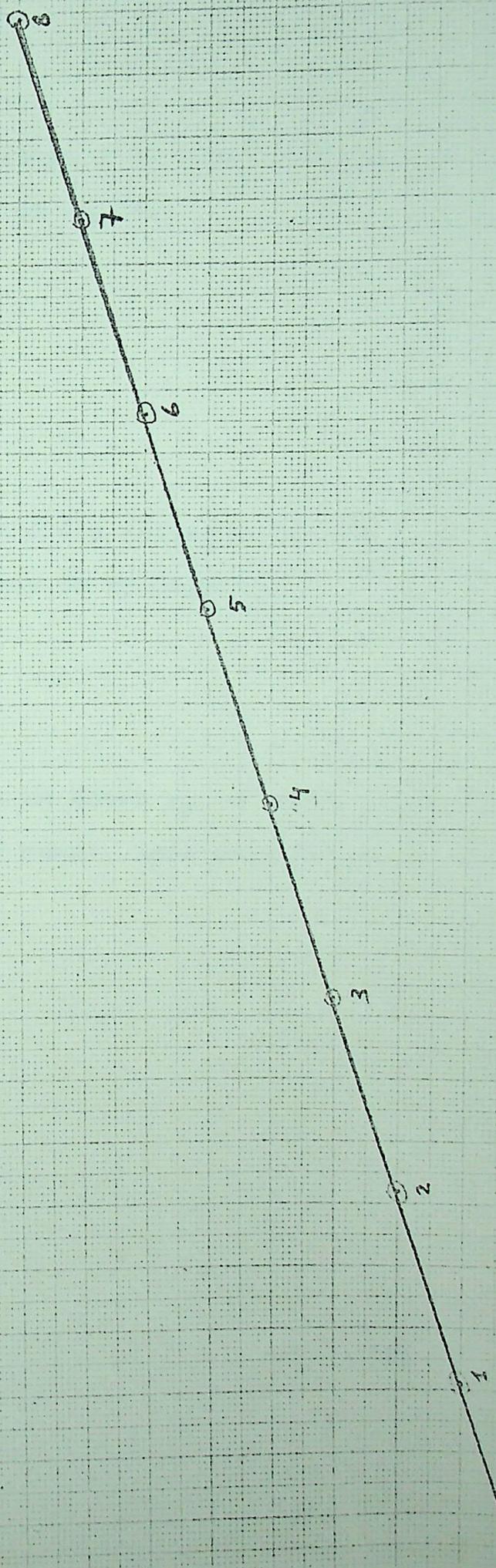
F_y = sensibilidade do registrador na direção y, em mv/cm

S = calibração do extensômetro, em mv/ m, teremos a deflexão f, dada por:

$$f = \frac{d F_x}{S} \frac{\text{cm mv m}}{\text{cm mv}} = \frac{d F_x}{S} \text{ m}$$

8
7
6
5
4
3
2
1

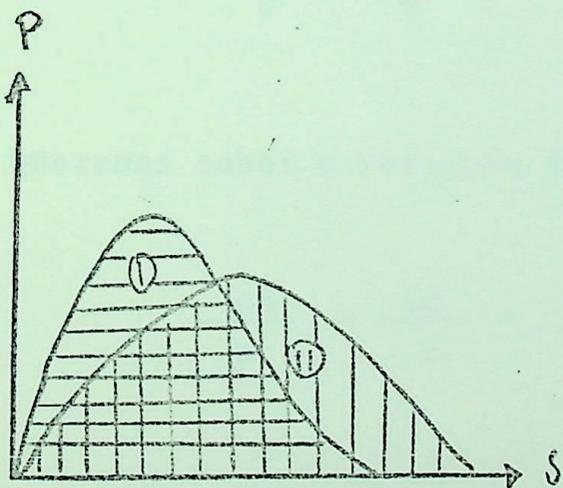
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20



ANEXO IV - AVALIAÇÃO DO EFEITO DA DIMINUIÇÃO DE W NA EXECUÇÃO
DO ENSAIO DE γ_F

1. dúvida: diminuir Δw cortado h de forma a $\Delta a = \Delta w$; teremos maior ou menor facilidade de ensaio?

2. condição: minimizar p na curva $\sigma \times \delta$ é a situação de melhor ensaio. Necessitamos de Δp negativo.



Para um mesmo γ_F , a curva II, de P menor, será mais favorável.

Curva $P \times \delta$, baixa velocidade de ensaio, fratura controlada.

3. verificação:

$$K_{Ic} = \gamma \sigma \sqrt{a}$$

(1)

Pondo (1) na forma logarítmica e derivando,

$$0 = \frac{\Delta Y}{Y} + \frac{\Delta \sigma}{\sigma} + \frac{1}{2} \frac{\Delta a}{a} \quad (2)$$

Sabemos que para flexão em 4 pontos;

$$\sigma = \frac{p \ell}{b w^2} \quad \text{ou de } \ell, b = \text{const.} \quad (3)$$

Rearrumando na forma logarítmica e derivando,

$$\frac{\Delta \sigma}{\sigma} = \frac{\Delta p}{p} - 2 \frac{\Delta w}{w} \quad (4)$$

Queremos saber a variação de ΔP , então, explicitando, teremos:

$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{\Delta \sigma}{\sigma} + 2 \frac{\Delta w}{w} \quad (5)$$

de (2), sabemos que $\Delta \sigma / \sigma = - \Delta Y / Y - 1/2 \Delta a / a$ substituindo em (5) teremos:

$$\frac{\Delta p}{p} = - \frac{\Delta Y}{Y} + 2 \frac{\Delta w}{w} - \frac{1}{2} \frac{\Delta a}{a} \quad (6)$$

Y é uma função de $x = a/w$, então

$$Y = f(x) \quad (7)$$

$$\Delta Y = f'(x) \Delta x \quad (8)$$

$$\Delta X = - \frac{a}{w^2} \Delta w + \frac{1}{h} \Delta a = \frac{1}{w} - \frac{a}{w^2} \quad w \quad (9)$$

Substituindo (9) em (8), teremos:

$$\Delta Y = + f'(x) \left[\frac{1}{w} - \frac{a}{w^2} \right] \Delta w \quad (10)$$

Como $f'(x) = Y'$ (11), teremos,

$$\Delta Y = + Y' \left[\frac{1}{w} - \frac{a}{w^2} \right] \Delta w \quad (12)$$

Substituindo (12) em (6), teremos,

$$\frac{\Delta p}{p} = - \frac{Y'}{Y} \left[\frac{1}{w} - \frac{a}{w^2} \right] \Delta h + 2 \frac{\Delta w}{w} - \frac{1}{2} \frac{\Delta a}{a} \quad (13)$$

rearrumando

$$\frac{\Delta p}{p} = - \frac{Y'}{Y} \left[\frac{1}{w} - \frac{a}{w^2} \right] + \frac{2}{w} - \frac{1}{2a} \Delta w \quad (14)$$

Para a confirmação do ensaio,

$$Y = Y(\alpha) = 0,635 \quad x(1-x)^3 \quad -1/2 \quad (15)$$

$$Y'(x) = - \frac{1}{2} x \cdot 0,635 \quad x(1-x)^3 \quad -3/2 \quad (1-x)^3 + 3x(1-x)^2 \quad (16)$$

Substituindo Y e Y' de (16) e (17) em (15), teremos:

$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{(1-x)^3 + 3x(1-x)^2}{2x(1-x)^3} \cdot \frac{w-a}{w} \Delta w + \frac{3\Delta w}{w} - \frac{\Delta w}{2a} \quad (18)$$

Considerando que

$$\Delta h \frac{a-w}{w^2} = \frac{a}{h} - \frac{w}{w} - \frac{\Delta w}{w} = (1-x) \frac{\Delta w}{w} \quad (19)$$

Substituindo em (18), teremos:

$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{2x+1}{2x(1-x)} (1-x) + 2 - \frac{1}{x} \frac{\Delta w}{w}$$

$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{2x^2 + 6x - 2}{2x} \frac{\Delta w}{w}$$

$$\frac{\Delta p}{p} = \left(x + 3 - \frac{1}{x} \right) \frac{\Delta w}{w}$$

$\Delta p/p$ cresce com o aumento de $\Delta w/w$. Como desejamos $\Delta p/p$ menos, a melhor situação será a de menor w .



Dat: 15 / 11 / 19 2015
 PRG:
 P.L.L.:
 LIV.:
 NCr\$:

(18)

$$\frac{w \cdot \Delta}{w} + \frac{w \cdot \Delta}{w} = \frac{w \cdot \Delta}{w} + \frac{w \cdot \Delta}{w}$$

(19)

$$\frac{w \cdot \Delta}{w} = \frac{w \cdot \Delta}{w}$$

$$\frac{w \cdot \Delta}{w} = \frac{w \cdot \Delta}{w}$$

$$\frac{w \cdot \Delta}{w} = \frac{w \cdot \Delta}{w}$$

