

DETERMINAÇÃO DE UM VALOR CRÍTICO DE J, EM AÇO ESTRUTURAL EXIBINDO SEPARAÇÕES, ATRAVÉS DO EMPREGO DE ULTRASSOM

Marcelo Fairbanks Cescon (1)

Paulo Sergio Carvalho Pereira da Silva (2)

RESUMO

Os métodos de medida da integral J (Norma ASTM E813) estabelecem um valor que é aceito como de início de propagação mas, na realidade, podem implicar na existência de uma certa propagação da trinca. em consequência da definição arbitrária da reta de referência ("blunting line"). Este inconveniente torna-se particularmente crítico nos aços que apresentam o fenômeno das "separações" ("splits") pois, nesses aços, o início de crescimento é bastante irregular devido as superfícies livres que se formam.

Os métodos de medida que empregam o ultra-som para detectar o início de crescimento podem superar esta dificuldade mas apresentam como maior deficiência a falta de confiabilidade no acoplamento entre o transdutor e o c.p., que pode gerar sinais espúrios.

Neste trabalho adaptou-se a técnica de determinação de J empregando ultra-som de tal modo a garantir sinais confiáveis e reprodutíveis. Foi ensaiado um aço ASTM A516 G 70, com "separações" povocadas por inclusões alinhadas, confirmando: (a) a qualidade da técnica; (b) a tendência dos métodos da Norma ASTM E813 de superestimarem os valores de J_{IC} e (c) a possibilidade de se estudar o fenômeno de "fechamento e abertura" da trinca por meio da técnica.

Palavras-Chaves: fratura, integral J, separações.

1. INTRODUÇÃO

A integral J, proposta por Rice [1] como uma ferramenta analítica para a análise do campo elasto-plástico na ponta de uma trinca, foi utilizada com sucesso por Begley e Landes como um critério de fratura elasto-plástico [2,3].

(1) Membro da ABM. Engenheiro Metalurgista. Laboratório de Metalografia do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo S.A.

(2) Membro da ABM. Engenheiro Metalurgista. Professor Titular da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

A integral J foi, inicialmente, medida a partir de curvas experimentais da carga versus deslocamento, nos pontos de aplicação da carga, usando o método óptico para a medida da trinca. Essa metodologia necessita de vários corpos de prova com tamanhos de trinca distintos [2,3]. Posteriormente foi desenvolvido um método capaz de medir J com um único corpo de prova [4,5].

Esses métodos (Norma ASTM 813) estabelecem um valor que é aceito como de início de propagação mas, na realidade, implicam na existência de uma certa propagação da trinca..

A inclinação arbitrária da reta de referência (“blunting line”), que pretende refletir as etapas de arredondamento da trinca, sem propagação, não garante que a trinca crescerá no ponto indicado pela intersecção da reta de referência com a curva de integral J . O deslocamento de 0.2 mm da reta de referência para a direita, por convenção, implica num crescimento dessa ordem de grandeza da trinca. Estes métodos podem fornecer valores de J_{IC} que se afastam consideravelmente daqueles medidos em pontos de pequenos valores de Δa , não refletindo com exatidão o comportamento do material.[6,7]

Definir o início do crescimento estável de uma trinca no centro da espessura do corpo de prova esbarra com a dificuldade de se isolar o processo de propagação da trinca do processo de deformação plástica que antecede a propagação e que provoca o arredondamento da ponta da trinca.

Recentemente [6,7,8,9], foram desenvolvidos métodos ultra-sônicos que podem detectar e acompanhar as etapas de abertura da pré-trinca de fadiga, arredondamento da ponta da trinca por deformação plástica e o crescimento estável da mesma.

A avaliação de J pelo método ultrassônico é do tipo quantitativo, isto é, determina o valor correspondente ao início físico do crescimento da trinca. Adicionalmente, o método ultrassônico é sensível não somente ao crescimento da trinca como também em etapas anteriores, como a abertura da pré-trinca, como mencionado na literatura [6,7], e será mostrado neste trabalho.

A maior deficiência da técnica, está na confiabilidade do acoplamento entre o transdutor e o corpo de prova. O acoplamento é normalmente realizado por um fluido; se a pressão de contato for insuficiente, ocorre instabilidade do sinal ultrassônico, se em excesso, ocorre uma atenuação do sinal pela progressiva expulsão do fluido acoplante.

No presente trabalho foi introduzido um furo no corpo de prova numa posição tal que a reflexão ultrassônica produzida não fosse afetada pela mudança de geometria do corpo de prova durante o ensaio . Esta descontinuidade origina um sinal de referência que reflete as variações de acoplamento do mesmo modo a que está submetido o sinal ultrassônico da pré-trinca de fadiga.. Essa modificação no ensaio permitiu detectar e

compensar variações do sinal acústico originadas de alterações do acoplamento e não relacionadas com o ensaio propriamente dito.

O equipamento de ultrassom foi adaptado para realizar leituras na trinca e no furo de referência. Na técnica ultrassônica adotada o equipamento emite e recebe um pulso de frequência estabelecida pelo cristal do transdutor e cronometra o tempo para o retorno do eco refletido na tela de um osciloscópio.

2. MATERIAL ESTUDADO E ENSAIOS REALIZADOS

2.1. Material e Ensaio Preliminares

No presente trabalho foi utilizado como material de estudo o aço ASTM A-516 grau 70, fornecido no estado bruto de laminação com espessura de 25,4mm e com a seguinte composição química: 0,25%C; 0,27%Si ;1,06%Mn; 0,017%P e 0,008%S.

A chapa foi recortada em placas de dimensões aproximadas de 25 X 30 cm, e submetidas à normalização à 930°C por uma hora e recozimento à 700°C por 16 horas.

Foram retirados do material normalizado corpos de prova para ensaios mecânicos com orientação L para o ensaio de tração (Norma ASTM E8M) e corpos de prova para a medida de J (Norma ASTM E813 - c.ps. do tipo CT).

O material foi submetido a exames metalográficos e determinação do nível de inclusões (Norma ASTM E45) num sistema analisador de imagens Leco, modelo 2001.

O material estudado apresentou o fenômeno das “separações” (Figura 3-4) que são freqüentemente observadas em chapas obtidas por laminação controlada [10,11]. No caso, as “separações” se formaram a partir de inclusões alongadas ou alinhadas de forma planar. Este tipo de “separação” está mais associado com o nível de limpeza interna do aço que com o tratamento termomecânico, podendo ser reduzido ou eliminado por tratamentos metalúrgicos de controle de morfologia e nível de inclusões.

Este fenômeno pode dificultar e mesmo impossibilitar a obtenção de uma medida significativa e reprodutiva de J. O método desenvolvido mostrou-se particularmente satisfatório nesta situação difícil.

2.2. Ensaio de J pelo Método Ultrassônico

Foi empregado um transdutor de ultra-som tipo piezelétrico, frequência de operação de 10 MHz, 10 mm de diâmetro, 2,5 vezes menor que a espessura do corpo de prova, facilitando ajustes no posicionamento do transdutor de ultra-som.

A Figura 2-1 mostra o corpo de prova com o furo de referência, transdutor de ultra-som e "clip-gage" acoplados.

O posicionamento do transdutor de ultra-som no corpo de prova é crítico, seguindo-se um procedimento que submete o corpo de prova à uma carga cíclica positiva de 0,5 Hz que não supera o valor da carga do final de pré-trincamento e garante que a intensidade do eco proveniente do furo de referência é praticamente invariante com o ciclagem. A intensidade do eco da trinca tem, ao mesmo tempo, bastante variação, devido ao fenômeno de "fechamento" da trinca.

Durante o carregamento, o corpo de prova é tracionado com uma velocidade constante de 0,48 mm/min. Nesta etapa, a aquisição de dados é feita pelo computador, que foi programado para receber as informações de carga e de deslocamento (medido pelo "clip gage"), e também para controlar o aparelho de ultra-som.

Para a condução dos ensaios foi indispensável o controle por meio de um computador. A configuração do computador não é relevante a não ser no uso de uma interface modelo DT2809, com oito canais de leitura A/D de 16 bits e leitura simultânea (técnica de "sample holder", onde circuitos apropriados mantêm as entradas invariantes até o término das leituras) e dois canais D/A de 12 bits. A frequência máxima de aquisição de 16 kHz é dividida pelos cinco canais de aquisição em uso (carga, deslocamento, abertura do clip-gage e dois canais para os sinais de ultra-som).

Foi desenvolvido para este estudo um programa para o computador com os seguintes objetivos:

- i) Auxiliar nos preparativos para o ensaio.
- ii) Selecionar a profundidade do plano a ser mostrado na tela do aparelho de ultra-som.
- iii) Ler e registrar as voltagens correspondentes aos sinais de carga, ultra-som e deslocamento.
- iv) Mostrar a evolução do ensaio ao longo do tempo de execução do teste, permitindo que o operador possa tomar a decisão de quando terminá-lo.
- v) Gerar um arquivo contendo todos os dados pertinentes ao ensaio para uma análise posterior.

Através de um chaveamento eletrônico com frequência aproximada de 2 Hz armazenase na memória os valores das respostas do eco-trinca e do eco-referência.

Durante todo o tempo do experimento, o computador registra na tela do monitor as curvas de carga, eco-trinca e do eco-referência em função do deslocamento na linha de carga. O ensaio é encerrado pelo operador, observando e analisando as curvas

mostradas no monitor. Em seguida, os dados da memória são copiados em um arquivo para uso posterior.

A propagação da frente da trinca envolve etapas de propagação de fadiga e de propagação estável. Os dois processos geram acidentes topográficos distintos, produzidos por diferentes mecanismos de fratura, isto é, estrias de fadiga e alvéolos, respectivamente, permitindo uma distinção entre as duas regiões [12].

A maior dificuldade é a delimitação da linha de separação entre a zona de propagação estável durante o ensaio e o resto da fratura, provocada no ato de rompimento do corpo de prova em duas metades, visto que, nos dois casos, o micromecanismo de fratura é o mesmo e as eventuais diferenças de solitação são difíceis de serem observadas.

Existem dois métodos que podem ser utilizados para marcar a posição da trinca: oxidação por aquecimento e propagação de uma outra trinca por fadiga.

No primeiro método o corpo de prova é colocado num forno numa temperatura acima de 350°C por 30 minutos, seguido de resfriamento ao ar. O efeito é observado visualmente, devido a diferença de coloração entre as superfícies da fratura que foram expostas ao ar durante o aquecimento e as superfícies criadas no ato de rompimento.

No segundo método, propagação da trinca por fadiga ou pós-trincamento por fadiga, procura-se criar acidentes topográficos típicos de fadiga, permitindo uma diferenciação nítida dos alvéolos formados na ruptura final.

Neste trabalho foi utilizado, em todos os casos, o método da oxidação, sendo que, em alguns deles, o pós-trincamento foi adicionalmente utilizado, para facilitar as medições ópticas.

3. RESULTADOS

3.1. Resultados dos Ensaio Preliminares

A Tabela 3-1 resume os resultados obtidos no ensaio de tração e a Tabela 3-2 os valores de J_{IC} obtidos pelo método de corpo de prova único.

A determinação do valor de J_{IC} pela técnica de múltiplos corpos de prova segundo ASTM E813 para plano de trinca com orientação LT, forneceu:

$$J_{IC} = 193 \text{ kN/m.}$$

3.2. Resultados de J_{in} pelo Método Ultra-sônico

O procedimento adotado para a detecção do início de propagação da trinca no ensaio de tenacidade à fratura, efetuado conforme relatado no item 2.2., forneceu os resultados exemplificados na Figura 3-3. A curva de integral J mostradas nesses gráficos foi calculada para um tamanho de trinca igual ao tamanho da pré-trinca medido, sendo portanto verdadeira enquanto a curva de intensidade do sinal de ultra-som não indicar crescimento de trinca. Os resultados foram ordenados em ordem crescente de avanço de trinca até interrupção do ensaio.

A Tabela 3-3 fornece os valores de J_{in} baseados na indicação da curva de intensidade do sinal de ultra-som nos corpos de prova em estudo. Além do cálculo pela Norma ASTM E813, foram também calculados os valores pela equação de Clarke et all [12], a saber:

$$J_{in} = \frac{2A}{Bb} \cdot \frac{1 + \alpha}{1 + \alpha^2}$$

$$\alpha = \sqrt{(2a/b)^2 + 2(2a/b) + 2} - (2a/b + 1)$$

onde

A = área sob a curva P-VI

a = comprimento da trinca

B = espessura do corpo de prova

b = comprimento do ligamento remanescente

3.3. Resultados dos Exames Metalográficos

As Figuras 3-4, 3-5 e 3-6 mostram, respectivamente, um aspecto da estrutura do material com “separações”, um aspecto do c.p. S, que não apresentou crescimento estável, e do c.p. O com crescimento estável da trinca.

A Tabela 3-4 fornece os resultados do nível de inclusões obtido pelo método A da ASTM E-45 num sistema analisador de imagens da Leco modelo 2001.

4. DISCUSSÃO

A intensidade do sinal acústico registrada durante o ensaio como exemplificado na Figura 3-3, apresenta um primeiro trecho linear e de constante angular muito elevada; um segundo trecho com intensidade praticamente constante e um terceiro trecho não linear. Como em trabalhos anteriores, o valor de J_{in} procurado foi indicado na mudança do segundo para o terceiro trecho e que representa a transição entre os fenômenos de arredondamento da ponta da trinca e a nucleação de alvéolos na zona deformada com o início do crescimento da trinca [6,7,9].

Todos os resultados das curvas de intensidade do sinal de ultrassom versus deslocamento na linha de carga mostram um andamento similar, em aspecto, ao observado no ensaio de tração que exhibe escoamento descontínuo. É interessante salientar que não foi encontrada nenhuma menção a respeito desse fenômeno na literatura consultada. Dificilmente o fenômeno poderia ser atribuído à deformação plástica, uma vez que a etapa imediatamente anterior ao crescimento da trinca envolve grande deformação plástica na região da ponta da trinca e o resultado na intensidade do sinal acústico é o patamar. Uma hipótese plausível poderia ser um breve aumento do contato físico entre as superfícies da pré-trinca provocada pela componente de rotação em torno da ponta da trinca devido à distância da linha de carga, com conseqüente diminuição da intensidade do sinal acústico refletido.

Calculando-se os valores de K para os pontos de mínimo para esse tipo de curva "senoidal", precedendo o início do patamar da curva de ultrassom, usando-se o comprimento da pré-trinca a_0 e o valor da carga associado a esses pontos, obtemos os valores apresentados na Tabela 4-1.

É importante ressaltar que nestes ensaios o valor de K no final de cada pré-trincamento foi controlado pelo programa do computador através da técnica da rigidez. Este controle permite uma maior uniformidade entre os corpos de prova e garante, no pré-trincamento um valor de K abaixo do máximo estipulado de $23 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$.

A média e desvio padrão dos valores encontrados: $18.94 \pm 1.62 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ exhibe forte correlação com este valor de K no final do pré-trincamento. O método ultrassônico empregado parece indicar uma forma de se estimar a qualidade da etapa de pré-trincamento.

A associação dessa "senóide" na curva de intensidade de ultrassom com o valor da intensidade de tensão K no final do processo de pré-trincamento de fadiga representa uma possibilidade de medição direta desse parâmetro e da sua relação com o "fechamento" da ponta da trinca, caso seja comprovada com maior número de ensaios em que se varie o valor de K no final do pré-trincamento.

Os resultados obtidos mostram inequivocamente que a ocorrência de "separações" pode se dar antes da propagação da trinca principal. A fig. 3-5 que mostra o aspecto da fratura do corpo de prova S após o ensaio de J_{m} ilustra a presença de separações antes da propagação estável da trinca.

As "separações" na zona de propagação estável durante o ensaio provocam um avanço irregular da frente da trinca por modificar a triaxialidade de tensões no local. Junto à superfície livre da "separação" a trinca é retardada pela diminuição da triaxialidade de tensões.

No caso de materiais exibindo separações, o método empregando ultrassom mostra-se capaz de medir o parâmetro de J_{IC} . Já os métodos convencionais exigindo um avanço relativamente uniforme não são aplicáveis, porque dependem do crescimento da trinca

para se chegar ao resultado através de técnica de regressão. Uma prática utilizada para contornar a presença de separações é a execução do ensaio em temperaturas mais elevadas onde a ocorrência de separações não mais ocorram. Esta alternativa introduz uma complicação adicional na execução do ensaio além de fornecer como resultado um parâmetro do material fora da temperatura de serviço.

Os corpos de prova ensaiados exibiram desde avanço estável da trinca nulo e ausência de separações até avanços estáveis significativos e tamanho de separações pronunciados. Como as separações são aberturas em planos perpendiculares ao plano da trinca, a relação entre a área projetada pelas separações no plano da trinca e a área da secção resistente no plano da trinca é muito baixa nos estágios iniciais, pois as separações estão em processo de formação. Nesse quadro, a influência das separações no sinal de ultrassom é mínima, não afetando a capacidade de detecção do início de crescimento da trinca.

Uma vez detectado o ponto de início de crescimento foi alcançado o objetivo do ensaio, não importando a evolução posterior do crescimento influenciado pelas separações. O método com ultrassom expande, portanto, o campo de aplicação válido para o método convencional.

Sob este aspecto, o método proposto apresenta uma vantagem intrínseca já que mede o valor de iniciação de J , antes da propagação da trinca. Deste modo ele propicia a determinação do valor de J em materiais que de outra forma não teriam resultados validados pela norma ASTM E-813.

5. CONCLUSÕES

- O método ultra-sônico mostrou-se aplicável na determinação do parâmetro J_{IC} .
- A modificação introduzida no ensaio ultra-sônico, fornecendo um valor de referência, permite discernir se as variações na curva do sinal de ultra-som são devidas à resposta do material ou à variação no acoplamento do transdutor
- A ocorrência de separações no material estudado deve ser atribuída ao elevado nível de inclusões alongadas e alinhadas de forma planar.
- As separações formaram-se antes do crescimento da trinca, sem contudo interferir no resultado do ensaio.
- Os valores de J_{IC} obtidos na técnica ultra-sônica sugerem que a reta de referência imposta pela norma ASTM E813 super-estima os resultados.
- Existe um sinal na curva de resposta do sinal de ultra-som que apresenta forte correlação com o fator intensidade de tensões presente no final do pré-trincamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] RICE, J.R. A path independent integral and the approximate analysis of strength concentration by notches and cracks. *Journal of Applied Mechanics*, New York, v. 35, n.2, p.379-386, June 1968.
- [2] BEGLEY, J.A.; LANDES, J.D. The J integral as a fracture criterion. In: NATIONAL SYMPOSIUM ON FRACTURE MECHANICS, 1971, Urbana-Champaign. *Proceedings...* Philadelphia : American Society for Testing and Materials, 1972. p.1-20. (ASTM STP 514).
- [3] LANDES, J.D; BEGLEY, J.A. The effect of specimen geometry on J_{Ic} . In: NATIONAL SYMPOSIUM ON FRACTURE MECHANICS, 1971, Urbana-Champaign. *Proceedings...* Philadelphia : American Society for Testing and Materials, 1972. p.24-39. (ASTM STP 514).
- [4] BUCCI, R.J.; PARIS, P.C.; LANDES, J.D.; Rice, J.D. J integral estimation procedures. In: NATIONAL SYMPOSIUM ON FRACTURE MECHANICS, 1971, Urbana-Champaign. *Proceedings...* Philadelphia : American Society for Testing and Materials, 1972. p.40-69. (ASTM STP 514)
- [5] RICE, J.R.; PARIS, P.C.; MERKLE, J.G. Some further results on J-integral analysis and estimates. In: NATIONAL SYMPOSIUM ON FRACTURE MECHANICS, 1972, Philadelphia. *Proceedings...* Philadelphia : American Society for Testing and Materials, 1973. p.231-245. (ASTM STP 536).
- [6] BUXBAUM, S.R. *Ultrasonic evaluation of crack closure and crack extension in compact tension specimen*. Baltimore : Johns Hopkins University, 1985. Ph.D. Thesis. 202p.
- [7] HIRANO, K.; KOBAYASHI, H.; NAKAZAWA, H. A single-specimen determination of J_{Ic} by the ultrasonic method and analysis of its statistical distribution characteristics. *Journal of Testing and Evaluation*, Philadelphia, v. 13, n. 5, p.356-362, Sept. 1985.
- [8] CLARK JR, W.G. Ultrasonic detection of crack extension in the W.O.L. type fracture toughness specimen. *Materials Evaluation*, Columbus, v. 25, n. 8, p.185- 190, Aug., 1967.
- [9] KLIMA, S.J.; FISHER, D.M.; BUZZARD, R.J. Monitoring crack extension in fracture toughness tests by ultrasonics. *Journal of Testing Evaluation*, Philadelphia, v.4, n.6, p.397-404, Nov. 1976.

- [10] DABKOSWKI, D.S.; KONKOL, P.J.; BALDY, M.F. Progress in high-strength steels “splitting type fractures in high strength line pipe steels”. *Metals Engineering Quartely*, Metals Park, v. 16, n. 1, p.22-32, Feb. 1976.
- [11] SILVA, C.N.P. *Efeitos das separações na tenacidade de um aço microligado produzido por laminação controlada*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica/Departamento de Engenharia Metalúrgica, Universidade de São Paulo, 1986. 161p.
- [12] CLARKE, G.A.; ANDREWS, W.R.; BEGLEY, J.A.; DONALD, J.K.; EMBLEY, G.T.; LANDES, J.D.; MCCABE, D.E.; UNDERWOOD, J.H. A procedure for determination of ductile fracture toughness values using J integral techniques. *Journal of Testing and Evaluation*, Philadelphia, v. 7, n. 1, p.49-56, Jan. 1979.

J INTEGRAL DETERMINATION FOR A STRUCTURAL STEEL EXHIBING “SPLITS” BY A MODIFIED ULTRASONIC METHOD

ABSTRACT

ASTM E813 methods for determining J integral are generally accepted as corresponding to the very beginning of crack extension but a certain growth may occur since the blunting line is arbitrarily defined. This is particularly troublesome for steels subjected to the development of “splits” during fracture toughness testing, since their initial crack growth is very irregular due to the generation of internal free surfaces.

Ultrasonic methods may overcome this difficulty but their inherent deficiency is the risk of obtaining spurious signals due to a variable coupling between probe and specimen.

This paper presents simple alterations in specimen design and testing procedure in order to guarantee reliable and reproducible signals, corresponding to the very beginning of crack extension. Samples of a ASTM A516 G70 steel, presenting “splits” due to aligned inclusions, were tested. It was confirmed (a) the reliability of the alterations proposed; (b) the tendency of ASTM E813 methods to over-estimate J_{IC} values and (c) the possibility to employ the method to the study of “crack closure”.

Key-Words: fracture, J integral, “splitting”.

Tabela 3-1 - Resultados dos Ensaios de Tração

Corpo de Prova	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Alongamento em 5 D (%)	Redução de Área (%)
1	315	563	35	70
2	315	557	34	69
Valor Médio	315	560	34	69

Tabela 3-2 - Resultados do Ensaio de J_{IC} . Método: Corpo de Prova Único

Corpo de Prova	Orientação	J_{IC} (kN/m)
1	LT	190
2	LT	102

Tabela 3-3 - Valores de J_{IN} calculados pela Equação de Clark et all [12] e pela Norma ASTM E813

Cálculo de J_{IN}	J_{IN} (kN/m)				
	c.p. V	c.p. S	c.p. A	c.p.Q	c.p.O
conforme Eq. de Clark et all	-	-	39	42	36
conforme ASTM E813	-	-	56	55	49

Tabela 3-4 - Resultados da Medida do Nível de Inclusões

Aumento: 100 x		Amostra: ASTM 516 G 70		
Calibração: 1,241 m/Pixel		ASTM E45 Método A		
largura 10,61 mm	comprimento 14,85 mm	área da amostra 157,5 mm ²		
	A Sulfeto	B Alumina	C Silicato	D Globular
Fina	3,5	3,0	1,5	2,0
Grossa	3,0	1,5	0	0,5

Tabela 4-1 - Valores de K Calculados no Ponto de Mínimo da Curva “Senoidal”

Corpo de Prova	a ₀ (mm)	P (kN)	f(a/W)	K (MPa √ m)
V	30,79	6,68	14,55	17,56
S	31,12	6,62	14,95	17,88
A	31,21	6,72	15,06	18,29
Q	31,25	7,90	15,11	21,57
O	31,47	6,97	15,40	19,39

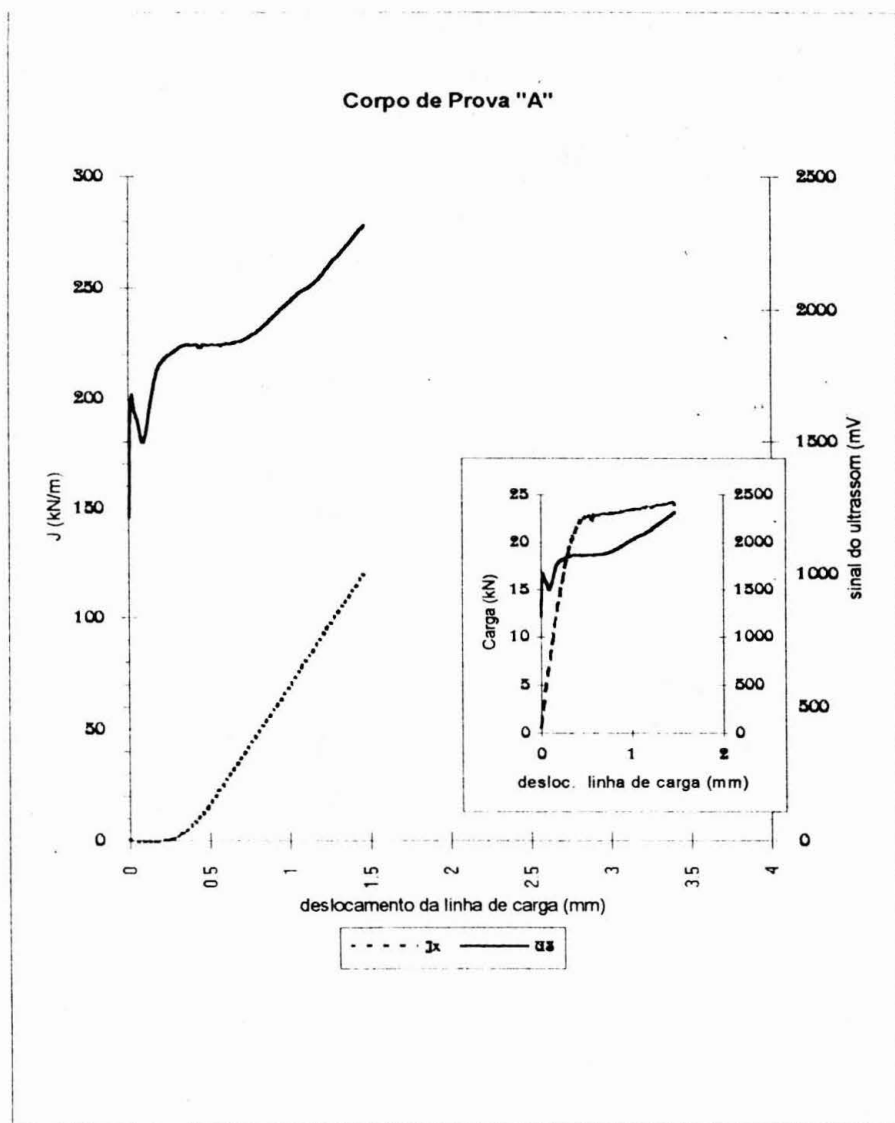


Fig. 3-3 - Ensaio com ultra-som no corpo de prova A. Estão representados em função do deslocamento da linha de carga:(a) intensidade do sinal ultra-sônico e o valor da integral J , no gráfico maior.(b) intensidade do sinal ultra-sônico e o valor da carga, no gráfico menor.

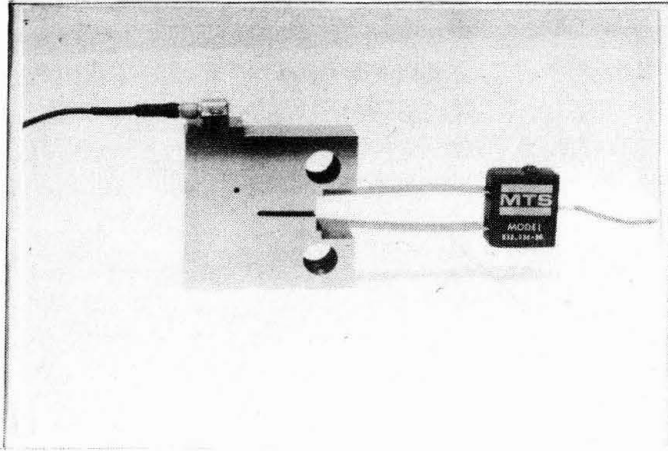


Fig.2-1 - Fotografia do Corpo de Prova com o Furo de Referência, Transdutor de Ultra-Som e "Clip-gage".

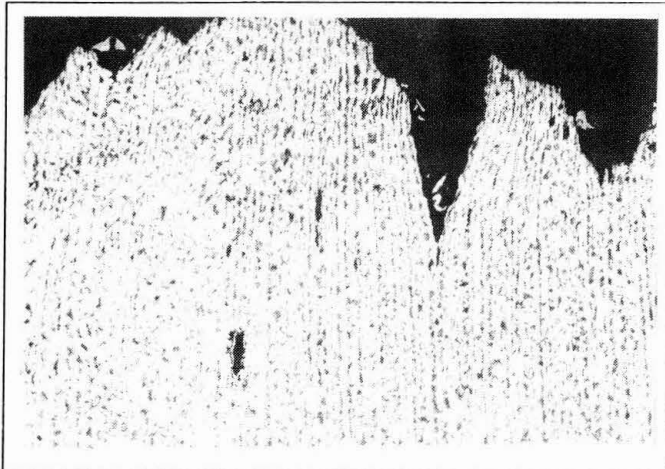


Fig.3-4 - Seção Normal à Superfície de Fratura. C.p. H. "Separações" na Fratura e Aberturas nas Interfaces de Inclusões. Ataque: Nital. Aumento: 25 x

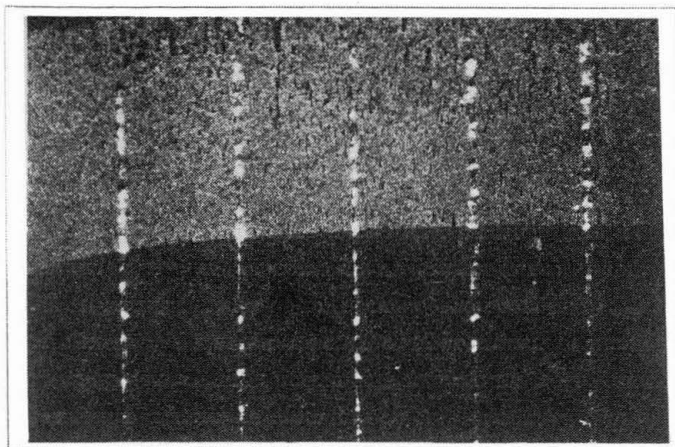


Fig.3-5 - Detalhe do Aspecto da Fratura do c.p. S. Transição entre Pré-Trinca e Pós-Trinca de Fadiga Bem Definida. Ausência de Crescimento Estável. "Separações". Aumento: 6 x

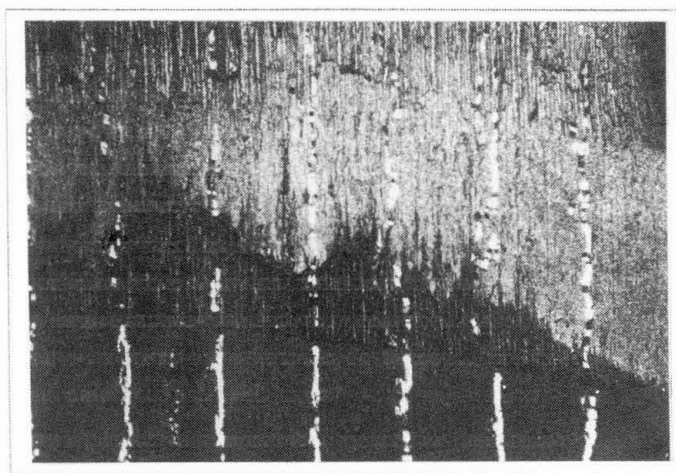


Fig.3-6 - Aspecto da Fratura do c.p. O. Zona Cinza: Fadiga. Zona Preta: Propagação Estável. Zona Branca: Pós-Trinca de Fadiga. Propagação Estável Pronunciada no Centro do c.p. Crescimento Estável de 1,61 mm. Aumento: 6 x

