

LEVANTAMENTO DA FLEXIBILIDADE DE CORPOS DE PROVA DE ENSAIO DE TENACIDADE À FRATURA COM AQUISIÇÃO DE DADOS SIMULTÂNEA ATRAVÉS DE CLIP-GAUGE E STRAIN-GAUGE

PATRICIA SANTOS DE ALCANTARA BEZERRA¹
CARLOS JOSÉ BANDEIRA DE MELLO JOIA²
FERNANDO LUIZ BASTIAN³

Resumo

Foram levantadas as curvas de flexibilidade para corpos de prova do tipo WOL (*Wedge Opening Loaded*) com relação a/W variando de 0,38 a 0,75 para ensaio de tenacidade à fratura, determinando-se simultaneamente a abertura da ponta da trinca, através de um clip-gauge, e a deformação na face do corpo de prova oposta à trinca, através de um strain-gauge.

Palavras-Chaves

flexibilidade
deformação na face oposta
tenacidade

A nucleação e o crescimento de trincas em equipamentos de aço-carbono e baixa liga expostos a meios contendo H_2S podem resultar em falhas catastróficas, com perda de vidas humanas e prejuízos consideráveis, inclusive os decorrentes de lucros cessantes e danos ao meio ambiente.

Este fato é de grande importância para a indústria petrolífera, uma vez que a produção, o transporte e o refino do petróleo fazem uso de uma série de equipamentos que trabalham pressurizados e expostos ao H_2S . Levantamento realizado pelo American Petroleum Institute (API) mostrou que 25% de todos os equipamentos existentes em plantas de processo apresentavam trincas induzidas pelo hidrogênio.

Considerando-se que o comprometimento da integridade estrutural dos equipamentos pode se dar de forma repentina e de difícil percepção, tornam-se necessários o desenvolvimento e o estabelecimento de uma metodologia para a avaliação da tenacidade à fratura de materiais que trabalham expostos a meios contendo H_2S .

1 Engenheira Metalúrgica - Universidade Federal do Rio de Janeiro

2 Engenheiro de Equipamentos - PETROBRÁS/CENPES

3 Professor Titular do Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio de Janeiro

Usualmente, em ensaios ao ar, são utilizados clip-gauges para a medição indireta do crescimento de trinca durante o ensaio de tenacidade à fratura. O clip-gauge mede a abertura da ponta da trinca provocada pela sua propagação. No entanto, o crescimento da trinca também pode ser medido indiretamente através de strain-gauges. O strain-gauge mede a deformação provocada pela propagação da trinca na face do corpo de prova oposta a ela.

Tendo em vista o alto custo dos clip-gauges específicos para trabalho em meios agressivos - da ordem de US\$ 30000 - o desenvolvimento de uma técnica de baixo custo - da ordem de US\$ 2000 - que utilize strain-gauges mostra-se bastante interessante.

Visando, portanto, ao desenvolvimento de uma técnica para a medição da tenacidade à fratura em meios contendo H₂S através do uso de strain-gauges, foram levantadas as curvas de flexibilidade de corpos de prova de ensaio de tenacidade à fratura, aquisitando-se simultaneamente a abertura da ponta da trinca através de um clip-gauge e a deformação na face oposta à trinca através de um strain-gauge.

I - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O tamanho da trinca é de fundamental importância para estudos de tenacidade à fratura e propagação de trinca, tendo sido desenvolvidos vários métodos para sua determinação. A eficiência desses métodos, no entanto, depende do caso em que eles estão sendo utilizados.

Entre esses métodos podem ser citados⁽¹⁾ os que utilizam técnicas óticas; mudanças no potencial elétrico quando o corpo de prova (CP) é incorporado a um circuito ac ou dc; mudanças nas medidas de deformação utilizando strain-gauges; mudanças nas medidas de abertura da trinca utilizando clip-gauges; métodos ultrassônicos para defeitos sub-superficiais; e medidas de flexibilidade.

A equação (1) mostra que a taxa de liberação de energia elástica (G) é relacionada com a carga aplicada (P) e com a derivada do inverso da rigidez (M) em relação ao tamanho da trinca (a):

$$G_{CR} = \frac{1}{2} P_{CR}^2 \frac{\partial(1/M)}{\partial a} \quad (1)$$

O inverso da rigidez do CP trincado é a **flexibilidade (C)**, que depende da geometria do CP e do tamanho da trinca (figura 1).

Cons. rando-se que:

$$G_I = \frac{K_I^2}{E} \quad (3)$$

obtem-se que:

$$K_I = \left(\frac{P^2 E dC}{2 da} \right)^{0.5} \quad (4)$$

ou seja, a determinação do fator de intensidade de tensão (K) para uma determinada geometria utiliza medidas de flexibilidade para diferentes tamanhos de trinca.

Para o caso geral de um defeito em um estrutura submetida ao modo de carregamento I, tem-se que⁽¹⁾:

$$K_I = \sigma \left[\pi (a + r_p) \right]^{0.5} \frac{Y}{Q} \quad (5)$$

onde: r_p = correção da zona plástica

Q = parâmetro de forma de defeito (que para uma trinca plana é um)

Y = função da flexibilidade.

Para uma trinca plana ($Q = 1$) e uma zona plástica pequena comparada com o comprimento da trinca ($r_p = 0$), a combinação das equações (4) e (5) resulta em:

$$Y = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{P^2 E dC}{2\pi a da} \right)^{0.5} \quad (6)$$

A equação (6) indica que a função da flexibilidade (Y) pode ser determinada experimentalmente para uma determinada carga e geometria. Y pode então ser usado para calcular K_I .

Dividindo-se a pela distância do centro do furo até a face oposta do CP (W) na equação (6), chega-se à forma parametrizada da flexibilidade:

$$Y = \frac{P}{\sigma} \left[\frac{1}{2\pi(a/W)} \frac{d(CE)}{d(a/W)} \right] \quad (7)$$

que é usualmente representada como uma função polinomial de a/W :

$$Y = A \left(\frac{a}{W} \right)^{\frac{1}{2}} - B \left(\frac{a}{W} \right)^{\frac{3}{2}} + C \left(\frac{a}{W} \right)^{\frac{5}{2}} - D \left(\frac{a}{W} \right)^{\frac{7}{2}} + F \left(\frac{a}{W} \right)^{\frac{9}{2}} \quad (8)$$

onde A, B, C, D e F são coeficientes determinados através de regressão de mínimos quadrados dos dados obtidos experimentalmente.

Na figura 2, é apresentada a curva de flexibilidade contra tamanho de trinca. Esta curva é obtida da seguinte forma: vários CPs com diferentes tamanhos de trinca são ensaiados, aumentando-se a carga e medindo-se o deslocamento na linha de carga com um clip-gauge. Curvas como a apresentada na figura 1 são então obtidas, sendo que cada reta corresponde a um tamanho de trinca a. Assim para cada valor de a tem-se um valor de flexibilidade $C=1/M=d/P$. Os valores de a e C são plotados em um gráfico que resulta na curva apresentada na figura 2.

Richards e Deans⁽²⁾ apresentaram uma técnica para medida, em CPs do tipo WOL ou do tipo CT (*Compact Tension*), da carga atuante quando o tamanho da trinca é conhecido ou do tamanho da trinca quando a carga atuante é conhecida. Esta técnica baseia-se na deformação medida na face oposta ao crescimento da trinca (BFS).

A relação entre tamanho de trinca, BFS e carga para estes CPs são válidas para qualquer material no regime linear elástico.

Esta técnica é simples, confiável, sensível e de baixo custo. Além disso, a BFS está diretamente relacionada ao tamanho da trinca. Para tensão constante, a BFS aumenta linearmente com o tamanho da trinca, exceto para trincas muito grandes nos CPs do tipo CT. Para BFS constante, a tensão diminui com o aumento da trinca. Para a medição da BFS são utilizados **strain-gauges**.

Richards e Deans constataram, através de análise de elementos finitos em duas dimensões em um CP do tipo CT com 25 mm de espessura e de resultados experimentais, que o posicionamento de um strain-gauge de 3 mm na face oposta do CP não introduz erros significativos nos resultados obtidos.

Para normalizar a relação entre BFS, tamanho de trinca e carga, tornando-a independente do módulo de Young do material e da geometria do CP, Richards e Deans chegaram à seguinte relação:

$$P^* = \frac{P}{BWE} \quad (9)$$

onde: P^* = carga normalizada
B = espessura do CP

W = distância do centro do furo até a face oposta do CP
E = módulo de Young.

II - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E RESULTADOS

Foram confeccionados 30 CPs com geometria correspondente à do tipo WOL e com dispositivo de perfuração correspondente ao do tipo CT, a fim de serem ensaiados em tração (figura 3). As dimensões dos CPs atenderam ao disposto na Norma ISO/DIS/7539-Parte 6⁽³⁾ para um CP do tipo WOL, tendo sido confeccionados dois furos para fixação das garras a serem usadas no ensaio de tração. Foram utilizadas 10 relações diferentes entre a e W. Para cada relação a/W foram preparados e ensaiados três CPs. A composição química e as propriedades mecânicas do aço utilizado (ASTM A285GrC) estão apresentadas nas tabelas 1 e 2, respectivamente.

A opção pelo uso de CPs do tipo WOL modificados para ensaio de tração se deu devido ao fato de a sua geometria oferecer uma área maior para a propagação da trinca. Os CPs do tipo WOL apresentam relação W/B = 2,55, enquanto os CPs do tipo CT possuem W/B = 2,00.

Após a usinagem dos CPs, foram propagadas trincas de fadiga de acordo com a Norma BS 7448 (4). Após a propagação, cada CP teve colada na superfície oposta à trinca de fadiga um strain-gauge de 121 Ω , 3,0 mm de comprimento e gauge fator igual a 2,11 (figuras 3). Os CPs foram então ensaiados em máquina de tração (MTS) até a carga máxima, segundo a Norma BS 7448, tendo o acompanhamento do crescimento da trinca sido feito pela leitura simultânea através do clip-gauge e do strain-gauge.

Os dados foram coletados por microcomputador através do uso de placa conversora analógica digital de marca NATIONAL AT-MIO-16L. Foi utilizado para a aquisição dos dados um *software* específico, elaborado a partir do programa LABVIEW FOR WINDOWS.

Nas figuras 4 e 5 são apresentadas, respectivamente, as curvas de carga normalizada versus leitura de clip-gauge e BFS para as várias relações a/W. A carga foi normalizada pela equação (9).

É importante ressaltar que, embora esta fórmula tenha sido desenvolvida para o regime elástico, foi feita aqui uma extrapolação para o regime plástico. Por isso, a região plástica destas curvas não devem ser consideradas para materiais com módulo de Young diferente daquele do material ensaiado.

A partir das curvas de carga normalizada contra leitura de clip-gauge e contra BFS, foram então obtidos os polinômios, pelo método dos mínimos quadrados, que mais se ajustam a cada relação a/W. Nas tabelas 3 e 4 são apresentadas as equações de cada curva.

Os elevados valores obtidos para os coeficientes de correlação (R) mostram que as relações polinomiais obtidas se ajustam às curvas com boa precisão.

III - DISCUSSÃO

Segundo Richards e Deans, é possível a medição do crescimento de trinca em corpo-de-prova CTOD do tipo CT ou WOL pelo uso da técnica BFS. No presente trabalho, foi utilizado um CP WOL modificado para a realização do ensaio de tração.

Na tabela 5, estão apresentados os valores teóricos de flexibilidade levantados pela Norma ISO/DIS/7539-Parte 6 e os valores experimentais obtidos nos ensaios.

Os valores teóricos foram retirados do gráfico apresentado na Norma ISO/DIS/7539-Parte 6 (figura 6). Estes valores são calculados pela fórmula

$$\frac{EBV_y}{P} \quad (10)$$

onde, conforme figura 7:
$$V_y = \left(\frac{a}{a + C_1} \right) V \quad (11)$$

Os valores experimentais foram calculados pela fórmula

$$\frac{E\sqrt{BBn}(CLIP_{corr})}{P} \quad (12)$$

onde
$$\frac{CLIP_{corr}}{P} = \frac{CLIP}{P} \frac{a}{a + (C - W)} \quad (13)$$

e $\frac{CLIP}{P}$ é calculado pela tangente à curva carga versus deformação.

Os valores experimentais obtidos correspondem aos teóricos, a despeito de a geometria do CP ser correspondente à do tipo WOL e o dispositivo de furação ser correspondente ao do tipo CT (ver figura 8). Deve ser, no entanto, ressaltado que para o cálculo do CTOD a partir de um CP WOL modificado para ensaio de tração, a fórmula da Norma BS 7448 deve ser modificada para:

$$CTOD = \left(\frac{F}{a^{0,5}\sqrt{BBn}} f\left(\frac{a}{W}\right) \right)^2 \frac{(1 - \nu^2)}{2\sigma_y E} + \frac{0,46(W - a)V_p}{0,46W + 0,54a + (C - W) + z} \quad (14)$$

onde, conforme a Norma ISO/DIS 7539-6,

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = 30,96\frac{a}{W} - 195,8\left(\frac{a}{W}\right)^2 + 730,6\left(\frac{a}{W}\right)^3 - 1186,3\left(\frac{a}{W}\right)^4 + 754,6\left(\frac{a}{W}\right)^5 \quad (15)$$

Para o cálculo do CTOD através da equação (14), é necessário o valor, em mm, do deslocamento V_p correspondente à carga máxima (figura 9). No entanto, quando é utilizado o strain-gauge, este valor é obtido em microdeformação. Neste caso, V_p é determinado pelo cálculo do valor de CLIP correspondente à carga máxima através da relação polinomial apresentada na tabela 3 para a relação a/W do CP ($V_p = \text{CLIP}$).

IV - CONCLUSÃO

Foram levantadas as curvas de flexibilidade para corpos de prova do tipo WOL modificados para ensaio de tração com relação a/W variando de 0,38 a 0,75. Foram aqisitados simultaneamente os valores da abertura da ponta da trinca, através de um clip-gauge, e os valores da deformação na face oposta à propagação da trinca, através de um strain-gauge. Foi então verificado ser possível a obtenção de relações polinomiais, através do método dos mínimos quadrados, que se ajustam a estas curvas com um elevado coeficiente de correlação

Tabela 1 - Composição química do aço.

AÇO ASTM A285GrC									
	C	S	P	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Al
% peso	0,15	0,014	0,019	0,18	0,48	0,03	0,02	0,01	0,01

Tabela 2 - Propriedades mecânicas do aço.

LIMITE DE ESCOAMENTO (MPa)	LIMITE DE RUPTURA (MPa)	ALONGAMENTO (%)	ESTRICÇÃO (%)
251	435	39,3	65,7

Tabela 3 - Relações polinomiais entre carga normalizada e leitura de clip-gauge.

X = CLIP Y = CARGA NORMALIZADA R = COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO

a/W	POLINÔMIO	R ²
0,38	$Y = 1,98964 \times 10^{-5} + 4,25079 \times 10^{-4} X - 3,64470 \times 10^{-4} X^2 + 1,12860 \times 10^{-4} X^3$	0,9998
0,43	$Y = 1,44666 \times 10^{-5} + 4,75793 \times 10^{-4} X - 4,32619 \times 10^{-4} X^2 + 1,49909 \times 10^{-4} X^3$	0,9999
0,47	$Y = -4,91562 \times 10^{-7} + 3,59866 \times 10^{-4} X - 2,78152 \times 10^{-4} X^2 + 7,37434 \times 10^{-5} X^3$	0,9988
0,49	$Y = -8,73428 \times 10^{-6} + 3,51254 \times 10^{-4} X - 2,66769 \times 10^{-4} X^2 + 6,77128 \times 10^{-5} X^3$	0,9999
0,51	$Y = -5,23872 \times 10^{-6} + 3,20481 \times 10^{-4} X - 2,36689 \times 10^{-4} X^2 + 5,52895 \times 10^{-5} X^3$	0,9996
0,55	$Y = -1,80905 \times 10^{-5} + 3,26441 \times 10^{-4} X - 2,58555 \times 10^{-4} X^2 + 6,64260 \times 10^{-5} X^3$	0,9998
0,59	$Y = -2,36895 \times 10^{-5} + 3,14803 \times 10^{-4} X - 2,74881 \times 10^{-4} X^2 + 8,12975 \times 10^{-5} X^3$	0,9999
0,61	$Y = -2,35855 \times 10^{-5} + 3,17940 \times 10^{-4} X - 3,06044 \times 10^{-4} X^2 + 9,92079 \times 10^{-5} X^3$	0,9997
0,65	$Y = -2,36770 \times 10^{-5} + 2,86095 \times 10^{-4} X - 2,98487 \times 10^{-4} X^2 + 1,05291 \times 10^{-4} X^3$	0,9998
0,75	$Y = -1,16303 \times 10^{-4} + 7,75881 \times 10^{-4} X - 1,51018 \times 10^{-3} X^2 + 1,29001 \times 10^{-3} X^3 - 4,06863 \times 10^{-4} X^4$	0,9997

Tabela 4 - Relações polinomiais entre carga normalizada e leitura de BFS.

X = BFS Y = CARGA NORMALIZADA R = COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO

a/W	POLINÔMIO	R ²
0,38	$Y = 2,36184 \times 10^{-5} + 1,55812 \times 10^{-7} X - 4,76015 \times 10^{-12} X^2 + 6,34675 \times 10^{-15} X^3 - 3,10108 \times 10^{-19} X^4$	0,9997
0,43	$Y = -5,95071 \times 10^{-6} + 1,78277 \times 10^{-7} X - 6,15578 \times 10^{-11} X^2 + 9,24761 \times 10^{-15} X^3 - 5,09190 \times 10^{-19} X^4$	0,9993
0,47	$Y = -2,38436 \times 10^{-5} + 1,63639 \times 10^{-7} X - 5,44729 \times 10^{-11} X^2 + 7,90701 \times 10^{-15} X^3 - 4,22302 \times 10^{-19} X^4$	0,9992
0,49	$Y = -1,26457 \times 10^{-5} + 1,32695 \times 10^{-7} X - 4,28685 \times 10^{-11} X^2 + 6,15563 \times 10^{-15} X^3 - 3,24684 \times 10^{-19} X^4$	0,9984
0,51	$Y = -1,02905 \times 10^{-5} + 1,13294 \times 10^{-7} X - 3,60396 \times 10^{-11} X^2 + 5,31249 \times 10^{-15} X^3 - 2,93930 \times 10^{-19} X^4$	0,9995
0,55	$Y = -3,90329 \times 10^{-5} + 1,48498 \times 10^{-7} X - 5,68078 \times 10^{-11} X^2 + 9,53516 \times 10^{-15} X^3 - 5,82074 \times 10^{-19} X^4$	0,9971
0,59	$Y = -2,22309 \times 10^{-5} + 1,02140 \times 10^{-7} X - 3,61324 \times 10^{-11} X^2 + 5,66395 \times 10^{-15} X^3 - 3,21643 \times 10^{-19} X^4$	0,9976
0,61	$Y = -7,36523 \times 10^{-6} + 6,89174 \times 10^{-8} X - 1,95354 \times 10^{-11} X^2 + 2,40798 \times 10^{-15} X^3 - 1,04653 \times 10^{-19} X^4$	0,9977
0,65	$Y = -1,98076 \times 10^{-5} + 7,51642 \times 10^{-8} X - 2,55152 \times 10^{-11} X^2 + 3,94913 \times 10^{-15} X^3 - 2,29230 \times 10^{-19} X^4$	0,9996
0,75	$Y = -7,17479 \times 10^{-6} + 2,73451 \times 10^{-8} X - 6,21962 \times 10^{-12} X^2 + 4,57363 \times 10^{-16} X^3$	0,9968

Tabela 5 - Comparação dos valores de flexibilidade teóricos para um CP WOL com os valores experimentais obtidos.

a/W	valor teórico	valor experimental
0,38	26	26
0,43	32	32
0,47	40	40
0,49	45	44
0,51	48	48
0,55	57	59
0,59	75	73
0,61	78	73
0,65	98	102
0,75	200	210

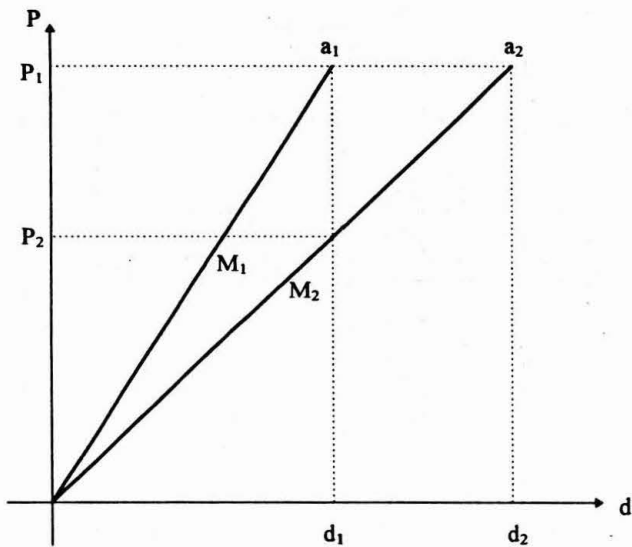


Figura 1 - Curva carga versus deslocamento.

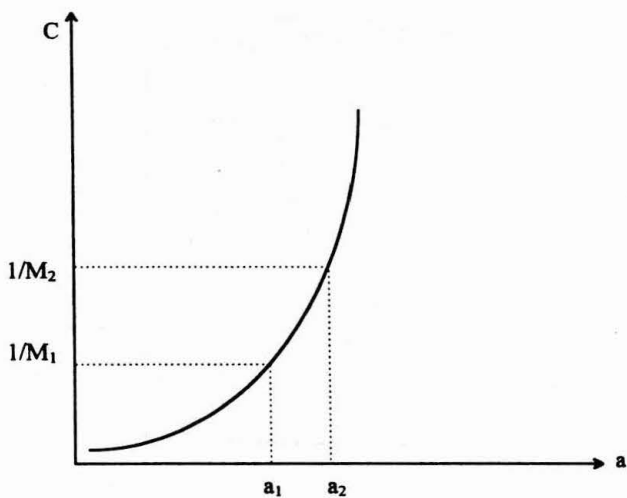
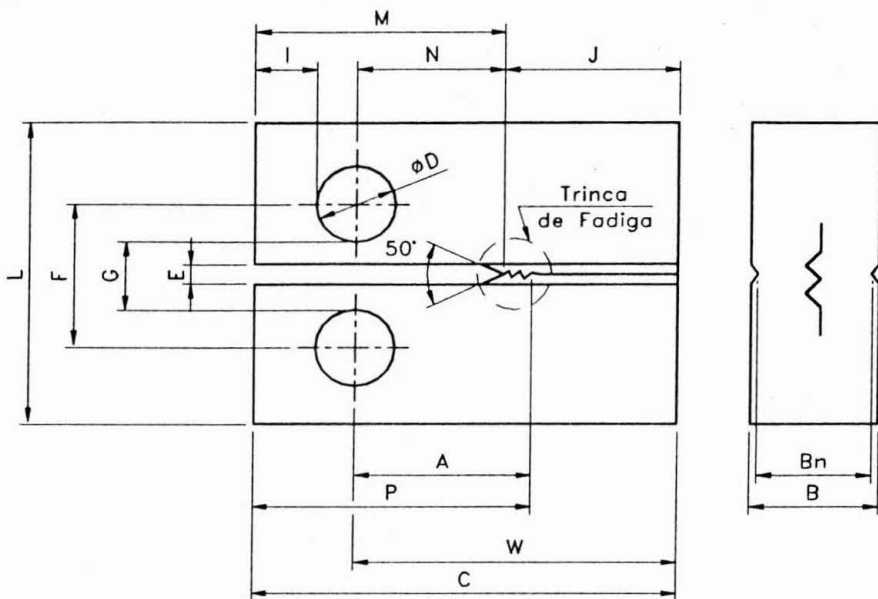


Figura 2 - Curva flexibilidade contra tamanho de trinca.



DIMENSÃO	(mm)
B	18,0
Bn	16,0
C	60,2
D	11,0
E	2,9
F	21,0
G	10,0
I	9,0
J	24,9
L	60,2
M	35,3
N	21,0
W	46,0

Figura 3 - Dimensões do CP WOL modificado para ensaio de tração.
(Tolerância para todas as medidas: $\pm 0,2$ mm.)

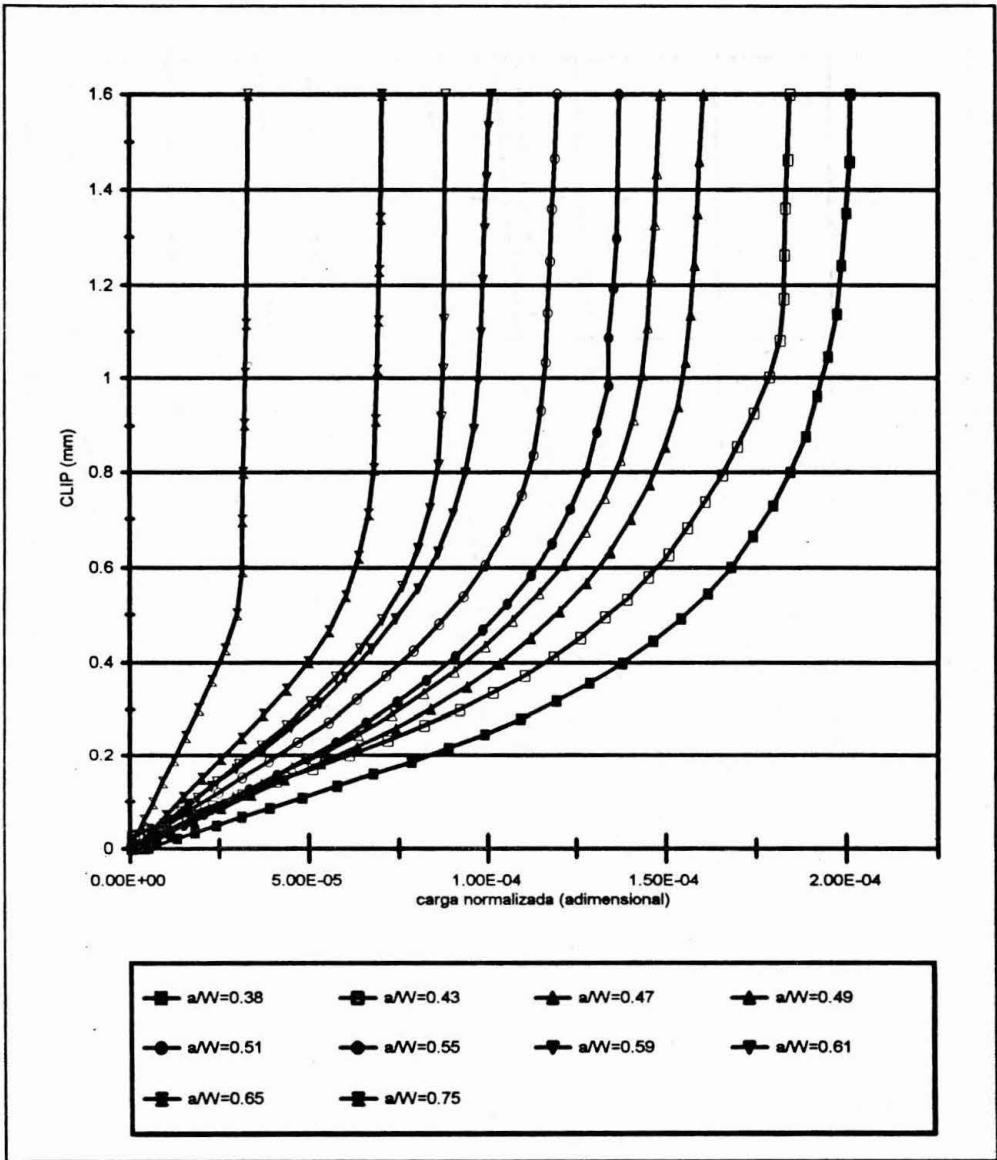


Figura 4 - Curva carga normalizada versus leitura do clip-gauge.

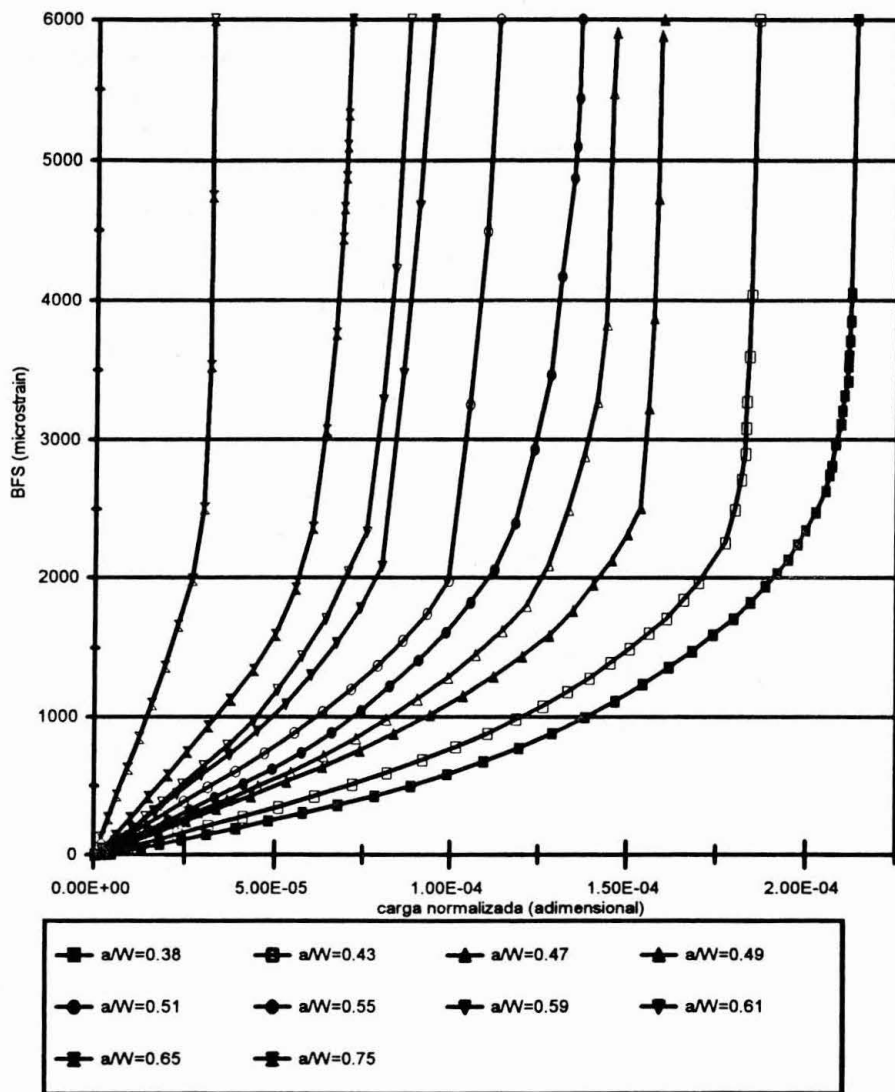


Figura 5 - Curva carga normalizada versus BFS.

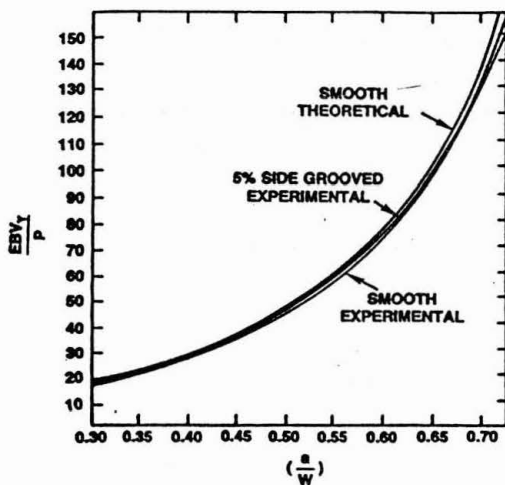


Figura 6 - Curva de flexibilidade para CP do tipo WOL.
(Extraído da Norma ISO/DIS/7539-Parte 6.)

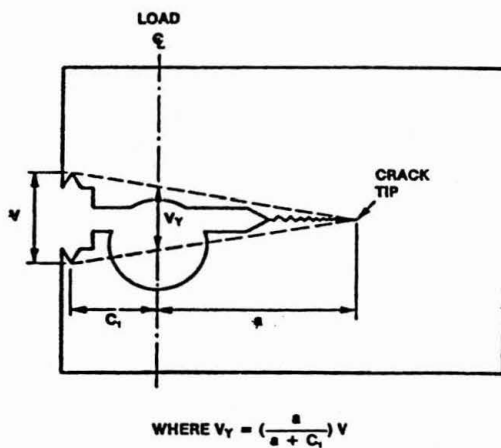


Figura 7 - Relação entre V e V_y para corpo-de-prova WOL.
(Extraído da Norma ISO/DIS/7539-Parte 6.)

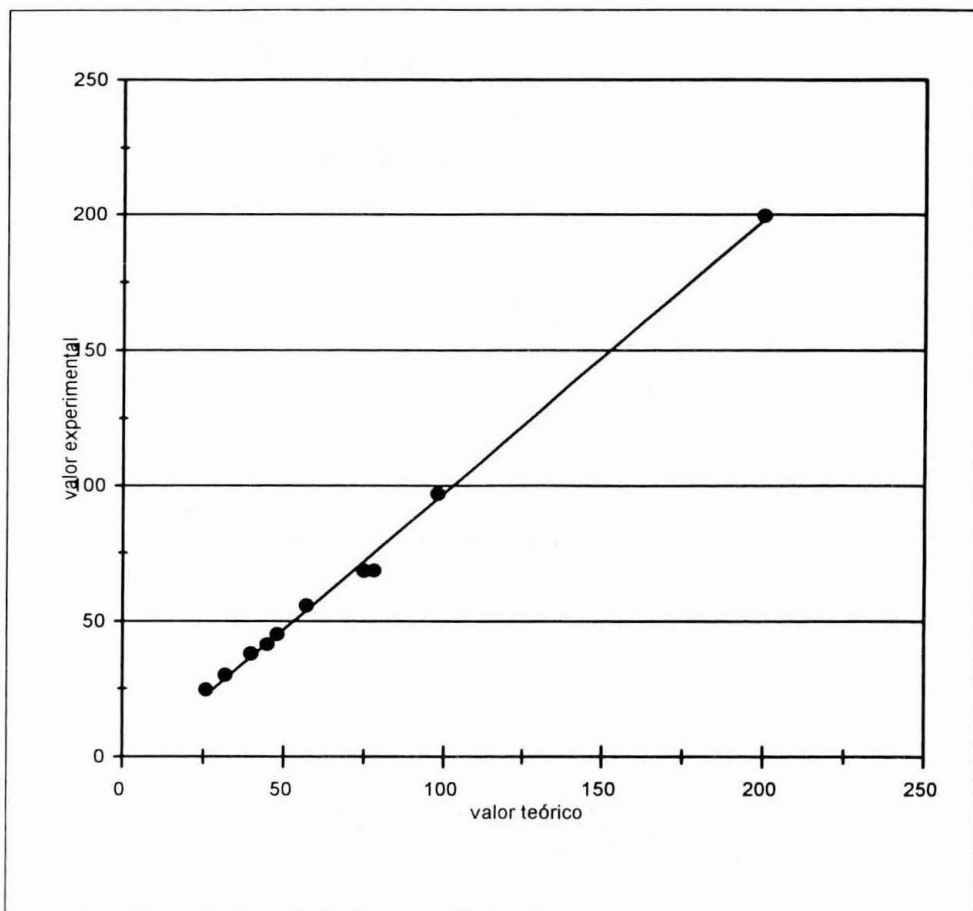


Figura 8 - Relação entre valores de flexibilidade teórico e experimental.
(coeficiente de correlação=0,9984)

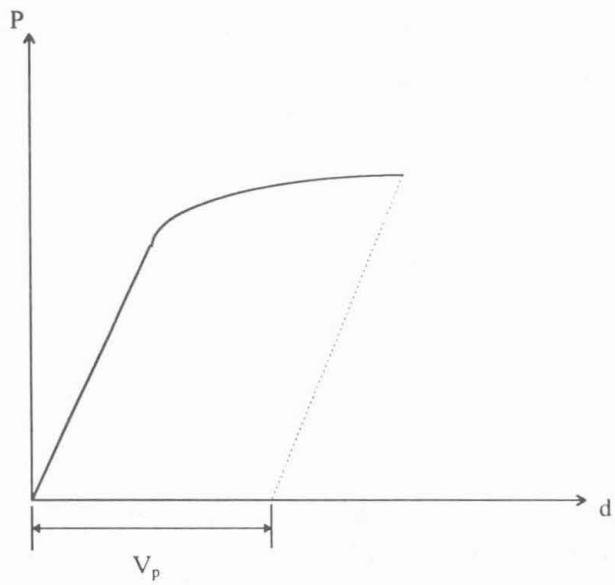


Figura 9 - Definição de V_p .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Duggan, T. V. e Proctor, M. W. - *Measurement of Crack Length from Changes in Specimens Flexibilidade - The Measurement of Crack Length and Shape during Fracture and Fatigue* - Engineering Materials Advisory Services Ltd, London, 1980.
- (2) Richards, L. E. e Deans, W. F. - *The Measurements of Crack Length and Load Using Strain-Gauges - The Measurement of Crack Length and Shape during Fracture and Fatigue* - Engineering Materials Advisory Services Ltd, Londres, 1980.
- (3) ISO/DIS/7539-Part 6 - *Corrosion of Metals and Alloys - Stress Corrosion Testing - Part 6, Pre-cracked Specimens*.
- (4) BS 7448 - *Fracture Mechanics Toughness* - Ed 1991.

EVALUATION OF THE FLEXIBILIDADE OF CTOD SPECIMENS THROUGH THE BACK FACE STRAIN-GAUGES AND CLIP-GAUGES TECHNIQUES

Abstract

The flexibilidade curves for CTOD specimens have been determined through the simultaneous reading of the crack growth with the use of clip-gauges and back face strain-gauges.

Key-Words
flexibilidade
back face strain
CTOD