

# 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 BEZERRA<sup>1</sup>  
CARLOS JOSÉ BANDEIRA DE MELLO JOIA<sup>2</sup>  
FERNANDO LUIZ BASTIAN<sup>3</sup>

## *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 H<sub>2</sub>S 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<sup>(1)</sup> 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<sup>(1)</sup>:

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

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<sup>(2)</sup> 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<sup>(3)</sup> 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  $\Omega$ , 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 ( $V_p=CLIP$ ).

#### 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 <sup>2</sup>
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 polinômiais entre carga normalizada e leitura de BFS.**

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

a/W	POLINÔMIO	R <sup>2</sup>
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.

<b>a/W</b>	<b>valor teórico</b>	<b>valor experimental</b>
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

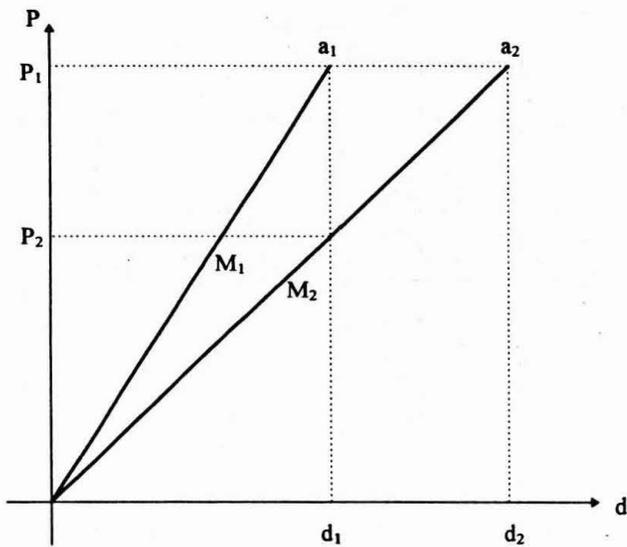


Figura 1 - Curva carga versus deslocamento.

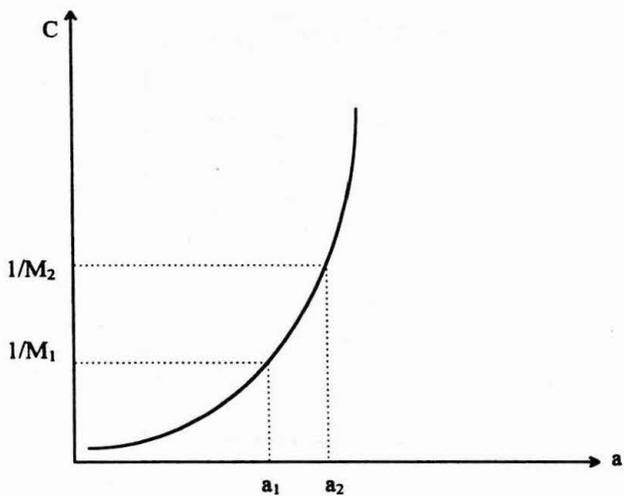
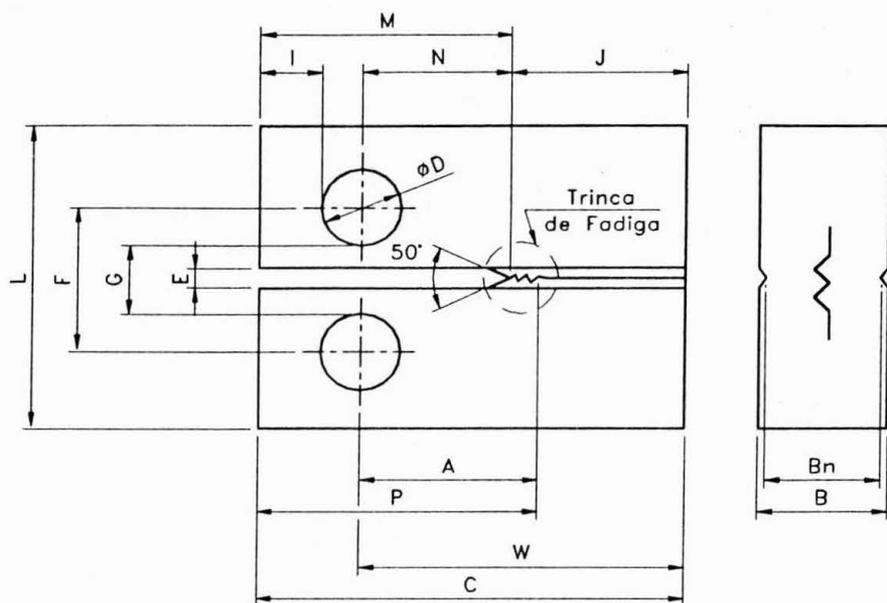


Figura 2 - Curva flexibilidade contra tamanho de trinca.



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.)

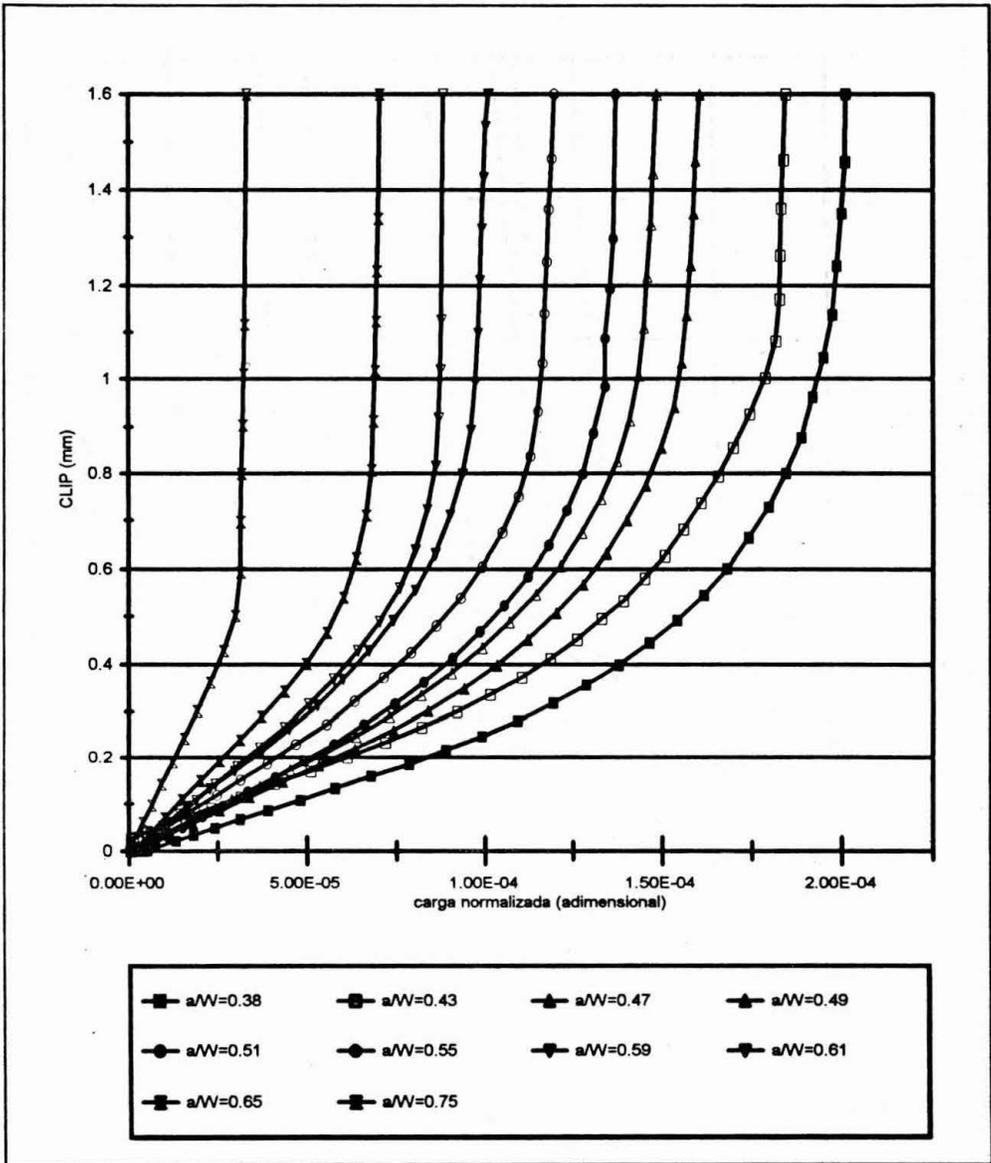


Figura 4 - Curva carga normalizada versus leitura do clip-gauge.

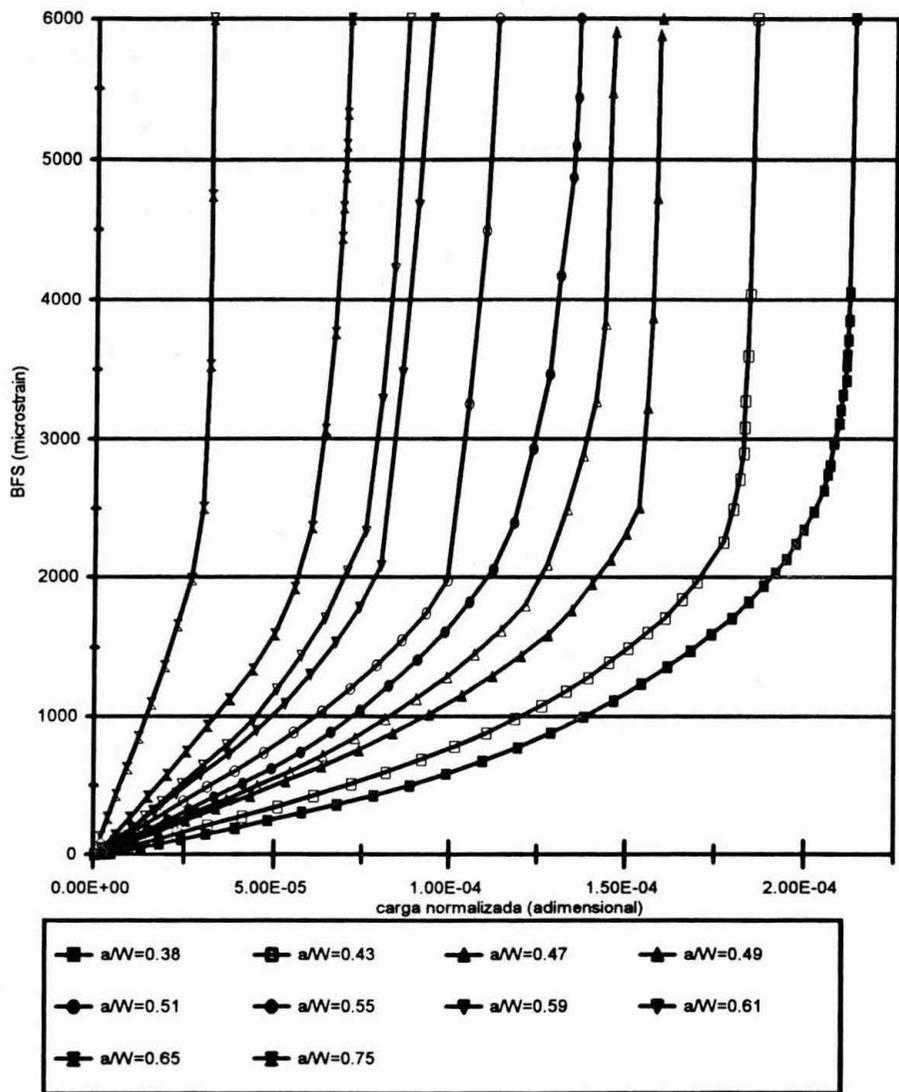


Figura 5 - Curva carga normalizada versus BFS.

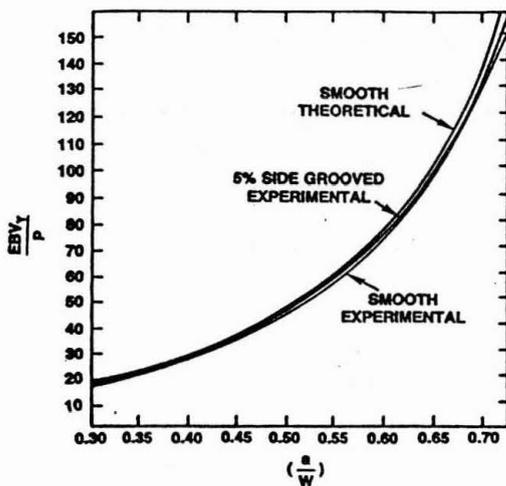


Figura 6 - Curva de flexibilidade para CP do tipo WOL.  
(Extraído da Norma ISO/DIS/7539-Parte 6.)

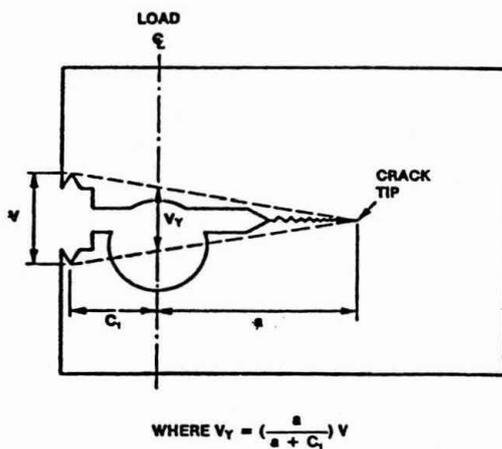
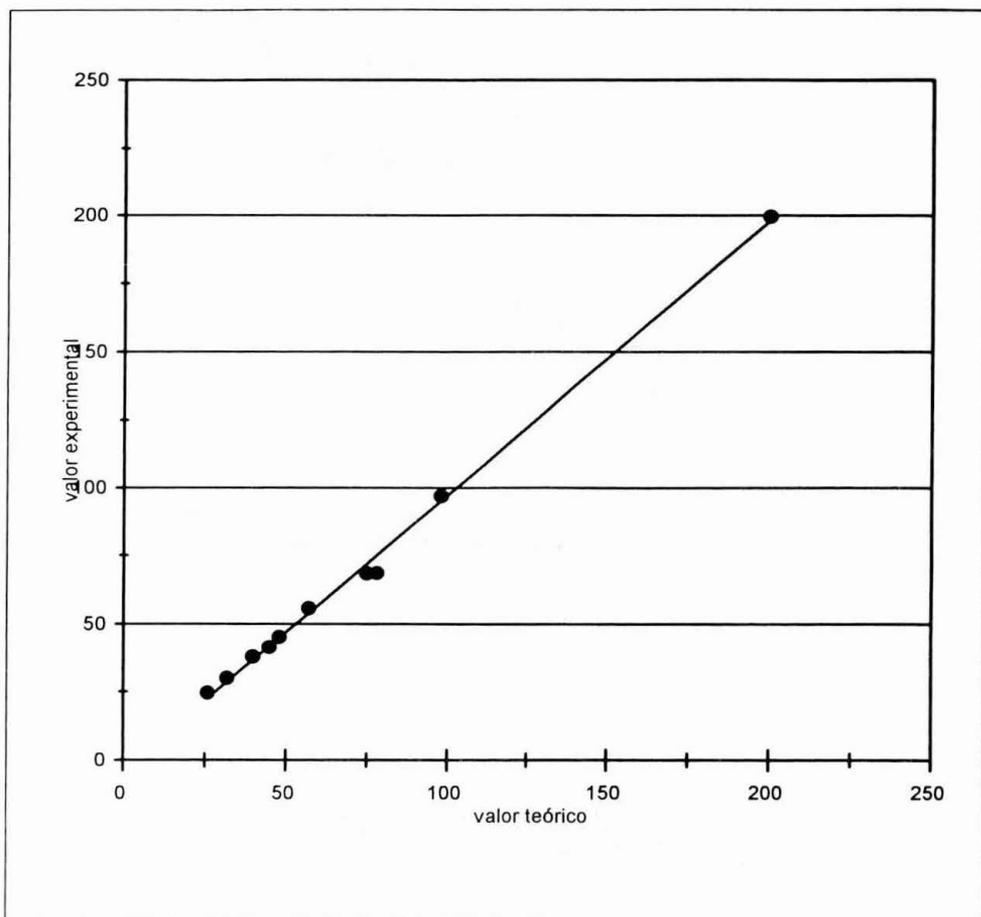
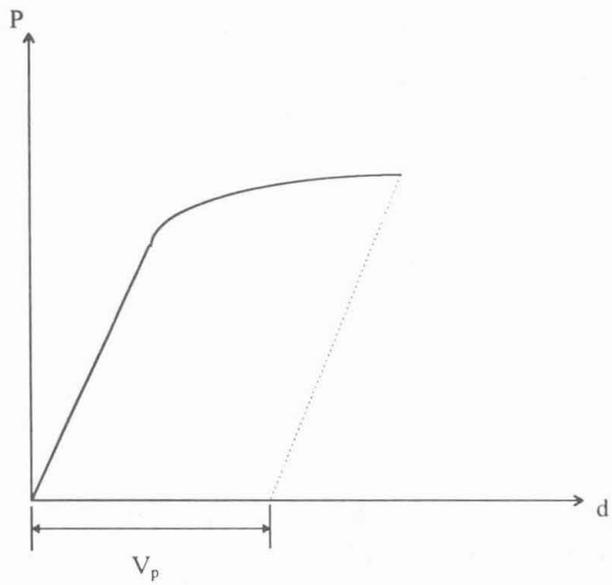


Figura 7 - Relação entre  $v$  e  $v_y$  para corpo-de-prova WOL.  
(Extraído da Norma ISO/DIS/7539-Parte 6.)



**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