

## CRESCIMENTO DE TRINCAS POR FADIGA EM AÇO DA CLASSE API 5L-X70

A.A. Buschiazzo, E.M. Castrodeza, F.L. Bastian

Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE/UFRJ  
CP 68505, CEP 21941-972, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

fbastian@metalmat.ufrj.br

Laboratório de Mecânica da Fratura

### RESUMO

*São apresentados resultados de um estudo da taxa de crescimento de trincas por fadiga em aço da classe API 5L-X70, utilizado em dutos e risers rígidos na indústria petrolífera. Foram avaliadas curvas da/dN versus  $\Delta K$  sob diferentes condições de carga ( $R = 0,1$  e  $0,5$ ), assim como o efeito de sobrecargas nas mesmas. A faixa de sobrecargas aplicada  $OLR = 1,75$  e  $2,0$ . Os testes de fadiga foram realizados em corpos de prova compactos  $C(T)$  de acordo com a norma ASTM E467. Para a medição do comprimento de trinca foi utilizada a técnica de queda de potencial elétrico. As taxas experimentais de crescimento de trinca foram corroboradas por contagem de estriações.*

Palavras-chave: Fadiga, Aço API 5L-X70, Dutos, Risers, Sobrecargas.

### INTRODUÇÃO

As características necessárias aos dutos utilizados para transporte de óleos, gases e risers rígidos, exigem o emprego de aços de alta resistência mecânica, elevada tenacidade à fratura, boa soldabilidade e resistência aos efeitos prejudiciais do meio ambiente e do fluido transportado. A tendência é utilizar aços que atinjam os requisitos para dutos API 5L graus X70 e X80, com carbono equivalente máximo de  $0,43\%$ <sup>(1)</sup>. Em risers, além da contribuição das ondas, as correntes marinhas podem gerar vibrações induzidas por vórtices (VIVs). Assim, existem sempre tensões cíclicas e dano por fadiga, pelo que é útil conhecer a taxa de crescimento de

trincas por fadiga no material, assim como o efeito de sobrecargas. No presente trabalho foram avaliadas curvas  $da/dN$  versus  $\Delta K$  de um aço API 5L X70 sob diferentes condições de carregamento ( $R = 0,1$  e  $0,5$ ), assim como o efeito de sobrecargas na faixa de OLR = 1,75 e 2. Os testes de fadiga foram realizados em corpos de prova compactos C(T), de acordo com a norma ASTM E467. As taxas experimentais de crescimento de trinca foram corroboradas por análise fractográfica. Finalmente, foi feito um estudo da influência das variáveis OLR,  $\Delta K_{\text{prévio}}$  e  $R$  nas curvas, com resultados coerentes com dados publicados para aços da mesma família.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Material

O material do trabalho é um aço API 5L-X70 para dutos. A composição química do material é apresentada na Tabela 1<sup>(2)</sup>. As propriedades mecânicas do material, avaliadas experimentalmente, são apresentadas na Tabela 2<sup>(2)</sup>.

Tabela 1: Composição química do material (% em peso).

C	Mn	Cr	Cu	Ni	Si	Nb	Mo	Al	P	Ti	V	W	S	C <sub>eq</sub>
0,03	1,52	0,29	0,23	0,15	0,14	0,092	0,04	0,03	0,013	0,01	<0,01	<0,01	0,003	0,36*

(\*) dado da USIMINAS<sup>(1)</sup>. C<sub>eq</sub> = carbono equivalente.

Tabela 2: Propriedades mecânicas do material (média ± desvio padrão)

Orientação	Quantidade de CPs	$\sigma_{LE} 0,2\%$ [MPa]	$\sigma_{LE} 0,5\%$ total [MPa]	$\sigma_R$ [MPa]	Alongamento à ruptura [%]
Longitudinal	3	653 ± 6	651 ± 2	679 ± 2	20,3 ± 1,5
Transversal		602 ± 9	600 ± 4	653 ± 5	21,0 ± 1,7

### Metodologia experimental

Os testes de propagação de trincas por fadiga foram realizados em uma máquina servo hidráulica INSTRON 1332, segundo a norma ASTM E647-99<sup>(3)</sup>. Os corpos de prova foram do tipo compacto de tração, C(T), na orientação da Figura 1. As dimensões nominais dos corpos de prova são apresentadas na Figura 2.

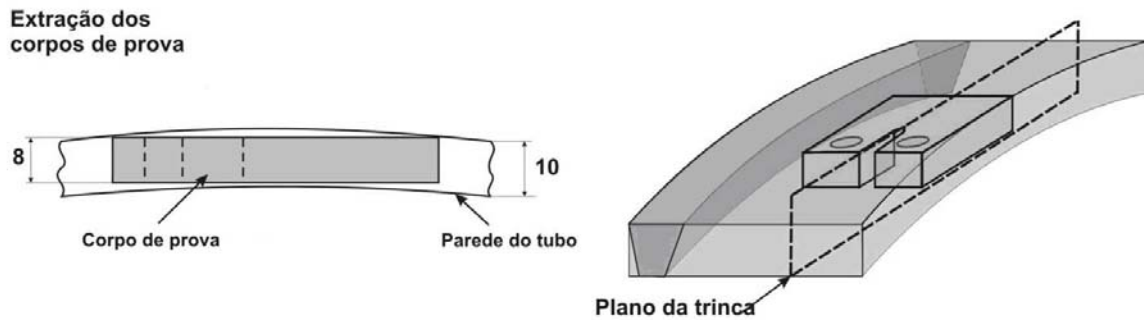


Figura 1: Orientação dos corpos de prova.

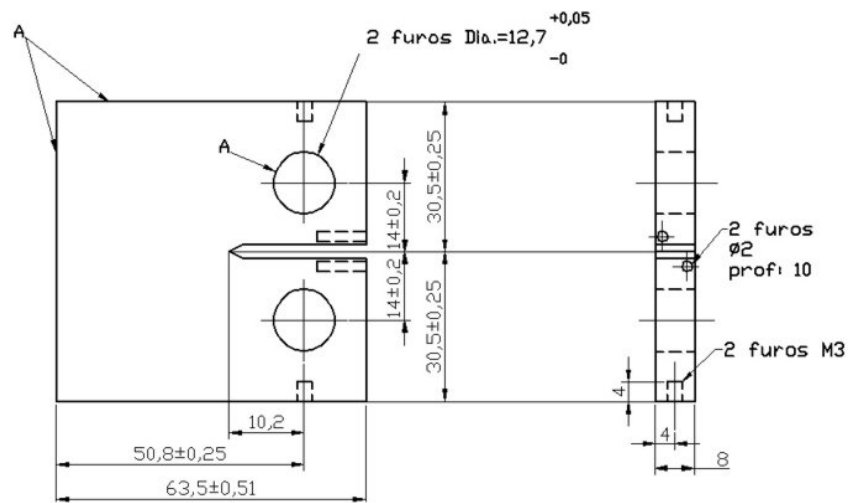


Figura 2: Dimensões nominais dos corpos de prova (em mm).

Para determinar o comprimento da trinca foi utilizada a técnica de queda de potencial elétrico de corrente contínua. A corrente nominal utilizada foi de 15 A. A expressão de calibração para correlacionar a queda de potencial (mV) com comprimento de trinca (mm) foi a seguinte:

$$a[q] = W \left[ -0,99742 + 1,74663 \frac{q}{V_r} - 0,60611 \left( \frac{q}{V_r} \right)^2 + 0,096393 \left( \frac{q}{V_r} \right)^3 \right] \quad (A)$$

onde:  $q$  é a queda de potencial registrada e  $V_r$  é a voltagem de referência. A expressão (A) é similar à expressão da norma ASTM E647-99<sup>(3)</sup>, com coeficientes adaptados para melhorar a calibração, o que é permitido pela norma.

As sobrecargas aplicadas foram definidas como a relação entre o pico de sobrecarga (*overload*),  $K_{\text{máx,OL}}$ , e a carga máxima aplicada (*background*),  $K_{\text{máx,BG}}$ , (*OLR*), segundo o esquema da Figura 3. Foram aplicadas sobrecargas com  $OLR =$

1,75 (75%) e 2,00 (100%). Após a aplicação de cada sobrecarga foram mantidos os parâmetros de ciclagem anteriores à mesma. A posição das sobrecargas foi escolhida de forma tal que as mesmas não fossem influenciadas pelo efeito das anteriores (se possível).

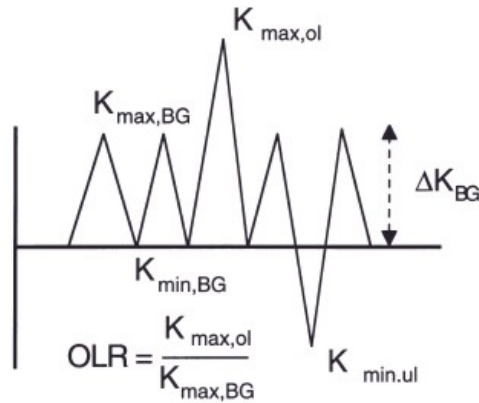


Figura 3: Termos para a definição de relação de sobrecarga *OLR*.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Curvas $da/dN$ vs. $\Delta K$ sem sobrecargas

As curvas  $da/dN$  vs.  $\Delta K$  do material são apresentadas nas Figuras 4 e 5. Nas figuras é também apresentado o ajuste da equação de Paris para cada  $R$ , assim como o intervalo de confiança do ajuste (95%). Nas curvas  $da/dN$  vs.  $\Delta K$  é possível distinguir quebras, isto é, cada curva poderia ser representada por duas retas de inclinação diferente no plano logarítmico. Este tipo de curvas é denominado bilinear. De acordo com a literatura<sup>(4,5)</sup>, nestes casos é recomendado dividir as curvas em dois intervalos diferentes para o ajuste. A Figura 6 mostra duas curvas  $da/dN$  vs.  $\Delta K$  bilineares, ajustadas aos valores experimentais. A localização dos pontos de mudança na inclinação nas curvas  $da/dN$  vs.  $\Delta K$  está de acordo com resultados da bibliografia<sup>(4,6)</sup>.

Observando a posição relativa de cada curva é possível ver que as curvas para  $R = 0,5$  se acham deslocadas para cima, se comparadas com as curvas para  $R = 0,1$ . Este comportamento está de acordo com os resultados da bibliografia<sup>(7-8)</sup>. Na Tabela 3 é apresentado um resumo dos valores experimentais das constantes da equação de Paris para  $R = 0,1$  e  $0,5$ .

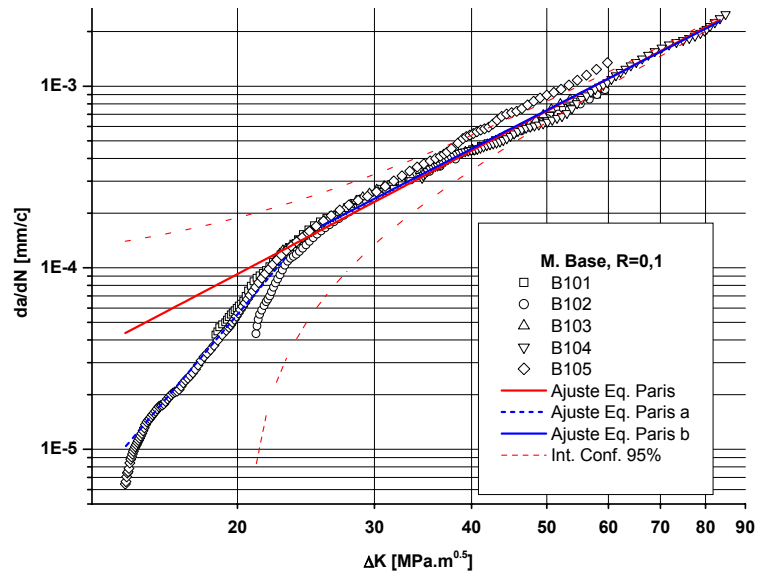


Figura 4: Curva  $da/dN$  vs.  $\Delta K$  do material.  $R = 0,1$ ; ajustes da Lei de Paris.

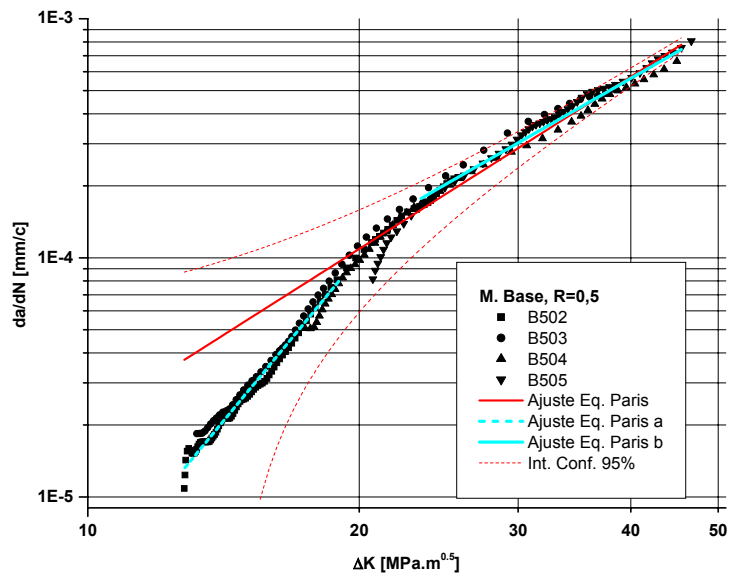


Figura 5: Curva  $da/dN$  vs.  $\Delta K$  do material.  $R = 0,5$ ; ajustes da Lei de Paris.

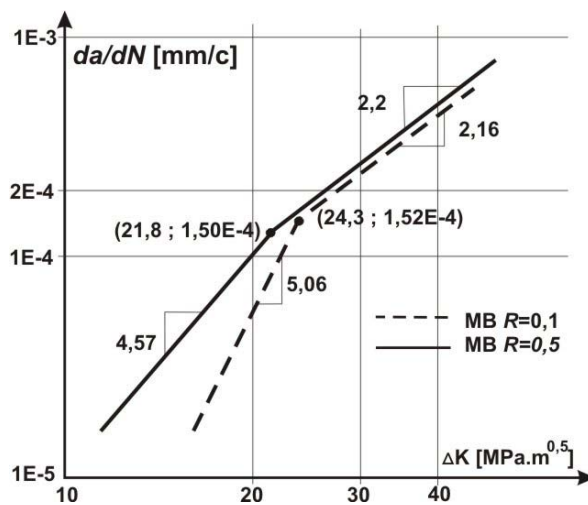


Figura 6: Curvas  $da/dN$  bilineares ajustadas a partir de resultados experimentais.

Tabela 3: Constantes da equação de Paris e parâmetros do ajuste por regressão.

$R$	Intervalo $\Delta K$ [MPa.m <sup>0,5</sup> ]	$C$ [mm/(ciclo.MPa.m <sup>0,5</sup> )]	Erro (C) [mm/(ciclo.MPa.m <sup>0,5</sup> )]	$m$	Erro ( $m$ )	$\chi^2$
0,1	14,3< $\Delta K$ <83,5	1,07×10 <sup>-7</sup>	±5,93×10 <sup>-9</sup>	2,26	±0,013	2,41×10 <sup>-15</sup>
	14,3< $\Delta K$ <23,0	1,46×10 <sup>-11</sup>	±8,40×10 <sup>-12</sup>	5,06	±0,188	8,97×10 <sup>-17</sup>
	25,6< $\Delta K$ <83,5	1,36×10 <sup>-7</sup>	±1,02×10 <sup>-8</sup>	2,20	±0,018	3,44×10 <sup>-15</sup>
0,5	12,8< $\Delta K$ <45,5	8,41×10 <sup>-8</sup>	±7,05×10 <sup>-9</sup>	2,39	±0,024	6,37×10 <sup>-16</sup>
	12,8< $\Delta K$ <19,0	1,15×10 <sup>-10</sup>	±2,24×10 <sup>-11</sup>	4,57	±0,069	7,74×10 <sup>-18</sup>
	23,4< $\Delta K$ <45,5	1,96×10 <sup>-7</sup>	±1,92×10 <sup>-8</sup>	2,16	±0,028	5,11×10 <sup>-16</sup>

Na Figura 7 é apresentada uma comparação entre os resultados obtidos para  $R = 0,1$  no presente trabalho (PT) e os obtidos por diferentes autores para aços da mesma família (de Marco Filho<sup>(9)</sup>, Fernandez<sup>(10)</sup>, Shi<sup>(11)</sup>, e Neves Beltrão<sup>(8)</sup>). A comparação de resultados deve ser vista com cautela, já que os da bibliografia foram obtidos a partir de aços de diferentes fornecedores e não são conhecidas as variáveis que podem influenciar na vida à fadiga (tratamento termomecânico, composição química, microestrutura, etc.).

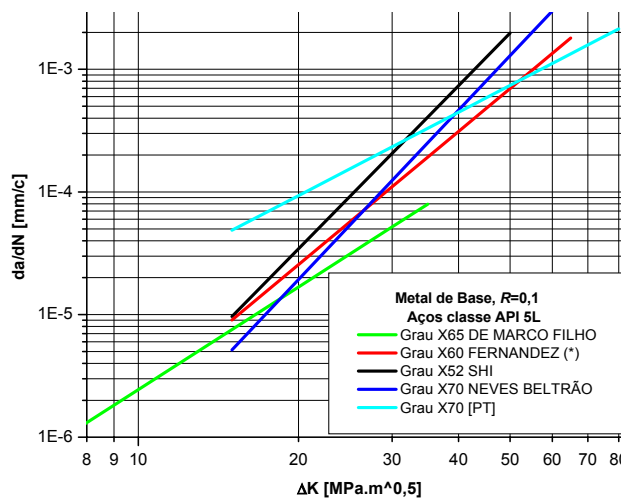


Figura 7: Comparação dos resultados de diferentes autores ( $R = 0,1$ ), aços classe API 5L. (\*) Faixa dos valores de  $\Delta K$  desconhecida.

### Influência das sobrecargas

Para uma melhor visualização, os resultados obtidos da aplicação de uma sobrecarga de tração na vida à fadiga para cada valor de  $R$  são apresentados na forma de curvas  $a$  versus  $N$ . Para destacar o efeito das sobrecargas, foram

superpostas as curvas  $a$  versus  $N$  sem sobrecargas, assim como o valor de  $OLR$  aplicado em cada sobrecarga.

A partir das Figuras 8 e 9 pode-se visualizar o efeito marcante das sobrecargas na vida à fadiga. Como pode ser visto, em todos os casos, sobrecargas maiores retardaram mais o crescimento da trinca. No caso do CP B51 a trinca diminuiu sua velocidade de crescimento até ficar praticamente estática após uma grande quantidade de ciclos (vide Figura 9).

Para quantificar o efeito das sobrecargas nas curvas  $da/dN$  versus  $\Delta K$ , foi considerado que existe uma região onde o crescimento é influenciado pela sobrecarga. O tamanho dessa região pode ser associado ao percurso da trinca até atingir a taxa de crescimento normal, isto é, sem efeito da sobrecarga. Esse percurso foi designado como  $\Delta a^1_s$  e pode ser calculado a partir do  $\Delta K_1$  (vide Figura 10) quando é conhecido o  $\Delta P$  após as sobrecargas. Nas curvas  $da/dN$  vs.  $\Delta K$  foram marcados os pontos onde foi considerado que o efeito da sobrecarga desapareceu, por ter sido atingida a taxa de crescimento de trinca correspondente aos ensaios sem sobrecarga ou, nos casos onde não foi possível estabelecer este critério, onde a curva reingressa ao intervalo de confiança, vide Figuras 11 e 12.

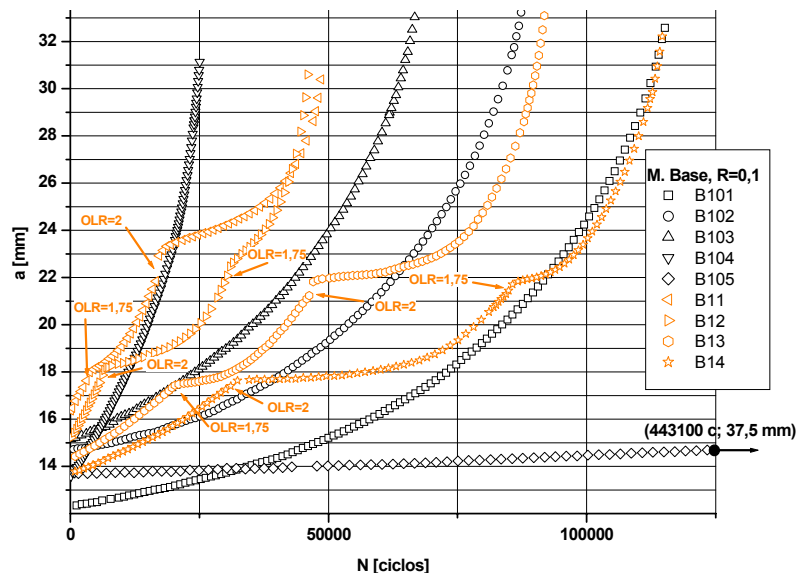


Figura 8: Curvas  $a$  vs.  $N$  e efeito de sobrecargas para  $R = 0,1$ .

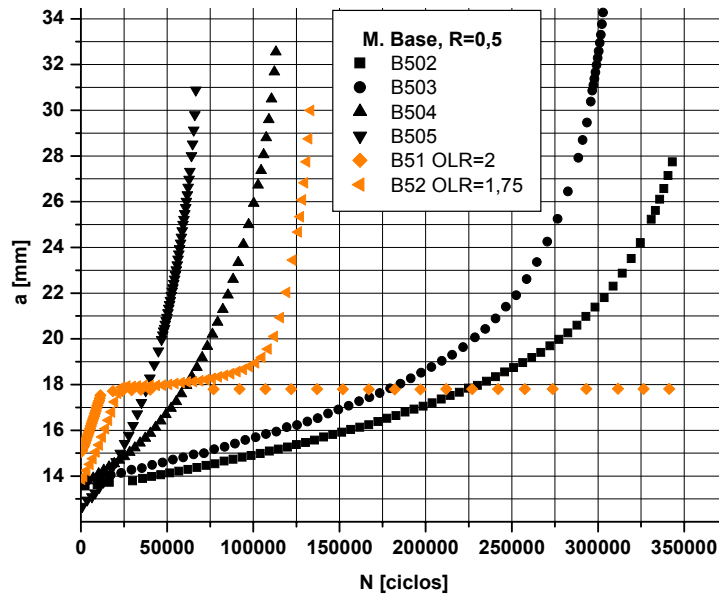


Figura 9: Curvas  $a$  vs.  $N$  e efeito de sobrecargas para  $R = 0,5$ .

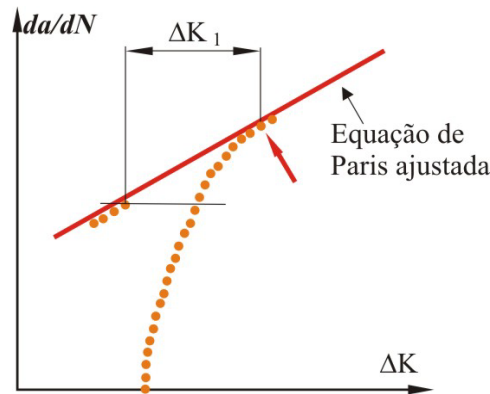


Figura 10: Definição de  $\Delta K_1$ , considerado para avaliar o efeito das sobrecargas.

Um outro parâmetro utilizado para quantificar o efeito das sobrecargas foi a mudança da taxa de crescimento de trinca pela sobrecarga,  $M_{da/dN}$ , definida como:

$$M_{da/dN} = \frac{(da/dN)_{\text{após a sobrecarga}}}{(da/dN)_{\text{antes da sobrecarga}}} \quad (\text{B})$$

O parâmetro  $M_{da/dN}$  terá um valor entre 0 e 1 se o resultado da sobrecarga for uma queda da velocidade e um valor maior que 1 se for um aumento na velocidade. Na Tabela 4 podem ser observados os valores de  $M_{da/dN}$  e  $\Delta a^1_s$  experimentais.

Para ilustrar claramente o efeito das sobrecargas nas curvas  $da/dN$  vs.  $\Delta K$ , nas Figuras 11 e 12 foram superpostos às curvas obtidas no estudo das sobrecargas os

ajustes da equação de Paris e os intervalos de confiança dos resultados sem sobrecargas (vide Tabela 3).

Tabela 4: Resultados das sobrecargas de tração.

CP	R	OLR	$\Delta K_{\text{prévio}}$ [MPa.m <sup>0,5</sup> ]	a [mm]	$M_{da/dN}$	$\Delta a_s^1$ [mm]
B11	0,1	1,75	40,0	17,8	0,33	>4,3
		2	50,7	22,0	0,13	-
B12	0,1	2	40,9	17,3	0,10	>4,1
		1,75	50,6	21,4	0,14	-
B13	0,1	1,75	27,5	17,5	0,12	1,9
		2	33,3	21,2	0,04	4,4
B14	0,1	2	27,3	17,4	0,01	3,0
		1,75	33,7	21,3	0,19	2,7
B51	0,5	2	27,8	17,7	$2,0 \times 10^{-5}$	-
B52	0,5	1,75	27,4	17,4	0,01	4,9

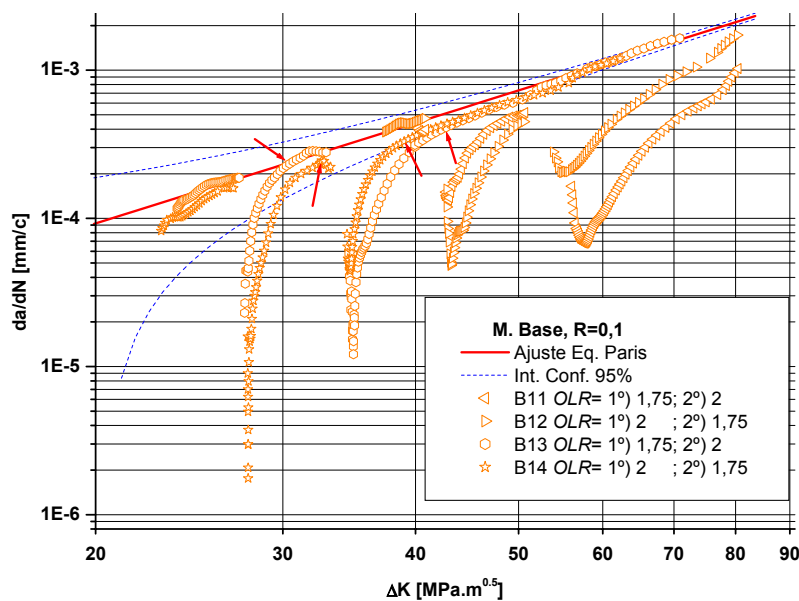


Figura 11: Efeito das sobrecargas nas curvas  $da/dN$  vs.  $\Delta K$  para  $R = 0,1$ .

Nos corpos de prova B11, B12, a trinca não recuperou a velocidade de crescimento sem influência da sobrecarga antes do teste se completar. É muito provável que, nesses casos, a sobrecarga tenha influenciado o ligamento remanescente como um todo. Por outro lado, uma análise estatística das variáveis  $R$ ,  $OLR$  e  $\Delta K_{\text{prévio}}$  demonstra que a única variável não significativa no processo de retardo após a aplicação de sobrecargas é  $R^{(2)}$ .

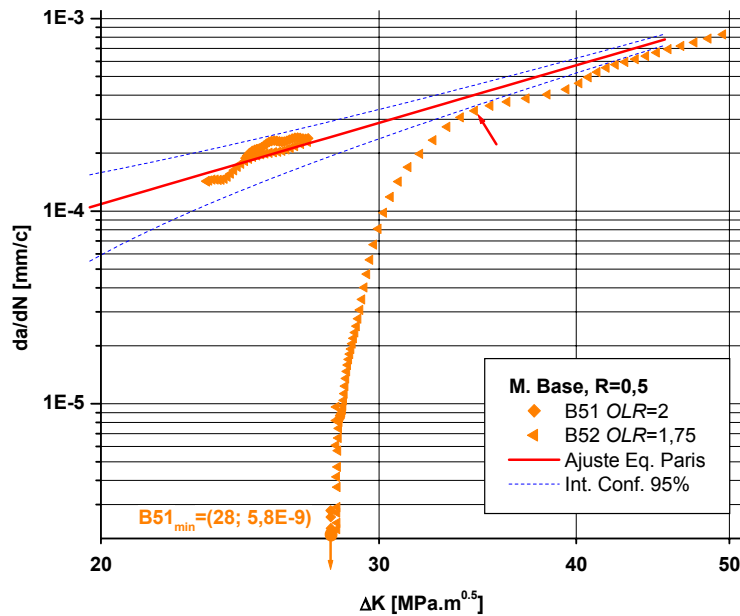


Figura 12: Efeito das sobrecargas nas curvas  $da/dN$  vs.  $\Delta K$  para  $R = 0,5$ .

### Análise fractográfica

A Figura 13 mostra algumas estriações, características de crescimento de trinca por fadiga no CP B101, em  $a \approx 23,2$  mm. Neste ponto foi determinada, mediante a contagem de estriações, uma velocidade aproximada de crescimento de trinca de  $3,5 \times 10^{-4}$  mm/c. O ajuste da equação de Paris, vide Figura 4, prediz aproximadamente  $3 \times 10^{-4}$  mm/c. Portanto, o valor aproximado obtido a partir de contagem de estriações fica dentro do intervalo de confiança (95%). Todas as taxas de crescimento de trincas inferidas a partir de contagem de estriações coincidiram com as taxas de crescimento experimentais.

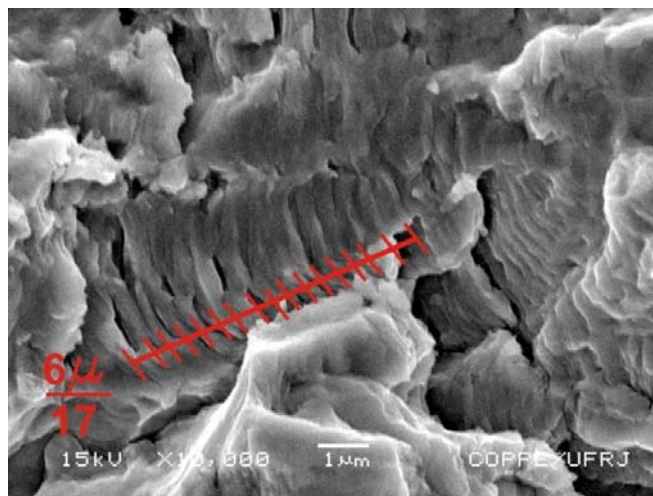


Figura 13: Estriações no CP B101 em  $a \approx 23,2$  mm.

## CONCLUSÕES

Foi possível identificar a bilinearidade das curvas  $da/dN$  versus  $\Delta K$ , para valores de  $\Delta K$  perto da transição do estágio I de fadiga para o estágio II. Estes resultados são consistentes com os resultados da bibliografia para materiais similares.

As taxas de propagação de trincas para  $R = 0,5$  foram superiores às taxas para  $R = 0,1$ , como esperado.

As taxas de crescimento de trinca calculadas nos testes de fadiga foram corroboradas mediante análise fractográfica com microscopia eletrônica de varredura.

As variáveis  $OLR$  e o  $\Delta K_{\text{prévio}}$  são significativas na vida residual à fadiga após da aplicação de sobrecargas, dentro das faixas de sobrecargas consideradas.

## AGRADECIMENTOS

À TenarisConfab, na pessoa do Eng. S. Kojima, pelo fornecimento dos materiais. À CAPES, CNPq CT-Petro 502084/03-0 e à Faperj pelo apoio financeiro. Ao CNPq pela bolsa de estudos de A.A. Buschiazzo. À CAPES pela bolsa ProDoc de E.M. Castrodeza.

## REFERÊNCIAS

1. Web site da USIMINAS, seção: catálogo de produtos /chapas grossas /tubos de grande diâmetro. [www.usiminas.com.br/produtos](http://www.usiminas.com.br/produtos) (acesso em 01/05/2005).
2. Buschiazzo, A.A., *Crescimento de trincas por fadiga em juntas soldadas circunferenciais de aço da classe API 5L X70 para risers rígidos*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.
3. ASTM E 674, *Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates*, Annual Book of ASTM Standard, v. 03.01, 1999.
4. Lal, D.N., "A Mechanistic Model for the Influence of Stress Ratio on the LEFM Fatigue Crack Growth Behavior of Metals and Alloys-I. Crack Ductile Materials", *Engineering Fracture Mechanics*, v. 49, n. 6, pp. 871-897, 1994.
5. Lal, D.N., Namdboohiri, T.K.G., "A Model for the Effect of Stress Ratio on the Threshold Condition", *Material Science Engineering*, A130, pp. 37-49, 1990.

6. Vosikovskiy, O., "Fatigue Crack Closure in an X70 steel", *International Journal of Fracture*, 17, pp. 301-309, 1981.
7. Fucks, W.E., Marsh, K.J., *Metal Fatigue in Engineering*, 1 ed. New York, John Wiley & Sons, 1980.
8. Neves Beltrão, M.A., *Propagação de Trincas de Fadiga em Juntas Soldadas Longitudinais de Aços para Dutos da Classe API 5L-X70*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.
9. De Marco Filho, M., *Propagação de Trincas de Fadiga em Juntas Soldadas Circunferenciais de Aço API 5L Grau X-65 para Utilização em Risers Rígidos*, Tese de D.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2002.
10. Fernandez, J.L., *Uma Metodologia para a Análise e Modelagem de Tensões Residuais*, Tese de D.Sc., PUC, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2002.
11. SHI, Y.W., CHEN, B.Y., ZHANG, J.X., "Effects of Welding Residual Stress on Fatigue Crack Growth Behavior in Butt Welds of Pipe Steel", *Engineering Fracture Mechanics*, v. 36, n. 6, pp. 893-902, 1990.
12. Sadananda, K., Vasudevan, A.K., Holtz, R.L., Lee, E.U., "Analysis of Overload Effect and Related Phenomena", *International Journal of Fatigue*, v 21, pp. S236-S246, 1999.

## FATIGUE CRACK GROWTH IN API 5L-X70 STEEL

### ABSTRACT

A study of fatigue crack growth in a circumferencial welded joint of an API 5L-X70 steel for risers and pipelines was made.  $da/dN$  versus  $\Delta K$  curves were obtained for two different load conditions ( $R = 0.1$  and  $0.5$ ). The influence of overloads for overload ranges  $OLR = 1.75$  and  $2$  were also considered. The fatigue tests were performed according to the ASTM E647 standard, with crack length assessment by the direct current potential drop technique. The experimental crack growth rates were verified by fractographic analysis and are close to results from steels of the same family.

Keywords: Fatigue, API 5L-X70 Steel, Pipeline, Risers, Overloads.