

ESTUDO SOBRE RETARDO NO CRESCIMENTO DE TRINCAS POR SOBRECARGAS MECÂNICAS EM AÇO API 5L X65¹

Genaro Zanon²
Tiago Rech²
Telmo R. Strohaecker³

Resumo

Este trabalho teve como meta avaliar a influência das sobrecargas mecânicas na taxa de crescimento de trincas por fadiga e aplicar um modelo de retardo de trinca para descrever quantitativamente essa influência após a aplicação de um ciclo de sobrecarga em Aço API 5L X65, usados em linhas de transporte de gás e petróleo. Para esse estudo foram determinadas curvas de taxa de propagação de trincas versus fator de intensidade de tensões (da/dN versus ΔK) em corpos de prova tipo *compact tension* retirados de dutos com 22" de diâmetro e 1/2" de espessura. O modelo de retardo de trinca empregado foi o de Wheeler, modelo que descreve o retardo no crescimento de trinca em função da razão entre a extensão das zonas de deformação plástica geradas pela sobrecarga e pelos ciclos de fadiga sob regime de amplitude de carga constante. Os resultados obtidos confirmam a boa correspondência entre o modelo de retardo de trinca proposto por Wheeler e o comportamento em fadiga do aço API 5L X65 após um ciclo de sobrecarga.

Palavras-chave: Retardo no crescimento de trinca; Modelo de Wheeler; Interação de carregamento; Aço API 5L X65.

FATIGUE CRACK GROWTH RETARDATION BEHAVIOUR BY MECHANICAL OVERLOAD IN API 5L X65 STEEL

Abstract

This report intended to estimate the influence of the mechanical overloads in the fatigue crack growth, and to apply a crack retardation model to describe quantitatively this influence after an application of overloads and crack configurations in API 5L X65 Steel, used in a gas and oil pipelines. For this study, fatigue crack growth curves (da/dN vs. ΔK) had been determined on compact tension specimens removed from pipes with a diameter of 22" and 1/2" of thickness. The model of fatigue crack retardation used in this work was the Wheeler's model (which) describes the retardation in the crack growth of a function of the ratio between the plastic zones generated by the overload and the cycles of fatigue under constant load amplitude regime. The achieved results confirm the good correspondence between the crack retardation model proposed by Wheeler and the experimental results after a single overload cycle in the fatigue live of an API 5L X65 steel.

Key words: Fatigue crack growth retardation; Wheeler model, Overload interaction; API 5L X65 steel

¹ Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil

² Mestrando, Programa de Pós – Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e dos Matérias (PPGEM) – UFRGS.

³ Professor, Programa de Pós – Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e dos Matérias(PPGEM) – UFRGS.

1 INTRODUÇÃO

O estudo da fadiga em componentes metálicos é de grande importância uma vez que a grande maioria das falhas ocorridas em componentes e estruturas se dá por fadiga. A mecânica da fratura é hoje usada amplamente em códigos de segurança e boas práticas de engenharia para cálculos de integridade estrutural, tanto por colapso plástico como por danos por fadiga. Uma boa previsão de vida útil, ou remanescente de estruturas submetidas a carregamentos cíclicos deve levar em consideração o histórico de carregamento, visto que interações de carregamentos podem alterar as condições de propagação de trinca e diminuir a previsibilidade da vida em fadiga.

Muitos pesquisadores observaram que uma mudança na magnitude do espectro de carregamento pode resultar em um retardo na taxa de propagação de trinca. Extensivos dados publicados mostram que a taxa da propagação de trinca por fadiga sob amplitude de carregamento constante pode retardar significativamente como resultado do emprego de um ou mais ciclos de fadiga com cargas maiores do que às do regime de fadiga com amplitude constante.

Essas sobrecargas mecânicas geram zonas de deformação plástica à frente da trinca que concorrem para uma desaceleração na taxa de propagação de trinca. Essas sobrecargas podem gerar zonas com tensões residuais compressivas que diminuem ou até mesmo neutralizam a amplitude de carregamento empregado.

No presente trabalho usou-se o modelo de retardo de trinca de Wheeler que usa a razão entre o tamanho da zona plástica gerada pelos ciclos de fadiga e o tamanho da zona plástica gerada pela sobrecarga. Esse modelo é usado como uma função multiplicadora na relação de Paris⁽¹⁾ entre a taxa de crescimento de trinca (da/dN) e a variação da intensidade de tensões (ΔK).

Esses parâmetros, ou coeficientes mostram-se extremamente dependentes da geometria e da profundidade de trinca (relação dessas com o ligamento remanescente), fazendo-se necessário relacionar esses parâmetros a diferentes profundidades e níveis de sobrecargas.

Unindo-se as equações de taxa de propagação de trincas já existentes ao modelo de retardo de trinca de fadiga, obtém-se uma ferramenta para prever o comportamento em fadiga de componentes sob regime de fadiga com amplitude de carregamento constante e sujeitos a sobrecargas regulares.

2 REVISÃO TEÓRICA

Quando um único ciclo de tensão elevada é aplicado em um componente com um histórico de amplitude constante, a taxa de crescimento de trinca imediatamente após a sobrecarga é muito menor que a taxa registrada antes da sobrecarga. Após um período de crescimento lento, a taxa de propagação de trinca vai gradativamente aumentando até retornar a taxa original. Este fenômeno é chamado de retardo de trinca.

As tensões geradas na ponta da trinca pelo carregamento mecânico atingem facilmente tensões da ordem do escoamento do material. O tamanho da zona deformada plasticamente é proporcional ao nível de carregamento externo.

2.1 Modelo de Retardo de Trinca – Wheeler

O modelo de Wheeler⁽²⁾ prediz o retardo no crescimento de trinca após uma sobrecarga pela modificação da taxa de crescimento por amplitude constante. O

modelo modifica a taxa de crescimento por amplitude constante por um parâmetro de retardo determinado experimentalmente, que é função da razão entre o tamanho da zona plástica decorrente dos ciclos de carregamento e o tamanho da zona plástica gerada pela sobrecarga. O modelo assume que enquanto a zona plástica gerada pelo corrente carregamento estiver contida na zona plástica gerada pela sobrecarga, a taxa de crescimento será em função da distância entre a borda da zona plástica por sobrecarga e a ponta da trinca.

2.1.1 Descrição do Modelo de Wheeler

O Modelo de Wheeler calcula o retardo na taxa de crescimento de trinca gerado após um único ciclo de sobrecarga introduzindo um parâmetro de retardo, ϕ_R , parâmetro esse que pode ser aplicado a qualquer modelo de fadiga por amplitude constante. Neste trabalho esse parâmetro será usado sobre a equação de Paris.

$$\frac{da}{dN} = \phi_R [C(\Delta K)^n] \quad (1)$$

Na EQ. 1, da/dN é o crescimento de trinca por ciclo, ΔK é amplitude do fator de intensidade de tensões aplicado e C e n são constantes do material.

Com referência a Figura 1, o parâmetro de retardo de trinca pode ser definido como:

$$\phi_R = \begin{cases} \left[\frac{r_{pi}}{a_{OL} + r_p - a_i} \right]^\beta & \text{quando } a_i + r_{pi} < a_{OL} + r_{pOL}, \\ 1, & \text{quando } a_{OL} + r_{pOL} \leq a_i + r_p, \end{cases} \quad (2)$$

onde a_{OL} é o tamanho da trinca no momento em que a sobrecarga é aplicada, r_{pOL} é o tamanho da zona plástica gerada pela sobrecarga em a_{OL} , r_{pi} é o tamanho da zona plástica no tamanho de trinca instantâneo a_i e β é o parâmetro de ajuste de curva.

$$r_p = \alpha \left(\frac{K}{\sigma_e} \right)^2 \quad (3)$$

onde K é o fator de intensidade de tensões aplicado, σ_e é a tensão de escoamento do material e α é a constante de zona plástica efetiva, que pode ser determinada experimentalmente pelo tamanho de trinca sob o efeito do retardo (a_r na Figura 1), ou seja, é a distância percorrida pela trinca após a sobrecarga até ultrapassar a região de interferência, na qual a taxa de propagação de trinca retorna ao nível inicial (antes da sobrecarga).

Assim, uma sobrecarga realizada em uma trinca de tamanho a_{OL} , produz uma zona de deformação plástica de tamanho r_{pOL} . Nos subseqüentes ciclos de fadiga, a zona plástica instantânea, gerada pelos ciclos de fadiga, avança junto com a trinca através da região plástica produzida pela sobrecarga. O efeito de retardo de trinca acaba quando a trinca atinge o tamanho $a_i = a_{OL} + a_r$. Neste momento o tamanho da zona plástica na ponta da trinca é denotado por r_{pr} . A relação entre a_r o tamanho da zona plástica é dado por:

$$a_r = r_{pOL} - r_{pr} = \alpha \left[\left(\frac{K_{OL}}{\sigma_e} \right)^2 - \left(\frac{K_r}{\sigma_e} \right)^2 \right] \quad (4)$$

onde K_{OL} é o fator de intensidades de tensões da sobrecarga e K_r é o fator de intensidades de tensões máximo em $a_i = a_{OL} + a_r$. Uma vez que a_r é determinado experimentalmente, a constante α é obtida.

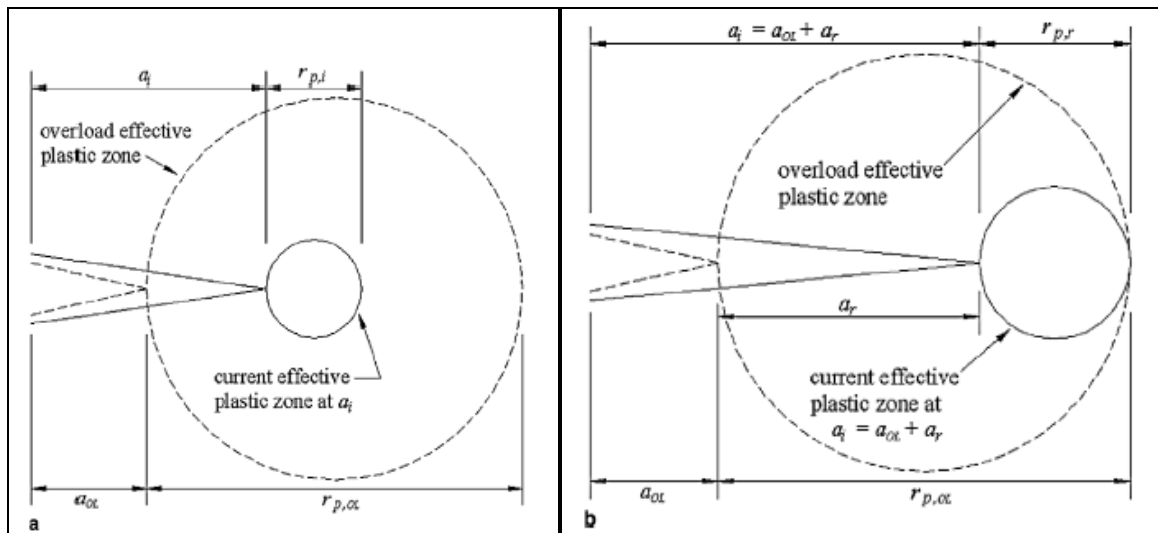


Figura 1. Ilustração dos termos que definem o modelo de retardo.⁽³⁾

3 MATERIAL E MÉTODOS

O material utilizado neste trabalho é um aço microligado API 5L X65⁽⁴⁾ obtido por laminação controlada na faixa de temperatura de 750°C com LE de 485 MPa e LR de 535 MPa. A composição química é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química do material usado no estudo.

C	SI	MN	P	S	CR	MO	NI	NB	TI	FE
0,07	0,29	1,38	0,017	0,0065	0,0263	0,0073	0,0183	0,0441	0,0147	98,12

3.1 Ensaios Propagação de Trinca

Foram realizados ensaios de propagação de trinca versus fator de intensidade de tensões em corpos de prova tipo *compact tension* (CT) retirados segundo orientação T-L. A espessura dos corpos de prova foi de 10 mm, medida essa limitada pela curvatura do tubo. Os ensaios foram conduzidos segundo norma ASTM E647-00⁽⁵⁾ em uma máquina de ensaios servo-hidráulica MTS 810 controlada pelo software *Fatigue Crack Growth* MTS. Os corpos de prova foram pré-trincados até um razão de a/W de 0,25 com um ΔK final de $15 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

Para os ensaios de estudo da influência das sobrecargas mecânicas na taxa de propagação de trincas procedeu-se os ensaios com controle constante da variação do fator de intensidades de tensões (ΔK constante) e controle constante da variação de carga (ΔP constante). Os ensaios realizados com regime de ΔK

constante, serviram para o propósito de comparar o efeito da magnitude da sobrecarga no retardo de trinca. Os ensaios com regime de ΔP constante foram realizados para a obtenção de dados para o ajuste experimental do modelo de retardo de trinca.

Nos ensaios com controle de ΔK constante e igual a $18 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, as sobrecargas (OLR) aplicadas foram de 30, 35 e 40 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, correspondendo a 1,5; 1,75 e 2,0 vezes o K_{max} aplicado em fadiga.

Os ensaios com controle de amplitude de carga constante foram efetuados com o intuito de levantar os coeficientes usados no modelo de predição de retardo de trinca. Foram usadas as seguintes configurações de sobrecargas e profundidade de trinca: a/w igual a 0,30; 0,45 e 0,60 e sobrecargas de 1,5; 1,75 e 2,0.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultados da Curva ΔK Constante

As sobrecargas com OLR iguais a 1,50 e 1,75 apresentaram decréscimo gradual na taxa de propagação até atingirem um mínimo à aproximadamente 0,1 mm após as sobrecargas. Na sobrecarga de OLR igual a 2,0 houve um ligeiro aumento logo após a aplicação da sobrecarga para atingir um mínimo a aproximadamente 0,4 mm. A Tabela 2 mostra a diferença do número de ciclos de fadiga entre os ensaios com sobrecarga, gastos para percorrer a região sob influência da sobrecarga, e o número de ciclos necessários para a trinca percorrer a mesma distância em um regime de ΔK constante sem sobrecargas. Esse número de ciclos foi calculado por integração numérica da equação de Paris usando os coeficiente $n = 4,03$ e $C = 2,163 \times 10^{-10}$ obtidos em um ensaio de taxa de propagação de trinca padrão com ΔK decrescente.

Tabela 2. Comparação entre os números de ciclos de fadiga.

SOBRECARGAS OLR	1,5	1,75	2,0
Tamanho da zona afetada [mm]	0,2875	0,6579	1,4769
Número de ciclos	14052	46000	106000
Número de ciclos sem sobrecarga	11500	26316	59076
Sobrevida	22,2%	74,8%	79,4%

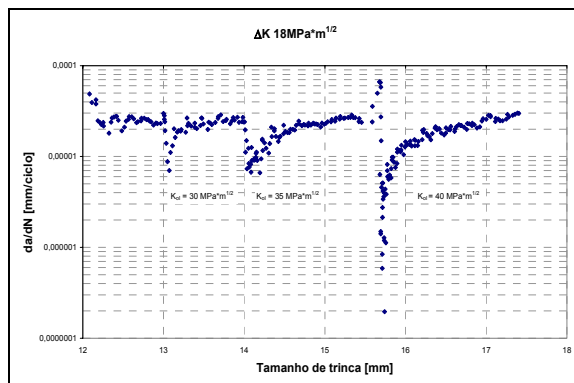


Figura 2. Gráfico da/dN versus tamanho de trinca.

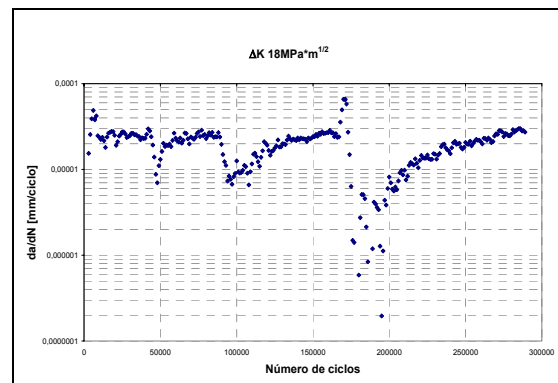


Figura 3. Gráfico da/dN versus número de ciclos.

4.2 Ajuste dos Coeficientes α e β

Para efetuar os ajustes dos parâmetros do modelo de Wheeler, usou-se um regime de fadiga com ΔP constante. Na Tabela 3 são mostradas as configurações de trinca e sobrecargas usados para os ajustes dos parâmetros experimentais, bem como os dados coletados durante os ensaios para os tamanhos de trinca e número de ciclos observados. A profundidade da trinca é dada em termos de a/W e a sobrecarga é dada em função da razão entre o P_{max} (carga) aplicado no regime de amplitude de carga constante e o P aplicado durante a sobrecarga, OLR.

Tabela 3. Dados coletados para determinação dos parâmetros de ajuste.

OLR	A/W	A _{OL}	A _F	A _R	N _I	N _F	N _R
1,5	0,30	12	12,379	0,379	205805	240439	34634
	0,45	18	18,875	0,875	591745	659761	68016
	0,60	24	24,516	0,516	26497	35032	8535
1,75	0,30	12	12,370	0,370	86003	111000	24997
	0,45	18	18,614	0,614	309639	336001	26362
	0,60	24	24,754	0,754	498552	519002	20450
2,0	0,30	12	12,553	0,553	85641	174842	89201
	0,45	18	18,450	0,450	636663	720766	84103
	0,60	24	24,990	0,990	211433	236016	24583

Para a obtenção dos dados listados na Tabela 3 foram plotados gráficos tamanho de trinca versus número de ciclo para cada uma das configurações de a/W e OLR. Assim, obtendo-se a_r , determina-se α usando a EQ. 4. O β é calculado integrando a EQ. 2, ajusta-se o β até que o número de ciclos de fadiga resultante coincida com o determinado experimentalmente.

Na Tabela 4 são mostrados os resultados obtidos para os valores de α e β . Nas Figuras 4 e 5 é mostrada a dependência de α e β em função do nível da sobrecarga (OLR) e a profundidade da trinca.

Tabela 4. Resultados de α e β calculados a partir dos dados experimentais.

OLR	A/W	K _{OL} [MPA*M ^{1/2}]	K _R [MPA*M ^{1/2}]	R _{POL} [MM]	α	β
1,5	0,30	25,22	17,23	0,711904	0,263312	0,08
	0,45	37,53	26,64	1,765124	0,294812	2,785
	0,60	45,33	31,82	1,01749	0,116466	1,88
1,75	0,30	29,51	17,27	0,562753	0,15201	1,34
	0,45	43,78	26,14	0,95543	0,11724	1,26
	0,60	53,05	32,70	1,217447	0,101771	1,85
2,0	0,30	33,73	17,48	0,756116	0,156372	0,8
	0,45	49,89	25,75	0,613767	0,058009	0,95
	0,60	60,62	33,52	1,425777	0,091251	1,42

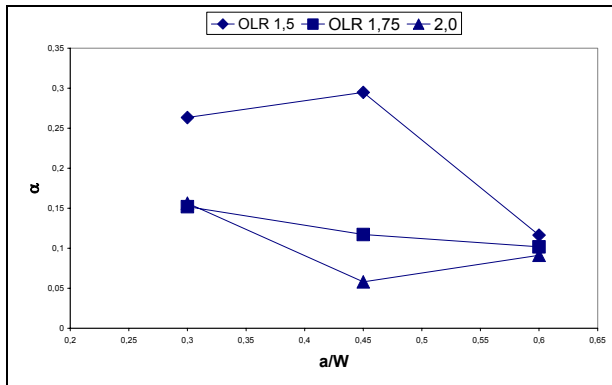


Figura 4. Relação entre α e a/W .

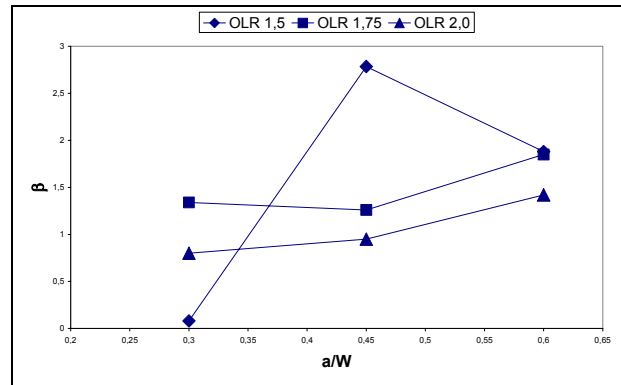


Figura 5. Relação entre β e a/W .

Com as relações entre α - β e a/W -OLR mostradas nas Figuras 4 e 5 determinaram-se equações que descrevessem essas dependências. As EQ. 5 e EQ. 6 mostram as relações que melhor descrevem o comportamento de α e β .

$$\alpha = 9,21(\text{OLR})^{-10,6} + 0,0348(a/W)^{-1,17} \quad \text{EQ. 5}$$

$$\beta = 3,57(\text{OLR})^{-4,54} + 2,90(a/W)^{1,29} \quad \text{EQ. 6}$$

Para avaliar a correspondência do método, foram efetuados ensaios de fadiga com sobrecargas aplicadas nas seguintes configurações: a/W de 0,40 e 0,49 com OLR de 1,8.

De posse da curva real obtida no laboratório. Usaram-se as equações EQ. 5 e EQ. 6 para determinar os coeficientes α e β usados no modelo de Wheeler, comparando os resultados do ensaio real e a predição usando o modelo de retardo de trinca. Nas Figuras 6 a 9 são mostrados os gráficos comparativos (tamanho de trinca versus número de ciclos e os de da/dN versus ΔK) entre os dados reais e os obtidos pelo modelo de retardo de trinca. Esses gráficos sobrepostos mostram que o modelo acompanha o decréscimo na taxa de propagação de trinca embora haja um distanciamento gradual das previsões e o comportamento real na medida em que a trinca se propaga.

Na Tabela 5 são mostrados os valores de α e β encontrados a partir das EQ. 5 e 6 usados no modelo de retardo de trinca.

Tabela 5. Valores de α , β e r_{OL} obtidos a partir das EQ 5 e 6 para o ensaio de teste do método.

OLR	A/W	R_{POL} [MM]	α	β
1,8	0,40	0,81085	0,11921	1,1445
1,8	0,49	1,04570	0,09839	1,4066

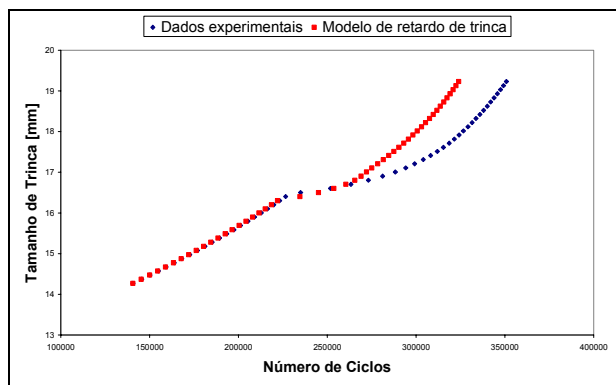


Figura 6. Gráfico Tamanho de Trinca versus Número de Ciclos comparando os dados experimentais com os resultados obtidos através do modelo de retardo de trinca, $a/W = 0,40$ e $OLR = 1,8$.

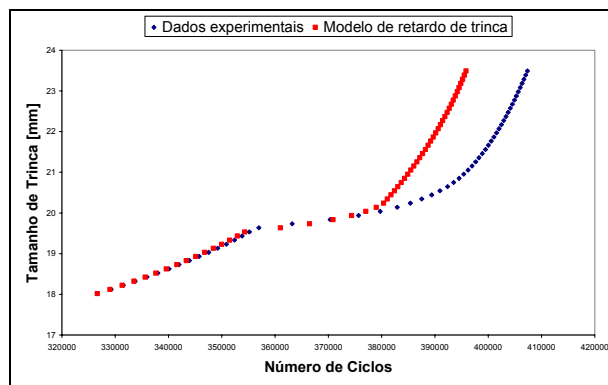


Figura 7. Gráfico Tamanho de Trinca versus Número de Ciclos comparando os dados experimentais com os resultados obtidos através do modelo de retardo de trinca, $a/W = 0,49$ e $OLR = 1,8$.

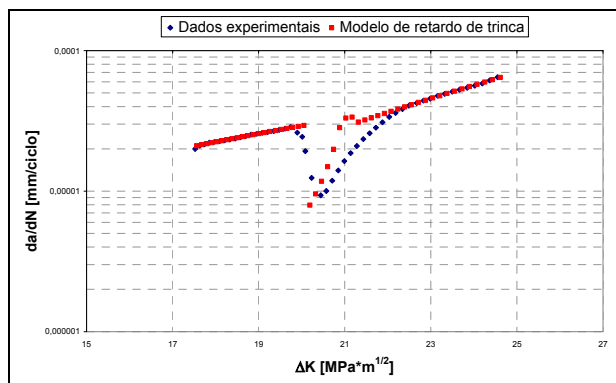


Figura 8. Gráfico da/dN vs ΔK para os dados experimentais e modelo de retardo de trinca, sobrecarga aplicada em a/W de $0,40$ e OLR de $1,8$.

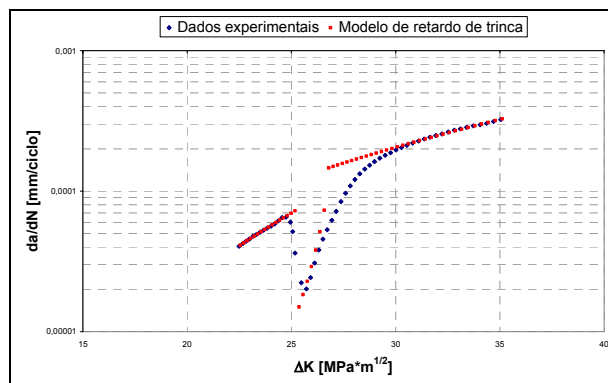


Figura 9. Gráfico da/dN vs ΔK para os dados experimentais e modelo de retardo de trinca, sobrecarga aplicada em a/W de $0,49$ e OLR de $1,8$.

5 CONCLUSÕES

O efeito das sobrecargas foi positivo, retardando o crescimento da trinca e conferindo uma sobrevida de até 75%.

O modelo de Wheeler, mesmo não levando em consideração outros mecanismos de retardo de trinca, mostrou-se satisfatório para prever o comportamento do crescimento de trinca após uma sobrecarga mecânica. Tendo sido encontrado um erro médio de 25% em favor da segurança no número final de ciclos de fadiga.

O procedimento de ajuste dos parâmetros α e β se mostrou eficaz, tendo a curva calculada boa correspondência com a curva real obtida nos ensaios.

O modelo admite que a menor taxa de propagação de trinca se dá imediatamente após a aplicação da sobrecarga, o que não é evidenciado nos ensaios realizados, onde ocorre uma redução gradual na taxa até se atingir o valor mínimo. A contemplação desta fase de decrescimento da taxa de propagação de trinca no modelo de retardo poderá aumentar a previsibilidade da taxa de propagação após ciclos de sobrecargas.

REFERENCIAS

- 1 PARIS, P., ERDOGAN, F. **A critical analysis of crack propagation laws.** J Basic Eng, Trans ASME 1963; 85:528-34.
- 2 WHEELER OE. **Spectrum Load and crack growth.** J Basic Eng, Trans ASME 1972; 94(1):181-6.
- 3 YUEN, B.K.C., TAHERI, F., **Proposed modifications to the Wheeler retardation model for multiple overloading fatigue life prediction.** International Journal of Fatigue 28 (2006) 1803-1819.
- 4 AMERICAN PETROLIUM INSTITUTE. API Specification 5l, 2004.
- 5 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM E 647-00: Standard Methods for Measurement of Fatigue Crack Growth.** West Conshohocken, PA, 2000.