

O FECHO DE FENDA COMO CAUSA PRINCIPAL PARA AS INFLUÊNCIAS DA TENSÃO MÉDIA E DA ESPESSURA NA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE FENDAS POR FADIGA NO AÇO CK45

Luis M. P. Abreu, José D. Costa e J. M. Ferreira

Departamento de Engenharia Mecânica/ FCT  
Universidade de Coimbra, Polo II, Pinhal de Marrocos 3030 Coimbra, Portugal

**Resumo.** Neste trabalho analisa-se a influência da razão de tensões na velocidade de propagação de fendas por fadiga, para  $R=0, 0.2,$  e  $0.4,$  no aço CK 45 DIN 17200. A influência da espessura na velocidade de propagação também é analisada, para três valores:  $B=6, 12$  e  $24$  mm. Na monitorização do comprimento de fenda usaram-se os métodos óptico e o sistema da queda de potencial eléctrico (DCPD). O fecho de fenda foi monitorizado através da técnica da complacência, utilizando um extensómetro do tipo Elber. A partir dos registos gráficos carga versus deslocamento relativo das faces da fenda, junto à sua extremidade, determinaram-se os valores de carga de fecho de fenda,  $P_{ab},$  que são usados no cálculo do valor efectivo da gama do factor de intensidade de tensões  $\Delta K_{ef}.$  No final, com base nas curvas  $da/dN-\Delta K_{ef},$  verifica-se que o fecho de fenda parece ser a causa principal para as influências tanto da tensão média como da espessura na velocidade de propagação de fendas por fadiga no regime II de Paris.

**Abstract.** In this work the influence of the stress ratio on the crack closure propagation rate was analysed for  $R=0, 0.2$  and  $0.4.$  The material used in this study was the steel CK 45 DIN 17200. Also, the influence of thickness on the crack propagation rate was analysed for  $B=6, 12$  and  $24$  mm. Crack length was monitored by the optical method and by the direct current potential drop (DCPD) technique. The crack closure measures were obtained by the compliance technique, using a gauge similar to the Elber type. From the load versus displacement plots, the crack opening loads  $P_{ab}$  were obtained and used in the calculation of the effective range of the stress intensity factor,  $\Delta K_{ef}.$  The plots  $da/dN-\Delta K_{ef}$  show that the closure phenomenon seems to be the main cause to explain both influences of the mean stress and the thickness on the crack propagation rate in the Paris regime.

## 1. INTRODUÇÃO

Desde o trabalho pioneiro de Elber [1], no final da década de sessenta, um elevado número de investigadores tem examinado a influência do fecho de fenda no comportamento à fadiga dos materiais. De entre as três causas mais importantes para o fecho de fenda, a mais relevante no regime II de propagação é a de indução por plasticidade. O seu mecanismo, proposto por Elber, é baseado na suposição de que o rasto plástico, ou seja, a região plastificada junto à extremidade de ambas as faces da fenda, é uma fonte de tensões residuais de compressão, que resulta do facto de esta zona ter estado anteriormente sujeita à deformação plástica. A formação desta região, associada à indução do fecho de fenda por plasticidade, é geralmente tomada como um processo contínuo e está relacionada com o tamanho da zona plástica que, por sua vez, é uma função da tensão de cedência e de  $\Delta K.$

Em condições de estado plano de tensão, o fenómeno do fecho de fenda pode ser provocado pela contracção lateral do material, que ocorre na zona plástica junto à extremidade da fenda. Esta contracção lateral resulta num transporte de material para o interior da região sub-superficial criando, desta maneira, um excesso de material, que faz surgir o fecho de fenda no rasto da sua extremidade. Em condições de estado plano de deformação não existe qualquer movimento lateral, porque a deformação segundo a direcção da espessura é nula e, por conseguinte, não existe material adicional para além da frente da fenda. Portanto, uma vez que o fecho global da fenda é dependente da espessura, é razoável supor, que a sua influência na velocidade de propagação diminua com o aumento da espessura. Schijve [2] sugeriu, que devido ao constrangimento, que ocorre com o aumento da espessura, haverá uma zona plástica com menor dimensão à frente da fenda, na zona central do provete, e portanto, o fecho de

fenda induzido por plasticidade deverá ser menor para espessuras mais elevadas [3,4]. Porém este comportamento não tem sido verificado por outros investigadores [5].

Um outro parâmetro muito importante na velocidade de propagação é a razão de tensões. A relação entre a velocidade de propagação da fenda e  $\Delta K_{ef}$  para o regime II de propagação tem sido aceite como meio de eliminar a influência deste parâmetro. Neste contexto, o parâmetro U, introduzido por Elber é uma função de R e de  $\Delta K$ , aumentando quer com R quer com  $\Delta K$  [6, 7]. O efeito da tensão média na velocidade de propagação tem sido explicado por intermédio do fecho de fenda, por diversos outros autores [8, 9]. Contudo, à semelhança do que se referiu para a espessura, o fecho de fenda não tem tido aceitação geral como explicação para a influência de R na velocidade de propagação. Por vezes, é sugerido como causa para esta divergência de opiniões a utilização de técnicas não apropriadas ou com insuficiência de sensibilidade na medição do fecho de fenda.

Neste trabalho analisa-se se a influência da tensão média e da espessura na velocidade de propagação de fendas por fadiga pode ser totalmente explicada através do efeito do fecho de fenda. O material escolhido para este estudo é um aço de grande aplicação em construção mecânica, o CK 45 DIN 17200. Em estudo anterior [10], em ligas de alumínio da série 5000, obteve-se um boa correlação entre a velocidade de propagação e  $\Delta K_{ef}$  para três valores da razão de tensões  $R=0.05, 0.5$  e  $0.7$ .

## 2. MATERIAL E TÉCNICAS EXPERIMENTAIS

A composição química do aço CK 45 DIN 17200 é apresentada na tabela 1.

Tabela 1 - Composição química do aço CK 45 DIN 17200.

C	Mn	Si
0.45	0.65	0.25

As propriedades mecânicas deste material são:  $\sigma_f=670-820$  MPa,  $\sigma_c>420$  MPa e  $\epsilon_f>16$  %.

A geometria dos provetes CT, utilizados nos ensaios de propagação de fendas está representada na figura 1. Foram analisados três valores de espessura:  $B = 6, 12$  e  $24$  mm.

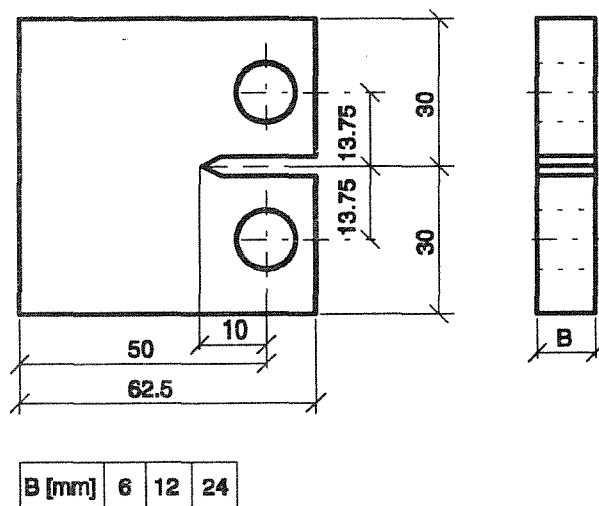


Fig. 1. Geometria dos provetes CT utilizados nos ensaios de propagação de fendas.

Os testes foram realizados numa máquina servo-hidráulica, INSTRON modelo 1341, de 100 KN de capacidade, utilizando-se uma onda sinusoidal com frequências entre os 10 e os 30 Hz. Para cada uma das espessuras foram analisados, à temperatura ambiente e ao ar, três valores de razão de tensão,  $R = 0, 0.2$  e  $0.4$ , seguindo as prescrições da norma ASTM E647 [11].

Na medição do fecho de fenda utilizaram-se os métodos óptico e da queda de potencial eléctrico de corrente contínua. A instrumentação óptica era constituída por uma luneta com ampliação de 30 vezes, assente sobre uma base deslizante provida de um comparador com precisão de 0.01 mm. O sistema da queda de potencial era composto por uma fonte de alimentação de corrente contínua com capacidade de 50 A e um micro-voltímetro com resolução de  $1 \mu V$ . As leituras obtidas variaram entre os  $150 \mu V$ , no início do ensaio, e cerca de  $2000 \mu V$ , correspondente ao comprimento máximo da fenda.

A medição do fecho de fenda foi obtida com base no método da complacência, utilizando-se um extensómetro de pinos, semelhante ao usado por Elber [1]. À medida que o ensaio progredia, eram efectuados dois furos de 0.5 mm de diâmetro numa das faces do provete, um em cada lado da fenda, distanciados entre si de 1.25 mm e a cerca de 1-2 mm da extremidade da fenda. Em cada ensaio eram abertos um total de 6 a 8 pares destes furos. A partir dos registos gráficos carga versus deslocamento de abertura da fenda, determinou-se a carga de abertura da fenda,  $P_{ab}$ , correspondente ao ponto onde a curva carga-deslocamento se torna linear durante o carregamento.

Nos primeiros ensaios também foi experimentada a utilização de outras técnicas de medição de fecho de

fenda, designadamente o extensómetro de lâminas, vulgarmente utilizado na determinação do COD, e as técnicas eléctricas baseadas quer na utilização de corrente contínua (DCPD) quer alterna (ACPD). Enquanto que a primeira se mostrou ineficaz por falta de sensibilidade, as técnicas eléctricas não permitiram uma correlação satisfatória entre os registos gráficos e o fenómeno do fecho de fenda.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

As figuras 2, 3 e 4 apresentam todos os resultados obtidos nos ensaios de propagação de fendas na forma de curvas da/dN versus  $\Delta K$ , para as três espessuras analisadas, B = 6, 12 e 24 mm, respectivamente. Em cada figura, são apresentados os resultados para os três valores de razão de tensão considerados, R = 0, 0.2 e 0.4, cobrindo somente o regime II de propagação, para velocidades compreendidas entre  $10^{-5}$  e  $10^{-3}$  mm/ciclo. A figura 2, que apresenta os resultados para B = 6 mm, evidencia uma forte influência da razão de tensão na velocidade de propagação. À medida que  $\Delta K$  aumenta, essa influência diminui.

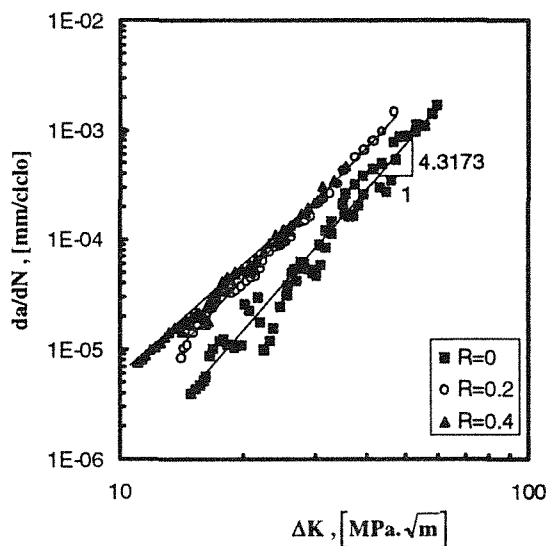


Fig. 2. da/dN versus  $\Delta K$ ; B = 6 mm, R = 0, 0.2 e 0.4.

Os valores de da/dN aumentam com R, verificando-se uma menor variação das velocidades de propagação entre R=0.2 e R=0.4 do que entre R=0 e R=0.2. Para B=12 mm, figura 3, a influência de R é inferior à que foi observada para B=6 mm, tornando-se praticamente nula para as velocidades de propagação elevadas, isto é, da ordem dos  $10^{-3}$  mm/ciclo ( $\Delta K \approx 50 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ). Finalmente, para B=24 mm, figura 4, a influência de R ainda é menor do que a verificada para B=12 mm. Na

figura 5 comparam-se as curvas da/dN- $\Delta K$ , obtidas para as três espessuras considerando-se uma das razões de tensão (R=0).

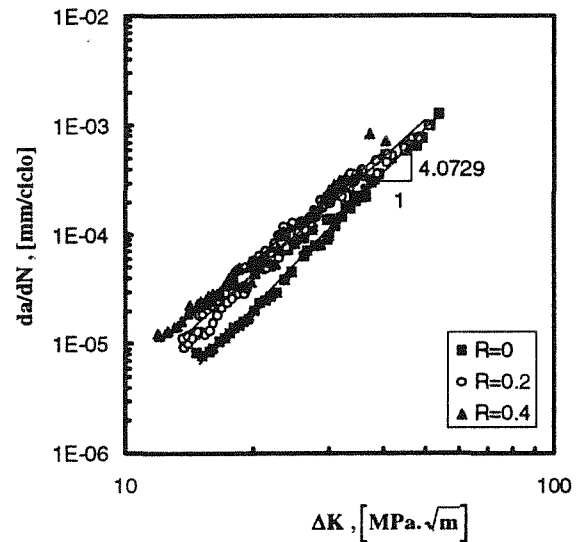


Fig. 3. da/dN versus  $\Delta K$ ; B = 12 mm, R = 0, 0.2 e 0.4

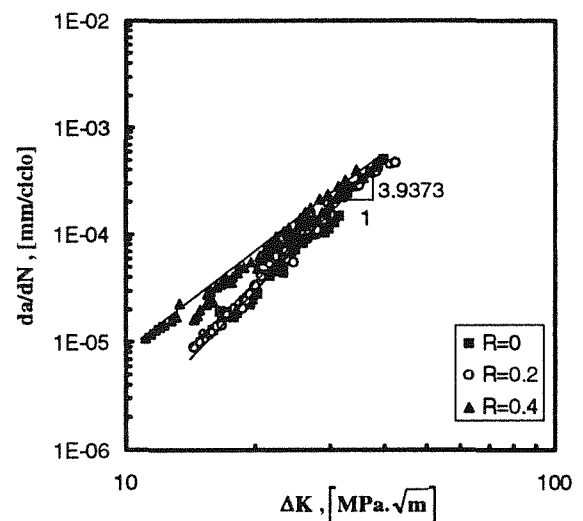


Fig. 4. da/dN versus  $\Delta K$ ; B = 24 mm, R = 0, 0.2 e 0.4

Observa-se alguma influência da espessura na velocidade de propagação. Esta influência é mais importante entre B=6 e B=12 mm do que entre B=12 e B=24 mm. À medida que  $\Delta K$  aumenta a influência da espessura diminui.

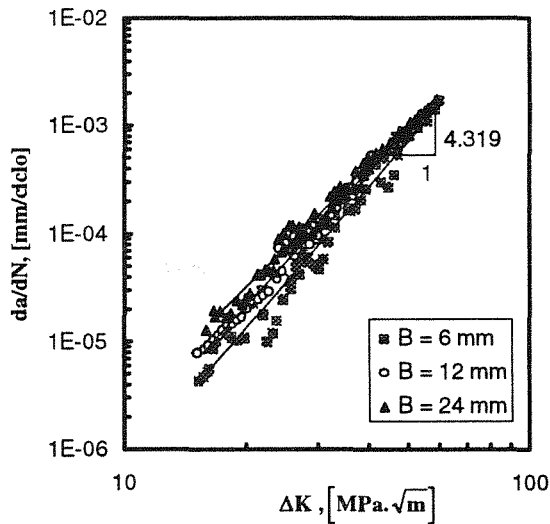


Fig. 5.  $da/dN$  versus  $\Delta K$ ;  $R = 0$ ,  $B = 6, 12$  e  $24$  mm

Em resumo, são observados os comportamentos habituais, ou seja,  $da/dN$  aumenta com os valores de  $R$  e de  $B$ ; as influências destes dois parâmetros diminuem com o aumento de  $\Delta K$ ; a influência de  $R$  é maior para espessuras reduzidas do que para espessuras elevadas, por nestas predominar o estado plano de tensões. Contudo, estas são também as influências que se verificam no valor do fecho de fenda, ou seja, com o aumento de  $R$  aumenta o parâmetro  $U$  e com o aumento de  $B$  diminui a importância relativa da zona junto à superfície em estado plano de tensão diminuindo, conseqüentemente, o valor global do fecho de fenda. Assim, é razoável admitir que o fecho de fenda seja a causa principal quer da influência de  $R$  quer da influência da espessura na velocidade de propagação.

Na figura 6 apresentam-se as curvas  $U-\Delta K$ , obtidas para uma das espessuras,  $B=6$  mm. Tal como era esperado, verifica-se que  $U$  aumenta com  $R$  e com  $\Delta K$ . Estas tendências são confirmadas com resultados obtidos por outros autores [10], que efectuaram ensaios para três valores de  $R$  ( $R=0.05, 0.5$  e  $0.7$ ) numa liga de alumínio-magnésio. Para  $R=0.4$  só se regista fecho de fenda para valores de  $\Delta K < 16$   $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ , a que corresponde uma velocidade de propagação  $2 \times 10^{-5}$  mm/ciclo. Acima deste valor de  $\Delta K$ ,  $U$  toma o valor de 1.

Os gráficos obtidos para as outras duas espessuras apresentam tendências de variação de  $U$  com  $\Delta K$  semelhantes. Porém, a influência de  $R$  em  $U$  é mais importante para  $B=6$  mm do que para as restantes espessuras. Em geral, os valores de  $U$  obtidos para

$B=12$  e  $24$  mm são superiores aos obtidos para  $B=6$  mm.

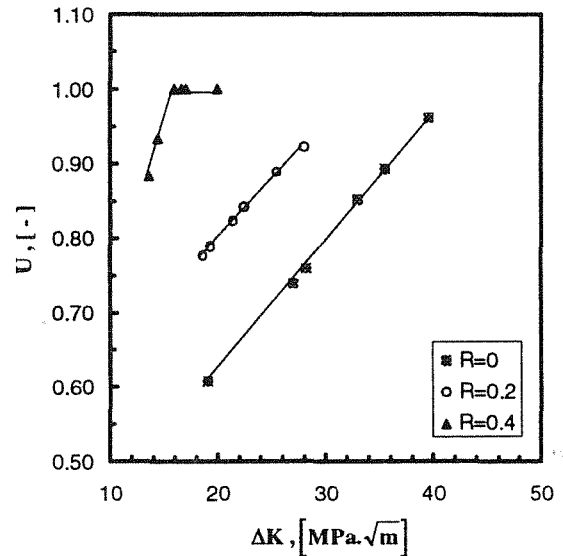


Fig. 6.  $U$  versus  $\Delta K$ ;  $B=6$  mm,  $R=0, 0.2$  e  $0.4$

Nas figuras 7, 8 e 9 apresentam-se as curvas  $da/dN-\Delta K_{ef}$  para as três geometrias analisadas,  $B=6, 12$  e  $24$  mm, respectivamente. Os valores de  $\Delta K_{ef}$  foram determinados através da relação  $\Delta K_{ef} = \Delta K U$ . Em cada figura estão reunidos os valores obtidos para as três razões de tensão analisadas.

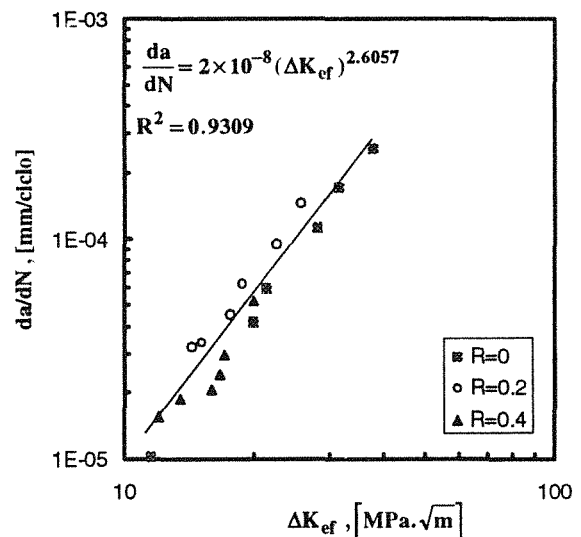


Fig. 7.  $da/dN$  versus  $\Delta K_{ef}$ ;  $B=6$  mm,  $R=0, 0.2$  e  $0.4$ .

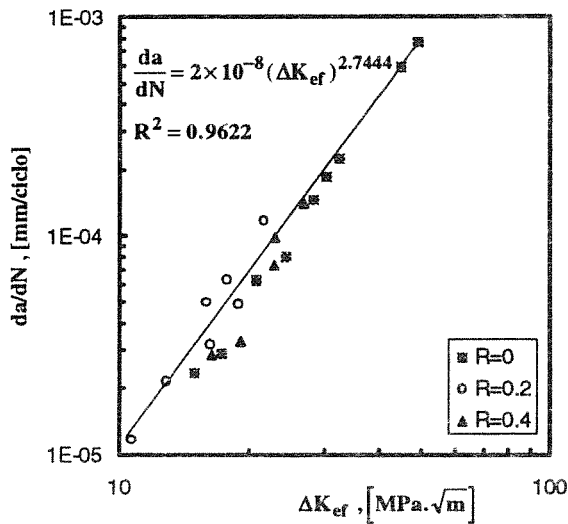


Fig. 8.  $da/dN$  versus  $\Delta K_{ef}$ ;  $B=12$  mm,  $R=0, 0.2$  e  $0.4$ .

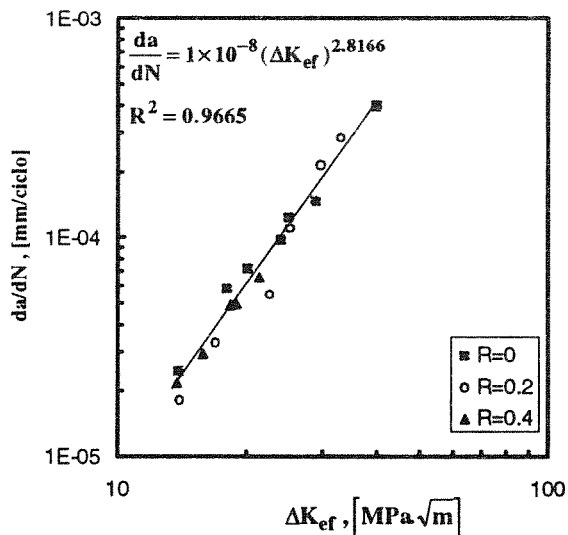


Fig. 9.  $da/dN$  versus  $\Delta K_{ef}$ ;  $B=24$  mm,  $R=0, 0.2$  e  $0.4$ .

Pode observar-se que, apesar de existir alguma dispersão, os resultados se encontram segundo a mesma banda, não sendo distinguível a influência da tensão média para nenhuma das espessuras. A influência da espessura também é eliminada, quando se representam os valores de  $da/dN$  em função de  $\Delta K_{ef}$ , figura 10.

A influência da espessura na velocidade de propagação está associada à maior ou menor quantidade relativa de material em estado plano de tensão (junto à superfície do provete) e em estado plano de deformação (interior

do provete) e ao facto de os valores do fecho de fenda induzido por plasticidade, que ocorrem em cada um destes estados de tensão serem muito diferentes.

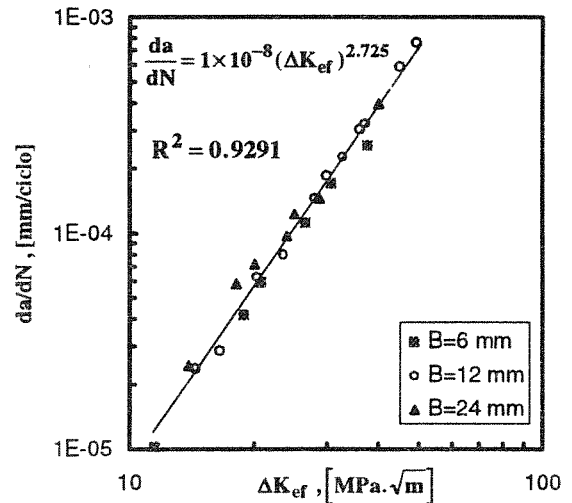


Fig. 10.  $da/dN$  versus  $\Delta K_{ef}$ ;  $R=0$ ,  $B=6, 12$  e  $24$  mm.

A figura 10 apresenta somente os resultados obtidos para  $R=0$ . Para os outros valores de  $R$ , 0.2 e 0.4, as tendências são semelhantes. Pode observar-se, que o efeito da espessura é praticamente desprezável. Também se observa a existência de alguma dispersão, que se atribui às dificuldades verificadas na determinação rigorosa de  $P_{ab}$ . A não utilização da técnica de derivação do sinal para a obtenção dos registos gráficos  $P$  versus  $dP/d\delta$  condicionou o rigor na determinação de  $P_{ab}$ .

Pode assim concluir-se, que tanto a influência da razão de tensão como da espessura são praticamente eliminadas, quando a velocidade de propagação da fenda é representada em função do valor efectivo da gama do factor de intensidade de tensões,  $\Delta K_{ef}$ .

#### 4. CONCLUSÕES

1 - Tanto a espessura como a razão de tensão apresentam influências consideráveis na velocidade de propagação, quando esta é representada em função de  $\Delta K$ . A influência de  $R$  diminui com os aumentos de  $\Delta K$  e da espessura.

2 - O parâmetro do fecho de fenda  $U$  foi determinado com base nos valores de  $P_{ab}$  obtidos experimentalmente.  $U$  aumenta com  $R$ ,  $B$  e  $\Delta K$ . Para  $R=0.4$  só foram verificados valores de fecho de fenda

( $U < 1$ ) para  $B=6$  mm e para os valores mais baixos de  $\Delta K$ .

Rates Above  $10^{-5}$  mm/cycle", Annual Book of ASTM Standarts, Part. 10, E647-82 (1982).

3 - Quando a velocidade de propagação é representada em função de  $\Delta K_{ef}$ , as influências de R e de B são praticamente eliminadas. Assim, a influência destes dois parâmetros na velocidade de propagação de fendas por fadiga no aço CK 45 parece ser causada essencialmente pelo fenómeno do fecho de fenda.

## 6. REFERÊNCIAS

- [1] Elber, W., "Fatigue Crack Closure Under Cyclic Tension", Engng Fract Mech 2, 37-45 (1970).
- [2] Schijve, J., "Four Lectures on Fatigue Crack Growth", Eng. Fract. Mech. 11, 167-221 (1979).
- [3] Fleck, N. A., "An Investigation of Fatigue Crack Closure", PHD Thesis, Pembroke College, Universidade de Cambridge (1983).
- [4] Romaniv, O. N., Track, A. N. e Lenets, Y. N., "Effects of Fatigue Crack Closure on Near Threshold Crack Resistance of Structural Steels", Fat. Fract. of Eng. Mat. Struct. 10, nº3, 263-272 (1987).
- [5] Lafarie-Frenot, M. C. , Petit, J. e Gasc, C., "A Contribution to the Study of Fatigue Crack Closure in Vacuum", Fat. Engng. Mat. Struct. 1, 431-438 (1979).
- [6] Foroughi, R., "Fatigue Resistance of Structural Steel under Randon Loading", PHD Thesis , Imperial College, Universidade de Londres (1985).
- [7] Minakawa, K., Levan, G. e McEvily, A. J., "The Influence of Load Ratio on Fatigue Crack Growth in 7090-T6 and IN9021-T4 P/M Aluminium Alloys", Met. Trans. 17 A, 1787-1795 (1986).
- [8] Elber, W., "The Significance of Fatigue Crack closure", ASTM, STP 486, 230-242 (1971).
- [9] Blom, A. e Holm, D., "An Experimental and Numerical Study of Crack Closure", Eng. Fract. Mech. 22, 997-1011 (1985).
- [10] Costa, J. D., "Análise da Tolerância de Defeitos em Ligas de Alumínio", tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra (1991).
- [11] American Society for Testing and Materials, "Constant-Load-Amplitude Fatigue Crack Growth