

Projetando à fadiga por diferentes regras e modelos de propagação¹

Juan Dias Diório²
Marcio Guimarães Marujo³

Resumo

O presente trabalho objetivou a determinação da vida em fadiga de corpos de prova do tipo compacto (**CTS**) mediante integração numérica de diferentes regras de propagação de trincas ajustadas a dados experimentais de propagação obtidos em uma fonte bibliográfica ^[1]. Para um único conjunto de dados experimentais é possível ajustar diferentes regras de propagação (Paris, Elber, Forman, Priddle, Walker, Hall, etc). Como a vida calculada depende da função da/dN e esta pela sua vez dos parâmetros de ajuste de cada regra, uma comparação entre as vidas experimentais e as calculadas numericamente permite definir qual das regras deve ser utilizada no projeto para o material em questão.

Palavras chaves: fadiga, regras de propagação da trincas, mecânica da fratura.

PROJECTING TO THE FATIGUE FOR DIFFERENT RULES AND MODELS OF PROPAGATION

Abstract

This present work objectified the determination of the life in fatigue of bodies of test of the compact type (CTS) by means of numerical integration of different rules of propagation of crack adjusted the experimental data of propagation gotten by the authors. For an only experimental data set it is possible to adjust different rules of propagation (Paris, Elber, Forman, Priddle, Walker, Hall, etc). As the calculated life depends on the function da/dN and this for its time of the parameters of adjustment of each rule, a comparison between the experimental and calculated lives numerically allows to define which of the rules must be used in the project for the material in question.

Key Words: fracture mechanics, fatigue, crack propagation

¹ 61º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM), Rio de Janeiro (RJ), Julho 24 – 27, 2006

² Graduando de Engenharia Mecânica/Universidade Federal Fluminense

³ Graduando de Engenharia Mecânica/Universidade Federal Fluminense

Introdução

Por muitos anos, a fadiga tem sido um problema significativo e muito difícil para os engenheiros, especialmente para quem projeta estruturas de aviões, pontes, etc. A fadiga de materiais da engenharia é considerada um processo importante da deterioração e uma falha principal para vários sistemas estruturais e sistemas mecânicos. Acredita-se que entre 50 e 90 por cento ^[2] de todas as falhas mecânicas em estruturas metálicas está relacionada à fadiga.

Atualmente os profissionais da área de desenvolvimento de materiais, trabalham com os fatores básicos como a composição da liga, o tratamento térmico e o funcionamento mecânico para tentar produzir os materiais que possuem a resistência elevada da fadiga. O sucesso destes esforços depende do nível de conhecimento utilizado nas áreas de pesquisa e desenvolvimento das empresas do setor.

O fenômeno de iniciação de trincas por fadiga resulta do processo de deformação plástica. A experiência mostra que a trinca se inicia em regiões de concentração de deformação plástica.

Na figura 1 são ilustrados os dois estágios de ruptura por fadiga. No estágio 1, a trinca se inicia na superfície e se propaga em uma direção paralela às máximas tensões tangenciais, num processo controlado pelas tensões de Mises ou Tresca. Após a microtrinca ter alcançado um tamanho, da ordem alguns grãos nos materiais metálicos, elas chega ao estágio 2. O segundo estágio é caracterizado por uma propagação de trinca que se dá em direção perpendicular à direção da maior tensão principal. A transição do estágio 1 para o estágio 2 é marcada por uma redução da tensão de cisalhamento e um aumento da tensão normal.

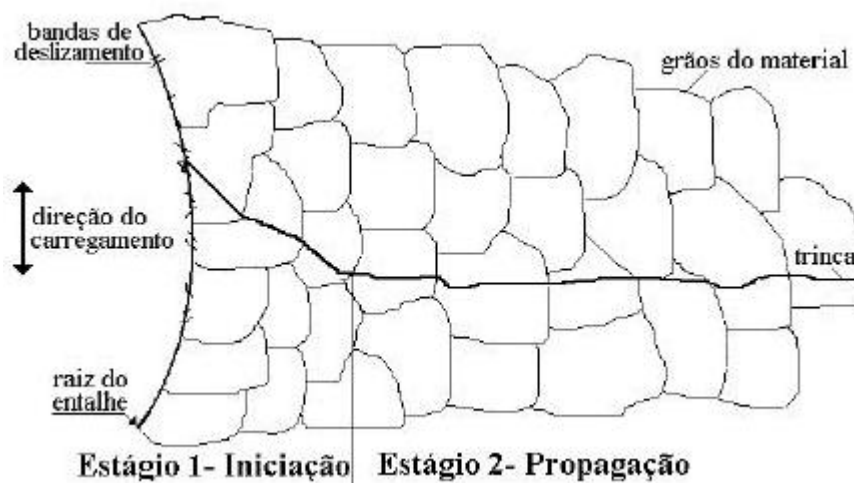


Figura 1 – Esquema dos períodos de iniciação e propagação da trinca por fadiga ^[3]

A importância do ΔK como fator controlador da taxa de propagação de trincas foi demonstrado por Paris ^[4], em 1962, Foram analisados os dados de ensaios de propagação feitos em chapas trincadas de alumínio de alta resistência. Uma chapa foi carregada longe da trinca, enquanto a outra chapa foi carregada nas faces da trinca, figura 2. A gama de variação da tensão nominal foi constante e igual em ambos os casos. Na primeira chapa, a gama de variação do fator de intensidade das tensões ΔK aumenta com o aumento do tamanho da trinca. Correspondentemente, as taxas de propagação, da/dN , serão baixas ao início e altas no final do ensaio. Na segunda chapa, poderia prever-se que, se o ΔK controla a taxa da/dN , esta seria alta no início e diminuiria com o crescimento da trinca. Esta reversão no

comportamento da taxa de propagação não poderia ser prevista se o crescimento fosse controlado por outro fator, como por exemplo, a tensão na seção restante, que aumenta para as duas configurações de carregamento, na medida em que a trinca cresce. De fato, os experimentos confirmam a reversão predita no comportamento devido à dependência Δa . A chapa carregada nas faces da trinca exibe os mais altos valores de da/dN , ao começo do teste, quando o tamanho da trinca é pequeno e vai diminuindo na medida que a trinca cresce. O contrário acontece para a chapa carregada nos extremos.

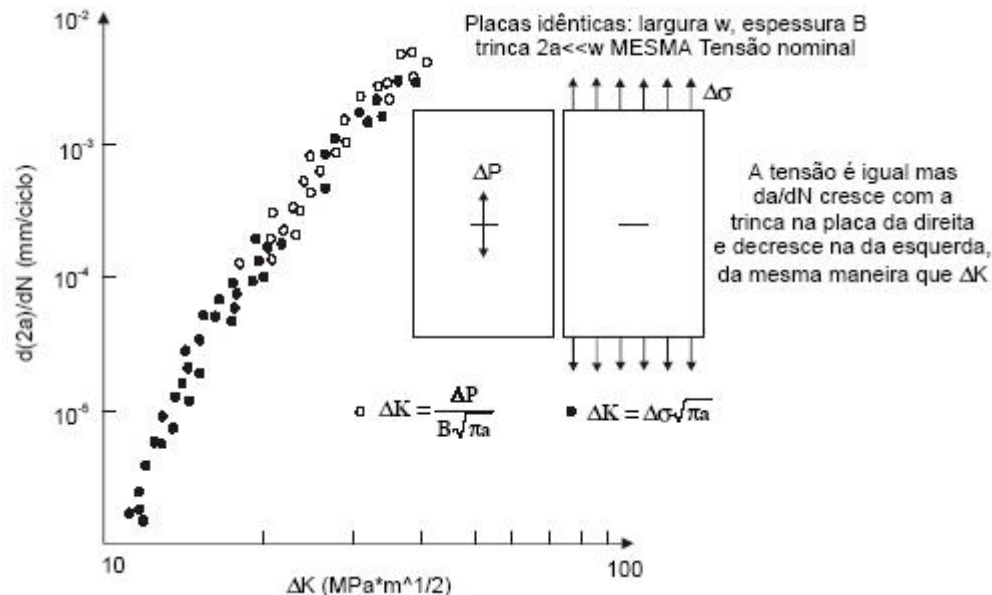


Figura 2 - Dada de Paris que demonstram ser o fator de intensidade das tensões e não a tensão que controla a propagação das trincas ^[3]

Para um determinado material e condições de ensaio, tais como um valor particular de **R** (Razão de assimetria), frequência do teste e condições ambientais, as taxas de crescimento dependeram apenas do valor de ΔK . Isto porque **K** caracteriza a severidade das combinações de carregamento, geometria e tamanho da trinca, enquanto que ΔK realiza as mesmas funções para o carregamento alternado. Por esta razão, todos os dados obtidos sob as mesmas condições de ensaio, deveriam cair numa única curva, em gráficos da/dN vs ΔK . Isto ocorre para diferentes níveis de carregamento e comprimentos de trinca.

As curvas da/dN vs ΔK , quando plotadas em escala logarítmica, possuem uma forma sigmoideal característica, com três fases bem distintas, como mostrado na figura 3.

Curva de Propagação de Trincas por Fadiga Típica

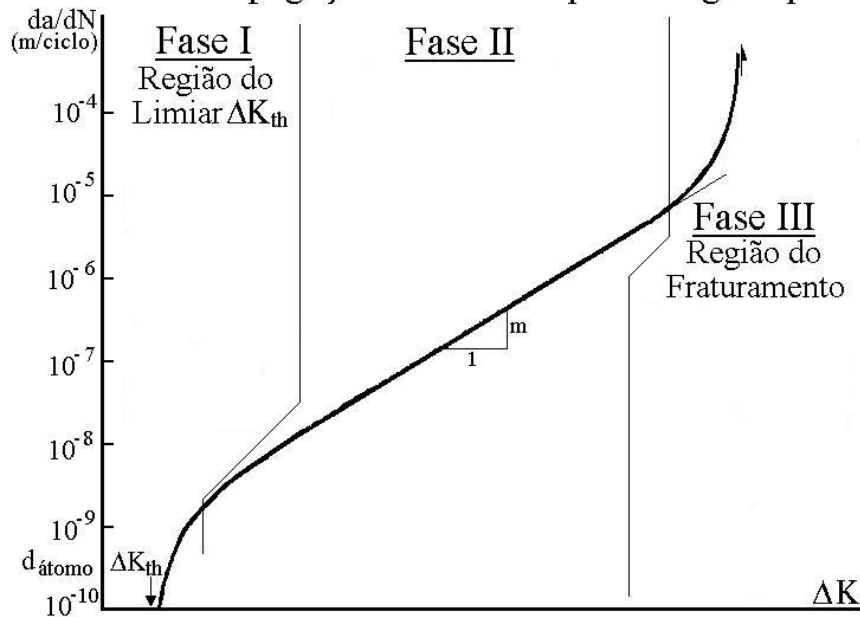


Figura 3 – Curva Típica de propagação de trinca por fadiga ^[3]

A fase I é caracterizada por mecanismos descontínuos de crescimento e com a existência de um limiar de propagação ΔK_{th} , abaixo do qual não ocorre propagação de trinca. A fase I é muito sensível à microestrutura do material e ao meio ambiente.

Na fase II, o crescimento é controlado por mecanismos contínuos, pouco sensíveis à microestrutura, ao meio ambiente e à espessura da peça. A equação de Paris ajusta bem os dados experimentais nesta fase. O crescimento é controlado, primariamente, pela gama de deformações elastoplásticas cíclicas na frente da trinca.

Na fase III, ocorre a propagação instável da trinca ou rasgamento da peça, quando o valor de K_{max} atinge a tenacidade à fratura do material. Este processo é chamado de fraturamento, para diferenciá-lo do crescimento lento ou trincamento, que é progressivo e estável, como ocorre nas fases I e II. O fraturamento ocorre por clivagem ou coalescência de cavidade. É possível que nesta fase sejam excedidas a condição de deformação plana na frente da trinca, visto que, na medida em que o tamanho da trinca aumenta.

Quando a carga máxima supera aproximadamente 80% da carga de colapso plástico, o crescimento da trinca se incrementa rapidamente, desviando-se do comportamento esperado.

O presente trabalho está dividido em duas partes. Em uma primeira parte se faz o ajuste das diversas regras de propagação utilizadas aos dados experimentais, o que permite encontrar os parâmetros de cada regra. De posse destas “propriedades” do material, que são função da regra utilizada, procede-se a determinar a vida em fadiga do espécime testado. Pela complexidade do integrando foi necessário elaborar um pequeno código de maneira a poder efetuar a integração numérica.

Resultados Experimentais

Os dados de propagação de trincas por fadiga de dois espécimes de aço 1020 bem como outras propriedades mecânicas, S_y , e.g., e de tenacidade K_{IC} , e.g., deste material (ver tabela 1) foram obtidos das referências bibliográficas ^[1]. Na realização dos ensaios de propagação o ΔP foi mantido constante nos dois espécimes, o que caracteriza ensaios de ΔK crescente.

Tabela 1 – Dados utilizados para determinação da vida em fadiga

Espessura do corpo de prova - B(m)	0,01
Largura do corpo de prova - W(m)	0,05
Limite de escoamento - S_y (MPa)	300
1º valor de ΔP para corpo de prova 1 (j_1) (KN)	3,41
2º valor de ΔP para corpo de prova 2 (j_4) (KN)	3,47
Tenacidade à fratura - K_{IC} (MPa*m^{1/2})	250
Tamanho inicial da trinca - a_i (m)	0,0123
Tamanho final da trinca - a_f (m)	0,0334
ΔK_{th} (MPa*m^{1/2})	6
Razão de assimetria	0,1

Resultados e Discussões

Em posse dos dados experimentais de propagação do aço 1020 para os dois CPs são determinados os parâmetros de cada uma das regras utilizadas neste trabalho. Para a determinação destes parâmetros é necessário o ajuste de cada regra de propagação aos dados experimentais. Para obter um ajuste preciso foi utilizado o software microcal Origin 6.0™. Os resultados se mostram na figura 4 e as constantes de ajuste estão resumidas na tabela 2.

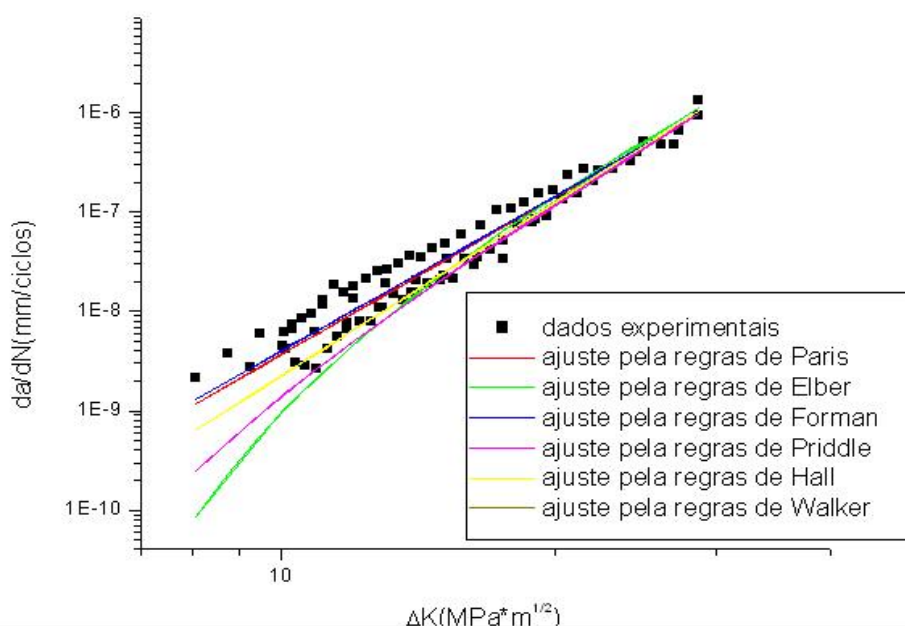


Figura 4 - Ajuste dos dados experimentais para diferentes regras

Tabela 2 – Regras de propagação de trinca com suas respectivas regras e constantes

Regras	Equações	Constantes	
Paris	$\left(\frac{da}{dN}\right)_{\text{Paris}} = C_p (\Delta K)^{m_p}$	Cp	1,913e-14
		mp	5,28363
Elber	$\left(\frac{da}{dN}\right)_{\text{Elber}} = C_E \left(\frac{\Delta K - \Delta K_{th}}{(1-R)}\right)^{m_E}$	Ce	1,25e-12
		me	4,35
Forman	$\left(\frac{da}{dN}\right)_{\text{Forman}} = \frac{C_F \Delta K^{m_F}}{[(1-R)K_C - \Delta K]}$	Cf	6,6125e-12
		mf	5,11607
Priddle	$\left(\frac{da}{dN}\right)_{\text{Priddle}} = C_{Pr} \left[\frac{\Delta K - \Delta K_{th}}{K_C - K_{max}}\right]^{m_{Pr}}$	Cpr	0,00082
		mpr	3,06362
Hall	$\left(\frac{da}{dN}\right)_{\text{Hall}} = C_H \Delta K^{m_H} \left[\frac{\Delta K - \Delta K_{th}(1-R)}{(1-R)}\right]^{p_H}$	Ch	2,35e-14
		mh	3,54
		Ph	1,74
Walker	$\left(\frac{da}{dN}\right)_{\text{Walker}} = C_W \Delta K^{(m_W+p_W)} \left[\frac{1}{(1-R)}\right]^{p_W}$	Cw	3,95e-15
		mw	4,37
		Pw	1,45

A partir das constantes relativas a cada regra de propagação (tabela 2) e utilizando os dados da tabela 1 (tamanho inicial a_i e final da trinca a_f , valores de ΔP e ΔK_{th}), a segunda etapa do trabalho que tem como objetivo determinar a vida em fadiga, ou seja, determinar o número de ciclos que uma trinca em um espécime do

tipo utilizado nos ensaios C(T), do mesmo material (aço 1020) vai consumir para se propagar entre a_i e a_f .

Para os cálculos da vida em fadiga segundo as regras ajustadas neste trabalho será necessário utilizar o método proposto por Broek ^[5]. Segundo este autor se o carregamento é do tipo amplitude constante, a integração para a determinação do número de ciclos (vida à fadiga), pode ser feita numericamente com pequenos passos de iteração, minimizando os erros. O tamanho do passo precisa ser tomado como um incremento de tamanho de trinca igual a 1% do tamanho atual da trinca.

Implementando esta idéia de integração numérica no software Maple 6™ foi possível calcular o N entre a_i e a_f , como mostrado na figura 5.

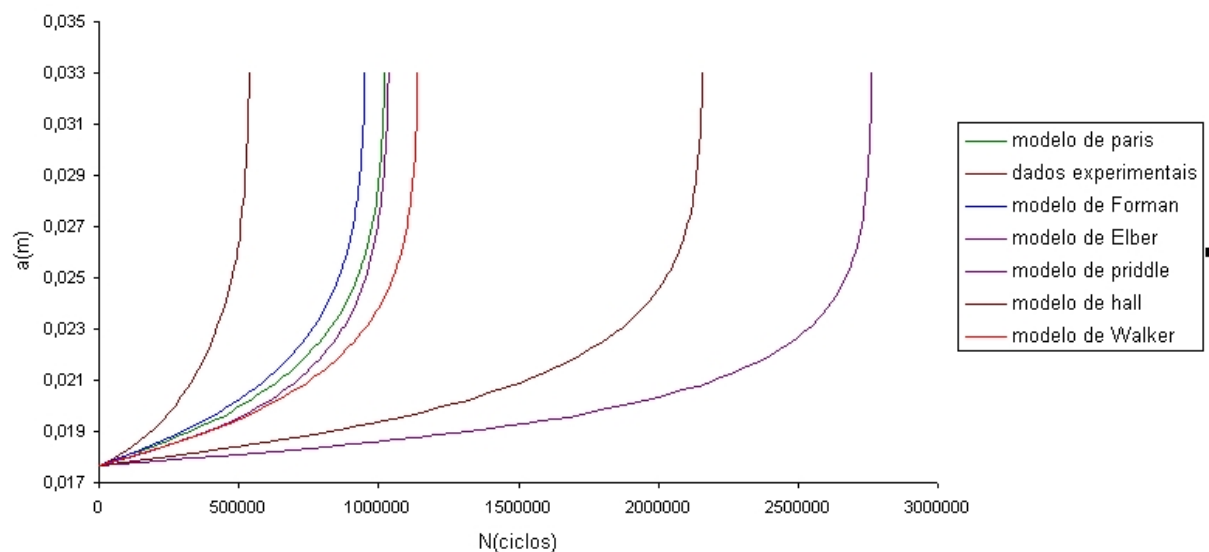


Figura 5 – Gráfico com numeros de ciclos para referente a cada regra

As previsões ficam mais conservativas quando ajustamos à curva da/dn vs ΔK para mais de um CP. Isto porque a correlação no ajuste dos dados $da/dN \times \Delta K$ para mais de um CP tende a diminuir, como mostrado nas figuras 6, 7 e 8 e na tabela 3.

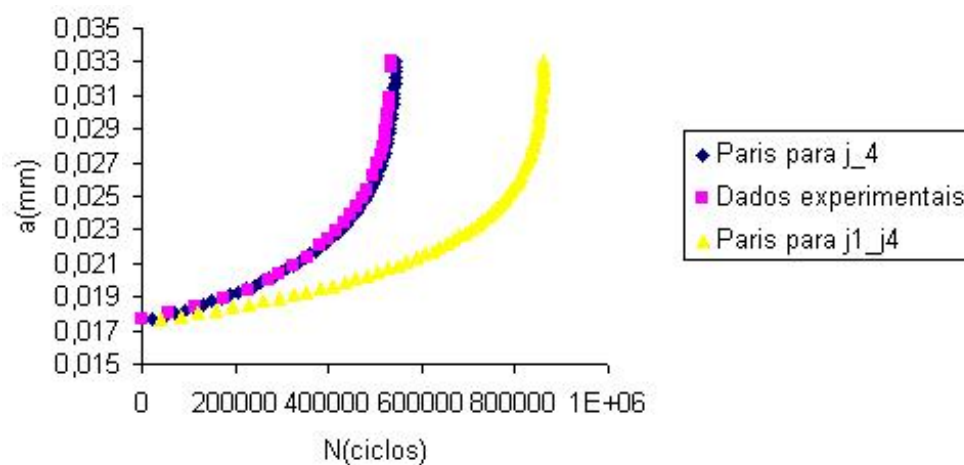


Figura 6 – Gráfico que indica a diminuição da correlação quando unimos dois corpos de prova.

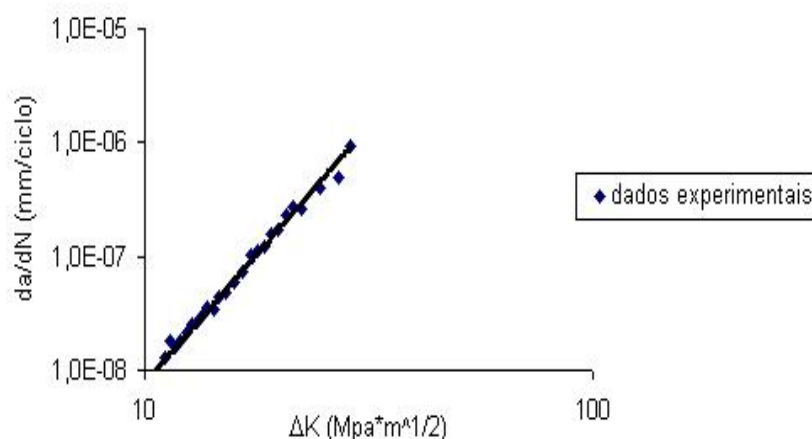


Figura 7 – Gráfico de correlação do ajuste para um corpo de prova

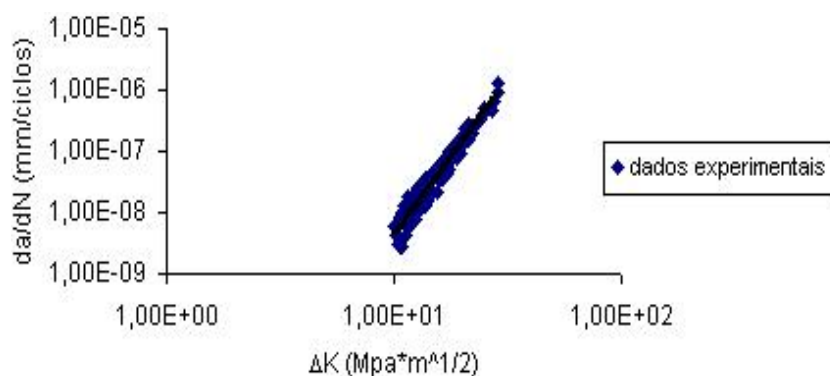


Figura 8 – Gráfico de correlação do ajuste para dois corpos de prova

Tabela 3-Correlação das figuras 7 e 8, respectivamente.

Correlação com um corpo de prova	0,9909
Correlação com dois corpos de prova	0,9372

As curvas **da/dN** vs **ΔK** permitem unificar os dados **a** vs **N** obtidos com diferentes **ΔP**'s em diferentes **CP**'s. Isto porque o **ΔK** representa campos de tensões que incluem a influencia do **ΔP**, geometria, distâncias até as superfícies livres, etc.

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} f\left(\frac{a}{w}\right)$$

As constantes da curva **da/dN** vs **ΔK** são propriedades do material . A integração da regra que melhor ajusta os resultados experimentais fornece a vida em fadiga de estruturas daquele material desde que se conheça o **ΔK** solicitante. Aplicando este principio deveríamos ser capazes também de reproduzir as curvas **a** vs **N** que deram origem à curva **da/dN** vs **ΔK**. Quando juntamos dados de vários espécimes numa curva **da/dN** vs **ΔK**, no entanto, observamos que, ao diminuir a correlação entre os dados experimentais e a curva de ajuste (**da/dN** vs **ΔK**) a curva **a** vs **N** prevista vai ficando mas à direita, ou seja, mais conservativa. Isto ocorre para as diversas regras ajustadas exceto a de Walker.

Conclusões

O trabalho apresenta diferentes modelos de ajuste de regras de propagação (Paris, Elber, Forman, Priddle, Walker, Hall, etc). Foi mostrada a metodologia de obtenção dos resultados, sendo capazes agora de reproduzir as curvas **a** vs **N** que deram origem à curva **da/dN** vs **ΔK** com qualidade significativa nas previsões dos diferentes modelos.

Agradecimentos

- A Deus em primeiro lugar.
- A FAPERJ pela contribuição financeira que ajudam tantos pesquisadores a dar seguimento as pesquisas.
- Ao professor Jorge Alberto Rodríguez Durán, da Universidade Federal Fluminense, pela orientação e conhecimento para durante a pesquisa.
- Aos meus amigos pela ajuda nas horas de dificuldades.
- A minha família pela compreensão nos momentos de ausência.

Referencias Bibliográfica

- [1] Durán, J.R. “**Caracterização do comportamento mecânico mediante ensaios de tração, fadiga de baixo ciclo e propagação de trincas por fadiga de aço**” 1020. Relatório Técnico, PUC-Rio, R.J., maio de 2002
- [2] SOBCZYK, K. SPENCER, B.F. Jr. (1992). **Random Fatigue**. Academic Press, Inc. San Diego, CA, 264 pp.
- [3] Durán, Jorge A. R. **Modelos de Acúmulo de Dano por Plasticidade Cíclica para Previsão de Taxas de Propagação de Trincas por Fadiga**. Rio de Janeiro, 2001. 223 p. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.
- [4] Paris, C. P. **The growth of fatigue cracks due to variations in load**. Ph. D. Dissertation, Lehigh University, 1962.
- [5] Broek, D. **The Practical use of Fracture Mechanics**. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 1988.
- [6] Paris, C.P., Tada, Hiroshi, Donald, K. J. **Service load fatigue damage – a historical perspective**. International Journal of Fatigue, 12 p., 1999.
- [7] CASTRO, J.T. MEGGIOLARO, M.A (2000). “Automation of The Fatigue Design Under Complex Loading”. In: **1º Seminário de Fadiga da SAE Brasil, Seção São Paulo**. FEI – Faculdade de Engenharia Industrial, S.B. do Campo, SP – Brasil.
- [8] CASTRO, J.T. MEGGIOLARO, M.A (1997 a). **Uma Nota sobre Modelagem da Curva de Propagação de Trincas de Fadiga**. PUC - Rio.
- [9] CHAND, S. GARG, B.L. (1985). “Crack Propagation under constant amplitude loading”. **Engineering Fracture Mechanics**, vol. 21, Nº 1, pp 1-30.