

Tenacidade à Fratura e Propagação de Trinca de Fadiga de uma Superliga INCONEL 600

L.B. GODEFROID ¹, J.A. M.LOPES ², K.S. AL-RUBAIE ³

¹ REDEMAT - Universidade Federal de Ouro Preto Ouro Preto, MG, Brasil

e-mail: leonardo@demet.em.ufop.br

² Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN/CNEN Belo Horizonte, MG, Brasil

e-mail: jaml@cdtn.br

³ EMBRAER - São José dos Campos, SP, Brasil

e-mail: kassim.rubaie@embraer.com.br

RESUMO

No presente trabalho procurou-se verificar a tenacidade à fratura e a resistência à propagação de trinca de fadiga de uma superliga de níquel do tipo INCONEL 600. Trata-se de uma liga Ni-Cr-Fe, utilizada em componentes internos de geradores de energia termonuclear. Corpos-de-prova do tipo C(T) foram confeccionados no sentido longitudinal de conformação mecânica, com espessura de 7 mm e relação B/W (espessura por largura) igual a 1/4. Os ensaios foram realizados na temperatura ambiente. Os ensaios de tenacidade à fratura tiveram como objetivo a determinação da curva de resistência integral J versus incremento de trinca Δa e o valor crítico J_i de iniciação de crescimento de trinca. Foi determinado também o valor de CTOD de carga máxima. Estes ensaios foram realizados de acordo com a Norma ASTM E 1820. Os ensaios de fadiga foram realizados para a determinação da taxa de propagação de trinca da/dN em função da força motriz ΔK de propagação de trinca de fadiga, desde o limiar de propagação até a fratura. Os ensaios foram realizados para R (razão entre tensões) igual a 0,1, de acordo com a Norma ASTM E 647. Os resultados mostraram valores elevados para as propriedades estudadas, indicando que o material atende as especificações para utilização na indústria termonuclear. Observou-se que a técnica da normalização para modelamento da curva de resistência $J-\Delta a$ é conservadora, necessitando de correção. Observou-se também que o modelo matemático de Colli Priest representa bem a forma sigmoidal da curva $da/dN \times \Delta K$.

Palavras chaves: INCONEL 600, tenacidade, propagação de trinca, modelamento.

Fracture Toughness and Fatigue Crack Propagation of an INCONEL 600 SuperAlloy

ABSTRACT

Fracture toughness and fatigue crack growth have been investigated at ambient temperature and in laboratory air for a nickel-based superalloy, INCONEL 600. C(T) specimens of 7mm thickness and 28mm width were used. It was shown that the alloy exhibited good mechanical properties. The normalization method to develop a $J-R$ curve showed conservative results. The Colli Priest mathematical function is a reasonable model to predict $da/dN \times \Delta K$ behavior.

Keywords: INCONEL 600, fracture toughness, fatigue crack growth, modelling.

1 INTRODUÇÃO

Durante a operação das geradoras elétricas termonucleares baseadas em reatores a água pressurizada (PWR), seus componentes (vaso de pressão, tubulações, trocadores de calor, geradores de vapor, válvulas, etc.) sofrem continuamente a ação de radiação e líquidos de refrigeração a alta temperatura (~320°C) e pressão (~150 bar). Estas condições provocam ciclos térmicos, vibrações mecânicas e ambientes agressivos, que combinados ou isoladamente são responsáveis pelo aparecimento de mecanismos de degradação, tais como fadiga térmica ou mecânica, corrosão sob tensão, fragilização por neutrons, etc. O envelhecimento dos materiais submetidos a estas condições acontece contínua e ininterruptamente. O conhecimento do histórico de operação das centrais combinado com as propriedades dos materiais permite que decisões com respeito a

reparos, manutenção preventiva ou troca de componentes sejam tomadas da maneira mais segura e econômica para a operação.

A vida útil de uma central PWR é projetada para aproximadamente 40 anos, podendo ser estendida (nos EUA esta extensão tem sido de aproximadamente 20 anos), desde que condições econômicas e de segurança sejam atendidas. A estimativa deste tempo residual de vida deve ter como base a análise de danos acumulados, as causas destes danos e as condições de operação do componente. Entre os mecanismos de danos a que são submetidos muitos componentes dos reatores um dos mais significativos é o fenômeno da corrosão. O emprego de materiais nobres como os aços inoxidáveis e as superligas de níquel impedem o aparecimento da corrosão generalizada; porém estes materiais podem sofrer danos pelos fenômenos de corrosão localizada, tais como, corrosão sob tensão, corrosão intergranular, corrosão por pites e em fendas. As principais variáveis envolvidas nestes fenômenos são aquelas relacionadas às características físico-químicas do refrigerante, a estrutura e as propriedades do material e o estado de tensões a que foi submetido o componente. O controle químico da água de refrigeração é um dos parâmetros operacionais, sendo conseqüentemente muito explorado como opção de soluções de problemas reais ou potenciais destas instalações.

Superligas a base de níquel são conhecidas desde a década de 1930, e utilizadas principalmente em aplicações aeroespaciais e plantas de geração de energia [1,2]. Estas aplicações requerem um material com elevada resistência mecânica, boa resistência à fadiga e à fluência, boa resistência à corrosão e capacidade de operar continuamente em elevadas temperaturas. Trata-se de ligas que contêm de 30% a 75% de níquel, e até 30% de cromo, endurecidas por solução sólida e por precipitação. As ligas endurecidas por solução sólida são geralmente usadas na condição de recozimento. Algumas denominações são Hastelloy-X, Inconel 600, Inconel 617, Inconel 625, etc. As ligas endurecidas por precipitação contêm alumínio, titânio ou nióbio, para causar a precipitação de uma segunda fase durante um apropriado tratamento térmico. Algumas denominações são Astrolloy, Inconel 718, Nimonic 80A, René 41, Udimet 500, Waspalloy, etc.

A corrosão sob tensão de componentes internos ao vaso de pressão, tais como: suportes de elementos combustíveis, tubos-guia de varetas de controle, suportes de instrumentação, bem como os tubos trocadores de calor dos geradores de vapor, etc. construídos com a superliga Inconel 600 podem ser minimizados com mudanças na química da água dos reatores. Como a ELETRONUCLEAR tenciona fazer interferências nestas variáveis e estas precisam ser feitas com as garantias devidas, ela encomendou ao CDTN/CNEN um estudo sobre alguns aspectos destas mudanças. Os trabalhos envolvem a submissão de corpos de prova deste material as condições de operação dos reatores, utilizando uma instalação com temperatura e pressão semelhantes as existentes no núcleo do reator e provida de facilidades para a realização de ensaios de deformação lenta. A resposta do material à variação da química da água quando submetido aos ensaios será uma informação importante para a tomada de decisão quanto a adoção dos procedimentos.

Por outro lado, a caracterização da referida superliga quanto a composição química, microestrutura, propriedades mecânicas convencionais (ensaios de tração e dureza), e estudos mais aprofundados sobre a tenacidade a fratura e a resistência à fadiga devem constituir o passo inicial deste projeto. Assim, o presente trabalho forneceu resultados importantes sobre esta caracterização preliminar.

2 MATERIAL E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

O material estudado foi uma superliga INCONEL 600, fornecida na forma de chapa de 7 mm de espessura, e cuja composição química está apresentada na Tabela 1. Trata-se de uma liga de níquel endurecida por solução sólida, cuja composição química atende à especificação padronizada [2].

Tabela 1 - Composição química de chapa de Inconel 600.

C	S	Fe	Cr	Ni
0.070%	0,0007%	9,46%	13,92%	70,12%

Para a caracterização microestrutural o material foi embutido a quente, polido mecanicamente até pasta de diamante de 1µm e submetido a ataque eletroquímico com solução de ácido fosfórico a 10% num equipamento modelo LECTROPOL, da marca STRUERS.

As propriedades mecânicas convencionais foram determinadas através de ensaios de dureza Vickers, segundo norma NBR 6672, e tração à temperatura ambiente, segundo a norma ASTM E-8M [3]. Os ensaios de dureza realizados foram Dureza Vickers, utilizando um durômetro Wolpert, com um carregamento de 196 N e tempo de ação da força de 30s. Os ensaios de tração foram realizados numa máquina de ensaios universal Instron, com capacidade de 100kN, velocidade da máquina de 2 mm/min.

Os ensaios de tenacidade à fratura e de fadiga foram realizados numa máquina servo-hidráulica MTS de 10 ton, com controle computacional, e aquisição de dados de tamanho de trinca pela técnica da flexibilidade elástica, respectivamente segundo as normas ASTM E-1820 [4] e ASTM E-647 [5]. Corpos-de-

prova do tipo C(T) foram confeccionados no sentido longitudinal de conformação mecânica, com espessura de 7 mm e relação B/W (espessura por largura) igual a 1/4. Os ensaios foram realizados na temperatura ambiente. A Figura 1 mostra um detalhe da montagem de um corpo-de-prova na máquina de ensaios.

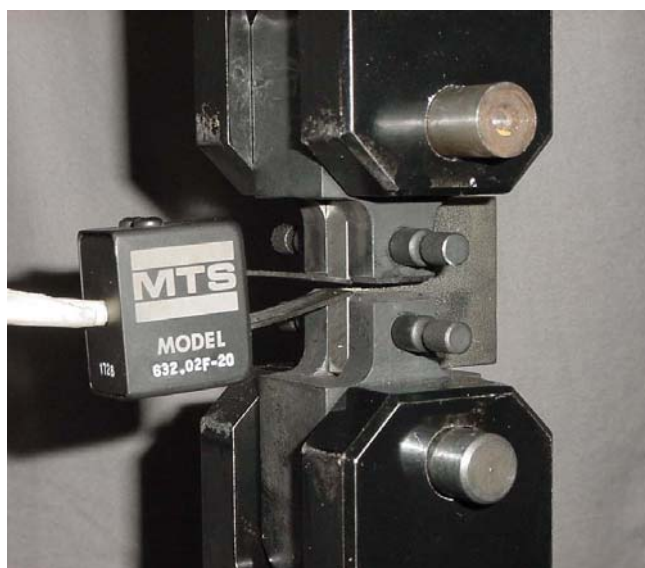


Figura 1: Montagem de um corpo-de-prova na máquina de ensaios.

Os ensaios de tenacidade à fratura tiveram como objetivo a determinação da curva de resistência *integral J* versus incremento de trinca Δa e o valor crítico J_i de iniciação de crescimento de trinca, pela técnica de apenas um corpo-de-prova. Estes ensaios foram realizados em corpos-de-prova com entalhe lateral de 20% de redução de espessura. Foi determinado também o valor de CTOD de carga máxima. Foram realizados três ensaios, sempre numa velocidade constante de deslocamento de 0,25 mm/min. Os ensaios de fadiga foram realizados para a determinação da taxa de propagação de trinca da/dN em função da força motriz ΔK de propagação de trinca de fadiga, desde o limiar de propagação até a fratura. Foram realizados dois ensaios, para R (razão entre tensões) igual a 0,1, sempre na frequência de 30 Hz. A fratura foi realizada em um microscópio eletrônico de varredura - MEV, modelo JEOL JSM 5510.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A microestrutura da superliga estudada está apresentada na Figura 2. Pode-se notar uma estrutura de grão heterogênea. A medida do tamanho de grão foi feita com o analisador de microestrutura Quantykov e apresentou o valor de diâmetro médio igual a 14 μ m com um desvio padrão de 9 μ m. Para o Quantykov este grandeza representa o valor do diâmetro de um círculo de área equivalente ao grão analisado. Para este diâmetro tem-se então aproximadamente 6500 grãos/mm² ou seja um tamanho de grão próximo a ASTM N°10.

As propriedades mecânicas convencionais estão apresentadas na Tabela 2. Percebe-se uma liga levemente encruada [2].

A tenacidade à fratura está apresentada na Figura 3, através da curva de resistência *integral J* versus Δa (curva média). A Tabela 3 mostra os valores de J_i e de δ_{max} para esta superliga. Observa-se que este material possui uma elevada tenacidade à fratura. Obteve-se também o valor de tenacidade à fratura K_{Ic} , que é 40,08 MPa \sqrt{m} .

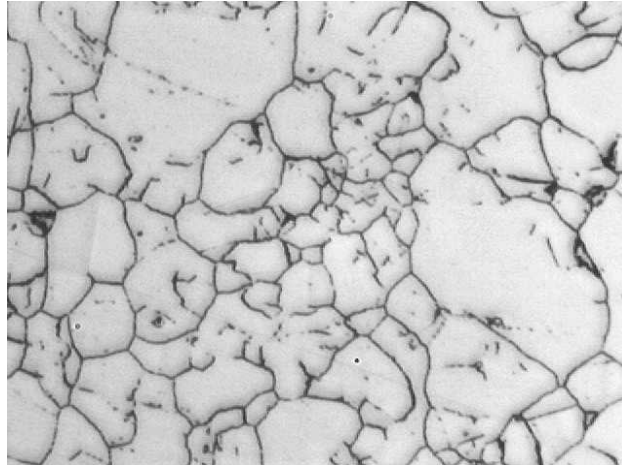


Figura 2 - Microestrutura da superliga Inconel 600, ataque eletrolítico com ácido fosfórico a 10% . (400X)

Tabela 2- Propriedades mecânicas de Inconel 600.

Limite Resistência		Limite Escoamento		Alongamento	Dureza
kgf/mm ²	MPa	kgf/mm ²	MPa	%	HV
70,0	687	39,4	386	33,5	224

Tabela 3- Tenacidade à fratura de Inconel 600.

J _i (kJ/m ²)	δ _{max} (mm)
518,033 ± 73,411	0,846 ± 0,049

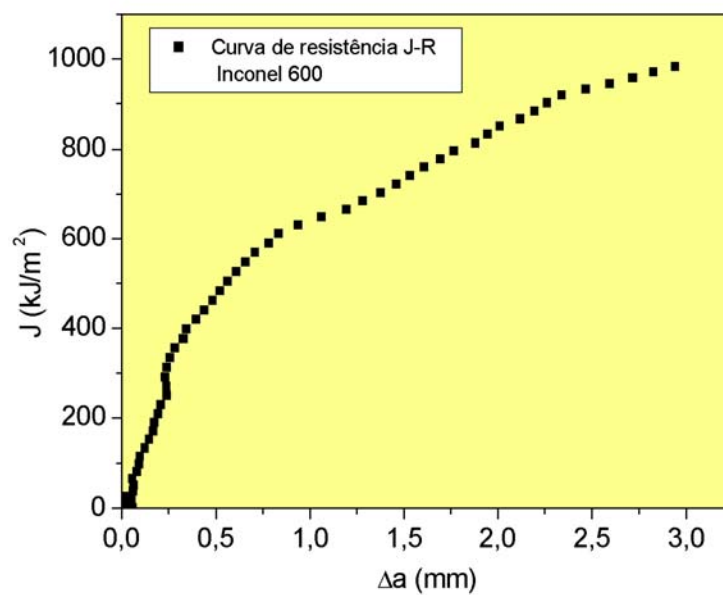


Figura 3: Curva de resistência integral J x incremento de trinca Δa para a superliga Inconel 600.

As Figuras 4 e 5 mostram, respectivamente, as microfratografias dos ensaios de integral J e de CTOD de carga máxima, sempre para um tamanho de trinca 0,5mm à frente do entalhe do corpo-de-prova. Pode-se notar em ambos os casos uma fratura dúctil, com mecanismo de nucleação, crescimento e coalescimento de microcavidades.

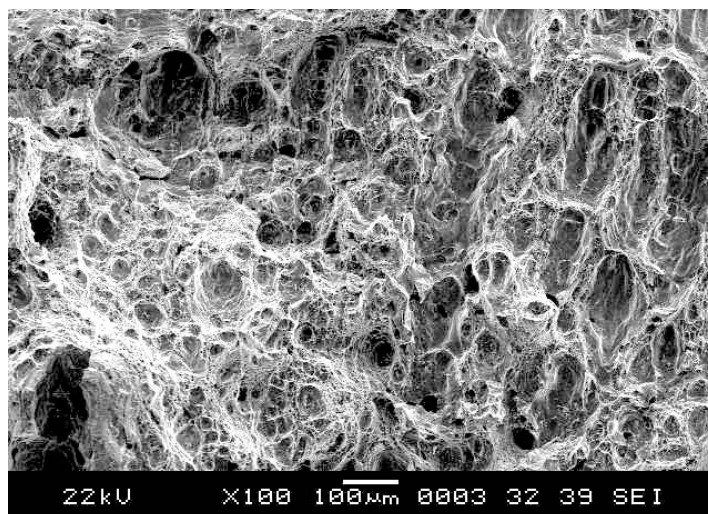


Figura 4: Microfratografia de ensaio de integral J, 0,5mm à frente do entalhe. 100X.

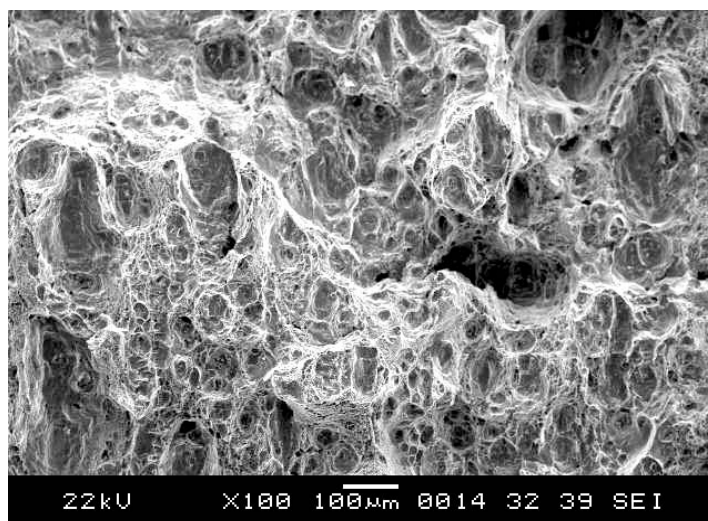


Figura 5: Microfratografia de ensaio de CTOD, 0,5mm à frente do entalhe. 100X.

A Figura 6 mostra uma tentativa de modelamento da curva de resistência, a partir do método da normalização, conforme proposição de Landes e colaboradores [6-9]. Este método foi proposto como uma técnica para obtenção das curvas J-R a partir de registros carga versus deslocamento, sem a necessidade de equipamento para a monitoração automática do crescimento de trinca. Para superligas que trabalham em elevadas temperaturas esta técnica torna-se bastante interessante. O método da normalização é adotado pela ASTM [4]. Recentemente, uma revisão sobre este método foi publicada [10].

No presente caso, observa-se que a previsão do comportamento do material pela normalização conduz a resultados mais conservadores do que o método direto. Resultados semelhantes foram encontrados por Fortes [11] e por Rodrigues [12], indicando que esta metodologia, embora prevista pela ASTM, precisa ser revista e adaptada.

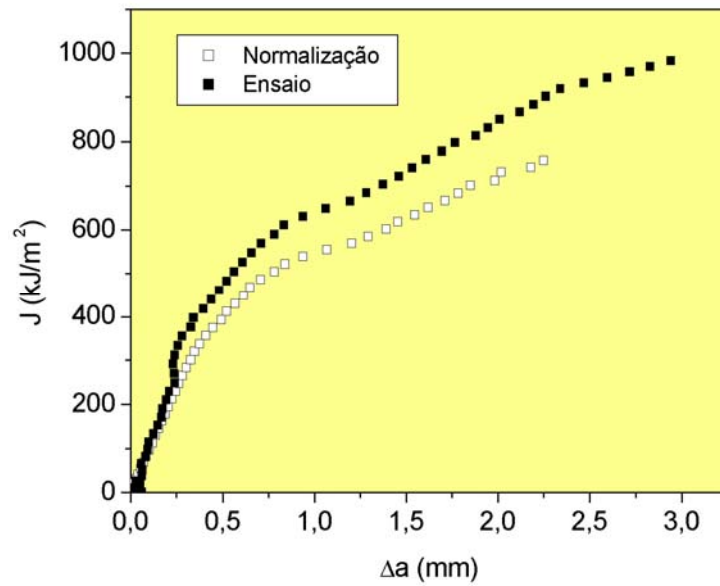


Figura 6: Comparação entre resultados experimentais e a técnica da normalização para a superliga Inconel 600.

A resistência à propagação de trinca de fadiga está mostrada na Figura 7, através da curva de velocidade da trinca da/dN versus fator cíclico de intensidade de tensões ΔK . Para este caso, tem-se um valor do limiar ΔK_{th} de $6,38 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, o que indica um material de relativa elevada resistência à fadiga. Esse valor foi determinado de acordo com a norma ASTM E 647 [5].

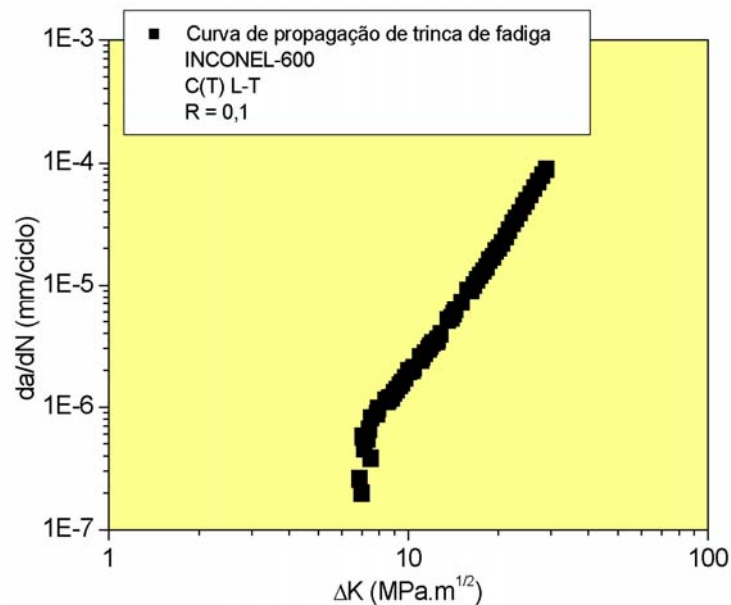


Figura 7: Curva de propagação de trinca de fadiga, superliga Inconel 600.

As Figuras 8 e 9 mostram as microfratografias do ensaio de fadiga, respectivamente para a região do limiar de propagação de trinca ($da/dN \approx 10^{-7} \text{ mm/ciclo}$) e para a região linear de propagação de trinca ($da/dN \approx 10^{-5} \text{ mm/ciclo}$). Observa-se claramente a diferença de morfologia de fratura. Na região do limiar prevalece o mecanismo de propagação cristalográfica e facetada, enquanto que na região linear a propagação envolve o

mecanismo de estrias de fadiga. Esta diferença de comportamento em superligas de níquel tem sido verificada por diversos pesquisadores [13-22].

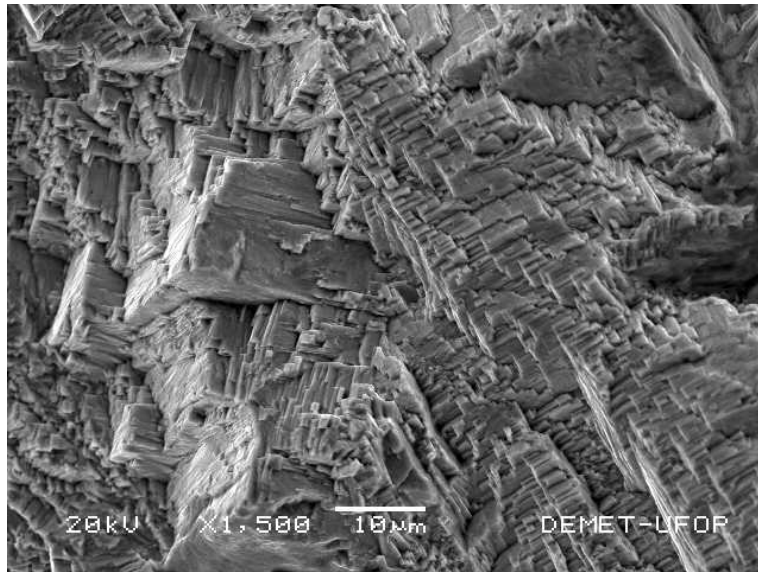


Figura 8: Microfratografia de ensaio de fadiga, $da/dN \approx 10^{-7}$ mm/ciclo. 1500X.

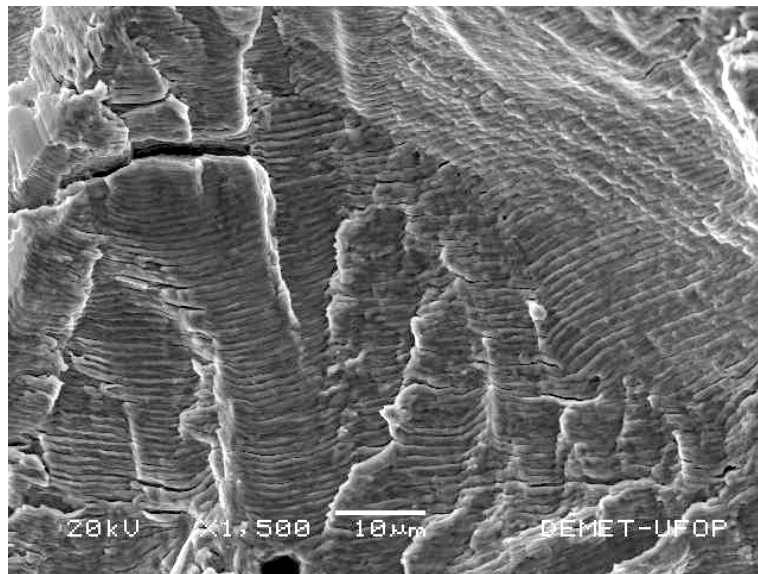


Figura 9: Microfratografia de ensaio de fadiga, $da/dN \approx 10^{-5}$ mm/ciclo. 1500X.

A Figura 10 mostra o modelamento da curva de propagação de trinca de fadiga, com a utilização dos modelos de Paris e Erdogan [23], Forman et al. [24] e Collipriest [25-26].

O modelo do Paris [23] pode ser descrito como:

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^n \tag{1}$$

Onde C e n são parâmetros do modelo, sendo que C representa o ponto onde a reta cruza o eixo das ordenadas e n representa a inclinação da reta e normalmente varia de 2 a 5.

O modelo do Forman [24] é descrito como:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K)^n}{(1-R)K_c - \Delta K} \tag{2}$$

Onde C e n são parâmetros do modelo e K_c é a tenacidade à fratura.

Collipriest [24,25] descreve a taxa de propagação de trinca de fadiga por meio da função tangente hiperbólica inversa como:

$$\text{Log} \frac{da}{dN} = C_1 + C_2 \tanh^{-1} \left[\frac{\text{Log} \left(\frac{\Delta K^2}{K_{th} K_c (1-R)^2} \right)}{\text{Log} \frac{K_c}{K_{th}}} \right] \tag{3}$$

Onde C_1 e C_2 são parâmetros do modelo. A curva se torna assintótica à faixa de intensidade de tensão crítica, $(1-R)K_c$, e à faixa de intensidade de tensão do *threshold*, $(1-R)K_{th}$.

Os dois primeiros modelos somente prevêm a região linear de crescimento de trinca e a fratura, e sua extrapolação leva a um valor do limiar ΔK_{th} exageradamente conservativo. O modelo de Collipriest prevê as três regiões distintas da curva sigmoideal, e fornece um valor para ΔK_{th} que permite uma economia de material no projeto estrutural, sendo portanto um modelo mais promissor do que os anteriores.

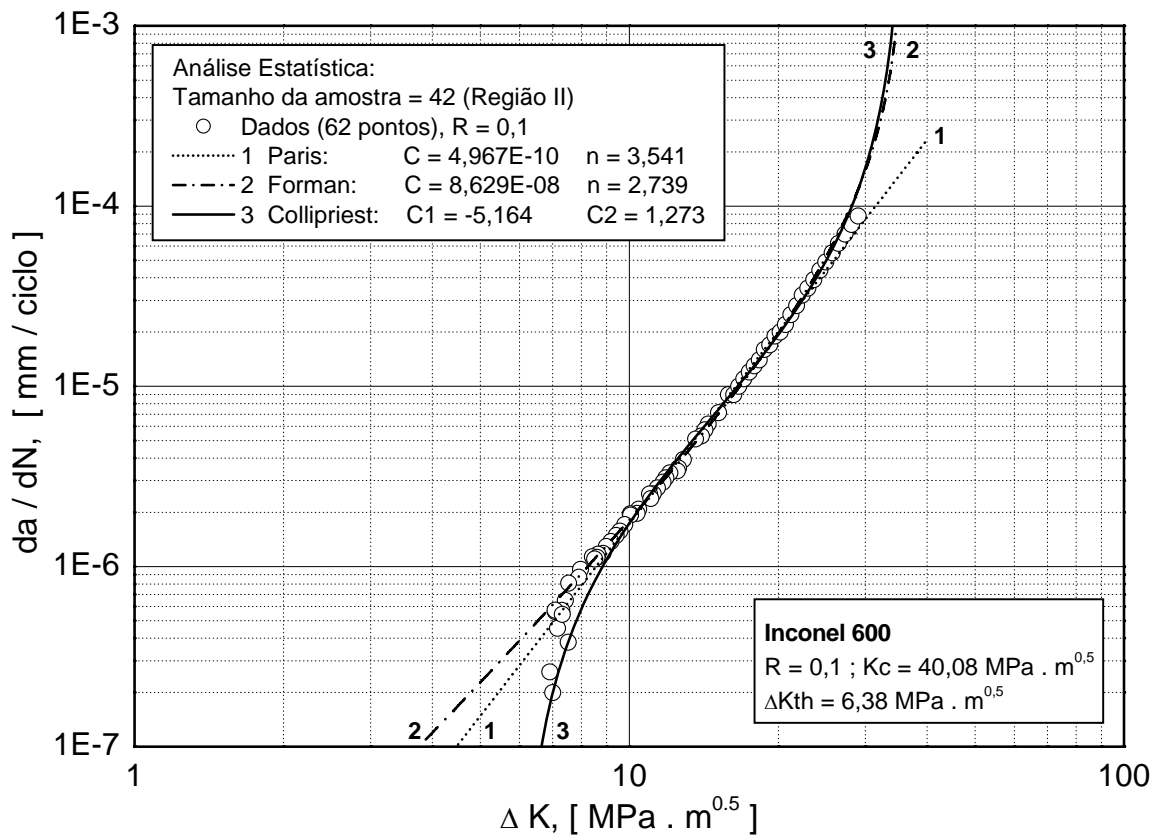


Figura 10: Aplicação de modelos de propagação de trinca de fadiga, superliga Inconel 600.

4 CONCLUSÕES

- 1) A liga Inconel 600 apresentou, na temperatura ambiente, elevados valores para tenacidade à fratura, medidos pela integral J e CTOD.
- 2) A técnica de normalização para obtenção da curva J-R mostrou-se conservadora, necessitando de uma correção.
- 3) A resistência à propagação de trinca da liga Inconel 600 é relativamente elevada.
- 4) O modelo de Collipriest consegue modelar adequadamente a curva sigmoideal de propagação de trinca de fadiga.

5 AGRADECIMENTOS

Ao eng. Sidney Cardoso de Araújo e ao técnico Ivete Estevão dos Santos, pelo apoio laboratorial.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANTOLOVICH, B.F., Fatigue and Fracture of Nickel-Base Superalloys, ASM Handbook, Vol. 19, 1996, pp. 854-868.
- [2] BRADLEY, E.F., Superalloys, a Technical Guide, ASM Handbook, 1988, pp.53-74.
- [3] Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, Annual Book of ASTM Standards, Edited by ASTM, 2001.
- [4] Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, ASTM E-1820-01, Annual Book of ASTM Standards, Edited by ASTM, 2001.
- [5] Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, ASTM E-647-01, Annual Book of ASTM Standards, Edited by ASTM, 2001.
- [6] LANDES, J.D. e HERRERA, R., A new look at J-R curve analysis, Int. J. Fract., 36(1988)R9-R14.
- [7] HERRERA, R. e LANDES, J.D., A direct J-R curve analysis of fracture toughness tests, J. Test. Eval., 16(1988)427-449.
- [8] HERRERA, R. e LANDES, J.D., Direct J-R curve analysis: a guide to the methodology, ASTM-STP 1074, ASTM, 1990, pp. 24-43.
- [9] LANDES, J.D., ZHOU, Z., LEE, K. e HERRERA, R., Normalization method to develop J-R curves with the LMN Function, J. Test. Eval., 19(1991)305-311.
- [10] CRUZ, J.R.B., Procedimento Analítico para Previsão do Comportamento Estrutural de Componentes Trincados, Tese de Doutorado, IPEN/USP, São Paulo, 1998.
- [11] FORTES, C.J.F.O., Estudo das Metodologias de Integral J e de CTOD aplicadas a um Aço ao Ni-Cr-Mo HY-80, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1993.
- [12] RODRIGUES, E.M., Avaliação da Tenacidade à Fratura através da Integral J de Dois Aços Bifásicos de Emprego Automobilístico, Dissertação de Mestrado, REDEMAT/UFOP, Ouro Preto, 2003.

- [13] KING, J.E., Effects of grain size and microstructure on threshold value and near-threshold crack growth in powder-formed Ni-base superalloy, *Met. Sci.*, 16(1982)345-355.
- [14] CROMPTION, J.S. e MARTIN, J.W., Crack growth in a single crystal superalloy at elevated temperature, *Metall. Trans.*, 15A(1984)1711-1719.
- [15] YUEN, J.L. e ROY, P.E., Effect of grain size on the near-threshold fatigue crack propagation of a nickel base precipitation hardened superalloy, *Scripta Met.*, 19(1985)17-22.
- [16] KING, J.E., Fatigue crack propagation in nickel-base superalloys – effects of microstructure, load ratio and temperature, *Mater. Sci. Technol.*, 3(1987)750-764.
- [17] LERCH, B.A. e ANTOLOVICH, S.D., Fatigue crack propagation of a single crystalline superalloy, *Metall. Trans.*, 21A(1990)2169-2177.
- [18] REED, P.A.S., GALE, W.F. e KING, J.E., Intrinsic threshold in polycrystalline UDIMET 720, *Mater. Sci. Technol.*, 9(1993)281-287.
- [19] MERCER, C., SOBOYEJO, A.S.O. e SOBOYEJO, W.O., Micromechanisms of fatigue crack growth in a forged INCONEL 618 nickel-based superalloy, *Mater. Sci. Engng.*, A270(1999)308-322.
- [20] PADULLA, S.A., SHYAM, A., RITCHIE, R.O. e MILLIGAN, W.W., High frequency fatigue crack propagation behavior of a nickel-base turbine disk alloy, *Int. J. Fatigue*, 21(1999)725-731.
- [21] MERCER, C., SHADEMAN, S. e SOBOYEJO, W.O., An investigation of the micromechanisms of fatigue crack growth in structural gas turbine engine alloys, *J. Mater. Sci.*, 38(2003) 291-305.
- [22] LUO, J. e BOWEN, P., Small and long fatigue crack growth behaviour of a PM Ni-based superalloy, UDIMET 720, *Int. J. Fatigue*, 26(2004)113-124.
- [23] PARIS, P.C. e ERDOGAN, F., A critical analysis of crack propagation laws, *J. Basic. Engng.*, 85(1960)528-534.
- [24] FORMAN, R.G., KEARNEY, V.E. e ENGLE, R.M., Numerical analysis of crack propagation in cyclic-loaded structures, *J. Basic Engng.*, 89(1967)459-464.
- [25] COLLIPRIEST, J.E., EHRET, R.M. e THATCHER, C., Rockwell International Corporation – Space Division, Report MFS-24447, 1973.
- [26] SWIFT, T., *Damage Tolerance Technology: A Course in Stress Analysis Oriented Fracture Mechanics, Crack Propagation – Phase 2*, Federal Aviation Administration, FAA.