



ANÁLISE DAS CURVAS DE CRESCIMENTO DE TRINCA POR FADIGA A BAIXA TEMPERATURA DO AÇO ABNT 4133 (API 5CT)¹

Jefferson José Vilela²
Sabrina Nunes Soares³
José Rubens Gonçalves Carneiro⁴
Mariana Pimenta Alves⁵
Geraldo de Paula Martins⁶
Marc Scibetta⁷

Resumo

A crescente utilização de dutos para o transporte de petróleo e gás natural tem impulsionado o desenvolvimento de aços resistentes à propagação de trincas. Utilizando o modelo de Paris-Erdogan aplicado ao estágio II da propagação, o objetivo deste trabalho foi a análise das curvas de crescimento de trinca por fadiga a uma baixa temperatura do aço ABNT 4133 modificado (API 5CT), obtido por lingotamento contínuo. Para a análise das curvas foi realizada a suavização das mesmas no programa Origin7.5, e um teste t de hipóteses no Minitab14, a fim de aceitar ou não os resultados. Observa-se que este material utilizado em tubulações para o transporte de petróleo e gás natural (API5CT) não teve propriedades mecânicas afetadas quando utilizado a baixas temperaturas.

Palavras-chave: Crescimento de trinca por fadiga; Aço ABNT 4133; API 5CT.

EVALUATION OF THE FATIGUE CRACK GROWTH CURVES IN A LOW TEMPERATURE OF AN ABNT 4133 MODIFIED STEEL (API - 5CT)

Abstract

The increased use of pipelines to transport oil and natural gas has driven the development of steel resistant to harsh conditions. Using Paris-Erdogan model in the stage II region, the goal of this study was the analysis of the fatigue crack growth at a low temperature of ABNT 4133 modified (API 5CT) manufactured by continuous ingot casting. The curve analysis smoothing was performed in Origin7.5 program, and a t test hypotheses was in Minitab14. It is observed that the material used in pipelines to transport oil and natural gas (API5CT) didn't affect the mechanical properties when used at low temperatures.

Key words: Fatigue crack growth; ABNT 4133 steel; API 5CT.

¹ Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Membro da ABM, Dr., pesquisador, CDTN/CNEN, Av. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte, MG, jjv@cdtn.br.

³ Estudante de Engenharia Metalúrgica, CNPq/CDTN, Av. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte, MG, onlysabrina@gmail.com.

⁴ Dr., Professor, PUCMINAS, Av. Dom Gaspar, 500, Belo Horizonte, MG, joserub@pucminas.br.

⁵ Estudante de Engenharia Mecânica, UFMG, Av. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte, MG, maripimenta8@yahoo.com.br.

⁶ Dr., pesquisador, CDTN/CNEN, Av. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte, MG, gpm@cdtn.br.

⁷ D.Sc., pesquisador, SCK.CEN, Boretang, 200, B-2400, Mol, Belgium, mscibett@sckcen.be.

1 INTRODUÇÃO

O petróleo e o gás natural possuem uma grande relevância no cotidiano do ser humano, pois são usados como combustíveis e, também, são agregados na fabricação de muitos outros produtos. O acréscimo, no Brasil, da exploração de petróleo e gás natural em águas profundas, está possibilitando o desenvolvimento de aços mais nobres com o aprimoramento principalmente da qualidade interna. Esses aços estão sujeitos a rigorosas condições, como o contato com ácidos sulfídricos em altas pressões e variações de temperatura. Os tubos API 5CT sem costura estão sendo desenvolvidos pelas siderúrgicas, a fim de atender a tais especificações.

O dano que ocorre em componentes e estruturas submetidos a carregamentos cíclicos externos é chamado de fadiga. Ela se manifesta na deterioração da habilidade do material de suportar o carregamento para o qual foi projetado. Antes da falha ocorre o surgimento de trincas, então, é importante estudar o mecanismo de propagação das mesmas, com o objetivo de melhorar as características do material. Para a maioria das ligas de engenharia, a curva $\log (da/dN)$ versus $\log (\Delta K)$ (a: tamanho de trinca, N: número de ciclos, ΔK : faixa de fator de intensidade de tensão) exibe uma variação sigmoideal, conforme ilustrado na Figura 1.

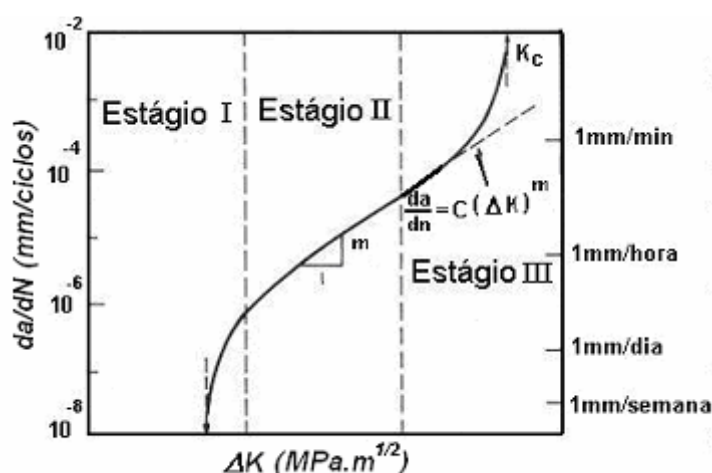


Figura 1 - Diferentes estágios na propagação de trinca por fadiga.⁽¹⁾

Neste gráfico, observa-se os estágios I, II e III, cujas características são mostradas na literatura:⁽¹⁾

- Estágio I - a trinca e a zona de deformação plástica que circunda o vértice da trinca estão confinadas a uns poucos grãos; o crescimento de trinca ocorre predominantemente por cisalhamento único na direção do sistema de escorregamento primário. Anterior a esse estágio; o incremento médio por ciclo é menor que o espaçamento reticulado e associa-se com ΔK_{limiar} (fator de intensidade de tensão limiar). Em termos práticos, ΔK_{limiar} é definido como o fator cíclico de intensidade de tensão para o qual a taxa de crescimento de trinca é igual a 10^{-8} mm/ciclo.
- Estágio II - ocorre em faixas de valores de intensidade de tensão mais elevados; a zona plástica no vértice da trinca incorpora muitos grãos; o processo de crescimento de trinca envolve dois ou mais sistemas de escorregamento; a trinca cresce através

do avanço de uma quantidade fixa por ciclo de tensão; a microestrutura e as condições de carregamento não são muito importantes neste estágio.

- Estágio III - Corresponde aos últimos ciclos de carregamento que ocorre sob crescimento instável de trinca até a fratura brusca final. Esse estágio sofre grande influência da microestrutura e das condições de carregamento.

Para amplitude de carga constante, alguns modelos são propostos para a predição da propagação de trincas por fadiga.⁽²⁾ Eles envolvem constantes do material, taxa de carregamento e nível de tensão atuante. O modelo de Paris & Erdogan⁽³⁾ (Eq. 1) é uma relação empírica que obedece à lei de potência e descreve o crescimento de trinca de fadiga na região II da curva da/dN em função de ΔK , em que C e m são constantes do material determinadas experimentalmente. Este modelo pode ser considerado conservativo mas a maior parte do crescimento de trinca por fadiga ocorre no estágio II.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (1)$$

O objetivo desse trabalho foi a obtenção das curvas de crescimento de trinca por fadiga, curvas da/dN em função de ΔK , do aço ABNT 4133 modificado (API 5CT) às temperaturas de -30°C e ambiente, e, simultaneamente, verificar se as constantes da equação de Paris (C e m) se modificam nessa faixa de temperatura.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O material utilizado foi o aço modificado ABNT 4133 (API 5CT) obtido por lingotamento contínuo pela Vallourec & Mannesmann Tubes –V&M S/A, em discos de 230 mm de diâmetro e 20 mm de espessura, cuja composição é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1- Composição química do aço modificado ABNT 4133 (API 5CT)

C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Al	V	Nb	Ti	Cu	Sn
0,33	0,46	0,012	0,002	0,29	0,01	0,95	0,78	0,031	0,043	0,028	0,012	0,03	0,001

Fornecido por Vallourec & Mannesmann Tubes –V&M S/A

Os corpos de prova foram usinados na orientação C-R (Figura 2) e as dimensões são mostradas na Figura 3.

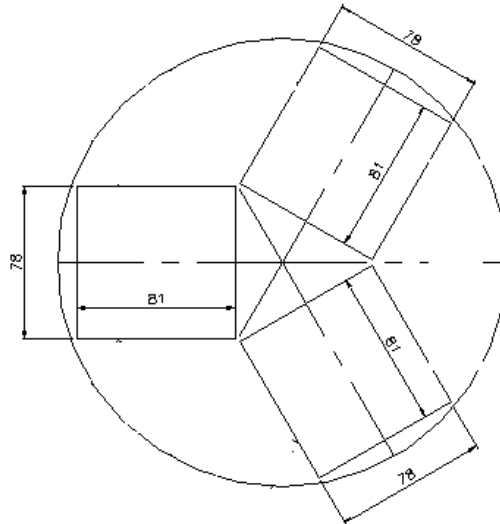


Figura 2: Esquema de retirada de corpo de prova tipo C(T) do tarugo com 230 mm de diâmetro, respeitando a direção CR, espessura (B) de 14 mm.

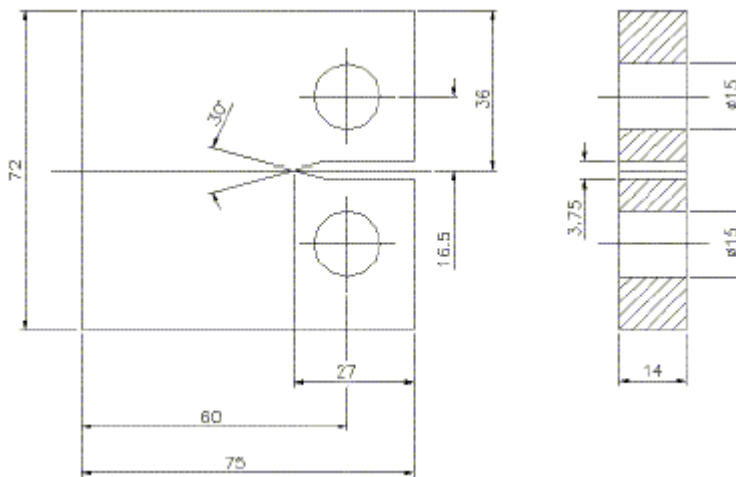


Figura 3: Dimensões (mm) do corpo de prova C(T) para os testes de propagação de trinca por fadiga.

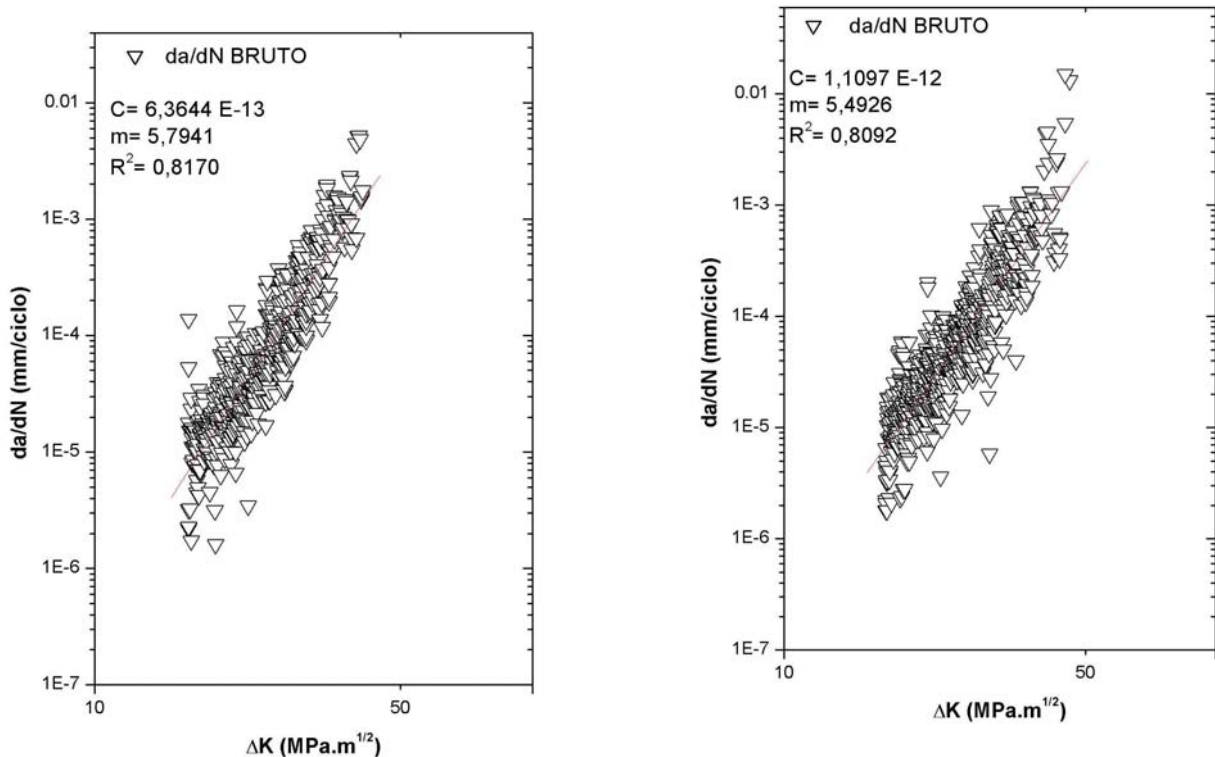
Os ensaios de propagação de trinca por fadiga foram obtidos em uma máquina servo-hidráulica universal INSTRON modelo 8802, composta de sistema dinâmico com capacidade máxima de 250 kN, garras de cabeçote e levantamento hidráulico com distância máxima 1.515 mm, controlador eletrônico digital de carga e posicionamento, construído em torre modular para 5 controladores ou placas de aquisição de dados. Cada sistema de aquisição de dados pode acomodar até 8 transdutores adicionais, controlador eletrônico digital com atualização dos parâmetros de PID automático até 1 kHz, processamento digital de sinais com a resolução de 19 “bits” sem a necessidade de ajuste manual ou supressão, condicionamento de sinal do transdutor de alta exatidão, baixo ruído com filtros variáveis de 0 até 1 kHz. Para a medição do tamanho da trinca, utilizou-se um *clip gauge* INSTRON modelo 2670-122, com abertura fixa de 10 mm e variando ± 4 mm. As obtenções das pré-trincas foram divididas em três estágios de 1 mm cada, o ΔK foi mantido constante em cada estágio cujos valores foram: 1^o- 20 MPa m^{1/2}, 2^o- 18 MPa m^{1/2} e 3^o- 16 MPa m^{1/2}, de acordo com a metodologia desenvolvida por Reis et al.⁽⁴⁾ e ASTM E647,⁽⁵⁾ a razão de carga foi 0,1 e a frequência de 20 Hz. Os testes foram feitos à temperatura ambiente (3 corpos de prova), e à -30° C (2 corpos de

prova), com uma amplitude de carga constante de 10,8 KN, freqüência de 20 Hz e razão de carga de 0,1.

Para a análise dos gráficos obtidos nos testes de propagação de trinca por fadiga realizou-se primeiramente no Origin7.5 uma série de etapas a fim de reduzir os ruídos das curvas. Posteriormente, para provar se a suavização empregada não influenciou nos resultados e admitir se a temperatura mais baixa influencia ou não nas propriedades do material foi feito no Minitab14 um teste t de hipóteses admitindo se um nível de confiança de 90% ($\alpha = 0,05$).

3 RESULTADOS

Após realizados os ensaios de propagação de trinca por fadiga, aplicou-se o modelo de Paris-Erdogan ao estágio II da propagação e então obteve-se os valores das constantes C e m, como também o coeficiente de determinação (R^2). Os gráficos dos dados brutos (não suavizados) e os valores das constantes são representados na Figura 4 para o ensaio à temperatura ambiente e Figura 5 para -30°C .



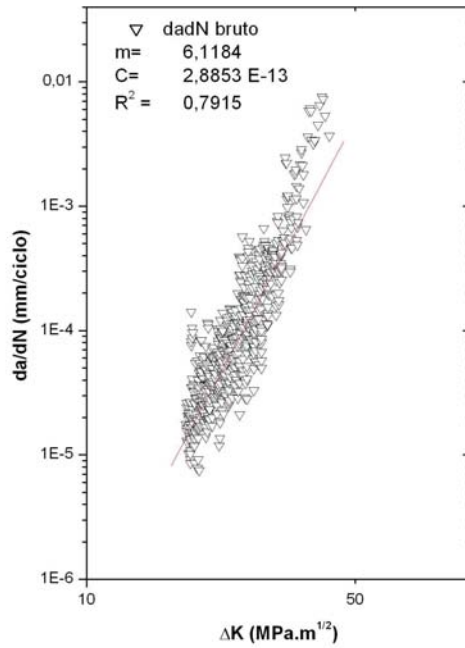


Figura 4: Gráficos da/dN versus ΔK dos dados brutos com valores das constantes de Paris (C e m) e coeficiente de determinação (R^2), dos corpos de prova 1, 2 e 3 respectivamente à temperatura ambiente, do aço modificado ABNT 4133 (API 5CT) obtido por lingotamento contínuo.

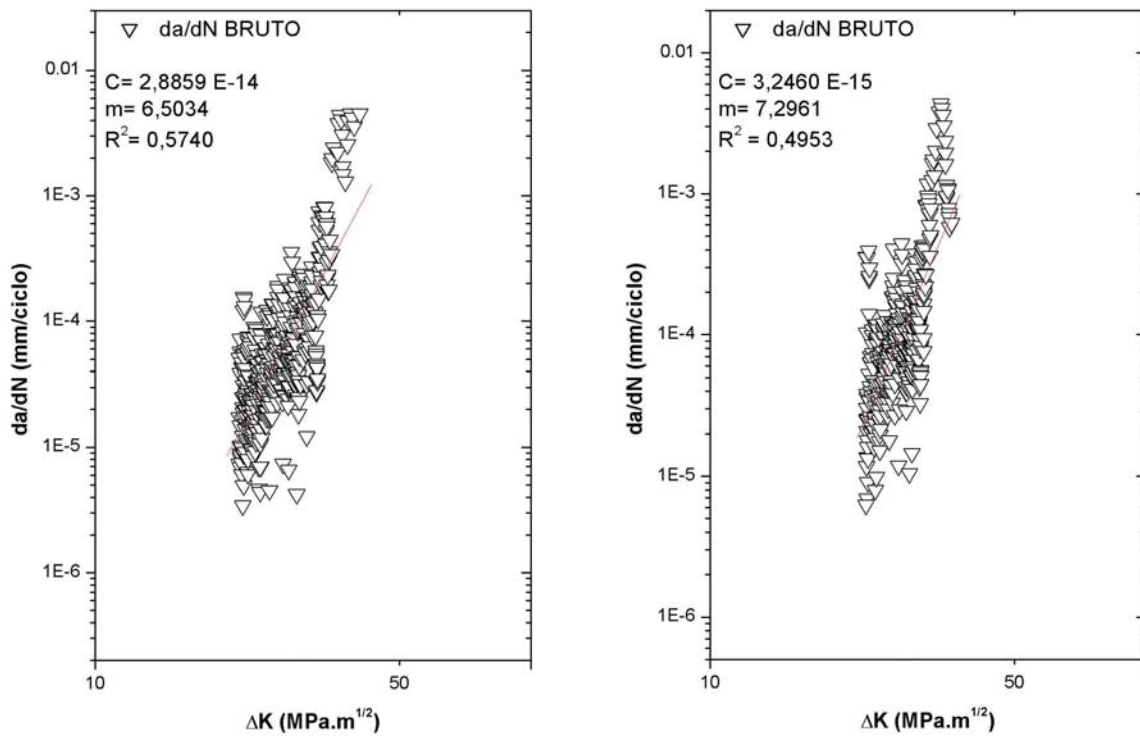


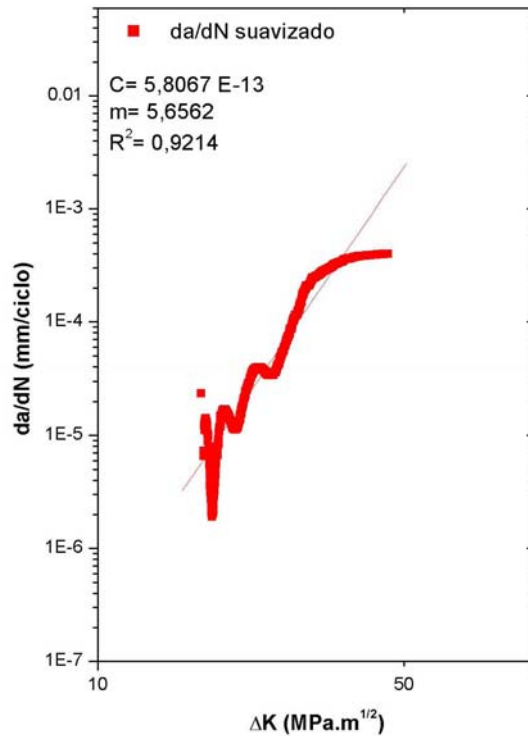
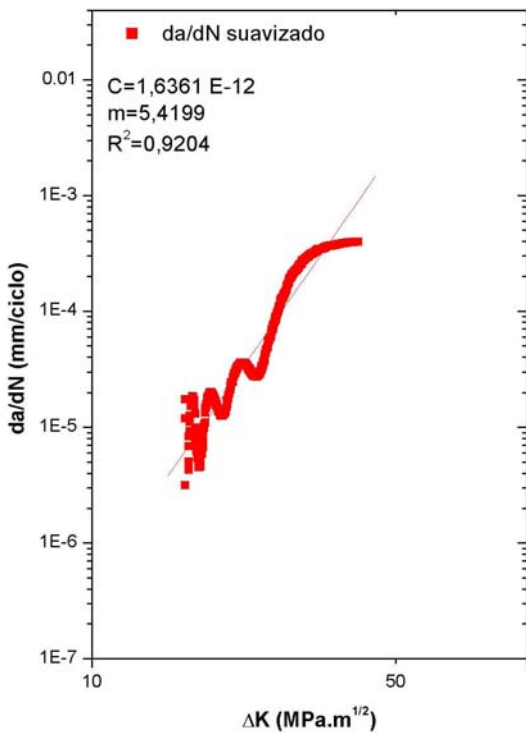
Figura 5: Gráficos da/dN versus ΔK dos dados brutos com valores das constantes de Paris (C e m) e coeficiente de determinação (R^2), dos corpos de prova 4 e 5 respectivamente à -30°C , do aço modificado ABNT 4133 (API 5CT) obtido por lingotamento contínuo.

Observando-se a grande dispersão dos pontos obtidos pela máquina de ensaio, foi então feito a suavização dos gráficos, onde o procedimento é descrito na Tabela 2.

Tabela 2: Procedimentos utilizados na suavização das curvas

Etapa	Procedimentos:
1	Coleta-se os arquivos dat's obtidos por meio do programa "Fast Track" da Instron;
2	Passa-se então os dados para o programa Origin7.5: número de ciclos (N), comprimento de trinca (a), ΔK e da/dN;
3	Deve-se fazer o gráfico "a" versus "N";
4	Passa-se um polinômio que melhor se ajusta (nos casos estudados, usou-se um polinômio de 9 ^o);
5	Deriva-se o polinômio encontrado, e utilizando o Excel, acha-se os vários da/dN's para cada número de ciclo (valores já suavizados);
6	Com os da/dN's constrói-se também no Origin7.5, o gráfico da/dN versus ΔK ;
7	Muda-se as escalas dos eixos das ordenadas e abcissas para logarítmica;
8	Passa-se uma reta nos pontos;
9	Em seguida, obtêm-se as constantes da equação de Paris: m e C.

Os gráficos suavizados, os valores das constantes de Paris e coeficientes de determinação obtidos são mostrados na Figura 6 para a temperatura ambiente e Figura 7 para -30°C .



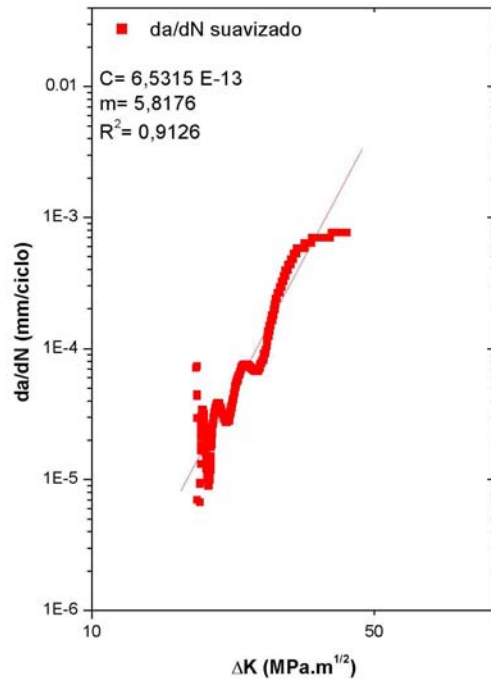


Figura 6: Gráficos da/dN versus ΔK dos valores suavizados, com as constantes de Paris (C e m) e coeficiente de determinação (R^2), dos corpos de prova 1, 2 e 3 respectivamente a temperatura ambiente, do aço modificado ABNT 4133 (API 5CT) obtido por lingotamento contínuo.

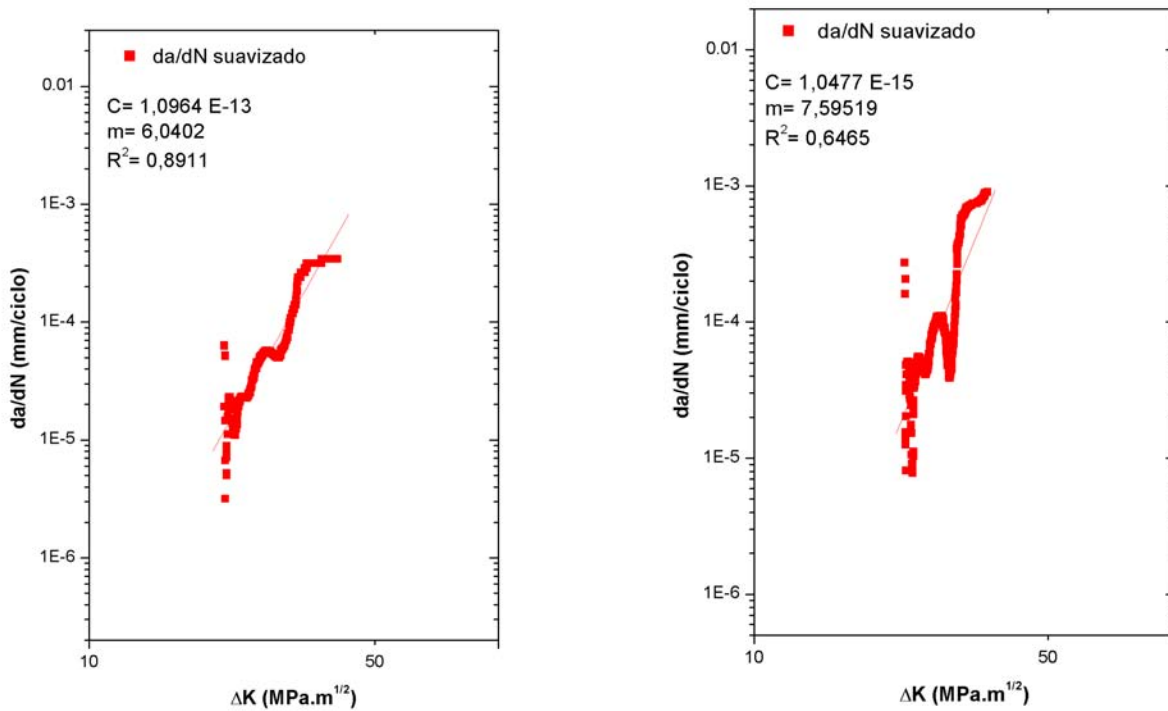


Figura 7: Gráficos da/dN versus ΔK dos valores suavizados, com as constantes de Paris (C e m) e coeficiente de determinação (R^2), dos corpos de prova 4 e 5 respectivamente à -30°C , do aço modificado ABNT 4133 (API 5CT) obtido por lingotamento contínuo.

Com os gráficos e resultados das Figuras 4, 5, 6 e 7, foi feito então um teste t de hipóteses no Minitab14, admitindo se um nível α de 0,05, a fim de provar se a suavização interfere nos resultados e também testando-se os valores a temperatura ambiente e à -30°C saber se a temperatura mais baixa interferiu no crescimento de trinca por fadiga desse aço. Foram obtidas as seguintes respostas:

- Teste t para a constante “C”, valores suavizados e brutos:

Com um P-Value = 0.539, não devemos rejeitar a hipótese nula a um nível α de 0,05 e concluímos que os valores da constante “C” de Paris não são diferentes quando suavizadas;

- Teste t para a constante “m”, valores suavizados e não suavizados:

Com um P-Value = 0.471, não devemos rejeitar a hipótese nula a um nível α de 0,05 e concluímos que os valores da constante “m” de Paris não são diferentes quando amaciadas;

- Teste t para a constante “C”, valores a temperatura ambiente e a -30° :

Com um P-Value = 0.120, não devemos rejeitar a hipótese nula a um nível α de 0,05 e concluímos que os valores da constante “C” de Paris não foram diferentes a uma temperatura mais fria (-30°);

- Teste t para a constante “m”, valores a temperatura ambiente e a -30° :

Com um P-Value = 1.000, não devemos rejeitar a hipótese nula a um nível α de 0,05 e concluímos que os valores da constante “m” de Paris não são diferentes a uma temperatura mais fria (-30°).

4 DISCUSSÕES

Observa-se que o modelamento das curvas da/dN versus ΔK utilizando-se Paris-Erdogan aplicado ao estágio II da propagação apresentou grande ruído para o aço ABNT 4133 modificado, contudo os valores das constantes C e m apresentaram valores próximos em todas as condições de mesma temperatura .

A grande dispersão observada nos valores brutos pode ser atribuída à heterogeneidade da microestrutura conforme afirmado por Alves et al.⁽⁶⁾ Testando-se um material mais homogêneo na mesma máquina obteve-se valores menos dispersos com R^2 superior a 0,9.⁽²⁾

5 CONCLUSÕES

A propagação de trinca por fadiga do aço ABNT 4133 (API 5CT) obtido por lingotamento contínuo, não é afetada quando o material é utilizado a baixas temperaturas (-30°C).

A suavização das curvas “a” versus “N” podem ser utilizadas a fim de diminuir a dispersão dos resultados e encontrar melhores valores das constantes de Paris-Erdogan, modelo aplicado no trabalho.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Fundação de Amparo a Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG), Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Católica de Minas Gerais (PUC Minas), Vallourec & Mannesman Tubes (V&M S/A). Emil dos Reis, Nirlando Rocha, Bruno Rossi de Meneses Vargas.

REFERÊNCIAS

- 1 SURESH, S., *Fatigue of Materials*, Cambridge University Press, 1988.
- 2 MARTINS, G. P. *Tenacidade a Fratura e Propagação de Trinca em Juntas Soldadas de Aço Estrutural Resistente a Corrosão Atmosférica*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: UFMG, 2004.
- 3 PARIS, P.C.; ERDOGAN, F. A Critical Analysis of Crack Propagation Laws. *Journal of Basic Engineering* 85, 1963. p. 528-534.
- 4 REIS, E.; ALVES, M. P.; VILELA, J. J. *Ensaio de Propagação de Trinca por Fadiga: Rotina interna do Laboratório de Ensaio Mecânicos do CDTN/CNEN, LABMEC/006*, Belo Horizonte, 2009.
- 5 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. E 647-99. *Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates*. Philadelphia: ASTM, 2005.
- 6 ALVES, M. P.; VILELA, J. J.; MARTINS, G. P.; CARNEIRO, J. R. G.; COSTA, L. V.; SCIBETTA, M.; MENEZES, R.M.R.O. *Evaluation of the fatigue crack growth of an ABNT 4133 modified steel (API – 5CT)* Em: 64^o congresso internacional da ABM, Belo Horizonte, 2009.