

PROPAGAÇÃO DE TRINCA POR FADIGA EM ARAMES DE ALTA RESISTÊNCIA MECÂNICA¹

Jefferson Haag²
Bill Paiva dos Santos²
Vagner Machado Costa²
Guilherme Vieira Braga Lemos³
Telmo Roberto Strohaecker⁴

Resumo

As principais ocorrências de falhas de risers flexíveis são em relação à fadiga da armadura de tração na região do conector. Sendo assim, é necessário obter as propriedades de fadiga do material visando o cálculo da vida remanescente do componente. O presente trabalho tem o objetivo de avaliar a propagação de trincas por fadiga em arames de alta resistência mecânica utilizados na forma de tendões na armadura de tração de dutos flexíveis de camadas não aderentes. Para tal, ensaios de da/dN por delta K foram desenvolvidos com a finalidade de conseguir os coeficientes das equações de Paris e Walker e, para isso, foram realizados ensaios com controle de delta K crescente em diferentes razões de carregamento (0,1, 0,3 e 0,5). Os resultados obtidos mostram que os arames são sensíveis a variação da configuração de carregamento aplicado (combinação entre delta K e R). Como consequência disso, os arames são susceptíveis a falha catastrófica na presença de defeitos do tipo trinca, visto que a mudança do carregamento pode implicar no aumento da taxa de propagação de trinca e, conseqüentemente, na redução da vida do mesmo.

Palavras-chave: Propagação de trinca por fadiga; Lei de Paris; Equação de Walker; Aço de alta resistência mecânica.

FATIGUE CRACK GROWTH OF HIGH STRENGTH STEEL WIRES

Abstract

The main failure mode of the flexible risers system is the wires fatigue at the interface between the pipe and the end fitting. Therefore it is necessary obtain fatigue properties to calculate the remaining life of this component. The present work aims to evaluate the fatigue crack growth of high strength wires used on the manufacture of flexible risers. Fatigue crack growth testing were performed with purpose to measure the coefficients of Paris and Walkers equations and tests under increasing delta K with different load ratios (0.1, 0.3 and 0.5). The obtain outcomes show that the wires are sensitive to the variation of setting applied loading (combination of delta K and R). As a result, the wires are susceptible to catastrophic failure in the presence of cracks, since the change of loading may lead in an increase of crack propagation and consequently reducing the service life.

Key words: Fatigue crack growth; Paris Law; Walker equation; High strength steel wire.

¹ Contribuição técnica ao 68^o Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Engenheiro Metalúrgico. Mestrando. PPGE3M, UFRGS. Porto Alegre, RS, Brasil.

³ Engenheiro Metalúrgico, MSc, Doutorando. PPGE3M, UFRGS. Porto Alegre, RS, Brasil.

⁴ Engenheiro Metalúrgico, Professor Doutor, PPGE3M, UFRGS. Porto Alegre, RS, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Materiais de alta resistência mecânica são amplamente utilizados na indústria de alto desempenho para suportarem carregamentos estáticos e dinâmicos impostos pelas condições severas de serviço. Na exploração offshore de petróleo são utilizados dutos rígidos e flexíveis com o objetivo de conduzir o petróleo do poço no fundo do mar até a plataforma responsável pela primeira separação de óleo, gás e água. Os dutos precisam suportar esforços provenientes das pressões internas e externas, do peso próprio, das correntes marinhas, etc. O desafio da seleção de materiais é desenvolver ligas capazes de resistir às condições rigorosas de trabalho em que os dutos são submetidos, sobretudo com a descoberta do Pré-sal e o aumento da lâmina d'água na exploração de petróleo.

Arares de aço com composição química próxima ao eutetóide são utilizados na forma de tendões na armadura de tração de dutos flexíveis de camadas não aderentes, sendo que o modo de falha desses sistemas offshore consiste na ruptura por fadiga dos tendões próximos ou dentro do conector, conforme apresentado na Figura 1.⁽¹⁾ Assim, torna-se necessário obter técnicas que possibilitem o aumento da segurança dos processos de exploração de petróleo.



Figura 1. Detalhe da ruptura de tendões próximos à interface com o conector.⁽¹⁾

Sendo inerente a presença de descontinuidades em estruturas, torna-se imprescindível o emprego de ferramentas que permitam a definição das propriedades do material em condições críticas. A mecânica da fratura é amplamente utilizada em códigos de segurança e boas práticas de engenharia para cálculo da integridade estrutural, tanto por colapso plástico quanto por danos de fadiga.

Existem diversos modelos de propagação de trincas por fadiga que são capazes de descrever o comportamento em fadiga de um material sujeito a uma amplitude de carregamento constante. Entretanto, os modelos variam em fatores e número de parâmetros requeridos para o ajuste da curva. O modelo de Paris e o modelo de Walker serão abordados a seguir.⁽²⁾

O Modelo de Paris é o método mais simples e bem conhecido para prever a propagação de trincas por fadiga. A Equação 1 apresenta a correlação de Paris e Erdogan (1963) para a taxa de propagação da trinca (da/dN) e a amplitude do fator intensidade de tensões (ΔK).

$$\frac{da}{dN} = C_p \Delta K^{m_p} \quad (1)$$

Onde:

- C_p é o coeficiente linear (intercepto) da curva log-log da/dN versus (ΔK);
- m_p é o coeficiente angular (inclinação) da curva log-log da/dN versus (ΔK).

A Lei de Paris é simples de utilizar e requer a determinação de dois parâmetros de ajuste de curva, que são facilmente obtidos. A limitação principal dessa Lei é que ela só é capaz de descrever o comportamento na região II. Por fim, a equação de Paris não considera o efeito da razão de carregamento (R). Para aços ensaios em várias razões de fadiga, geralmente, uma família de linhas paralelas entre si é produzida para diferentes valores de R. Isto é, possuem o mesmo valor de m_p para todos os valores de razão de carregamento, mas o valor de C_p é específico para cada R.

A grande limitação da Lei de Paris em não considerar a razão de carregamento (R) no comportamento em fadiga fez com que Walker (1970) adequasse o modelo, incluindo o efeito da razão de carregamento. Walker propôs um parâmetro que varia de zero ao máximo (R=0) fator intensidade de tensões do ciclo ($K_{máx}$), conforme Equação 2.

$$\overline{\Delta K} = K_{máx}(1 - R)^{\gamma_w} \quad (2)$$

Onde γ_w é uma constante proposta por Walker para avaliar o efeito de R.

A equação de Walker, por fim, pode ser expressa segundo a Equação 3 tomando o parâmetro como o ΔK da equação de Paris. Se γ_w é igual a 1, significa que a razão de carregamento não apresenta efeito sobre o comportamento em fadiga do material.

$$\frac{da}{dN} = C_w \left[\frac{\Delta K}{(1-R)^{1-\gamma_w}} \right]^{m_w} \quad (3)$$

Onde C_w e m_w são constantes modificadas para a equação de Walker.

Em resumo, a equação de Walker é uma modificação da Lei de Paris que leva em conta o efeito da razão de carregamento com o “custo” de introduzir um terceiro parâmetro de ajuste da curva.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a propagação de trincas por fadiga em arames de alta resistência mecânica, utilizados na fabricação da armadura de tração de dutos flexíveis. Os coeficientes de Paris e Walker foram calculados, permitindo a compreensão do comportamento em fadiga dos arames com diferentes valores de razão de carregamento e amplitude de intensidade de tensões.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Os arames de alta resistência mecânica utilizados nesse estudo são fabricados com o aço carbono DIN FI41 por laminação a frio controlada, possuindo seção final de 15 mm x 5 mm. O material tem a composição química equivalente ao aço carbono SAE 1070 (Tabela 1). A microestrutura dos arames consiste em colônias de perlita com pequena quantidade de ferrita nos contornos de grão (Figura 2). A estrutura fortemente deformada e o alto teor de carbono resultam em uma alta resistência mecânica, alcançando o limite de resistência à tração de 1.496 MPa e limite de escoamento de 1.323 MPa.

Tabela 1. Composição química do aço carbono DIN FI41

Elemento	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Fe
% em peso	0,685	0,791	0,291	0,0200	0,0208	0,0224	0,00970	98,1

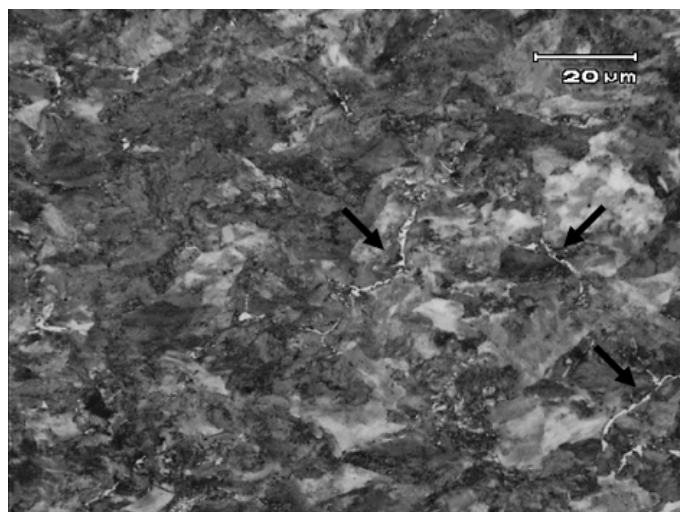


Figura 2. Micrografia da seção transversal dos arames, apresentando a estrutura perlítica. Setas indicam ferrita nos contornos de grão. Ataque Nital 2%.

Para obtenção dos corpos de prova, os arames foram cortados com o auxílio de uma máquina de corte a disco para obter o comprimento desejado dos corpos de prova. Após essa etapa, foi realizada a usinagem do entalhe e do “rabo de andorinha” através do processo de eletroerosão para posicionamento do extensômetro. A geometria dos corpos de prova do SE(B) é apresentada na Figura 3, através de um desenho representativo e uma macrografia. A orientação selecionada do entalhe foi a X-Y, segundo a notação da norma ISO 12135⁽³⁾ (ou L-T, conforme as normas da ASTM).⁽⁴⁾

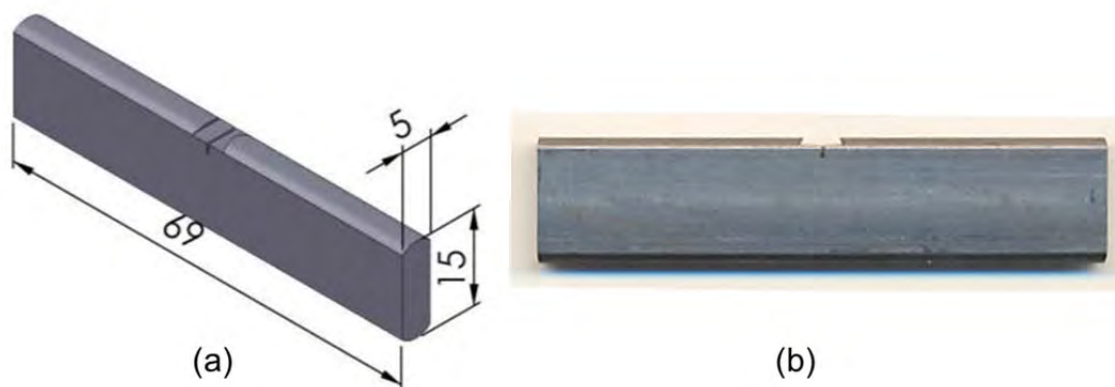


Figura 3. Corpo de prova do tipo SE(B). (a) Desenho esquemático com dimensões em milímetros. (b) Macrografia de uma das amostras.

Devido à curvatura dos arames nas regiões de fixação em contato com os roletes, foi necessário projetar um dispositivo para a realização dos ensaios em flexão três pontos, que pudesse permitir o alinhamento dos corpos de prova. A solução encontrada foi utilizar parafusos de fixação (prisoneiros) nas laterais dos corpos de prova e roletes que pudessem acomodar a curvatura do arame sem influenciar o ensaio. O dispositivo de flexão três pontos projetado para os ensaios de mecânica da fratura em arames é apresentado na Figura 4.

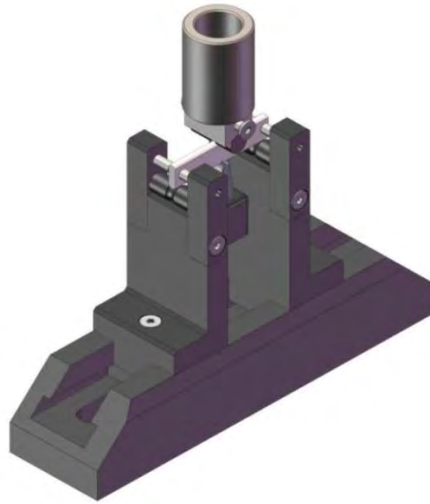


Figura 4. Representação esquemática e fotografia da configuração do dispositivo para ensaios em flexão três pontos.

Os ensaios de propagação de trincas por fadiga (da/dN), bem como o pré-trincamento, foram realizados numa máquina servo-hidráulica marca MTS modelo 810 com capacidade de 100kN, controlada pelo software MTS Fatigue Crack Growth, na temperatura ambiente (23°C). As recomendações das normas ASTM E647-11⁽⁵⁾ e BS 6835-1⁽⁶⁾ foram utilizadas.

Os corpos de prova foram pré-trincados até a razão a/W de 0,30 com $K_{máx\ final}$ de 19 MPa.m^{1/2} e razão de carregamento 0,1. Como alguns corpos de prova apresentaram frentes de propagação de trinca irregulares durante o pré-trincamento, foi utilizado uma razão de carregamento de 0,5. Este procedimento é baseado na norma Petrobras N-1859⁽⁷⁾ para avaliação de consumíveis de soldagem e visa obter uma propagação uniforme de trinca, compensando campo de tensões residuais.

Utilizaram-se ensaios de propagação de trincas por fadiga com controle de ΔK crescente para avaliar os coeficientes das equações de Paris e de Walker. Este procedimento de ensaio realiza incrementos no ΔK conforme a trinca cresce. Assim, podem ser obtidos dados uniformemente distribuídos ao longo de todo o ensaio.

A frequência do ensaio foi de 20Hz e a trinca foi propagada até a razão a/W de 0,70. O monitoramento do tamanho da trinca foi realizado pelo método da compliance, isto é, utilizando um extensômetro de medição fixado na região usinada na boca do entalhe.

O objetivo do ensaio é determinar o comportamento em fadiga e avaliar o efeito da razão de carregamento na curva da/dN versus ΔK . Para isso, foram utilizados três níveis de razão de carregamento: 0,1; 0,3 e 0,5. A Tabela 2 apresenta a identificação dos seis corpos de provas ensaiados e as respectivas razões de fadiga empregadas em cada um deles.

Tabela 2. Matriz de ensaios de da/dN

Identificação	Razão de carregamento, R
F1-1	0,1
F1-2	0,1
F1-3	0,3
F1-4	0,3
F1-5	0,5
F1-6	0,5

Após o término dos ensaios, os corpos de prova foram totalmente fraturados com o objetivo de medição da trinca e, caso fosse necessário, realizar a correção linear das curvas medidas pelo software.

A partir dos resultados experimentais, a curva a versus N foi obtida, assim como a relação da/dN versus ΔK , em escala logarítmica, que foi determinada pelo método polinomial indiciado na norma ASTM E647-11.⁽⁵⁾

3 RESULTADOS

Foram realizados seis ensaios de da/dN para obter os coeficientes das equações de Paris e Walker. Os coeficientes obtidos experimentalmente para a Lei de Paris dos corpos de prova com razões de fadiga de 0,1, 0,3 e 0,5 são apresentados nas Tabelas 3, 4 e 5, respectivamente.

Tabela 3. Coeficientes da Lei de Paris para razão de carregamento de 0,1

Corpo de Prova	R	C_p	m_p
F1-1	0,1	1,77 E-10	3,76
F1-2	0,1	1,47 E-10	3,80
Média		1,62 E-10	3,78

Tabela 4. Coeficientes da Lei de Paris para razão de carregamento de 0,3

Corpo de Prova	R	C_p	m_p
F1-3	0,3	6,81 E-09	2,91
F1-4	0,3	2,32 E-09	3,22
Média		4,57 E-09	3,07

Tabela 5. Coeficientes da Lei de Paris para razão de carregamento de 0,5

Corpo de Prova	R	C_p	m_p
F1-5	0,5	2,18 E-08	2,61
F1-6	0,5	1,01 E-08	2,86
Média		1,60 E-08	2,73

A Figura 5 mostra o efeito da razão de carregamento sobre os coeficientes na Lei de Paris. Foi constatado que o aumento da razão de carregamento proporciona o aumento do C_p e redução do m_p para os arames de alta resistência.

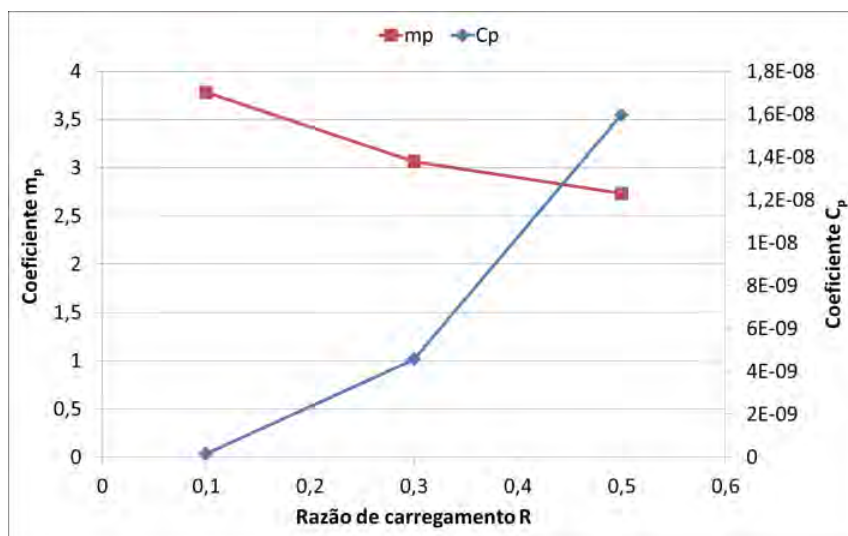


Figura 5. Efeito da razão de carregamento nos coeficientes da Lei de Paris.

O comportamento em fadiga dos arames é fortemente influenciado pela formação das delaminações, que ocorrem inclusive durante a propagação de trincas em fadiga (Figura 6). Em tensões médias mais elevadas e em carregamentos próximos ao K_Q do material, se torna bem evidente a ocorrência desse mecanismo de fratura, que acaba sendo ligeiramente benéfico para a tenacidade do material. As delaminações geram um alívio na triaxialidade e, assim, modificação do estado de tensões.

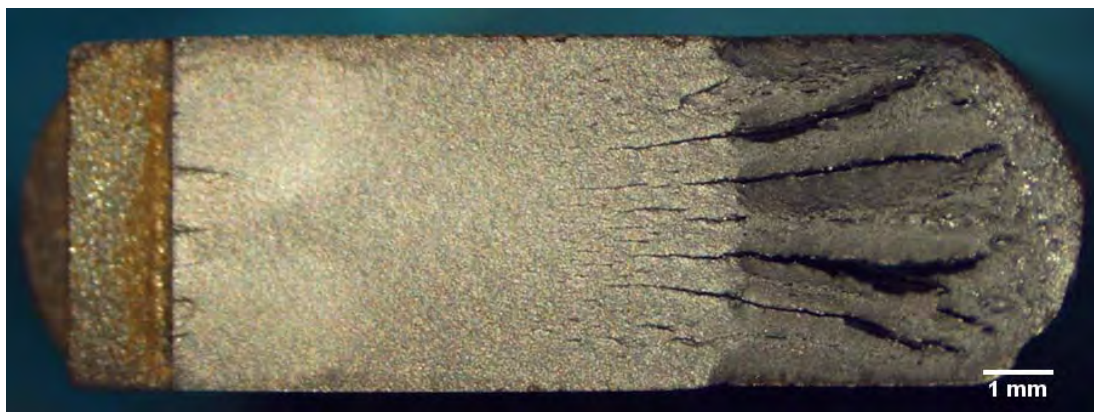


Figura 6. Macrografia da superfície de fratura.

As curvas da/dN versus ΔK para as razões de fadiga de 0,1; 0,3 e 0,5 são apresentadas nas Figuras 7, 8 e 9, respectivamente. As curvas foram obtidas através do método de regressão de sete pontos, que calcula os valores de da/dN e de ΔK a partir dos dados de entrada do equipamento (força, tamanho de trinca, número de ciclos, etc.). Os resultados obtidos por esse método convergem com os valores calculados pelo método de regressão do software *MTS Fatigue Crack Growth*. A partir dessas curvas, os coeficientes da Lei de Paris foram determinados e, para isso, foram desconsiderados os pontos iniciais e finais das curvas antes de utilizar a regressão.

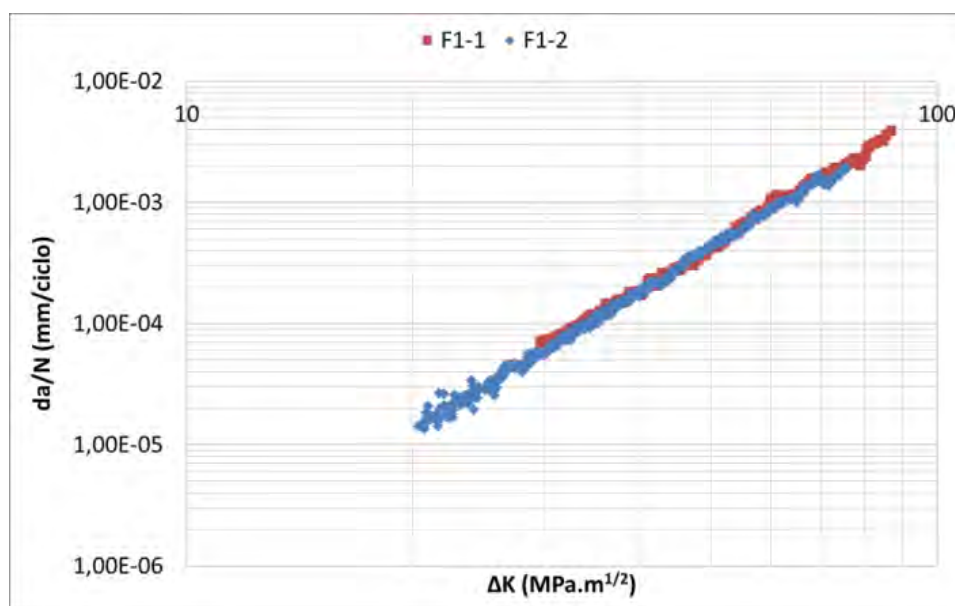


Figura 7. Curva da/dN versus ΔK do arame da armadura de tração com razão de carregamento de 0,1.

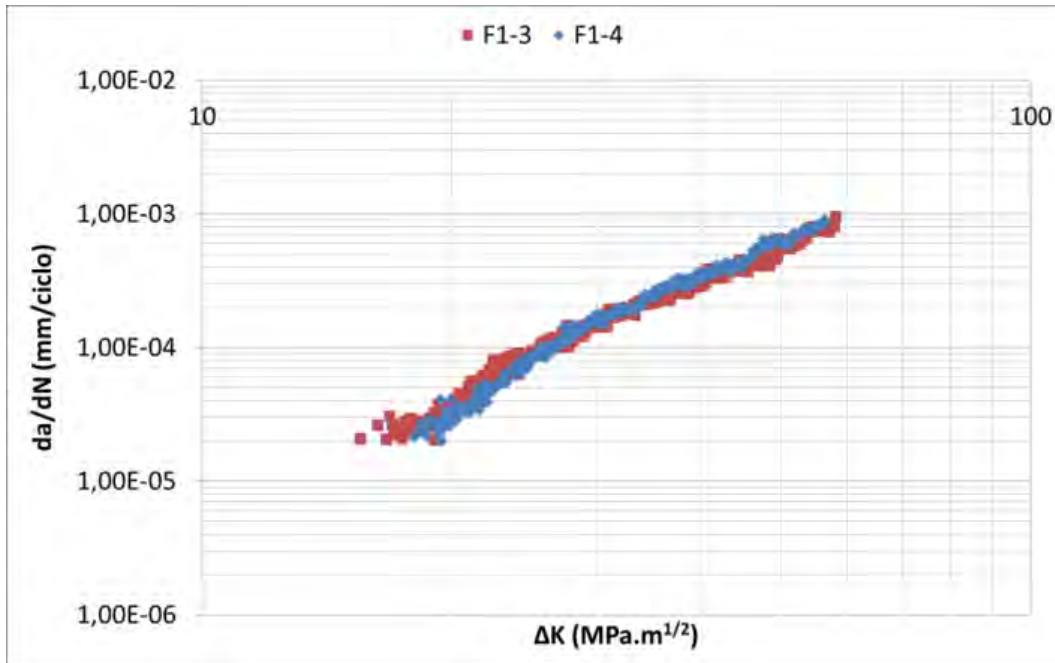


Figura 8. Curva da/dN versus ΔK do arame da armadura de tração com razão de carregamento de 0,3.

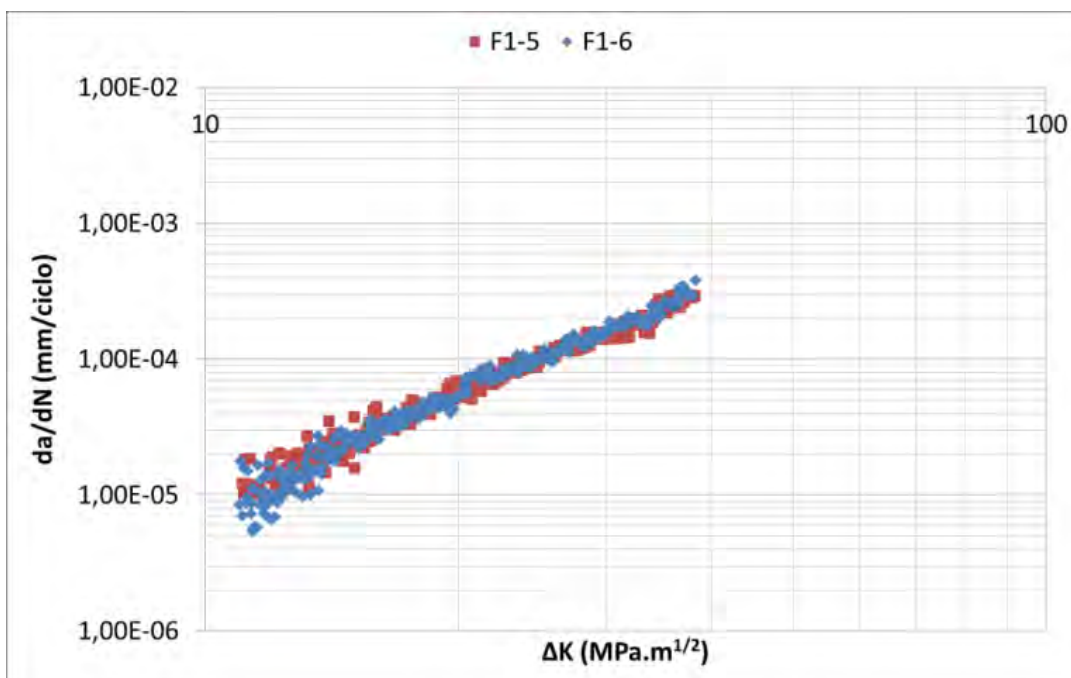


Figura 9. Curva da/dN versus ΔK do arame da armadura de tração com razão de carregamento de 0,5.

A partir de todos os dados obtidos nos ensaios de da/dN com diferentes razões de carregamento, foi realizado a regressão linear para obtenção dos coeficientes da equação de Walker, sendo as curvas de todos os ensaios apresentadas na Figura 10. A Tabela 6 apresenta o resultado da regressão linear para determinação dos coeficientes da equação de Walker para os arames da armadura de tração.

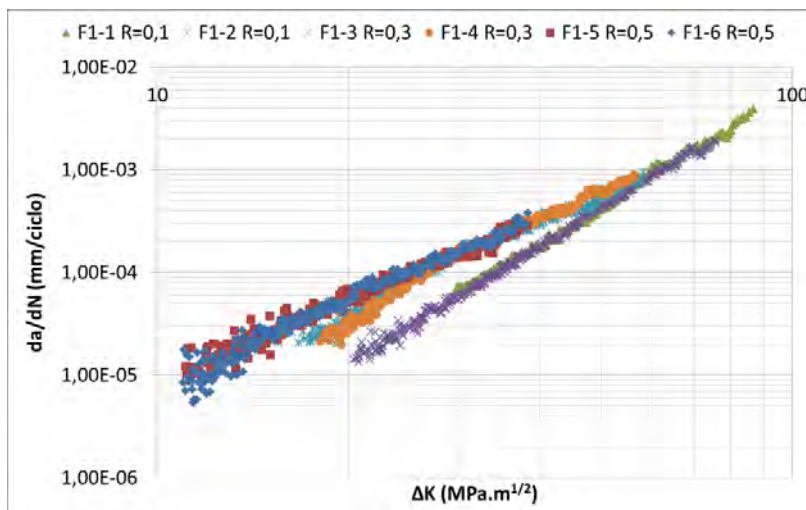


Figura 10. Resultados de todas as amostras para os ensaios de da/dN.

Tabela 6. Coeficientes da equação de Walker para os arames da armadura de tração

C_w	m_w	γ_w
1,26 E-09	3,20	0,51

4 DISCUSSÃO

Os corpos de provas que foram submetidos à razão de carregamento maior ($R=0,5$) apresentaram os maiores valores do coeficiente " C_p ". Este comportamento era esperado, pois o aumento da razão de carregamento acarreta deslocamento da curva da/dN versus ΔK para cima e para a esquerda e, subsequentemente, gera o aumento de " C_p ". Por outro lado, os valores do coeficiente " m_p " tiveram comportamento inverso ao do outro coeficiente de Paris, ou seja, conforme foi aumentado o valor de R, o valor de " m_p " foi reduzido. Esperava-se que houvesse pouca ou nenhuma influência no coeficiente " m_p " com a razão de carregamento. Analisando o estudo realizado por Pinheiro,⁽⁸⁾ foi encontrado o mesmo comportamento do coeficiente " m_p " no material base do aço API 2H Grau 50. Portanto, a modificação da inclinação da curva com o aumento da razão de carregamento é um fenômeno já reportado na literatura.

Os valores obtidos da equação de Walker permitem compreender o efeito da razão de carregamento sobre o material em carregamento cíclico. No caso do arame de armadura de tração, o coeficiente " γ_w " representa que o material apresenta uma moderada influência do R na curva da/dN versus ΔK . Os outros coeficientes (" C_w " e " m_w ") possuem valores relativamente elevados se comparados com aços estruturais ou ligas de alumínio. Assim, o material possuiu grande sensibilidade às condições impostas de carregamento, isto é, a modificação da forma do esforço que armadura de tração é submetida pode acarretar no aumento da propagação de trinca para valores elevados que podem levar a ruptura prévia do componente.

Cardinal et al. determinaram os coeficientes da equação de Walker para o aço carbono-manganês TC-128B (0,25%C e 1%Mn), utilizado em revestimento de carros-tanque.⁽⁹⁾ Esse material apresentou menores valores de " C_w " e " m_w " e maiores valores de " γ_w ". Logo, as propriedades de fadiga do aço da armadura de tração são inferiores as determinadas no estudo do aço TC128B, pois caso se altere o ΔK ou o R haverá um aumento mais significativo da propagação de trincas dos arames.

5 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados neste trabalho permitem as seguintes conclusões:

- a análise dos dados dos ensaios de propagação de trinca por fadiga mostraram que o aumento da razão de carregamento proporciona o aumento do C_p e redução do m_p , coeficientes da Lei de Paris, para os arames de alta resistência;
- os arames possuem sensibilidade à variação da configuração do carregamento aplicado, uma vez que os coeficientes determinados da equação de Walker C_w , m_w e γ_w apresentaram valores de 1,29E-09, 3,20 e 0,51, respectivamente, permitindo compreender o comportamento do material em diferentes níveis de ΔK e R; e
- as propriedades de propagação de trinca do material de um aço de alta resistência mecânica e alto teor de carbono, são inferiores se comparadas com um aço de baixo teor de carbono e menor resistência mecânica.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pela bolsa de mestrado.

REFERÊNCIAS

- 1 MARINHO, M.G.; SANTOS, J.M.; CARNEVAL, R.O. Integrity assessment and repair techniques of flexible risers. In: Proceedings of the 25th ASTM international conference on offshore mechanics and arctic engineering, vol. 4. 92467. 2006. p. 253–60.
- 2 BEDEN, S.M., e et al. "Review of Fatigue Crack Propagation Models for Metallic Components." European Journal of Scientific Research, 2009: 364-397.
- 3 ISO 12135. Metallic materials - Unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness. 2002.
- 4 ASTM E1823. Standard terminology relating to fatigue and fracture testing. 2011.
- 5 ASTM E647. Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates. 2011.
- 6 BS 6835-1. Method for the determination of the rate of fatigue crack growth in metallic materials, Part 1: Fatigue crack growth rates of above 10^{-8} m per cycle. 1998.
- 7 PETROBRAS N-1859: Consumível de Soldagem com Propriedade Assegurada. Rio de Janeiro, 2005.
- 8 PINHEIRO, J. Avaliação do comportamento à fadiga de uma junta soldada do aço API 2H Grau 50. Porto Alegre: UFRGS, 2010.
- 9 CARDINAL, J., e et al. "Fatigue Crack Growth Equations for TC-128B Tank Car Steel." Southwest Research Institute, 2006.