

ANÁLISE DE VIDA À FADIGA DE UM GRAMPO TENSOR

Antonio Carlos de Oliveira Miranda¹
Remo Magalhães de Souza²

Resumo

Este trabalho apresenta resultados de uma análise de vida à fadiga de uma rosca de um grampo tensor do cabo de aço do sistema pantográfico do Descarregador Contínuo de Navios da Alunorte (Alumina do Norte do Brasil), baseado em dados reais colhidos em campo. Nessa rosca houve o crescimento de uma trinca pelo processo de fadiga até chegar ao limite crítico que causou a ruptura da peça. Duas hipóteses são inicialmente levantadas para o processo iniciação da trinca: (1) o aparecimento de uma trinca de fadiga devido às cargas atuantes, ou (2) já havia uma trinca na peça devido a defeitos. Duas metodologias clássicas de projeto à fadiga são usadas para responder as hipóteses: método SN e método da/dN. O primeiro método poderá responder se houve iniciação de trinca devido às cargas atuantes de serviço, e o segundo método poderá responder se é possível que uma trinca propague a partir de um determinado tamanho. Os resultados são apresentados através de gráficos de iniciação da trinca em função da tensão de ruptura, que foram construídos levando em conta aumentos das cargas e considerando fator de segurança. Adicionalmente, a peça foi modelada com uma trinca numericamente por Elementos de Contorno. Os resultados revelaram valores de fator de intensidade de tensão suficientes para que ocorra o crescimento da trinca.

Palavras-chave: fadiga, método SN e da/dN, método dos elementos de contorno.

61º Congresso Anual da ABM - Julho de 2006, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

¹Eng. Civil, Ph.D., Tecgraf, PUC-Rio

²Eng. Civil, Ph.D., Nicae, Prof. Adjunto, Universidade Federal do Pará

1. Introdução

De acordo com Castro & Meggiolaro [1], “Fadiga é um tipo de falha mecânica causada primeiramente pela aplicação repetida de carregamentos variáveis, cuja característica principal é causar a geração e/ou a propagação paulatina de uma trinca, até a eventual fratura da peça. Fadiga é um problema local, que depende muito dos detalhes da geometria e do material do ponto mais solicitado da peça e da carga lá atuante, e que gera falhas localizadas, progressivas e cumulativas”. O evento terminal da propagação de trincas por fadiga é a fratura, ruptura ou quebra de uma estrutura em duas ou mais partes, quando ela atinge a carga máxima que pode suportar.

As metodologias tradicionais de projeto à fadiga podem ser divididas em três grupos: método SN, ϵ -N e da/dN [1, 2, 3]. O método SN ou de Wöhler é usado para prever a iniciação das trincas (encubação e nucleação) em estruturas grandes ou a vida total à fadiga de peças pequenas fazendo-se de uma análise de tensões que é linear elástica. O método ϵ -N também prever a iniciação das trincas, mas é um método mais poderoso que o SN, pois quantifica as deformações e tensões elastoplásticas cíclicas atuantes nos pontos críticos. O método da/dN ou de Paris, baseado nos conceitos da **Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE)**, é usado para quantificar a propagação das trincas por fadiga e o fraturamento final da peça.

Este trabalho apresenta resultados de uma análise aproximada de vida à fadiga de uma rosca de um grampo tensor do cabo de aço do sistema pantográfico do Descarregador Contínuo de Navios (DN-02) da Alunorte (Alumina do Norte do Brasil), baseado em dados colhidos pelo NiCAE (Núcleo de Instrumentação e Computação Aplicada a Engenharia) da UFPa (Universidade Federal do Pará), durante os dias 01, 30 e 31 de julho de 2003 [4].

Duas metodologias clássicas de projeto à fadiga serão usadas aqui para realizar a análise: método SN ou de Wöhler para a iniciação de trinca e método da/dN para o crescimento da trinca. O primeiro método poderá responder se houve iniciação de trinca devido às cargas atuantes de serviço, e o segundo método poderá responder se é possível que uma trinca propague a partir de um determinado tamanho.

2. Fadiga sob Cargas Reais de Serviço

Fadiga é o tipo de falha mecânica causada primariamente pela aplicação repetida de cargas variáveis, e cuja principal característica é o trincamento paulatino da peça, o qual eventualmente pode levá-la até a fratura. O trincamento pode ser muito lento se causado por gamas de tensões macroscópicas elásticas, e a fratura final pode ocorrer após muitos anos de uso aparentemente normal, depois de vários milhões ou bilhões de ciclos de carga de serviço e sem nenhum prévio aviso. Como as falhas por fadiga são progressivas, cumulativas e altamente localizadas, o dimensionamento à fadiga é um problema local, que depende dos detalhes da carga que solicita o ponto crítico da peça, da sua geometria e do seu material.

Na prática, a previsão do dano e da vida à fadiga requer informações complementares em seis áreas diversas: (1) Dimensões geométricas (incluindo principalmente as dos entalhes e das trincas, se presentes na estrutura); (2) Cargas de serviço (são dados de entrada nos modelos de dano, logo devem ser medidas, não estimadas); (3) Propriedades mecânicas (também devem ser medidas); (4) Análise de tensões (nos pontos críticos, geralmente as raízes de entalhes, para prever a iniciação das trincas); (5) Análise das trincas (para prever a sua

propagação, segundo os conceitos da mecânica da fratura); (6) Análise de dano (e.g., o modelo de Wöhler-Goodman-Miner no método SN).

Assim, o processo de dimensionamento funciona como se fosse uma corrente, cuja precisão é controlada pelo seu elo menos acurado. Os três elos dependem de informações que só podem ser obtidas experimentalmente, mas os três últimos elos dependem da qualidade do modelo teórico. Logo, só se pode fazer boas previsões quando todos os seus elos são igualmente precisos.

2.1 Método SN (ou de Wöhler) de Dimensionamento à Fadiga

O método **SN** é baseado em idéias antigas, mas consagradas pelo uso, e vem sendo melhorado desde meados do século XIX [5]. O método serve para prever a iniciação de trincas por fadiga sob tensões macroscópicas elásticas, as quais são associadas às vidas longas. Portanto, só se deve usar o método **SN** quando a tensão no ponto crítico da peça for menor do que a resistência ao escoamento cíclico do material, material esse que é modelado como na análise de tensões básica (contínuo, homogêneo, isotrópico, linear e elástico).

Wöhler descobriu que a fadiga $S_F(N)$ decresce com a vida **N** (em número de ciclos), e na maioria das vezes seguindo uma relação ajustável por uma parábola tipo:

$$N \cdot (S_F)^B = C \quad (1)$$

onde **B** e **C** são ajustados aos dados experimentais.

Na ausência de resultados experimentais confiáveis, há várias receitas [1, 6] para estimar a curva SN das peças de aço usa a relação parabólica $N \cdot (S_F)^B = C$ entre $10^3 < N < 10^6$, e assume um limite à fadiga S_L se $N > 10^6$, onde $S_L = k_a \cdot k_b \cdots S_L'$, ou seja:

$$\begin{cases} S_F(10^3) = 0,76 \cdot S_R \\ S_L(10^6) = k_a \cdot k_b \cdots 0,5 \cdot S_R, \text{ se } S_R < 1400MPa, \text{ ou} \\ S_L(10^6) = k_a \cdot k_b \cdots 700MPa, \text{ se } S_R > 1400MPa \end{cases} \quad (2)$$

onde S_R é a tensão de ruptura do material e k_i são fatores que quantificam os efeitos a vida à fadiga da peça quando comparada com os CPs padrão, como acabamento superficial, gradiente de tensões, temperatura, confiabilidade, etc.

A trinca se inicia em pontos críticos da peça, em geral, na raiz do entalhe. No caso geral pode-se ter fletores, torçores, normais e cortantes induzindo tensões no ponto crítico com cada componente de tensão nominal σ_n associada ao seu fator de concentração de tensão $K_t = \sigma_{max}/\sigma_n$. Entretanto, um outro fator é usado na concentração de tensões, $K_f = 1 + q \cdot (K_t - 1)$, chamado de fator de concentração de tensão na fadiga, onde **q** é a sensibilidade ao entalhe. O valor de **q** depende do material e do raio do entalhe, e é tabelado.

Um passo importante na análise de tensões é transformar as tensões alternadas e médias (σ_a e σ_m) em uma única tensão alternada equivalente que venham a causar o mesmo dano à peça, porque as curvas de Wöhler são obtidas sob flexão rotativa com \square tensão média igual a zero ($\sigma_m = 0$). Existem pelos menos quatro curvas σ_a σ_m tradicionais que fazem essa transformação [1]: Goodman, Gerber, Soderberg e ellipse.

O passo final da rotina de dimensionamento é análise do dano à fadiga. O conceito de dano pode ser associado a qualquer perda parcial da funcionalidade de uma peça ou equipamento. Assim, sendo D o dano, se uma peça virgem tem $D = 0$, e $D = 1$ para falha terminal, há dano parcial se $0 < D < 1$. O dano causado por cada evento $\{n_i, \sigma_{ai}, \sigma_{mi}\}$ da carga pode ser quantificada por $D_i = n_i / N_i$, onde n_i é o número de ciclos em que o evento atuou na peça e N_i é o número de ciclos que a peça duraria se apenas este evento nessa atuasse. A regra de acúmulo linear de dano [7] prevê a falha quando a soma dos dados igualar 1, $\sum (n_i / N_i) = 1$. Como os carregamentos reais são complexos (isto é, em geral têm amplitude variável no tempo), deve-se ordenar os eventos de carga pelo método **Rain-Flow** [8].

2.2 Método da/dN de Dimensionamento à Fadiga

Na MFLE a trinca pode ser caracterizada (mensurada) em termos de um parâmetro simples, K , chamado fator de intensidade de tensões que quantifica o campo de tensões em torno de uma trinca numa peça predominantemente elástica [1, 2, 3]. Cada modo está associado a um fator de intensidade de tensões: K_I para o modo I; K_{II} para o modo II e K_{III} para o modo III. O valor crítico de K_I , K_{IC} , é uma propriedade do material e é chamado de tenacidade à fratura.

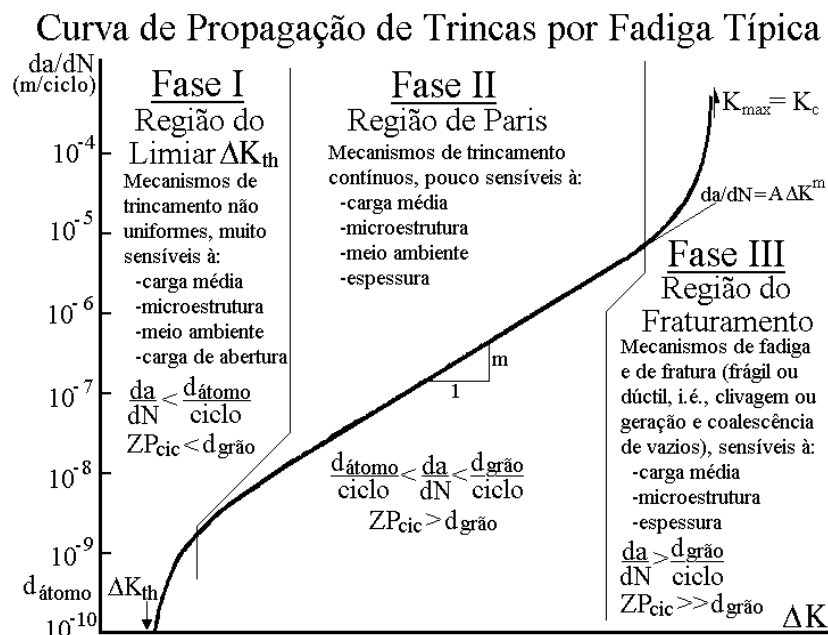


Figura 1 - Curva de propagação de trincas por fadiga típica.

No início da década de 60, Paris [9] mostrou convincentemente ser a variação do fator de intensidade de tensões (ΔK), e não a tensão, o parâmetro que controla a propagação das trincas por fadiga, ver Figura 1.

Existem alguns modelos empíricos bem conhecidos para quantificar as taxas de propagação de trincas por fadiga através de parâmetros que são ajustados aos resultados obtidos em testes experimentais, como por exemplo, modelo de Paris (descreve o comportamento à fadiga do material apenas na fase II), de Forman que modela tanto a fase II como a fase III; de Walker, um modelo similar ao modelo de Paris (Fase II), mas que incorpora os efeitos de R ; de Priddle, um modelo para modelar as três fases da curva $da/dN \times \Delta K$, mas não inclui os efeitos da razão R .

Efeitos de seqüência de carga influenciam o crescimento de trincas. Em geral, as taxas de propagação de trincas por fadiga sob cargas de amplitude variável são muito sensíveis à seqüência ou à ordem dos eventos de carregamento. Os efeitos de ordem da carga no crescimento das trincas por fadiga são fenomenologicamente complexos, pois podem ser causados por vários mecanismos diferentes, que podem atuar de forma independente ou simultânea. Os principais mecanismos indutores de retardos e/ou de acelerações [10] após variações bruscas da carga são:

- Fechamento da trinca induzido por plasticidade, oxidação ou rugosidade das faces da trinca, e transformação de fase gerada por deformação;
- Cegamento, dobra ou bifurcação da ponta da trinca;
- Campo de tensões ou das deformações residuais.

3. Análise

Basicamente, o grampo tensor é uma peça de aço que faz a ligação de uma estrutura (elevador de caçambas ou mastro) com um cabo de aço, como mostra a Figura 2 (observar que nessa Figura a rosca superior não aparece devido a sua ruptura). Nas duas extremidades do grampo existem roscas M56 que permitem a ligação com o cabo de aço através de uma peça auxiliar. Após anos de uso do descarregador, ocorreu falha no grampo com a ruptura da mesma.

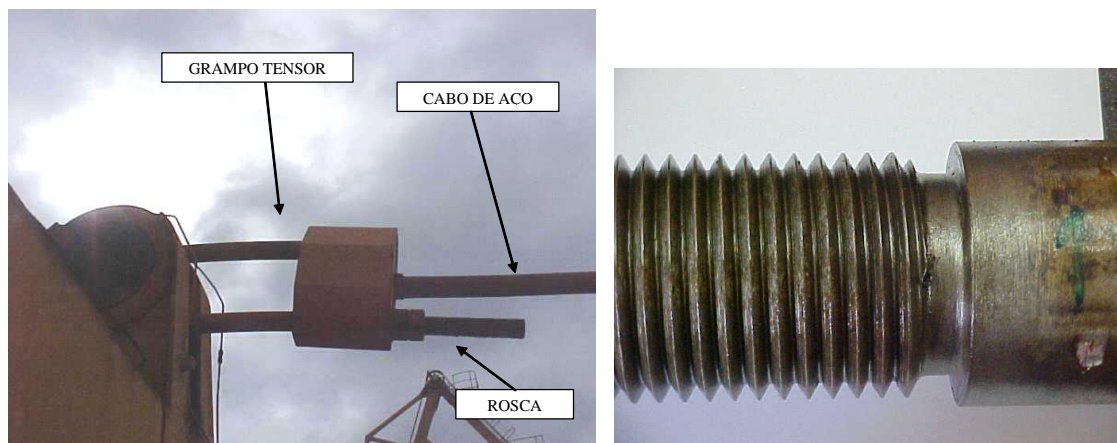


Figura 2 – Detalhe do grampo tensor após a ruptura e detalhe da rosca do grampo tensor.

3.1 Iniciação da Trinca

A previsão do comportamento estrutural à fadiga requer informações precisas sobre as dimensões da peça, cargas de serviço, propriedades mecânicas, análise de tensões, análise das trincas e análise do dano. Usualmente as propriedades do material são fornecidas pelo fabricante da peça ou então levantadas em laboratórios especializados de teste de materiais. O fabricante da peça apenas informou vagamente o tipo de aço empregado, sem fornecer detalhes das propriedades. Portanto, há uma falta de detalhes sobre as propriedades do material que pode comprometer a precisão da análise à fadiga.

Entretanto, pela falta de informações precisas das propriedades mecânicas do material, optou-se aqui em fazer uma análise de iniciação da trinca pelo método SN que ficará em função de uma propriedade do material, a tensão de ruptura.

Desse modo, de posse dessa informação somente será necessário comparar depois com valores dos gráficos que serão apresentados adiante.

As cargas de serviço atuantes no grampo tensor foram obtidas através de medidas de deformações utilizando-se extensômetros elétricos, “strain-gauges”. Por cinco períodos foram obtidas as deformações do grampo tensor durante operação da máquina. Durante a aquisição de dados, solicitou-se ao operador da máquina que executasse determinados manobras e movimentos de elementos do descarregador de navio, tais como subida e descida da lança, rotação da lança, giro do pé, etc. A Figura 4 mostra esquematicamente as deformações medidas nesse período.

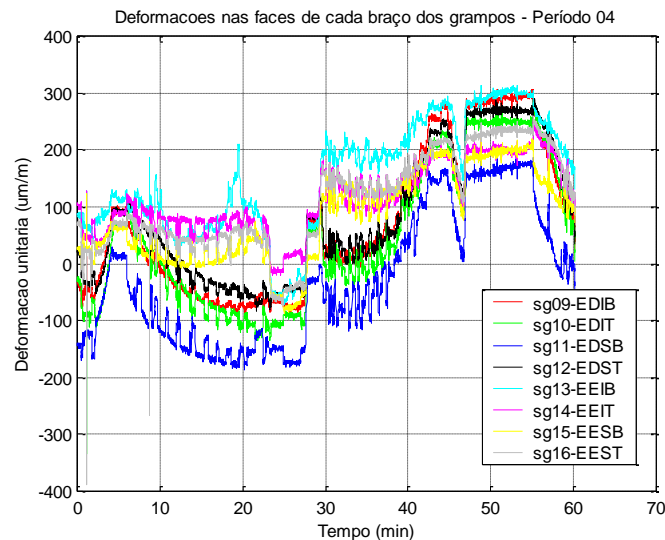


Figura 3 – Deformações nas faces do grampo referentes ao período de uma hora.

Um modelo de elementos finitos foi construído levando em conta a rosca do grampo tensor. Como a peça fraturou na rosca e livre de apertos de porcas, não são levadas em conta possíveis tensões residuais provenientes de apertos. Essa análise resultou uma concentração de tensão $K_t = 4,0$. A sensibilidade ao entalhe foi obtida de tabelas [] que leva em conta o raio do entalhe, com valor $q = 0,941$.

As tensões alternadas e médias obtidas de campo são transformadas em tensões totalmente alternadas equivalentes que causa o mesmo dano à fadiga. Nessa análise, usou-se a curva σ_a/σ_m de Gerber.

A análise de iniciação de trinca à fadiga será realizada em função da tensão de ruptura do material. Para isso, várias análises serão realizadas usando a equação (2), variando a tensão de ruptura de **500 MPa** até **1550 MPa** em intervalos de **50 MPa**. Os fatores existentes na equação (2) foram obtidos de tabelas e livros [], sendo que a peça foi considerada como usinada, sob cargas de tração somente, trabalhando em temperaturas externas.

Foram introduzidos dois fatores nas análises: fator de amplificação das cargas (**Fa**) e fator de segurança (**Fs**). O **Fa** leva em conta eventuais efeitos de aumento das amplitudes das cargas em relação àquelas medidas na Figura 4, e é somente aplicado nas tensões alternadas. Três valores são usados: (i) 1,00 não havendo acréscimo nas cargas; (ii) 1,25 havendo um acréscimo de 25% nas cargas; (iii) 1,50 havendo um acréscimo de 50% nas cargas. O fator de segurança **Fs** é aplicado tanto nas cargas médias como nas cargas alternadas e nessa análise foi considerado o valor de 1,50.

A Figura 4 mostra o dano aproximado causado na peça e o número de horas para o dano total da peça sem fator de segurança. Valores menores que 700 MPa para S_r causam dano maior que 1 (um) somente para o intervalo considerado de carga (60 minutos = 1 hora). O valor seguinte ao valor final de S_r (S_r final + 50 MPa) de uma curva representa vida infinita, isto é, que não causa nenhum dano na peça. Por exemplo, a curva $F_a = 1,00$ e $F_s = 1,0$ tem vida infinita em $S_r = 850$ MPa. A Figura 5 é idêntica a Figura 4, mas leva em conta o fator de segurança $F_s = 1,50$ (situação de projeto).

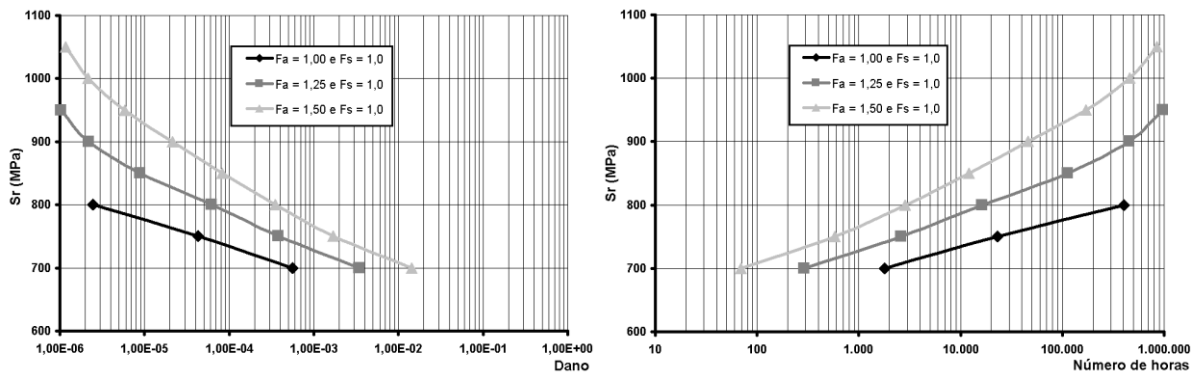


Figura 4 – Estimativa do dano causado (esquerda) e estimativo do número de horas para o dano total (direita) no grampo tensor sem fator de segurança.

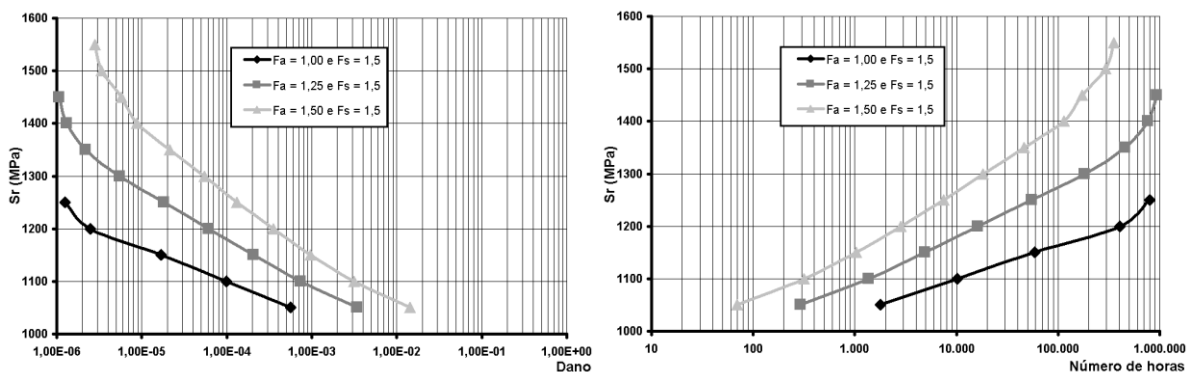


Figura 5 – Estimativa do dano causado (esquerda) e estimativo do número de horas para o dano total (direita) no grampo tensor com fator de segurança.

A partir dos gráficos apresentados é possível obter bastantes informações sobre vida à fadiga para o grampo tensor. Se por acaso, um dia as propriedades mecânicas do material forem levantadas, a Figuras 4 será bastante útil para responder o dano causado a peça e o número de horas aproximadas para que aparecesse uma trinca. De modo semelhante, a Figura 5 também pode responder várias outras questões. Por exemplo, a peça deveria ser projetada para ter no mínimo uma tensão de ruptura de $S_r = 1300$ MPa considerando um fator de segurança de $F_s = 1,50$, para ter vida infinita. Para uma tensão de ruptura menor é possível calcular o intervalo de inspeção e reparos pelo número de horas trabalhadas por dia pelo descarregador.

Há a possibilidade que as condições de carregamento não são suficientes para o aparecimento de uma trinca de fadiga. Nesse caso, resta a hipótese de um defeito ou uma micro-trinca pré-existentes que são provenientes de falhas no processo de fabricação da peça. Portanto, para tirar conclusões de quanto uma

trinca é “perigosa” na peça, será realizada na próxima seção uma estimativa dos valores dos fatores de intensidade de tensão de uma trinca na rosca do grampo tensor.

3.2 Propagação da Trinca

O objetivo dessa seção é verificar se uma trinca pré-existente é suficiente “severa” para que ela propague sob as condições de carregamento, pois é possível que na rosca do grampo tensor houvesse um defeito ou uma micro-trinca pré-existentes que são provenientes de falhas no processo de fabricação da peça.

Para realização de tal tarefa foi usado o programa **Franc3D** [11], disponível pelo grupo da mecânica da Fratura da Universidade de Cornell nos Estados Unidos (CFG/Cornell – Cornell Fracture Group) [12]. O programa usa método dos elementos de contorno para resolver problemas de trincamento. O programa já tem longos anos de uso na universidade para fins de pesquisa e projetos para indústria e instituições.

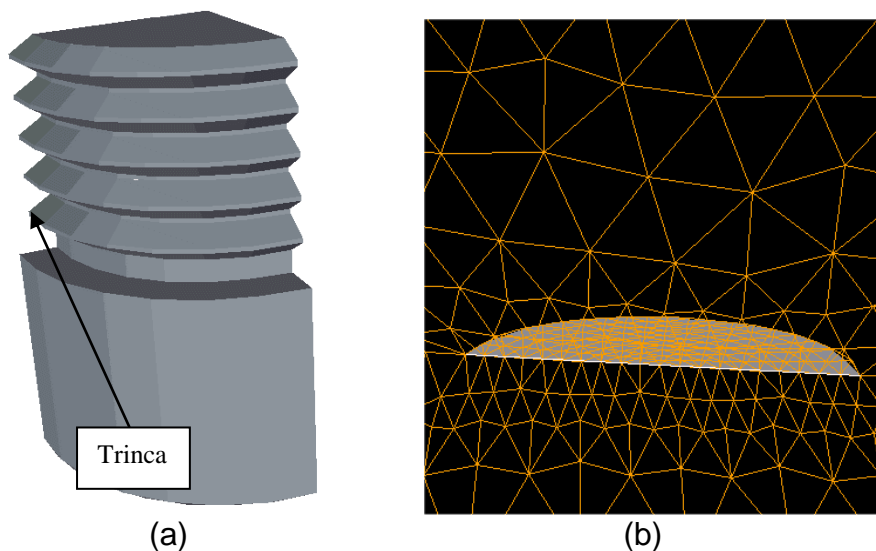


Figura 6 – Modelo desenvolvido no Franc3D: (a) $\frac{1}{4}$ do grampo tensor; (b) Detalhe da geometria da trinca.

A Figura 6(a) mostra o modelo tridimensional no programa **Franc3D**, modelado apenas $\frac{1}{4}$ do grampo tensor. Observar que a rosca em espiral foi simplificada, mas que não compromete a análise, pois o importante é representar o local de concentração de tensões. A Figura 6(b) mostra o detalhe da trinca inserida no modelo assim como a malha em seu entorno. A trinca tem largura $L = 0,5 \text{ mm}$ e de profundidade para dentro da peça de $H = 0,1 \text{ mm}$. Portanto, uma trinca impossível de detectar a olho nu.

A Figura 7 mostra os valores dos fatores de intensidade de tensão na frente da trinca para uma amplitude de tensão média do carregamento, valor esse de 50 MPa aplicado na parte sem rosca do grampo. Os valores apresentados na Figura 11 se enquadram na Fase II da Curva de Propagação da Trinca (ver Figura 1). Nessa fase, o crescimento da trinca é aproximadamente contínuo ao longo da frente da trinca.

Em resumo, a magnitude dos fatores de intensidade de tensão na frente da trinca é suficiente para que ocorra o crescimento da trinca sob as condições de carregamento levantadas. Portanto, qualquer que seja o mecanismo do surgimento

da trinca (fadiga ou trinca pré-existente), a trinca se propagou até alcançar um limite crítico que ocasionou o fraturamento completo da peça.

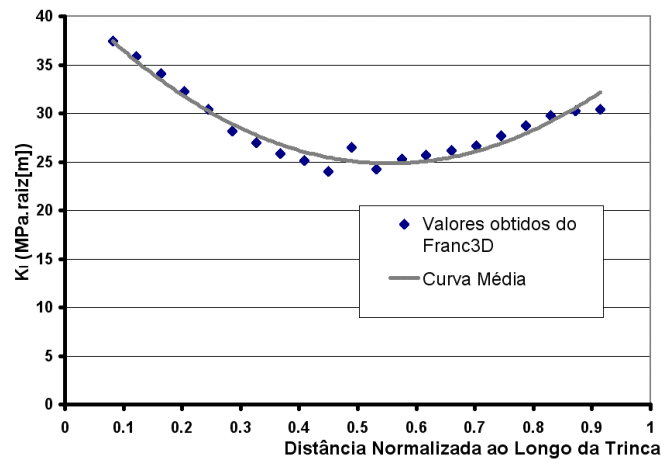


Figura 7 – Valores de KI obtidos pelo Franc3D ao longo da trinca.

4. Conclusões

Esse trabalho apresentou resultados de uma análise aproximada de vida à fadiga de uma rosca do grampo tensor que fraturou durante operação de um sistema pantográfico do Descarregador Contínuo de Navios (DN-02) da Alunorte (Alumina do Norte do Brasil).

Inicialmente, duas hipóteses foram levantadas para o surgimento de uma trinca na rosca: (1) a trinca surgiu devido à fadiga do material; (2) a trinca surgiu devido a alguma falha na fabricação da peça. Em ambos os casos, houve o crescimento da trinca pelo processo de fadiga até chegar ao limite crítico que causou a ruptura da peça. Em termos de análise, foi usado o método clássico de iniciação de trinca SN para verificar a primeira hipótese levantada. Para a segunda hipótese, foi usado outro método clássico da mecânica da fratura, da/dN.

Pela falta das propriedades mecânicas do material, optou-se em fazer uma análise de iniciação da trinca que fica em função de uma propriedade, a tensão de ruptura. Desse modo, foram montados gráficos de estimativa de dano à fadiga e gráficos com estimativa de hora para o dano total da peça. Esses gráficos foram construídos levando em conta um aumento das cargas, àquelas medidas em campo, e introduzindo fator de segurança. Com base nesses gráficos é possível ter uma idéia geral sobre o comportamento da peça quando solicitada à fadiga. Adicionalmente, eles podem responder várias perguntas sobre a vida à fadiga da peça, como por exemplo: Para um dado valor da tensão de ruptura, qual o dano causado a peça? Em quantas horas de trabalho se espera que a peça inicie uma trinca de fadiga? Qual tempo estimado de inspeção e reparos? Como projetar uma nova peça?

Também foi realizada uma análise para verificar se uma trinca pré-existente é suficiente severa para que ela propague sob as condições de carregamento impostas. Para tal tarefa, foi usado o programa Franc3D, disponível pelo grupo da mecânica da fratura da Universidade de Cornell nos Estados Unidos. Com esse programa foi modelado parte da rosca onde foi introduzida uma trinca. Os resultados revelaram valores de fator de intensidade de tensão suficientes para que ocorra o crescimento da trinca, pois esses valores se encontram na Fase II da Curva de Propagação da Trinca (ver Figura 1).

Em resumo, qualquer que seja o motivo do aparecimento da trinca (fadiga ou defeito de fabricação), houve a propagação contínua da trinca pelo processo de fadiga e que colapsou com a fratura total da mesma. Entretanto, um entendimento melhor do processo só será possível com a recuperação da peça fratura, realizando testes de laboratório para levantar as propriedades do material e realizando inspeções visuais e metalográficas na peça.

5. Referências

- [1] Castro, J.T.P., Meggiolaro, M.A., “Fadiga sob Cargas Reais de Serviço”, livro em publicação, 2006.
- [2] Dowling, N.E., “Mechanical Behavior of Materials – Engineering Methods for Deformation, Fracture and Fatigue”, Prentice Hall, 1999.
- [3] Lee, Y.L., Pan, J., Hathaway, R., Barkey, M., “Fatigue Testing and Analysis: Theory and Practice”, Elsevier, 2005.
- [4] Souza, R. M., “Monitoração Dinâmica dos Grampos Tensores dos Cabos de Aço do Sistema Pantográfico do Descarregador Contínuo de Navio DN-01 da Alunorte – Alumina do Norte do Brasil”, relatório técnico, 2003.
- [5] Mann, J.Y., “The Historical Development of Research on the Fatigue of Materials and Structures”, The Jnl. of Autralian Inst. Of Materials, Nov. 1958, pp. 222-241.
- [6] Shigley, J.E., Mischke, C.R., “Mechanical Engineering Design”, McGraw-Hill, 1989.
- [7] Miner, M.A., “Cumulative Damage in Fatigue”, Journal of Applied Mechanics, v.12, pp.A157-A164, 1945.
- [8] ASTM E 1049, “Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis”, ASTM Standards v.03.02.
- [9] Paris, P.C., Gómez, M.P., Anderson, W.E., “A Rational Analytic Theory of Fatigue”, The Tred in Engineering, v.13, pp.9-14, 1961.
- [10] Suresh, S., “Fatigue of Materials”, Cambridge, 1989.
- [11] FRANC3D and OSM, http://www.cfg.cornell.edu/software/franc3d_osm.htm.
- [12] Cornell Fracture Group, <http://www.cfg.cornell.edu>.