

# INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO DE FUROS NA TAXA DE CRESCIMENTO DE TRINCA POR FADIGA

Jerry Faleiro Coutinho Filho <sup>1</sup>, Carla Tatiana Mota Anflor <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Mecânica Experimental e Computacional, PGIntegridade, Universidade de Brasília, Brasil.

E-mail: jerryfaleirocf@gmail.com

<sup>2</sup> Grupo de Mecânica Experimental e Computacional, PGIntegridade, Universidade de Brasília, Brasil.

E-mail: anflor@unb.br

## Resumo

O objetivo deste artigo é estudar a taxa de crescimento de trinca devido à presença de furos feitos para a união de componentes. Os fatores de intensidade de tensões (FITs) serão calculados numericamente utilizando o método dos elementos finitos considerando a teoria da mecânica da fratura elástica linear. O procedimento envolve estimar os FITs para prever o crescimento da trinca por fadiga sob um estado plano de tensão. A análise da fadiga será realizada considerando a Lei de Paris e a direção do crescimento de trinca pela teoria da tensão circunferencial máxima.

**Palavras-chave:** Método dos elementos finitos; Fadiga; Furos; Crescimento de trinca.

## Abstract

The aim of this article is to study the rate of crack growth due to the presence of holes made for the union of components. Stress intensity factors (SIFs) will be numerically calculated using the finite element method for the mechanical problem of linear elastic fracture. The procedure involves estimating the SIFs to predict the growth of fatigue cracks under a flat state of tension. Fatigue analysis will be performed considering the Paris Law and the direction of crack growth by the theory of maximum circumferential stress.

**Keywords:** Finite element method; Fatigue; Holes; Crack growth.

## 1. Introdução

As falhas mecânicas devido à fadiga têm sido objeto de esforços de engenharia nos últimos anos, abrangendo um amplo espectro de indústrias, como de estruturas, aeronáutica, naval, automotiva e locomotiva [1].

A previsão do comportamento de trincas por fadiga é essencial ao se estimar a vida útil dos componentes. Estima-se que cerca de 50 – 90 % das falhas mecânicas ocorrem devido às cargas de fadiga, desta forma gerando um custo considerável para as indústrias [2].

O campo de estudo da predição de vida em fadiga apesar de antigo, com aproximadamente 160 anos,

ainda é considerado uma arte empírica e não uma ciência exata [3].

Mesmo para níveis de tensão abaixo da tensão última de um determinado material, danos microscópicos podem se acumular ao serem submetidos a ciclos de carregamentos contínuos, podendo assim gerar uma trinca ou outro dano macroscópico que leve o componente à falha. A ocorrência deste tipo de falha resultante de carregamentos cíclicos é chamada de fadiga [4].

O estudo de fratura pode ocorrer tanto no campo micro quanto no campo macroscópico. No campo macroscópico a trinca é detectável, classificada como

longa e seu tamanho inicial é de 1 mm. No campo microscópico as trincas são classificadas em curtas e pequenas. Os elevados níveis de tensão atuantes nas trincas curtas impedem o desenvolvimento de condições de escoamento de pequena escala necessários para seu comportamento como trinca longa.

A taxa de crescimento de trincas curtas pode ser significativamente maior que a correspondente taxa para trincas longas. Quando caracterizadas em termos do mesmo fator intensidade de tensão. Mas as pequenas trincas crescem a taxas consideráveis quando o  $\Delta K$  nominal é menor que o fator intensidade de tensão ao limiar  $\Delta K_{th}$  obtido para trincas longas

A trinca curta é da ordem do tamanho dos grãos, enquanto a trinca pequena é da ordem do tamanho do grão.

Uma trinca curta se difere de uma trinca longa, pois a cinética de crescimento é diferente. Ao analisar uma trinca longa a força motriz aplicada na ponta da trinca é expressa em termos da variação do fator de intensidade de tensão ( $\Delta K$ ) e de sua taxa de crescimento ( $da/dN$ ), que são independentes da geometria do espécime e do comprimento da trinca (baseados no  $\Delta K$ ). Por definição as taxas de crescimento em trincas curtas são maiores do que em trincas longas e variam com o comprimento da trinca [5]

O estudo de [6] investigou numericamente a influência da presença de furos e suas posições na taxa de crescimento de trinca em um espécime padronizado. Neste estudo numérico, os autores utilizaram um modelo de propagação de trincas baseado na lei de Paris, onde concluíram que as trincas crescem na direção dos furos. Em outro trabalho similar (Alshoaibi, 2021) foi demonstrado que a espessura da geometria não altera a trajetória do crescimento da trinca, mas quando a espessura do espécime aumenta ou diminui isso traz um impacto significativo na distribuição de tensão e deformação. Conforme a espessura do espécime aumenta pode-se verificar uma redução na tensão de equivalente de von-Mises [7]. O estudo da influência de furos na taxa de crescimento de trincas é um tema atual e relevante, tendo em vista que o processo de furação em estruturas é um procedimento padrão de manufatura para união de componentes mecânicos. Neste sentido, o principal objetivo deste trabalho consiste em avaliar a vida em fadiga de um espécime com a presença de descontinuidades (furos e trincas). O problema abordado foi resolvido utilizando o método dos elementos finitos e o recurso recentemente disponibilizado conhecido como SMART (Separating Morphing and Adaptive Remeshing). Na tecnologia SMART a malha se adapta na ponta da trinca à medida que seu comprimento evolui.

A taxa de crescimento de trinca foi realizada considerando a Lei de Paris para a região II do gráfico  $dN \times \Delta K$ .

## 2. Definições de taxa de crescimento de trinca por fadiga

Várias abordagens utilizando o MEF foram desenvolvidas ao longo dos anos para a análise do campo de tensão na ponta da trinca, tais como, método dos elementos finitos estendidos (XFEM), método dos elementos finitos generalizados (GFEM), método do Elemento Difuso (DEM) entre outros.

O método dos Elementos Finitos Estendidos (XFEM) consiste no enriquecimento das funções de base para representar o comportamento da fratura. O enriquecimento é definido apenas nos elementos onde a descontinuidade está presente. O método dos Elementos Finitos Generalizados (GFEM) apresenta duas características principais: Utilizar as malhas parcial o totalmente independentes da geometria., enriquecer as aproximações pelo uso de funções especiais. O método do Elemento Difuso (DEM) é como uma generalização da técnica de interpolação de elementos Finitos. Varias aplicações para esse método são indicadas, como solução de equações diferenciais parciais ou ordinárias. No entanto o MEF exige que a superfície da trinca coincida com a borda dos elementos finitos [7].

Paris, na década de 1960, propôs um grande avanço para resolução de problemas relacionados a fadiga, propondo uma abordagem analítica baseada na mecânica da fratura linear elástica. A falha por fadiga ocorre devido à propagação de uma trinca pré-existente, contida no elemento estrutural. A partir do trabalho de Paris foi demonstrado que a taxa de crescimento da trinca ( $da/dN$ ) é uma função resultante da variação do fator de intensidade de tensão ( $\Delta K$ ). A lei de Paris é uma lei de potência capaz de descrever a propagação de trincas com resultados convergentes com valores encontrados experimentalmente [8], conforme apresentada na eq. (1).

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

onde, C é uma constante do material e m é a inclinação do gráfico log-log.

A lei de Paris só é válida na parte central do diagrama denominada como região II (Figura 1). Quando o fator de intensidade de tensão (FIT) tende à tenacidade à fratura do material, ( $K_c$ ) a condição crítica de Griffith-Irwin é atingida e a curva apresenta uma assíntota vertical [8], resultando na falha do componente.

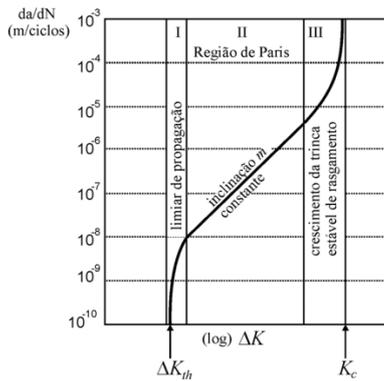


Figura 1 – Regiões crescimento da trinca em função de  $(\Delta K)$  [9].

As aplicações de mecânica da fratura tradicionalmente se concentram em problemas de crescimento de trinca sob o mecanismo de abertura, conhecido por modo I. Apesar disso, muitas falhas de serviço ocorrem a partir do crescimento de trincas submetidos a carregamentos de modo misto (carregamentos cíclicos, tensão e cisalhamento). A condição de carregamento que será discutida neste trabalho, consiste no crescimento de trincas sob o modo I e II. Uma característica de trincas de fadiga de modo misto é que elas se propagam de maneira não semelhante, ou seja, a direção de crescimento de uma trinca muda quando submetida a carregamentos de modo misto [10].

O  $\Delta K_{eq}$  (que é uma função de  $k_I$  e  $k_{II}$ ) usado para várias curvas de crescimento. O  $\Delta K_{eq}$  foi relacionado com a taxa de crescimento de trinca por fadiga primeiramente por Tanaka, utilizando condições de carregamento misto modo I/II na forma da lei de Paris [11].

O crescimento de trinca por fadiga ocorre na seguinte condição,  $\Delta K_{eq}(\Delta k_I, \Delta k_{II}) \geq K_{th}$  e uma fratura instável ocorre quando  $\Delta K_{eqmax} \geq K_c$ . Onde  $K_{th}$  é o limiar de crescimento de trinca por fadiga, ou seja, é conhecido como um valor limite inferior de  $\Delta K$  abaixo do qual o crescimento de trinca normalmente não ocorre.

As tensões nominais da seção bruta correspondente são  $\sigma_{max}$  e  $\sigma_{min}$  sendo aplicadas como constantes. Ao se analisar o crescimento de trinca é convencional utilizar a faixa de amplitude tensões  $\Delta\sigma$ , a razão de tensões (R) e variação do fator de intensidade de tensões são calculados a partir das equações (2), (3) e (4).

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (2)$$

$$R = \sigma_{min}/\sigma_{max} \quad (3)$$

$$\Delta K = F\Delta\sigma\sqrt{\pi a} \quad (4)$$

A vida para cada incremento de  $\Delta a$  pode ser estimado através da equação a seguir:

$$\int_0^{\Delta a} \frac{da}{C(\Delta K_{eq})^m} = \int_0^{\Delta N} dN = \Delta N \quad (5)$$

A faixa equivalente de FIT é definido pela equação:

$$\Delta K_{eq} = \frac{1}{2} \cos \frac{\theta_0}{2} [\Delta K_I(1 + \cos\theta_0) - 3\Delta K_{II}\sin\theta_0] \quad (6)$$

Uma zona cíclica plástica se forma na ponta da trinca, e a trinca em crescimento deixa um rasto plástico. Se essa região plástica for pequena, gerada em torno da zona de singularidade elástica, então as condições na ponta da trinca são unicamente definidas pelo valor de  $K$  atual e a taxa de crescimento de trinca (caracterizado por  $K_{min}$  e  $K_{max}$ ) [12].

### 3. Simulação Numérica do Crescimento de Trincas por Fadiga de Modo Misto

Existem duas abordagens disponíveis para simulações de crescimento de trinca, são elas: extensão incremental de trincas, consiste em inserir uma trinca no material. O método de extensão incremental de vida, consiste em medir a vida da trinca. O (FIT) de modo misto é calculado usando o comprimento de trinca incrementado e a vida em fadiga, que é avaliada para uma porção incrementada da trinca integrando a Lei de Paris.

A simulação de vida em fadiga foi realizada utilizando o método dos elementos finitos, através da tecnologia SMART de análise e crescimento de trinca, recurso do software ANSYS® 2022 R1. A tecnologia SMART permite prever a trajetória de propagação das trincas e a sua vida à fadiga associada à avaliação dos fatores de intensidade de tensão. O ANSYS pode modelar três tipos de trinca, são elas: arbitrária, semi-elíptica e pré-malhada.

A ferramenta de análise de crescimento de trinca SMART utiliza a frente da trinca na abordagem de trinca arbitrária, com o FIT sendo o critério de falha. À medida que a trinca se propaga, os segmentos de trinca recém introduzidos assumem sempre um comportamento de zona coesa. A malha é atualizada automaticamente para alterações na geometria provenientes do crescimento de trincas, reduzindo assim, longas sessões de pré-processamento [13].

Neste trabalho foi considerado um corpo de prova com dimensões 40 mm x 40 mm x 8 mm. A Fig. 2 ilustra a posição dos furos no interior do corpo de prova, sendo os dois furos localizados à direita da linha média utilizados para aplicação das condições de contorno.

A tabela 1 apresenta a distância do eixo do furo em relação a ponta da trinca, sendo abscissa (X) e ordenada

(Y). Sendo assim, a distância mencionada se dá para cada corpo de prova compactado (CTS) analisado conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Coordenadas geométricas de localização no espécime CTS.

Corpo de prova	Coordenada	
	X	Y
CTS 01	8.3	8.1
CTS 02	8.4	6.9
CTS 03	8.1	8.1
CTS 04	7.7	6.7

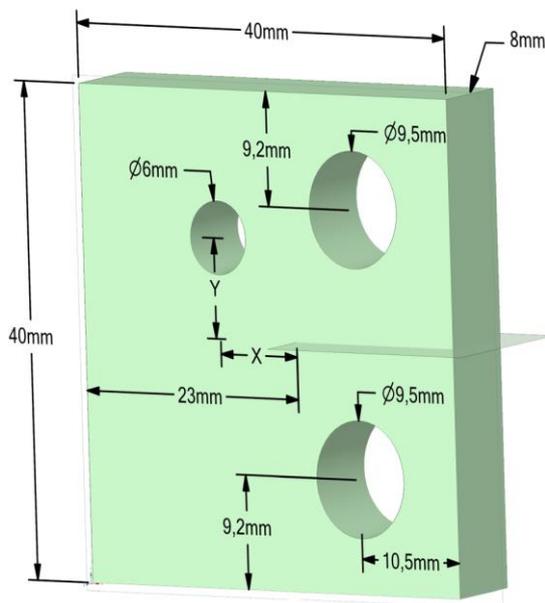


Figura 2 – Geometria do espécime com disposição dos furos.

A malha inicial gerada é representada pela Fig. 3, composta por elementos com tamanho de 4 mm, gerando 54.715 nós e 37.343 elementos

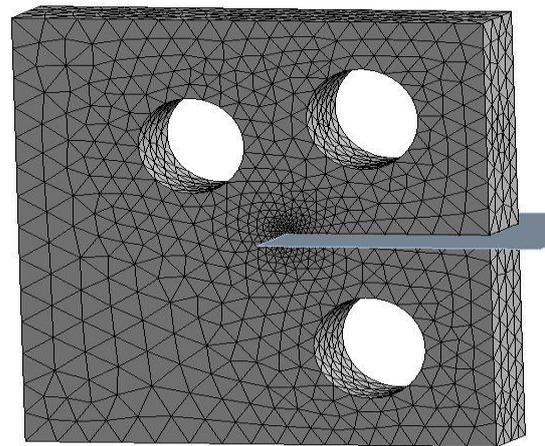


Figura 3 – Detalhamento da malha

Os raios utilizados para cada combinação orientação geométrica do furo (Tab. 1), foram: 3mm, 3.5 mm, 4 mm e 4.5 mm.

Um total de quatro corpos de prova foram simulados. As propriedades do material empregadas na simulação numérica são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades dos Materiais.

Propriedades	Unidades
Modulo Elasticidade, $E$	205 GPa
Razão de Poisson, $\nu$	0.29
Tensão Escoamento, $\sigma_y$	285 MPa
Tensão Última, $\sigma_u$	491 MPa
Coef. Lei de Paris, $C$	$8.59E-14$ mm/(ciclo MPa mm <sup>0.5</sup> )
Exponente Lei de Paris, $m$	4.26

#### 4. Resultados

Na figura 4 foi apresentado a avaliação da influência do raio ( $R$ ) em relação à quantidade de ciclos para o crescimento da trinca. A figura 5 foi gerada a partir dos dados da figura 4. Na figura 4 é apresentado a influência do raio do furo na evolução da trinca em relação a vida em serviço. [6]

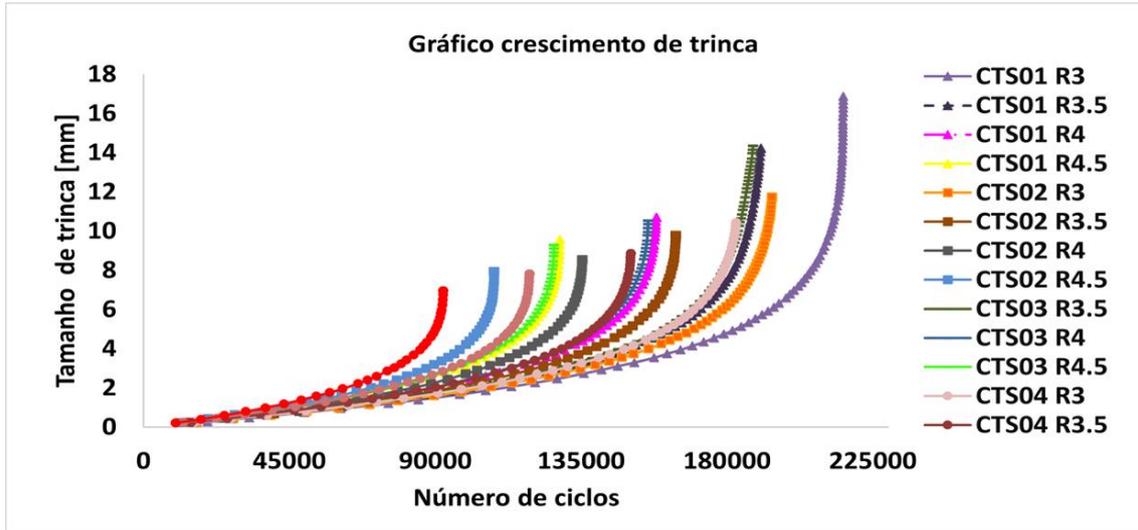


Figura 4 – Avaliação da influência do raio no crescimento de trinca (N ciclos x Tamanho de trinca [mm]).

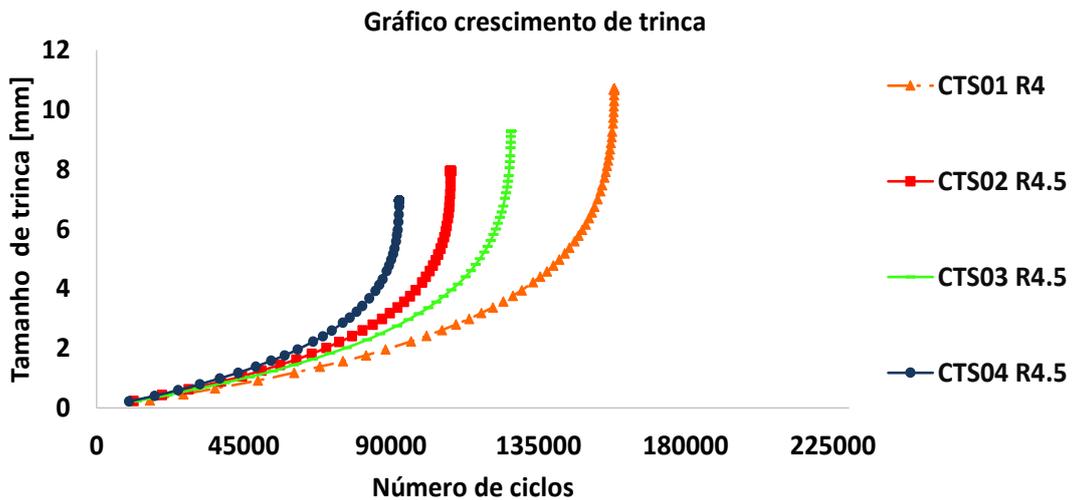


Figura 5 Avaliação da influência de R nos CTS [N ciclos x Tamanho de trinca (mm)].

Ao analisar a variação do diâmetro do furo para cada espécime (CTS), é esperado que o valor R específico (Fig. 7), frequência de ensaio e ambiente, as taxas de crescimento de trinca dependam apenas do fator de intensidade de tensões  $\Delta K$ . A variável K caracteriza a severidade de uma combinação de carga, geometria e comprimento de trinca, e  $\Delta K$  possui a mesma função para carregamento cíclico. Assim, independentemente do nível de carga, do comprimento da trinca e da geometria da amostra, todos os dados da  $da/dN$  versus  $\Delta K$

para um conjunto de condições de teste devem cair juntos ao longo de uma única curva [4].

O resultado numérico para os espécimes CTS#2 (Fig. 7) CTS#4 (Fig. 8) foram validados com a literatura. O estudo numérico proposto por [6], identificou que os espécimes CTS 02 e 04, direcionaram a trajetória do crescimento de trinca [6].

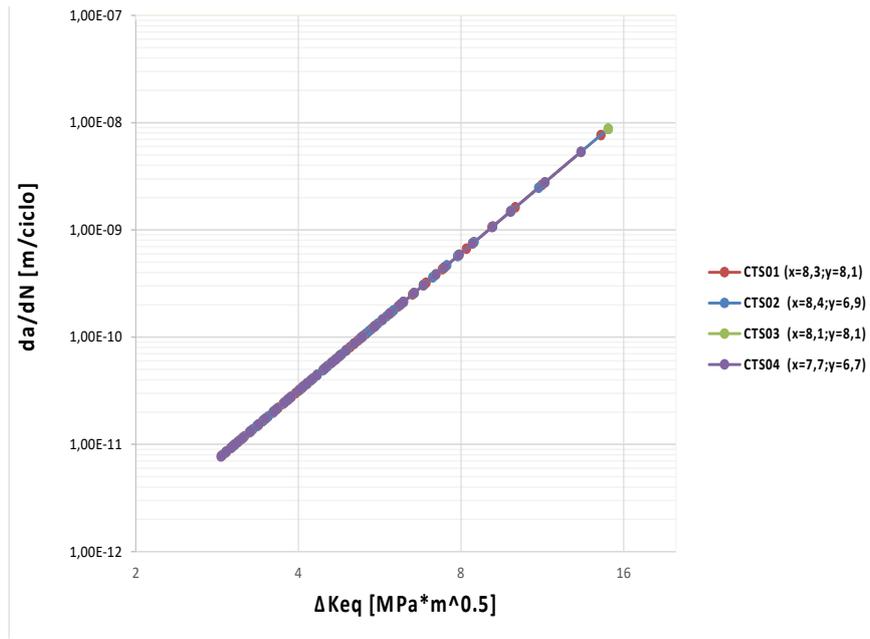
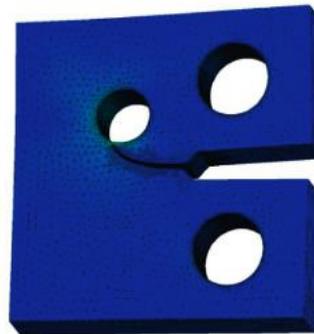
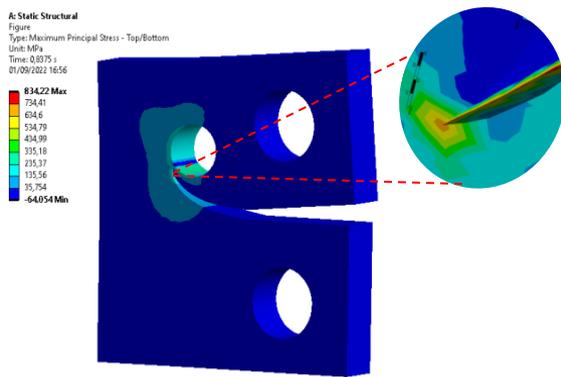


Figura 6 - Curva da/dN x Variação  $\Delta K_{eq}$  (Variação da intensidade de tensão equivalente)

Com base na teoria da MFLE (Mecânica da Fratura Linear Elastica) método desenvolvido para análises de trincas longas é possível verificar a distribuição de tensões na trinca, essa distribuição é única e está intrinsicamente relacionada com o fator de intensidade de tensões K. O parâmetro de controle usado para avaliar a taxa de crescimento de trinca por ciclo é o (da/dN), em função de  $\Delta K$  representado pela Fig. 6.

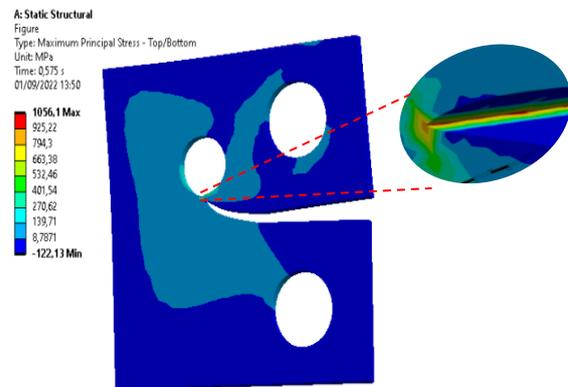


(b) Crescimento de trinca Ali Fageghi 2022.

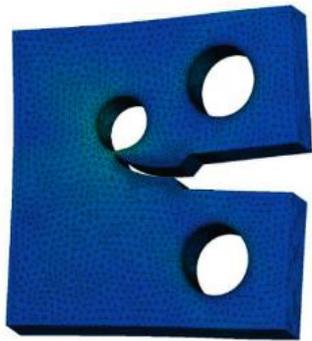


(a) Crescimento de trinca para o CTS#02.

Figura 7 – Crescimento de trinca para o CTS#02



(a) Crescimento de trinca o CTS#04



(b) Crescimento de trinca Ali Fageehi 2022

Figura 8 –Crescimento de trinca o CTS#04.

## 5. Conclusão

O presente trabalho investigou a influência da variação do raio e da posição do furo na vida em serviço de um CTS normatizado.

Dentre os espécimes analisados, foi identificado que o raio de 4.5 mm com maior proximidade á ponta de trinca é considerado o caso mais crítico.

Nesse sentido, quanto maior o raio do furo e mais próximo da trinca menor a vida em serviço. A mesma informação não pode ser estendida ao arranjo de vários furos, necessitando assim uma análise futura como continuidade desse trabalho.

Os resultados apresentados na curva  $da/dN \times \Delta K_{eq}$ , para todas as situações avaliadas persistiu em uma única curva  $da/dN$ , independentemente do nível de carga, do comprimento da trinca e da geometria da amostra para um conjunto concordando com a literatura.

Por fim, é importante salientar que os dados apresentados nesse trabalho apresentam uma convergência com o autor [6].

## 6. Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e a FAP-DF (Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal) pelo apoio financeiro e ao bolsa ao Grupo de Mecânica Experimental e Computacional (GMEC) pelo suporte técnico para elaboração dos estudos dessa pesquisa

## 7. Referências

- [1] P. Chowdhury e H. Sehitoglu, “Mechanisms of fatigue crack growth – a critical digest of theoretical developments”, *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, vol. 39, nº 6, p. 652–674, jun. 2016, doi: 10.1111/FFE.12392.
- [2] R. Seifi, “Total fatigue lives, crack growth paths and cycles in cold expanded adjacent holes”, *Int J Fatigue*, vol. 113, p. 69–77, ago. 2018, doi: 10.1016/J.IJFATIGUE.2018.04.004.
- [3] N. Pugno, M. Ciavarella, P. Cornetti, e A. Carpinteri, “A generalized Paris’ law for fatigue crack growth”, *J Mech Phys Solids*, vol. 54, nº 7, p. 1333–1349, jul. 2006, doi: 10.1016/J.JMPS.2006.01.007.
- [4] N. E. Dowling, M. V. Kral, e S. L. Kampe, “Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue”, p. 946.
- [5] K. Sadananda, M. Nani Babu, e A. K. Vasudevan, “A review of fatigue crack growth resistance in the short crack growth regime”, *Materials Science and Engineering: A*, vol. 754, p. 674–701, abr. 2019, doi: 10.1016/J.MSEA.2019.03.102.
- [6] Y. Ali Fageehi, “Prediction of Fatigue Crack Growth Rate and Stress Intensity Factors Using the Finite Element Method”, *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/2705240.
- [7] I. v. Singh, B. K. Mishra, S. Bhattacharya, e R. U. Patil, “The numerical simulation of fatigue crack growth using extended finite element method”, *Int J Fatigue*, vol. 36, nº 1, p. 109–119, mar. 2012, doi: 10.1016/J.IJFATIGUE.2011.08.010.
- [8] A. Carpinteri e F. Montagnoli, “Scaling and fractality in subcritical fatigue crack growth: Crack-size effects on Paris’ law and fatigue threshold”, *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, vol. 43, nº 4, p. 788–801, abr. 2020, doi: 10.1111/FFE.13184.
- [9] J. Schijve, “Fatigue crack growth, physical understanding and practical application”, *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, vol. 32, nº 11, p. 867–871, nov. 2009, doi: 10.1111/J.1460-2695.2009.01405.X.
- [10] J. Qian e A. Fatemi, “Mixed mode fatigue crack growth: A literature survey”, *Eng Fract Mech*, vol. 55, nº 6, p. 969–990, dez. 1996, doi: 10.1016/S0013-7944(96)00071-9.
- [11] S. Sajith, K. S. R. Krishna Murthy, e P. S. Robi, “Prediction of Accurate Mixed Mode Fatigue Crack Growth Curves using the Paris’ Law”, *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, vol. 100, nº 1, p. 165–174, fev. 2019, doi: 10.1007/S40032-017-0418-2/FIGURES/8.
- [12] T. L. Anderson, “Fracture Mechanics: Fundamental and Applications”, *CRC Press Taylor & Francis Group 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, FL 33487-2742, ISBN-13:978-1-4987-2813-3*, p. 668, 2017.

- [13] A. M. Alshoaibi, “Computational Simulation of 3D Fatigue Crack Growth under Mixed-Mode Loading”, *Applied Sciences* 2021, Vol. 11, Page 5953, vol. 11, n° 13, p. 5953, jun. 2021, doi: 10.3390/APP11135953.
- [14] P. Chowdhury e H. Sehitoglu, “Mechanisms of fatigue crack growth – a critical digest of theoretical developments”, *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, vol. 39, n° 6, p. 652–674, jun. 2016, doi: 10.1111/FFE.12392.
- [15] R. Seifi, “Total fatigue lives, crack growth paths and cycles in cold expanded adjacent holes”, *Int J Fatigue*, vol. 113, p. 69–77, ago. 2018, doi: 10.1016/J.IJFATIGUE.2018.04.004.
- [16] N. Pugno, M. Ciavarella, P. Cornetti, e A. Carpinteri, “A generalized Paris’ law for fatigue crack growth”, *J Mech Phys Solids*, vol. 54, n° 7, p. 1333–1349, jul. 2006, doi: 10.1016/J.JMPS.2006.01.007.
- [17] N. E. Dowling, M. V. Kral, e S. L. Kampe, “Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue”, p. 946.
- [18] K. Sadananda, M. Nani Babu, e A. K. Vasudevan, “A review of fatigue crack growth resistance in the short crack growth regime”, *Materials Science and Engineering: A*, vol. 754, p. 674–701, abr. 2019, doi: 10.1016/J.MSEA.2019.03.102.
- [19] Y. Ali Fageehi, “Prediction of Fatigue Crack Growth Rate and Stress Intensity Factors Using the Finite Element Method”, *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/2705240.
- [20] I. v. Singh, B. K. Mishra, S. Bhattacharya, e R. U. Patil, “The numerical simulation of fatigue crack growth using extended finite element method”, *Int J Fatigue*, vol. 36, n° 1, p. 109–119, mar. 2012, doi: 10.1016/J.IJFATIGUE.2011.08.010.
- [21] A. Carpinteri e F. Montagnoli, “Scaling and fractality in subcritical fatigue crack growth: Crack-size effects on Paris’ law and fatigue threshold”, *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, vol. 43, n° 4, p. 788–801, abr. 2020, doi: 10.1111/FFE.13184.
- [22] J. Schijve, “Fatigue crack growth, physical understanding and practical application”, *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, vol. 32, n° 11, p. 867–871, nov. 2009, doi: 10.1111/J.1460-2695.2009.01405.X.
- [23] J. Qian e A. Fatemi, “Mixed mode fatigue crack growth: A literature survey”, *Eng Fract Mech*, vol. 55, n° 6, p. 969–990, dez. 1996, doi: 10.1016/S0013-7944(96)00071-9.