



ISBN 2447-6102



Artigo

Estudo da Influência da Topologia dos Furos na Taxa de Propagação de Trincas

Ladeira, H. M.¹, Anflor, C. T. M.²

^{1,2} Grupo de Mecânica Experimental e Computacional – Universidade de Brasília.

E-mail: hallanmouraladeira@gmail.com¹

anflor@unb.br²

Recebido: 12/01/22; Aceito: 13/12/22; Publicado: 31/01/23

Resumo: O processo de furação para uniões parafusadas ou rebitadas de componentes são muito usuais na indústria naval, aeronáutica, mecânica e civil. Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo estudar, a partir da simulação computacional, a influência da geometria dos furos (passante, chanfrado e adoçado) na propagação de trincas quando submetidas a carregamentos de natureza estática e dinâmica. Para a avaliação de trinca estática foi considerada falha quando o fator de intensidade de tensão (FIT) supera a tenacidade à fratura do material (K_{Ic}). No caso de fadiga, foi considerado a condição de pequena zona de plastificação de ponta de trinca e a Lei de Paris para determinação da região II da curva $\text{dadN} \times \Delta K$. Inicialmente foi realizada uma análise paramétrica da geometria dos furos para obter uma topologia que resultasse em menor descontinuidade do campo de tensões e consequentemente menor influência no crescimento da trinca estática. A topologia de melhor desempenho foi utilizada na sequência para o estudo da taxa de crescimento de trinca em fadiga considerando a Lei de Paris. Os ensaios numéricos foram realizados em um corpo de prova em alumínio 7075-T6 resultando em curvas $\text{dadN} \times \Delta K$ com boa concordância com a literatura.

Palavras-chave: rebites, furos, mecânica da fratura, trinca.

Abstract: The drilling process for bolted or riveted joints of components is very common in the naval, aeronautical, mechanical and civil industries. In this context, the present work aims to study, through computer simulation, the influence of hole geometry (through, chamfered and rounded) on crack propagation when submitted to static and dynamic loads. For the static crack evaluation, failure was considered when the stress intensity factor (FIT) exceeds the fracture toughness of the material (K_{Ic}). In the case of fatigue, the condition of small crack tip plastification zone and the Paris Law were considered for determining region II of the $\text{dadN} \times \Delta K$ curve. Initially, a parametric analysis of the hole geometry was performed to obtain a topology that would result in less discontinuity of the stress field and consequently less influence on static crack growth. The best performing topology was then used to study the fatigue crack growth rate considering the Paris Law. The numerical tests were performed on a 7075-T6 aluminum specimen resulting in $\text{dadN} \times \Delta K$ curves with good agreement with the literature.

Keywords: rivets; holes; fracture mechanics, crack.

1. Introdução

A falha mecânica iniciada por uma trinca é um fenômeno tecnicamente irreversível. A propagação de trincas pode se dar por diversos motivos, podendo ser provenientes de processo de fabricação com imperfeições superficiais, vazios no processo de fundição, soldagem, formas geométricas as quais levam a concentradores de tensões em pontos

específicos da peça (Raul Gaspari Santos, Emerson dos Reis, and Renato Chaves Souza 2016). As trincas podem ser classificadas em três modos de abertura. O Modo (I), consiste no afastamento das faces da trinca, o Modo (II) por deslizamento das faces da trinca e Modo (III) por cisalhamento, conforme Figura 1. a maioria dos problemas de fissuração de interesse da engenharia, são relacionados ao modo (I). Quando em carregamento monotônico (fratura estática), a propagação da trinca ocorre sempre que fator de intensidade de tensões (FIT) for maior do que a tenacidade a fratura do material (K_{Ic}). Outro tipo de carregamento refere-se a presença de cargas alternadas que causam o fenômeno da fadiga. A fadiga mecânica é um fenômeno da aplicação de cargas variantes ao longo do tempo, ao qual a amplitude geralmente é inferior ao limite de escoamento do material. A presença de tensão alternada estimula o crescimento de uma ou mais trincas, podendo levar a falha estrutural ou do componente mecânico. A falha iniciada por fadiga mecânica se propaga ao longo da peça se tornando uma fratura dinâmica. A presença de danos em estruturas leva à prejuízos financeiros e ocorrência de acidentes com vítimas (Fuchs, Stephens, and Saunders 1981). Estima-se que, aproximadamente 50 à 90% das falhas ocasionadas em máquinas em serviço sejam geradas por fadiga mecânica. É importante lembrar que uma trinca tem seu início em nível atômico e passa a ser detectada quando atinge um comprimento mínimo de 1mm.

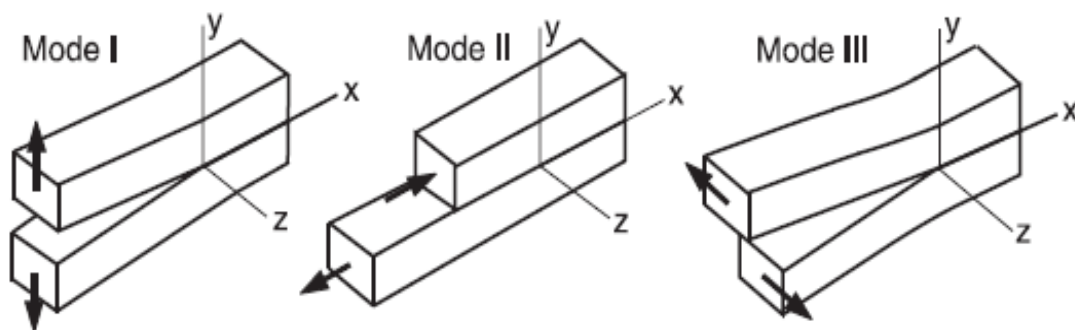


Figura 1. Modos de crescimento de trinca.

A presença de singularidades em componentes mecânicos é a principal causa de concentradores de tensão. O elevado campo de tensão na região de singularidade propicia a nucleação de trincas. Uma singularidade usual é a inserção de furos no corpo de peça, seja para fixação ou acoplamento de outro componente. A furação para rebite deve ter tamanho, forma ideal, e estar livre de rebarbas. Todos estes cuidados são importantes para evitar danos estruturais tanto para a camada protetora do rebite durante o processo de fixação, quanto para a junta de fixação. Tais ações evitam a falha estrutural localizada próximo a região de contato furo/rebite.

(Zhao and Jiang 2008) desenvolveram estudos que analisam o crescimento de trinca em fadiga com relação à presença de concentradores de tensão (K_t) causados por furos.

(Moreno, Ribeiro, and Junior 2018) alcançaram boa precisão na modelagem numérica na casa de rebites do tipo HI-LOCK, onde o objetivo consistia no aumento da resistência mecânica. A mudança entre o raio de transição da cabeça para o corpo do rebite foi o objeto de estudo de forma a avaliar a concentração de tensões na região de interesse. Segundo os autores, a resistência mecânica do material foi aumentada em 5,25% sem que houvesse alteração significativas na peça. No entanto, a partir dos testes de fadiga foi constatado que o material apresentou comportamento condizente com o esperado quando havia presença de fraturas próximas à região de HILOCK. Também foi observado uma pequena interferência sobre a resistência mecânica devido ao alargamento na região de HILOCK. Nos materiais utilizados para projeto estrutural de tensão e tensão de serviço a longo prazo, os danos se acumulam até que ocorra o fenômeno de falha. Uma vez que ao longo do tempo as baixas tensões maximizam a degradação sob carga mecânica ao ponto que os danos reduzam os níveis aceitáveis de projeto. ou seja, a combinação de um longo período com baixas tensões é igual a uma alta tensão induzida pelo dano antes da falha (Reifsnider et al. 2009).

Ante ao exposto, é possível entender a importância da realização de estudos de detecção e acompanhamento de danos presentes nas estruturas. Cada projeto tem sua particularidade, sendo os reparos de extrema importância para aumentar a vida útil de equipamentos e estruturas. Os tipos de reparos mais usuais consistem de aplicação de chapas-rebitadas sobre a trinca, corte da área danificada e substituição por uma seção semelhante, criação de nervuras, aplicação de selantes, colagem de adesivos de materiais compósitos, entre outros. (Martinetti, Demichela, and Singh 2020).

Os reparos em estruturas aeronáuticas por exemplo, precisam de um número definido de rebites em ambos os lados do reparo, para atingir a resistência original. O número tende a variar de acordo com a espessura do material e com o tamanho do dano sofrido. A presença de concentradores de tensão geralmente provoca a falha inicialmente no primeiro rebites, indicando que esse foi sobrecarregado, existindo a possibilidade de propagação de dano aos rebites vizinhos causando uma possível falha parcial.

Conforme discutido anteriormente, é possível verificar a importância e atualidade do estudo do impacto da presença de furos na causa de danos em estruturas. Neste sentido, o presente trabalho tem por objetivo ampliar a análise do problema inicialmente estudado por (Moreno, Ribeiro, and Junior 2018). Cabe salientar que apenas a análise estática e campo de tensões foi o objeto de estudo considerando a geometria dos furos de rebites. Neste trabalho será realizado inicialmente um estudo paramétrico da topologia dos furos. Na sequência, será realizado uma análise de MFLE (Mecânica da Fratura Linear Elástica) com o objetivo de determinar o fator de intensidade de tensões e o crescimento da trinca quando em carregamento monotônico. As topologias estudadas serão avaliadas e a que apresentar melhor resistências ao crescimento de trinca será escolhida para ser submetida a análise de crescimento de trinca por fadiga empregando a Lei de Paris.

2. Metodologia

2.1. Geometria e Propriedades mecânicas alumínio 7075-T6

Foi construído três modelos computacionais carregadas à uma tensão de 529,10MPa, com espessura de 3mm cada, onde as bordas foram criadas com 8 vezes o diâmetro do furo para que as bordas não exercessem influência sobre o furo. sendo assim ambos os lados das placas ficaram com 40mm. As dimensões iniciais dos furos podem ser consultadas na Figura 3 e então implantados no mesmo modelo estudado por (Moreno, Ribeiro, and Junior 2018), conforme Figura 2. Foi atribuído para cada uma das peças as propriedades mecânicas do alumínio aeronáutico AL 7075-T6 e podem ser consultadas na Tabela 1 e Tabela 2.

Para determinar a influência da forma geométrica dos furos no campo de tensão, foi realizada uma análise paramétrica de três geometrias de furos: adoçado (F_{ad}), chanfrado (F_{ch}) e passante (F_{pa}). A Figura 4 ilustra a discretização do corpo de prova com cinco furos, sendo apenas o furo central o objeto de estudo neste trabalho.

Tabela 1: Propriedades Químicas do Alumínio 7075-T6

LIMITES DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA LIGA DE ALUMINÍO 7075-T6	
MATÉRIAL	COMPOSIÇÃO (%)
Zinco	5,1 a 6,1
Magnésio	2,1 a 2,9
Cobre	1,2 a 2,0
Ferro	0,5
Silício	0,4
Manganês	0,3
Cromo	0,18 a 0,28
Titânio	0,2
Outros	0,5

Fonte ALCOA (2013).

Tabela 2: Propriedades Mecânicas do Alumínio 7075-T6

ALUMINÍO 7075-T6	
Densidade	2,81g/cm ³
Coefficiente de expansão térmica	0,000023/C
Módulo de elasticidade	72GPa
Coefficiente de Poisson	0,33
Módulo de cisalhamento	27,068GPa
Resistência a tração	560MPa
Tensão de limite elástico	500MPa

Tenacidade à fratura	916,98MPa√mm
Constante de Paris (C)	$1,201E^{-9}$
Constante de Paris (m)	2,246

Figura 2. Modelo estudado e detalhe de furo.

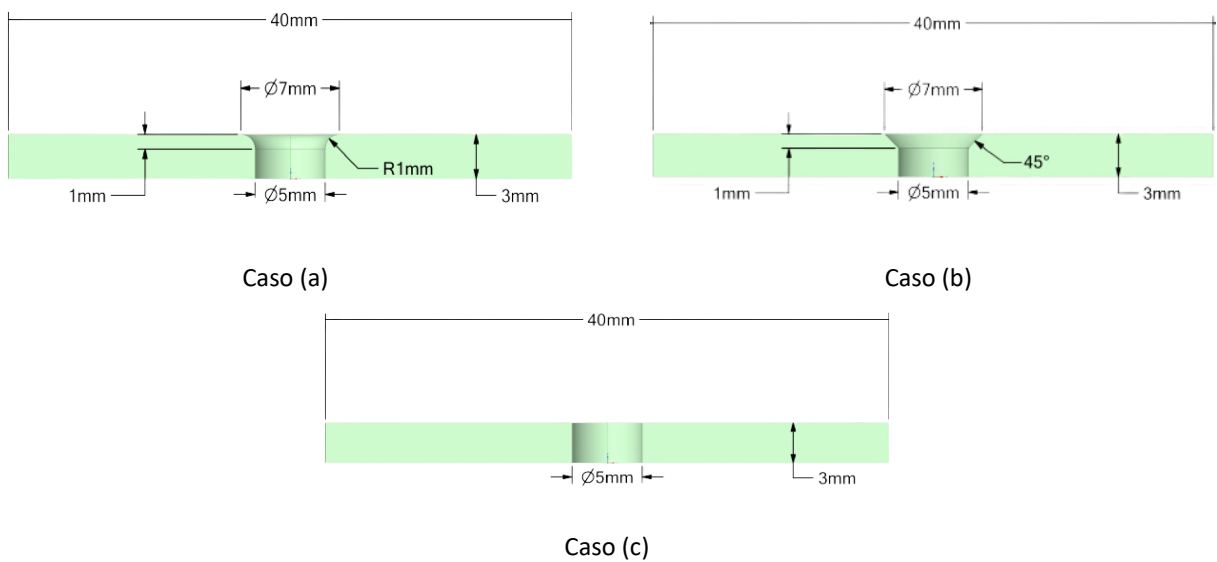
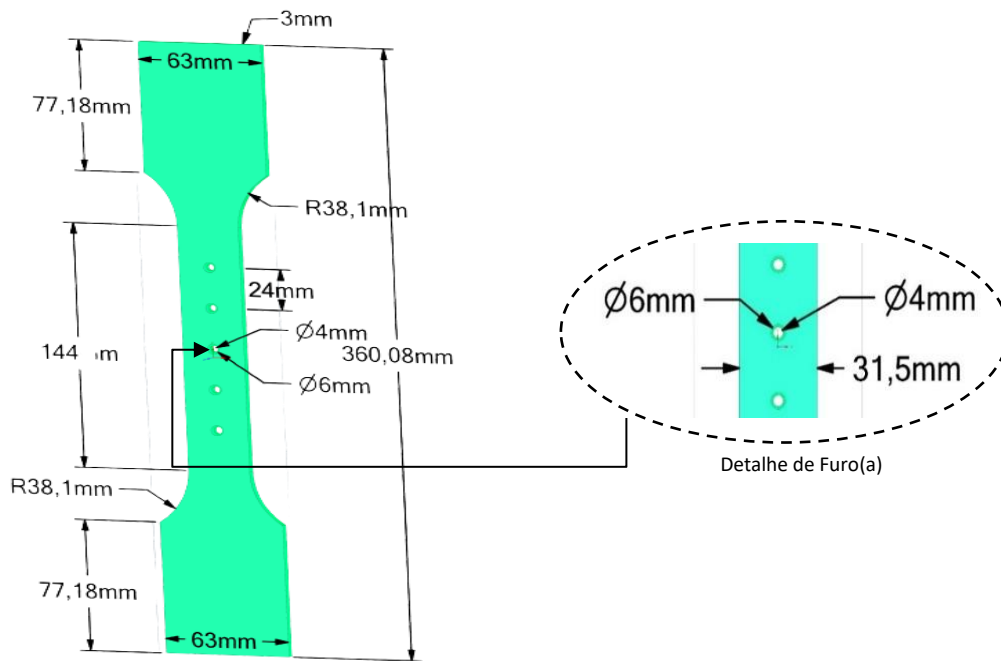


Figura 3: Formas Geométricas dos furos, Caso(a), Caso(b) e Caso(c).

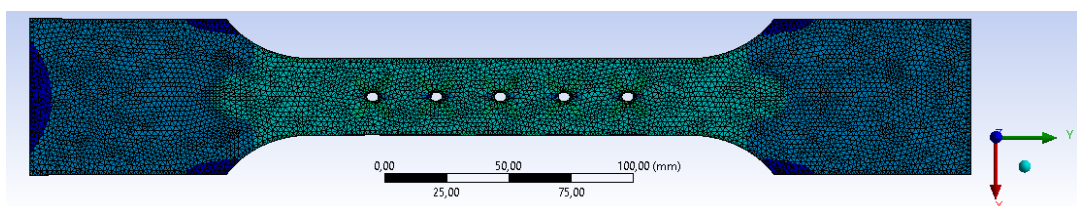


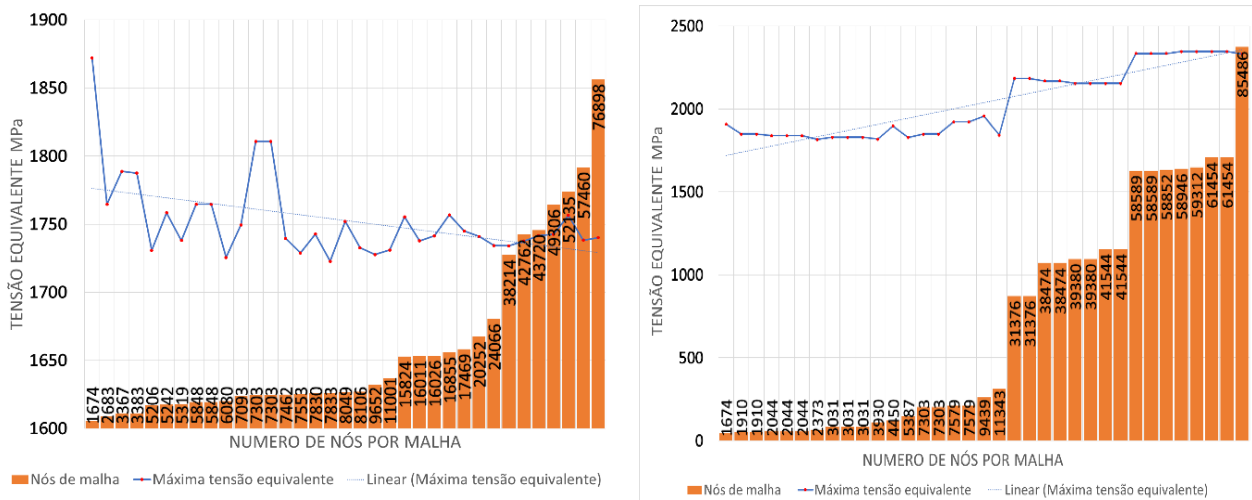
Figura 4. Modelo de peça analisado.

2.2. Estudo da convergência de malha

O estudo de convergência de malha permite garantir a estabilidade da solução numérica dos resultados. Para cada geometria analisada dos furos Caso (a) furo adoçado, Caso (b) furo chanfrado e Caso (c) passante. foi realizada um estudo de convergência de malha, conforme apresentado na Figura 5.

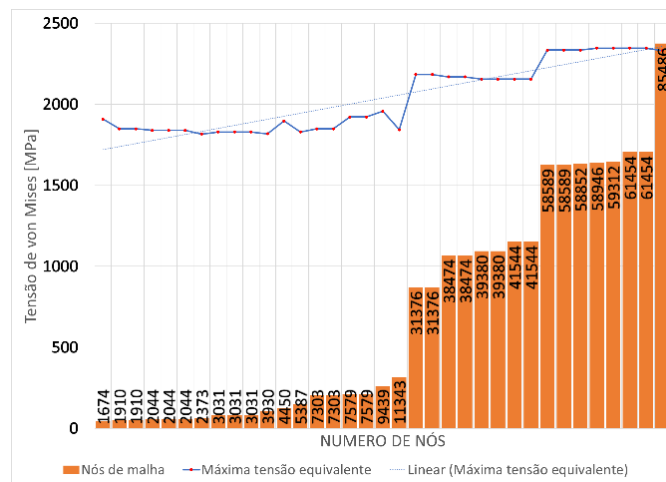
2.3. Estudo paramétrico de qualidade de malha.

A partir dos dados apresentados na figura 5 foi analisado o momento em que a malha não afeta mais de forma de significativa a tensão de von-Mises para cada um dos casos e então comparados na Tabela 3. Conforme observado na Tabela 3, o Caso(a) furo adoçado, demonstrou menor tensão de von-Mises e por esta razão será a geometria de estudo para o crescimento de trinca em fadiga.



Caso(a): furo adoçado.

Caso(b): furo chanfrado



Caso(c): furo passante.

Figura 5: Gráfico de convergência de malha para o Caso (a) furo adoçado, Caso (b) furo chanfrado e Caso (c) furo passante.

Tabela 3: Numero de nós x Tensão de von-Mises.

Casos	Número de nós por malha	Máxima Tensão de von-Mises
Caso(a)	20252	1741MPa
Caso(b)	58946	2346,82MPa
Caso(c)	48206	2345,05MPa

2.4. Estudo paramétrico do caso (a): Furo adoçado

Após as análises numéricas de convergência de malha, foi constatado que o F_{ad} apresenta menor valor de campo de tensão. Neste sentido, foi realizado um estudo paramétrico para a geometria de F_{ad} . Onde o conjunto analisado foi de $F_{ad} = \{0,5mm, 1mm, 1,5mm \text{ e } 2mm\}$. A Figura 6 apresenta a máxima tensão de von-Mises para cada um dos parâmetros considerados. É possível notar que ao $F_{ad} = 1,5mm$ apresentou menor tensão de von-Mises quando comparada com os demais casos (Figura 7).

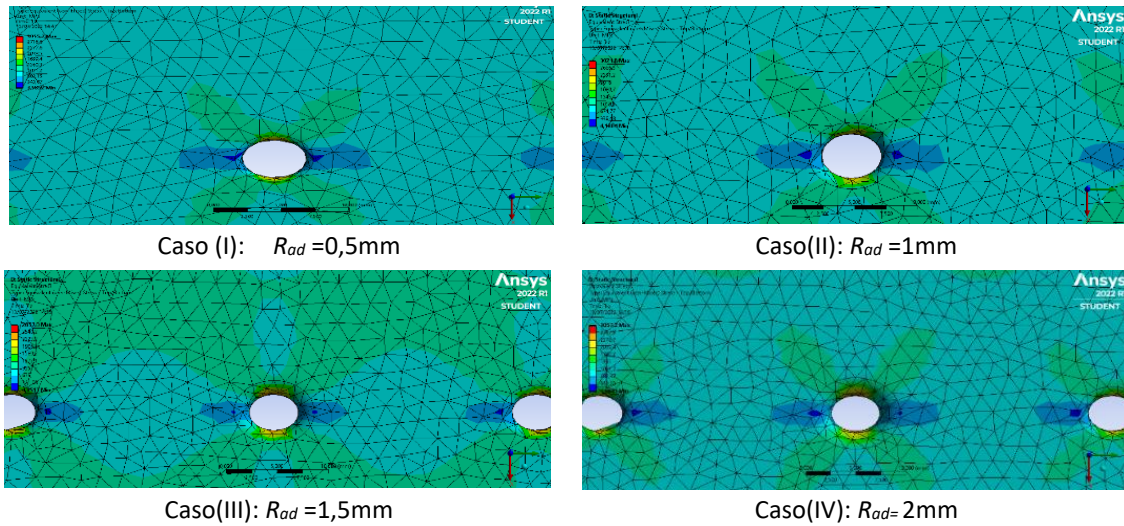


Figura 6. Campo de tensões conforme adoçamento: Caso(I): 0,5mm, Caso(II): 1mm, Caso(III): 1,5mm, Caso(IV): 2mm.

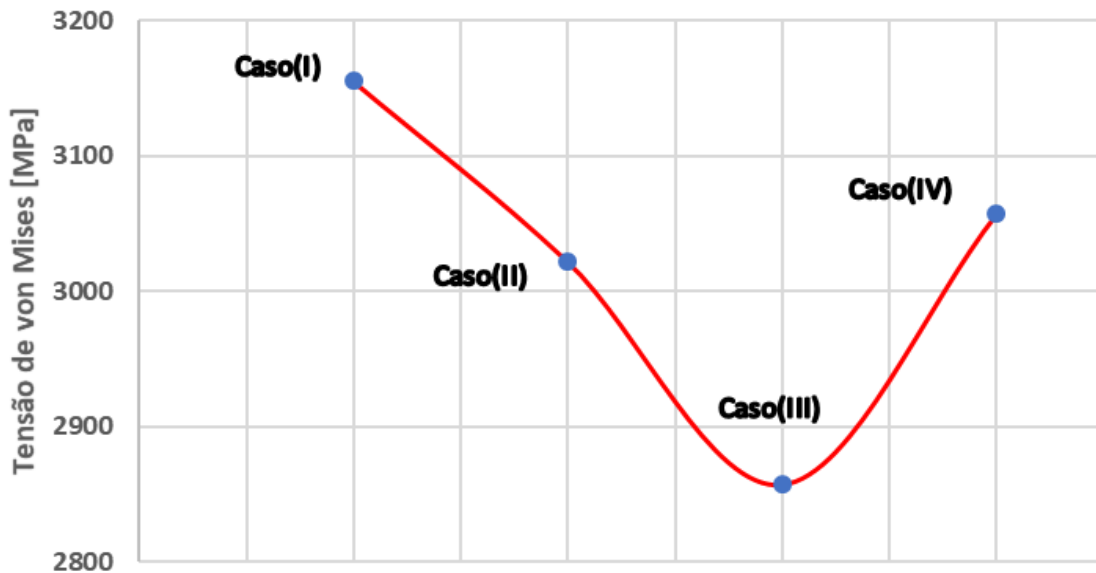
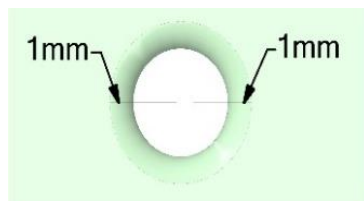


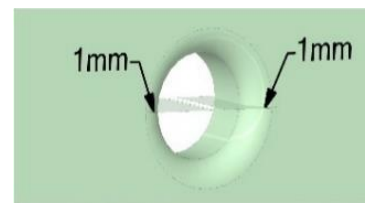
Figura 7. Tensões máximas de von-Mises para os casos I, II, III e IV.

2.5. Avaliação de trinca estática

Conhecendo-se a tensão de von-Mises pra os casos(I), (II), (III) e (IV), implementou-se um entalhe de 1mm em ambos os lados do furo Figura 8, a fim de observar o comportamento da trinca e o campo de tensão resultante em relação ao adoçamento do furo (Figura 8 até Figura 12).

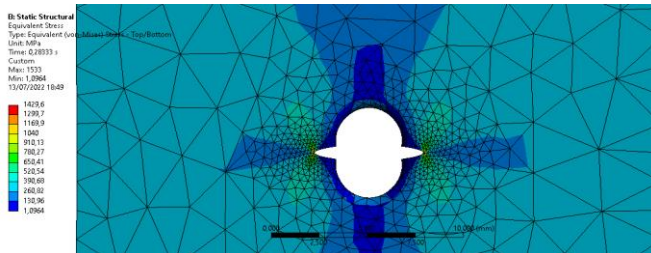


Detalhe de Trinca(b)

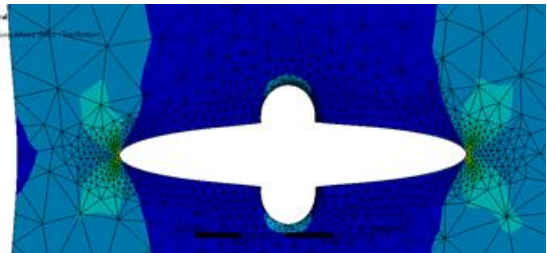


Detalhe de Trinca(c)

Figura 8. Detalhe de Trinca Arbitraria.

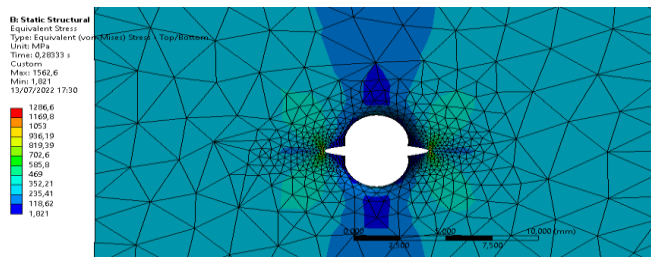


Caso(I): | Tamanho de trinca = 4mm, $F_{ad}=0,5mm$

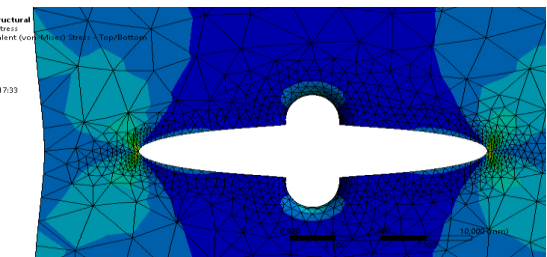


Caso(I): | Tamanho de trinca = 8mm, $F_{ad}=0,5mm$

Figura 9. Tamanho de trinca para de $F_{ad} = 0,5mm$.

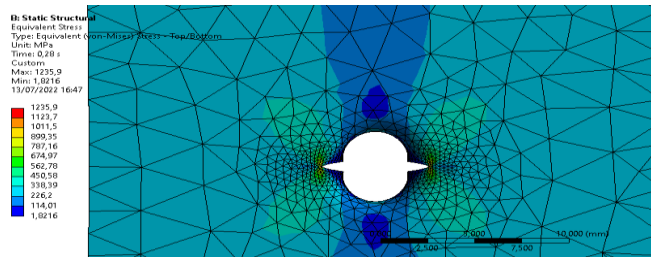


Caso(II): | Tamanho de trinca = 4mm, $F_{ad}=1mm$

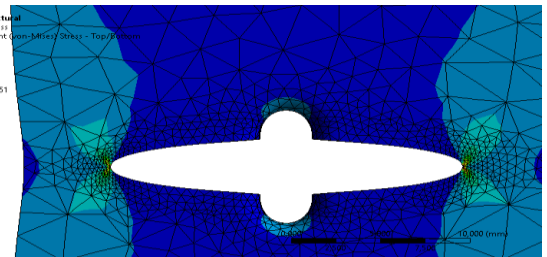


Caso(II): | Tamanho de trinca = 8mm, $F_{ad}=1mm$

Figura 10. Tamanho de trinca para de $F_{ad} = 1mm$.

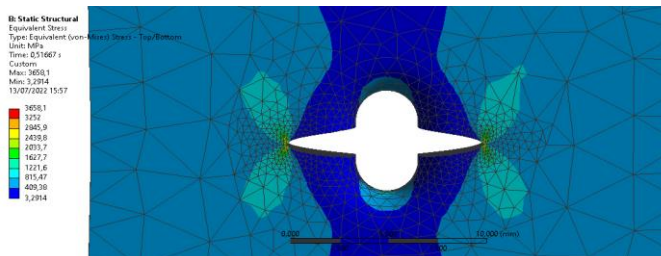


Caso(III): | Tamanho de trinca = 4mm, $F_{ad}=1,5mm$

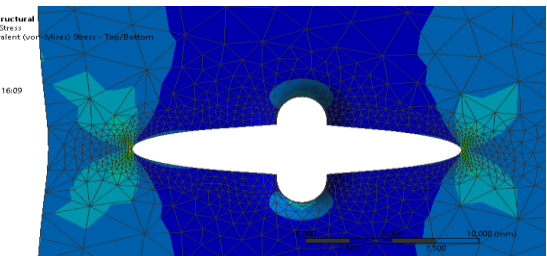


Caso(III): Tamanho de trinca = 4mm, $F_{ad}=1,5mm$

Figura 11. Tamanho de trinca para de $F_{ad} = 1,5mm$.



Caso(IV): | Tamanho de trinca = 4mm, $R_{ad}=2mm$



Caso(IV): | Tamanho de trinca = 8mm, $R_{ad}=2mm$

Figura 12. Tamanho de trinca para de $F_{ad} = 2mm$.

2.5.1. Avaliação de crescimento de trincas

Para que uma trinca se propague sobre a peça é necessário que a tensão na ponta da trinca supere a tenacidade a fratura do material. No caso da liga de alumínio 7075-T6 a tenacidade a fratura é de $916,98MPa\sqrt{mm}$. A partir das Figura 9 até Figura 12 é possível observar o início da trinca e o aumento da tensão de von-Mises à medida em que cresce. Na Tabela 4 é possível observar as tensões iniciais de von-Mises no momento inicial do crescimento da trinca, que ocorre em 4mm e quando atinge 8mm de comprimento.

O crescimento da trinca foi estudado a partir do modelo de F_{ad} por possuir menor campo de tensão na região do furo. A influência do tamanho do adoçamento sobre a trinca, para o caso (I), caso (II), caso (III) e caso (IV) pode ser apreciado conforme Tabela 4.

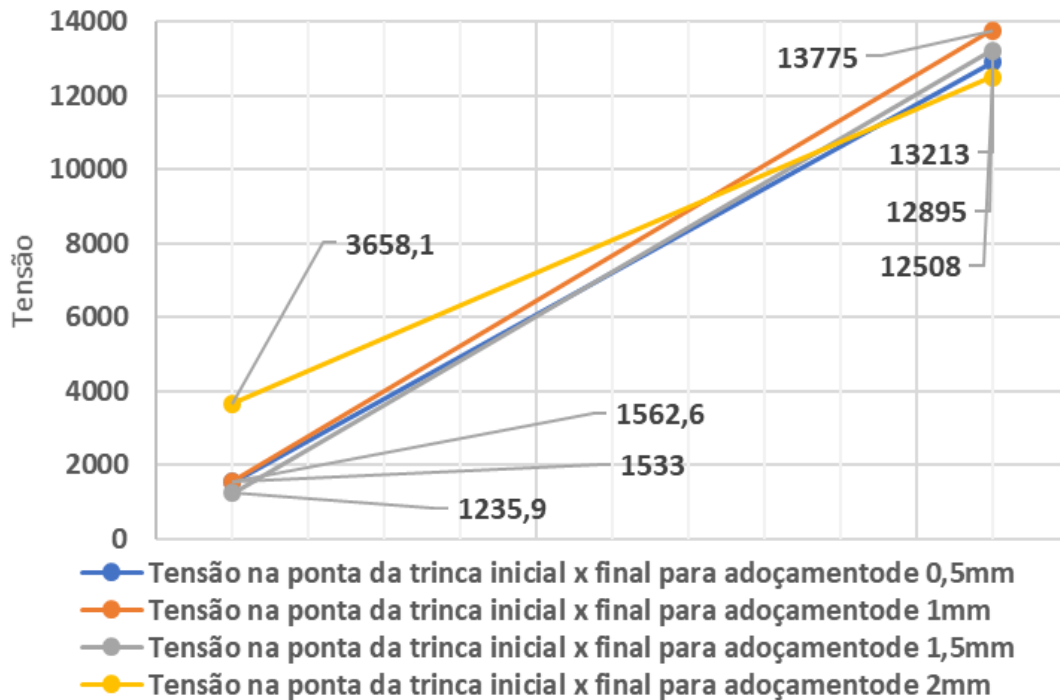


Figura 13: Tensão de von-Mises, no início e no final na ponta da trinca.

Tabela 4: Tensão na ponta da trinca para o caso(I), Caso (II), Caso (III) e Caso (IV).

Tensão na ponta da trinca [MPa]	Trinca a=4mm	Trinca a=8mm
Caso (I)	1.533	12.895
Caso (II)	1.562,6	13.775
Caso (III)	1.235,9	13.213
Caso (IV)	3.658,1	12.508

A Tabela 4 e a Figura 13 possibilitam a observação das tensões à medida que a trinca se propaga sobre a peça e a influência do adoçamento no crescimento de trinca. Sendo assim, o Caso (III) resultou menor intensidade de tensão no início da propagação da trinca, mas ao chegar ao final atingiu uma tensão mais elevada quando comparado aos casos (I) e (VI). O caso (VI) embora a tensão inicial tenha começado alta em comparação aos demais casos atingiu a menor tensão ao final da trinca.

2.5.2. Comparativo da influência do adoçamento em relação ao crescimento de trinca.

A análise numérica realizada nesse trabalho permitiu observar a influência do adoçamento do furo sobre o crescimento da trinca.

2.5.3. Comparativo de crescimento de trinca.

A topologia de F_{ad} no material possui influência sobre a trinca permitindo a evolução sobre a peça com maior velocidade a depender do diâmetro do adoçamento. Sendo assim, a Figura 14 permite observar o comportamento do crescimento da trinca com relação ao diâmetro de F_{ad} .

Nota-se pela Figura 14 que para os adoçamentos de 0,5mm e 1mm, o crescimento de trinca foi muito aproximado. A medida em que o adoçamento é aumentado para 1,5mm a trinca tende a crescer mais, todavia quando o adoçamento passa a ser de 2mm há uma redução no crescimento.

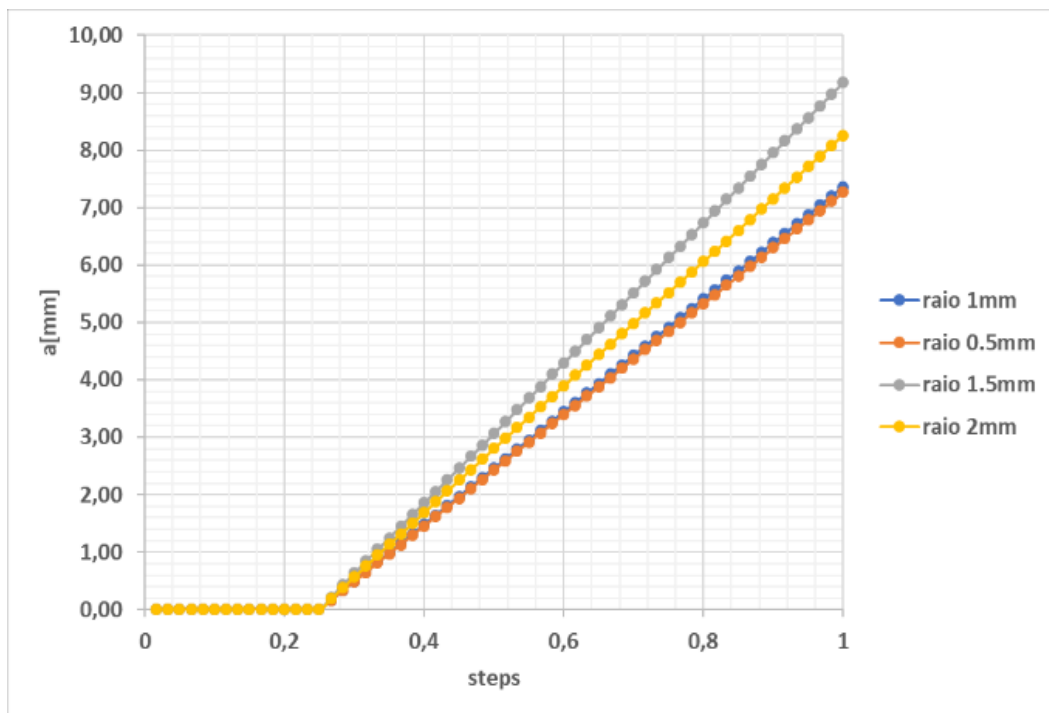


Figura 14: Influência do adoçamento sobre o crescimento de trinca.

2.6. Análise de crescimento de trinca por fadiga.

Com o objetivo de obter os resultados da curva da/dN versus ΔK do material, realizou-se uma simulação da peça submetida à carregamentos de amplitude constante para F_{ad} com adoçamentos de 0,5mm. A determinação da curva da/dN versus ΔK representa a taxa de crescimento cíclico da trinca pela variação do intervalo das intensidades de tensões, conforme eq. 1.

$$\frac{da}{dN} = C * (\Delta k)^m \tag{1}$$

Neste estudo foram utilizados tensões máximas no valor de 30% à 70% da tensão aplicada originalmente na peça em carregamento estático (Tabela 5). Para cada tensão alternada foi atribuído três razões de intensidade de tensão (R), sendo elas, R=0,1, R=0,2 e R=0,6. Os valores de R, representam a tensão mínima aplicada no corpo de prova durante o carregamento alternado, conforme Eq 2.

Tensão aplicada MPa	Percentual sobre o valor da Tensão Original de 529,1MPa .
158,73	30%
211,64	40%
264,55	50%
317,46	60%
370,37	70%

Tabela 5. Carregamentos aplicados no corpo de prova submetido a tensão alternada de amplitude constante.

$$\sigma_{min} = R * \sigma_{max} \tag{2}$$

A partir das Figura 17 e Figura 18 é possível observar o comportamento simétrico para as trincas à direita e à esquerda do furo independentemente do carregamento e R aplicado. Isto se deve a estabilidade numérica da malha de elementos finitos em razão da tecnologia SMART. Outra observação refere-se ao comportamento das curvas a x N, sendo as curvas de maior valor de R dispostas mais a direita, significando a necessidade de uma quantidade muito maior de ciclos para cada avanço de milímetro de trinca.

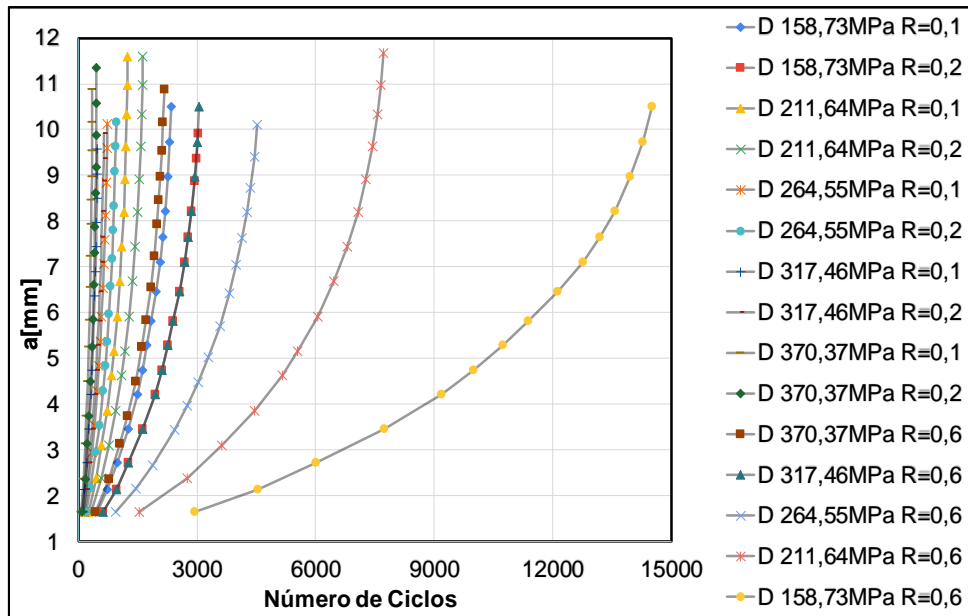


Figura 15. Crescimento de trinca por número de ciclos à direita do furo.

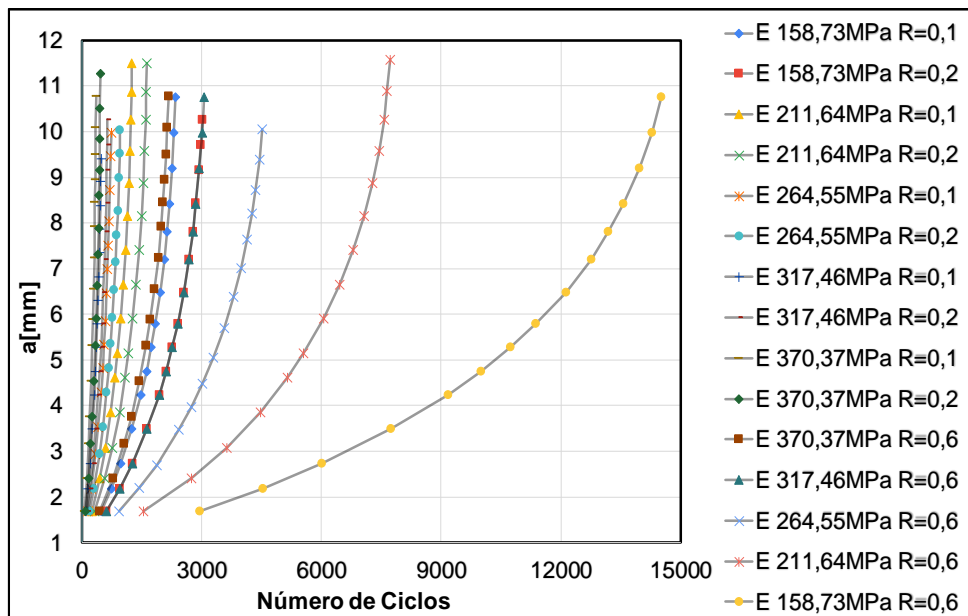


Figura 16. Crescimento de trinca por número de ciclos à esquerda do furo.

À medida que as trincas (direita e esquerda) vão crescendo, o furo originalmente circular tende a uma elipse, reduzindo a área da seção transversal originando assim o fenômeno de estricção (Figura 19).

A taxa de crescimento da trinca pela variação da intensidade de tensão para ambas as trincas analisadas (direita e esquerda) podem ser observadas nas Figura 17 e Figura 18, apresentando o mesmo comportamento. É importante salientar que para todos os carregamentos e R das curvas axN analisados resultaram em uma única curva para ambos

os lados das trincas. Isto demonstra a independência da Lei de Paris em relação ao carregamento, geometria e posição da trinca, estando assim os resultados em conformidade com a literatura.

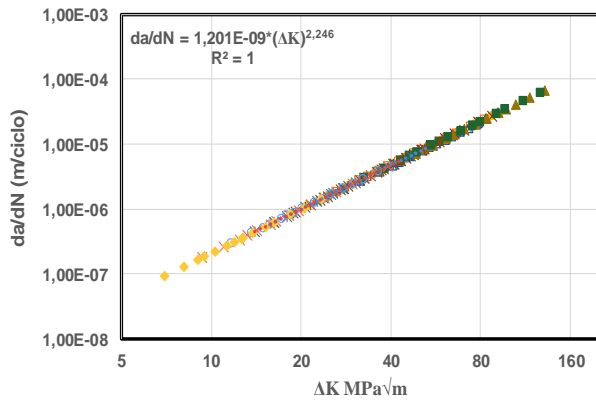


Figura 17: Curva da/dN versus ΔK para trinca à direita do furo.

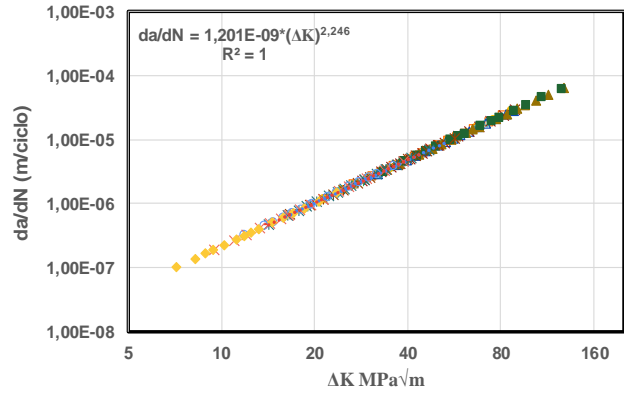


Figura 18: Curva da/dN versus ΔK para trinca à esquerda do furo.

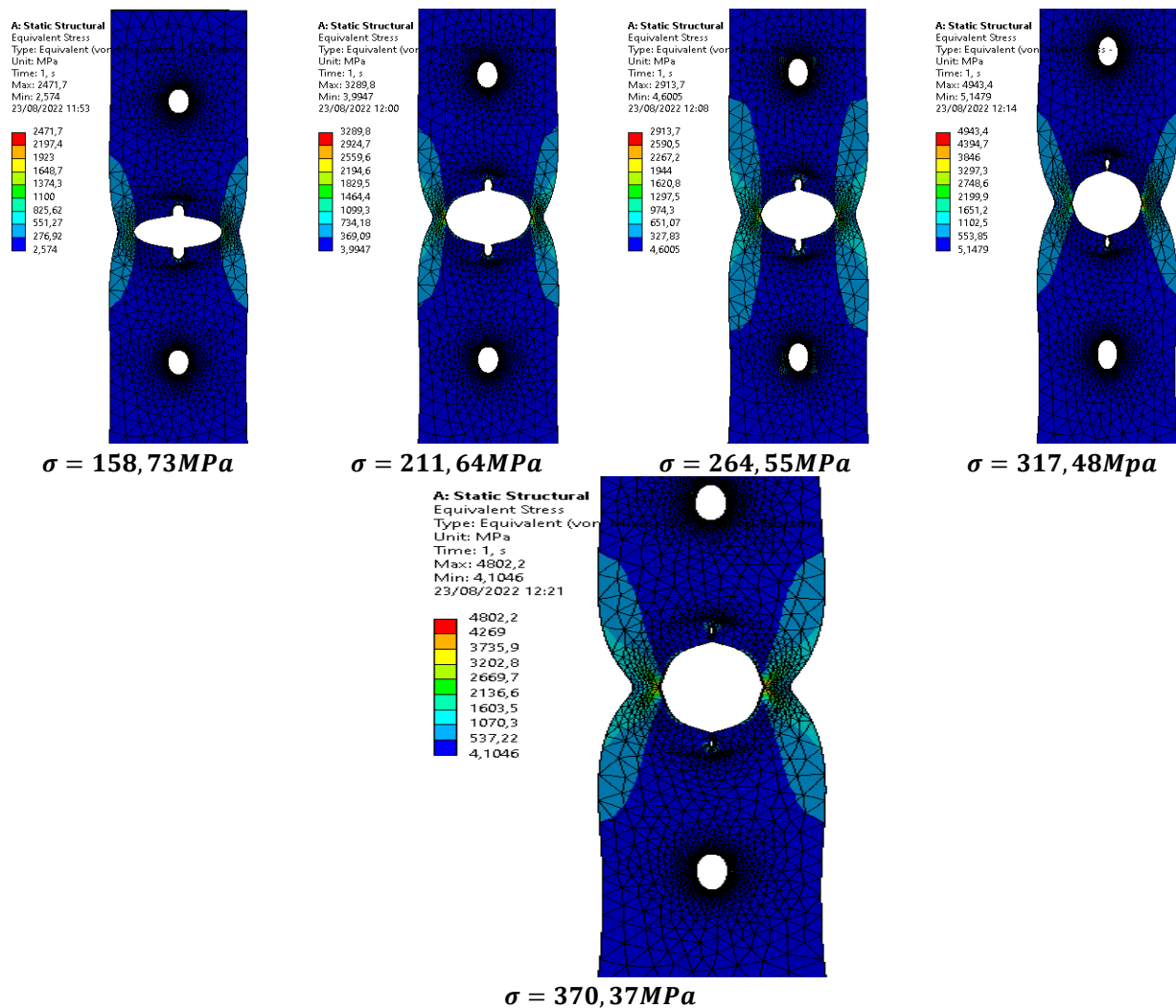


Figura 19. Evolução de abertura de trinca submetida à carregamentos cíclicos de amplitude constante.

5. Conclusões

Neste trabalho foi analisado um corpo de prova multi perfurado onde no furo central foi imposta a presença de duas trincas, uma à direita e outra à esquerda. As análises consideraram o comportamento da trinca quando em carregamento estático e dinâmico. No carregamento estático foram analisadas as topologias de furo Fad, Fch e Fpa. A partir dos resultados analisados foi verificado que furos com adoçamento (Fad) apresentaram na região vizinha menores valores de (FIT). Na análise dos raios de adoçamento foi realizado um estudo paramétrico, onde foi possível escolher dentre um conjunto o raio que minimizasse o campo de tensões na região do furo. A partir dos resultados da análise paramétrica foi constatado que a geometria do Caso (III) foi a que apresentou o menor valor para a máxima tensão de von-Mises. No entanto, quando a trinca é introduzida no furo, o adoçamento do Caso (III) mostrou menor resistência à fratura, permitindo um maior crescimento de trinca sobre a peça. Ao analisar o crescimento de trinca foi possível concluir que o Caso (I) exerceu maior resistência ao crescimento de trinca com o raio de adoçamento menor, sendo esta topologia adotada para o estudo de crescimento de trinca em fadiga.

Quando a peça foi submetida a carregamentos cíclicos de amplitude constante foi possível verificar que crescimento de trinca se inicia a partir de carregamentos inferiores ao experimento estático, estando assim em conformidade com o fenômeno da fadiga. A taxa de crescimento de trinca pela variação da intensidade tensões independe da tensão aplicada, geometria da peça ou localização da trinca.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem à 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 Grupo de Mecânica Experimental e Computacional (GMEC) pelo suporte técnico para elaboração dos estudos desta pesquisa.

Referências

1. Gaspari, R.S.; Reis, E.; Chaves, R.S.; Técnicas Para Identificação Do Estágio Inicial e/Ou Acompanhamento de Trinca Ocasionalada Por Fadiga Mecânica. Anais Do IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, no. March 2018.
2. Fuchs, H.O.; Stephens, R.I.; Saunders H.; *Metal Fatigue in Engineering. Journal of Engineering Materials and Technology*. 1980, Volume 103.
3. Zhao, T.; Yanyao, J.; Fatigue of 7075-T651 Aluminum Alloy. *International Journal of Fatigue* 2008, Volume 30.
4. Moreno, J.R.S; Ribeiro, C.; Junior, E.M; Computational Study of Fatigue Fracture in Rivet Housing of an Aeronautical Aluminum Alloy 7075-T6. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science* 2018, Volume 5.
5. Reifsnider, K.L.; Fazzino, P.; Majumdar, P.K.; Xing, L.; Material State Changes as a Basis for Prognosis in Aeronautical Structures. *Aeronautical Journal* 2009, Volume 113.
6. Martinetti, A.M.D.; Singh, S.; *Applications and Challenges of Maintenance and Safety Engineering in Industry* 2020.