

APLICAÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS PARA ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DE FUROS EM CHAPAS SOB CARREGAMENTO ALTERNADO

Jair Rempel Braun*

Thiago da Silveira**

RESUMO

Diversas são as aplicações de placas perfuradas na engenharia sendo o estudo das consequências causadas por estas descontinuidades de grande valor para a melhoria estrutural. A presença de perfurações, em casos específicos, traz melhorias em relação à vida em fadiga de estruturas, por alterar a distribuição das tensões internas. Neste trabalho buscou-se, inicialmente, a verificação de um modelo computacional baseado no Método dos Elementos Finitos para aplicação em chapas perfuradas em fadiga. Uma vez verificada a acurácia do modelo, e realizado teste de convergência de malha, o mesmo foi utilizado para a análise de placas com furos de geometrias variadas de modo a correlacionar a forma do furo com sua influência no desempenho em fadiga. Observou-se que para perfurações com a geometria mais alongada, obtém-se um desempenho melhor com uma significativa redução de massa das placas. Ainda, quando comparadas perfurações com volume removido de material igual entre si, obtém-se um melhor desempenho utilizando furos elípticos. Para geometrias em que se mantém fixa a dimensão ortogonal a direção da força, furos oblongos possuem um desempenho superior em fadiga.

Palavras-chaves: Concentração de tensões. Método dos elementos finitos. Fadiga. Placas perfuradas.

ABSTRACT

There are several applications of perforated plates in engineering and the study of the consequences caused by these discontinuities is of great value for structural improvement. The presence of perforations, in specific cases, improves the fatigue life of structures, by altering the distribution of internal stresses. This work initially sought to verify a computational model based on the Finite Element Method for application in fatigued perforated plates. Once the model's accuracy was verified, and a mesh convergence test was performed, it was used for the analysis of plates with holes of different geometries in order to correlate the hole shape with its influence on fatigue performance. It was observed that for perforations with the most elongated geometry, a better performance is obtained with a significant reduction in the mass of the plates. Also, when comparing holes with the same volume of material removed from each other, better performance is obtained using elliptical holes. For geometries where the dimension orthogonal to the direction of force remains fixed, slotted holes have superior fatigue performance.

Keywords: Stress concentrators. Finite element method. Fatigue. Perforated plates.

*Graduando – Curso de Engenharia Mecânica – Universidade Federal do Pampa - Campus Alegrete. E-mail: jairbraun.aluno@unipampa.edu.br

**Professor do Magistério Superior – Campus Alegrete – Universidade Federal do Pampa. E-mail: thiagods@unipampa.edu.br

1 INTRODUÇÃO

Na engenharia, a existência de perfurações em estruturas é constantemente necessária por diversos motivos. Em navios, por exemplo, ZHU *et al* (2022) destacam a existência de uma grande quantidade de furos em chapas estruturais que afetam diretamente a estabilidade do navio como um todo. O conceito também se aplica na aviação, onde a presença de janelas nas aeronaves deve ser analisada como uma descontinuidade na estrutura que causará impactos em seu desempenho estrutural.

A presença de furos em chapas gera um grande aumento das tensões no entorno dessas descontinuidades devido ao desvio das linhas de tensão, sendo esse fenômeno denominado concentração de tensão. A razão entre a máxima tensão próxima ao furo e a tensão na zona não afetada é chamado fator de concentração. A correta análise das tensões em torno de furos é importante durante o projeto de estruturas (REZAEPAZHAND; JAFARI, 2010).

A condição estática de um projeto é aplicada quando levamos em consideração que a carga aplicada a um determinado elemento estrutural se dá de forma gradual e as condições são conhecidas, não havendo repetição da aplicação da carga. Muitas vezes, porém, os carregamentos possuem variações no tempo e se observa a falha em componentes que operavam abaixo da tensão máxima e por vezes abaixo da tensão de escoamento. A falha decorrente da aplicação de determinados carregamentos por um número grande de repetições se denomina falha por fadiga (BUDYNAS; NISBET, 2008). A presença de concentradores de tensões torna o fenômeno de fadiga mais intenso.

De acordo com MIRJI (2020), a simulação numérica durante o desenvolvimento do produto é uma fonte confiável de estimativa de vida em fadiga e pode ser usada para obter uma visão detalhada dos fenômenos decorrentes do tipo de carregamento aplicado.

Uma interessante observação é encontrada no trabalho de LOLAND *et al* (2016) em que a adição de perfurações na otimização da geometria de uma grande polia, utilizada em tensionadores de *risers*, gera uma melhoria de 123% no desempenho em fadiga do componente analisado. Essa constatação leva a questionamentos acerca da possibilidade de otimizar estruturas através do rearranjo de perfurações com relação a sua forma e posição.

Sabendo disso, busca-se uma relação entre a geometria das perfurações em elementos estruturais simples, como as chapas sob tração cíclica, e a vida útil dessa estrutura, de modo a analisar diretamente a interferência da geometria do furo e possibilitar melhorias nos comportamentos mecânicos das placas finas perfuradas.

Sendo assim, inicialmente buscou-se verificar um modelo computacional que permita realizar simulações através do software ANSYS® para que se possa analisar os comportamentos mecânicos de placas finas sob tração cíclica com perfurações de diferentes geometrias. A primeira análise das placas envolveu perfurações cujo volume de material removido da placa é constante, para assim comparar a influência da forma dos furos no desempenho em fadiga. Em um segundo momento, analisou-se a influência do tipo de furo mantendo uma mesma dimensão da seção transversal da placa e variando as dimensões do furo. Para analisar o comportamento mecânico das placas finas perfuradas, foi aplicada a modelagem computacional via Método dos Elementos Finitos (MEF).

2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Utiliza-se o termo finito para caracterizar a divisão de um domínio em um número limitado de regiões definidas por geometrias específicas, denominadas elementos, diferentemente dos métodos infinitesimais do cálculo. A união de diversos elementos através de um arranjo bem estruturado é denominada malha e a conexão entre os elementos é feita através de nós. A solução de equações diferenciais estabelecidas em cada elemento, através de soluções numéricas com parâmetros definidos, caracteriza o Método dos Elementos Finitos (MEF) (PALMA, 2009).

Neste trabalho, as simulações numéricas foram feitas através do software ANSYS® por meio de sua ferramenta Workbench. A autora WIBAWA (2021) ressalta que o software e a ferramenta Workbench são amplamente utilizados na simulação de elementos construtivos de foguetes e aeronaves, possibilitando a integração com diversos softwares CAD (*Computer-Aided Design*). Além disso, no estudo de SKOGLUND (2021) reforça-se a possibilidade de integração entre softwares CAD e a utilização de diversas ferramentas em conjunto, como por exemplo o módulo para estruturas estáticas e o módulo de transiente térmico, demonstrando a enorme versatilidade das ferramentas e mostrando assim a importância que a análise através do método dos elementos finitos tem na concepção de peças e estruturas.

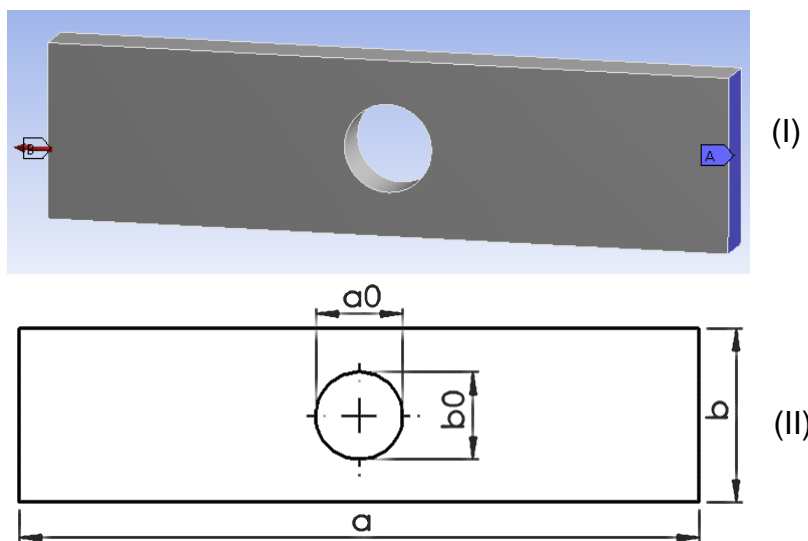
A discretização de um meio contínuo dentro do ANSYS® Workbench é denominada geração de malha e pode ser criada através de cinco métodos, sendo: *Automatic Method Control*, *Tetrahedrons Method Control*, *Hex Dominant Method Control*, *Sweep Method Control* e *MultiZone Method Control*. Além disso, diversas configurações são possíveis através dos métodos de geração de malha, sendo característicos de cada método (ANSYS, 2010). A metodologia acima é responsável pela criação dos elementos e pela conexão entre eles através dos nós gerando assim a discretização do domínio.

Quando se utiliza uma malha com elementos de dimensão muito pequena em todo o meio a ser discretizado, tem-se um alto custo computacional, sendo muitas vezes impraticável gerar uma malha suficientemente refinada em um ponto para obter resultados confiáveis. Desse modo, pode-se melhorar os resultados obtidos aplicando um refinamento localizado de malha em certos pontos de interesse, onde julga-se necessário informações mais precisas, mantendo maior a dimensão dos elementos em regiões de menor interesse. No ANSYS® Workbench isso é possível através das ferramentas de refinamento que permitem gerar refinamentos em faces, arestas ou vértices, porém não é aplicável a todos os métodos de geração de malha (ANSYS, 2010).

3 METODOLOGIA

Para atestar a confiabilidade do modelo computacional desenvolvido para este trabalho, as análises de MIRJI (2020) foram reproduzidas com a finalidade de comparar os resultados obtidos, neste trabalho, com os do autor. A placa utilizada para a verificação de modelo tem dimensões: comprimento $a = 100$ mm; largura $b = 25,6$ mm; espessura $t = 7,68$ mm; diâmetro $a_0 = b_0 = 12,8$ mm. A posição do carregamento aplicado, a região engastada fixamente e as dimensões do modelo estão expostos na Figura 1.

Figura 1 – (I) Posição do engaste (A) e da aplicação do carregamento (B); (II) Dimensões da placa.



Fonte: Autores.

O sólido 3D foi gerado através do software SolidWorks® e posteriormente foi importado para o ANSYS® Workbench através do módulo *Static Structural*. Foram utilizadas as mesmas propriedades de material definidas por MIRJI (2020), sendo algumas características do material similares ao aço A36, sendo expostas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do material.

Módulo de Elasticidade (MPa)	206900
Coefficiente de Poisson	0,32
Tensão de Escoamento (MPa)	648,3
Tensão de Ruptura (MPa)	786,2
Coefficiente de Carregamento da Vida em Fadiga (R)	-1

Fonte: MIRJI (2020).

Para reproduzir os resultados de MIRJI (2020), buscou-se obter a dimensão do elemento finito que apresente resultados confiáveis e, simultaneamente, que não demandem um tempo de processamento muito alto para a obtenção. Para tal, após a importação da geometria e definição do material, foram utilizados os controles de malha com método de geração de tetraedros e elementos de ordem quadrática, onde variou-se o tamanho do elemento entre 0,7 mm e 6,5 mm e foi aplicado um refinamento de grau 1 na face interna da perfuração. Fixou-se uma das extremidades da placa através de um engaste fixo e aplicou-se um carregamento de tração estática na outra borda, com módulo de 62250 N, como está representado na Figura 1. A partir disso, obtém-se a dimensão de elemento mínimo para garantir que os resultados convergiram.

3.1 ANÁLISE DE PLACAS COM PERFURAÇÕES DE VOLUME IGUAL

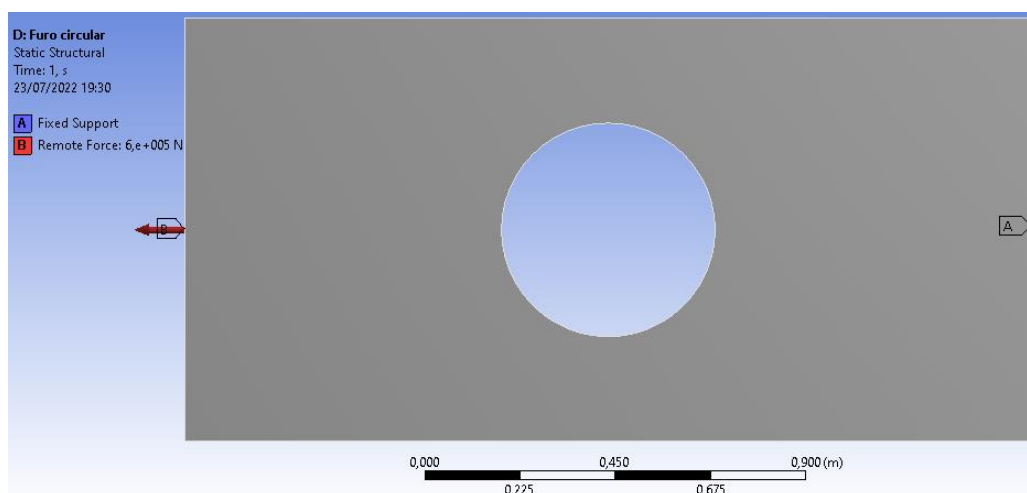
Para a análise deste trabalho foram utilizadas placas com dimensões maiores ($a = 2000$ mm; $b = 1000$ mm; $t = 12$ mm), com a finalidade de incorporar, à pesquisa, condições que se aproximem de uma aplicação real da indústria. Além disso, nessa primeira etapa das simulações, as dimensões das perfurações são ajustadas para que representem um volume removido de material da chapa de 10%.

Desse modo, necessita-se realizar o teste de convergência de malha novamente, agora para o modelo de dimensões maiores. A análise foi realizada variando-se a dimensão de elemento tetraédrico entre 10 mm e 100 mm e aplica-se um grau de refinamento 1 na face da perfuração. A perfuração utilizada para a otimização da malha foi a circular com diâmetro de 504,63 mm.

O material utilizado nas simulações trata-se do aço AH-36 de aplicação naval, com tensão de escoamento de 355 MPa e tensão de ruptura de 490 MPa. Entre suas características nota-se uma boa soldabilidade, sendo possível aplicar todos os processos de solda mais usuais e é aplicado em áreas de alta sollicitação de esforços em estruturas expostas às adversidades marítimas, como em navios e plataformas de petróleo (VUKELIC, 2022).

Um carregamento de 600 kN foi utilizado de modo a causar uma fadiga de baixo ciclo na chapa. O carregamento é completamente reverso, com seu valor médio definido em 0 (oscila entre -600 kN e 600 kN). O estado biaxial de tensões formado, faz com que uma teoria de fadiga seja aplicada. Utiliza-se se a teoria ASME Elíptico que leva em consideração a tensão de escoamento enquanto outros métodos levam em consideração a tensão de ruptura do material. A configuração do modelo é mostrada na Figura 2.

Figura 2 – Condições de contorno aplicados à uma placa com perfuração circular sendo: (A) Suporte fixo; (B) Carregamento com engaste rígido.



Fonte: Autores.

Diversas geometrias de perfurações (quadrado, retângulo, círculo, elipse, losango e oblongo) foram criadas em placas e as dimensões dos furos são apresentadas na Tabela 2. Nas geometrias em que não há simetria (retângulo, elipse, losango e oblongo) utilizou-se, como razão de aspecto do furo, $b_0 / a_0 = 0,5$.

Tabela 2 – Dimensões utilizadas para furos que representam a remoção de 10% do volume total da placa.

Geometria	b_0 (mm)	a_0 (mm)
Círculo	504,63	504,63
Quadrado	447,21	447,21
Retângulo	316,23	632,46
Elipse	356,82	713,65
Oblongo	334,70	669,40
Losango	447,21	894,43

Fonte: Autores.

3.2 ANÁLISE DE PLACAS COM SEÇÃO TRANSVERSAL IGUAL

Para uma segunda análise, fez-se um redimensionamento das perfurações para uma nova rodada de simulações. Tomando como base a dimensão do furo circular com $a_0 = b_0 = 504,63$ mm, as demais geometrias foram dimensionadas de forma que a sua dimensão b_0 tenha este mesmo valor, e as razões de aspecto das perfurações ($b_0 / a_0 = 0,5$) fossem também mantidas. Isso faz com que a remoção de material da placa represente valores diferentes, porém, a dimensão (b_0) que afeta o fluxo das tensões no sentido do carregamento (eixo x) se mantém a mesma. As dimensões utilizadas para cada perfuração estão dispostas na Tabela 3.

Tabela 3 – Dimensões de furos utilizadas para área de seção transversal igual.

Geometria	b_0 (mm)	a_0 (mm)
Círculo	504,63	504,63
Quadrado	504,63	504,63
Retângulo	504,63	1009,25
Elipse	504,63	1009,25
Oblongo	504,63	1009,25
Losango	504,63	1009,25

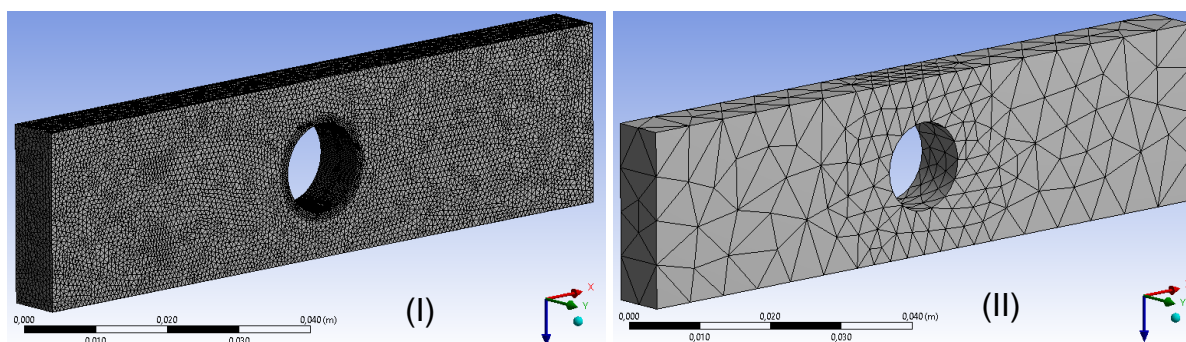
Fonte: Autores.

Parâmetros de carregamento, malha, material e método de análise de fadiga foram implementados do mesmo modo que na seção anterior.

4 RESULTADOS OBTIDOS

Para verificar o modelo, inicia-se com o teste de convergência de malha. A Figura 3 mostra a discretização do domínio da placa para a faixa de tamanhos de elementos (0,7 mm - 6,5 mm) utilizados.

Figura 3 – Malha com tamanho de elemento: (I) 0,7 mm; (II) 6,5 mm.



Fonte: Autores.

Através do teste de convergência de malha, obteve-se que uma dimensão de 1 mm já apresenta resultados suficientemente precisos a respeito das tensões de von Mises, e com um esforço computacional menor do que com malhas mais refinadas.

Utilizando-se a dimensão de elemento escolhida a partir do teste de convergência de malha, foram reproduzidas as análises realizadas por MIRJI (2020) com a finalidade de realizar a verificação do modelo computacional. A Tabela 4 mostra os resultados obtidos.

Tabela 4 – Verificação de modelo com a variação do carregamento.

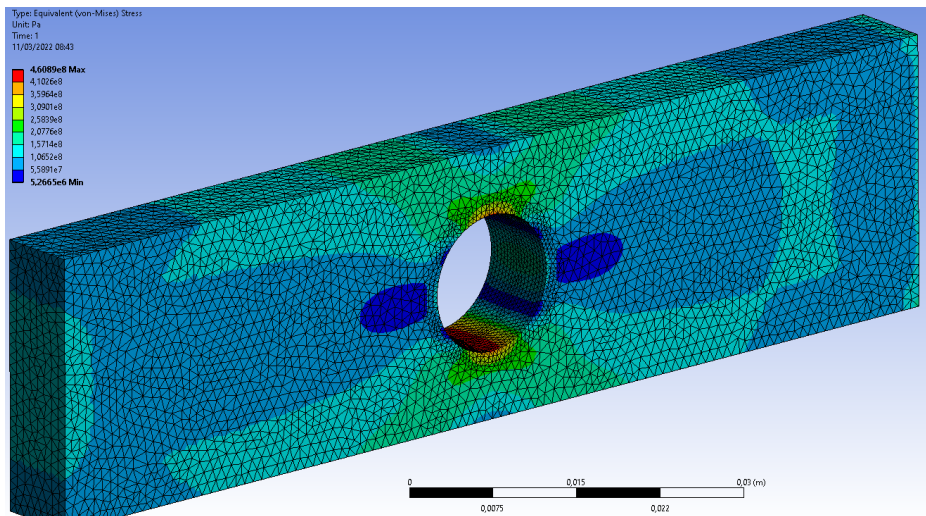
Carga (N)	Simulação Atual (MPa)	MIRJI (MPa)	Diferença %
62250	1371,4	1359,3	0,89%
53890	1187,2	1176,7	0,89%
47390	1044	1034,8	0,89%
40180	885,2	877,36	0,89%
40140	884,3	876,49	0,89%
31140	686	679,96	0,89%
25270	556,7	551,79	0,89%
22020	485,1	480,82	0,89%
20920	460,9	456,8	0,90%

Fonte: Autores e MIRJI (2020).

Baseado na Tabela 4, nota-se que os resultados obtidos através do modelo computacional apresentam uma diferença percentual pequena quando comparados aos de MIRJI (2020) mostrando que o modelo computacional desenvolvido apresenta resultados confiáveis.

A Figura 4 mostra a malha com elementos de 1 mm, definida após o teste de convergência de malha, e a distribuição das tensões de von Mises quando aplicado um carregamento de 20920 N.

Figura 4 – Verificação de modelo.



Fonte: Autores.

Através da Figura 4, é possível perceber que as maiores tensões de von Mises (representadas em vermelho) se encontram na parte de menor seção transversal, localizadas acima e abaixo da perfuração onde ocorre o fenômeno de concentração de tensões, distorcendo desse modo as linhas do campo de tensões que agem axialmente ao carregamento aplicado e geram um acúmulo de tensões nesses locais. As zonas de menores tensões de von Mises (representadas em azul) estão distribuídas ao longo da placa e principalmente nas laterais da perfuração, apontando o local onde a ação de linhas de tensões é muito baixa.

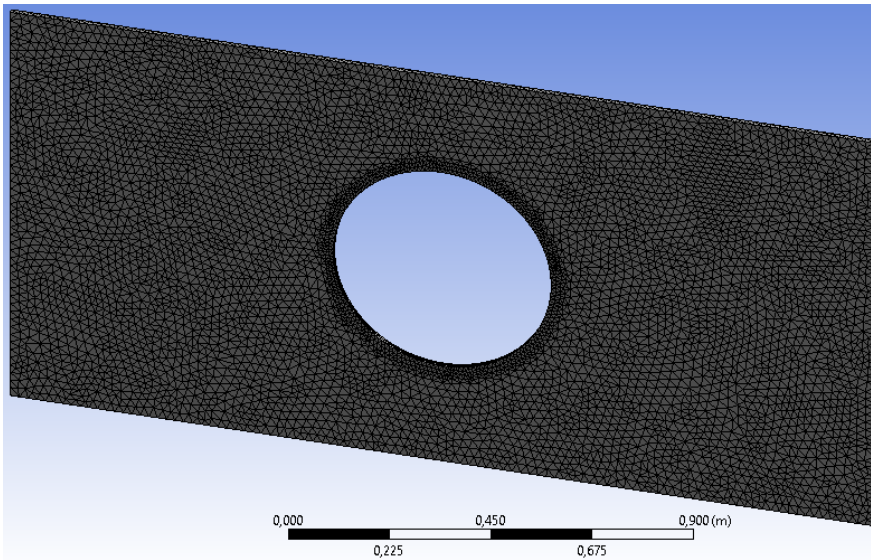
Com a verificação realizada, obtém-se que o modelo computacional analisado apresentou resultados condizentes e está apto a ser aplicado no módulo do ANSYS® Workbench onde é possível realizar análises de fadiga.

4.1 ANÁLISE DE PLACAS COM PERFURAÇÕES DE VOLUME IGUAL

Através do teste de convergência de malha na placa de 2000 mm x 1000 mm x 12 mm com furo circular, obtém-se que a dimensão de 20 mm para um elemento tetraédrico representa com assertividade os resultados e pode ser aplicado.

A Figura 5 mostra a malha que é aplicada e o refinamento utilizado na região da perfuração.

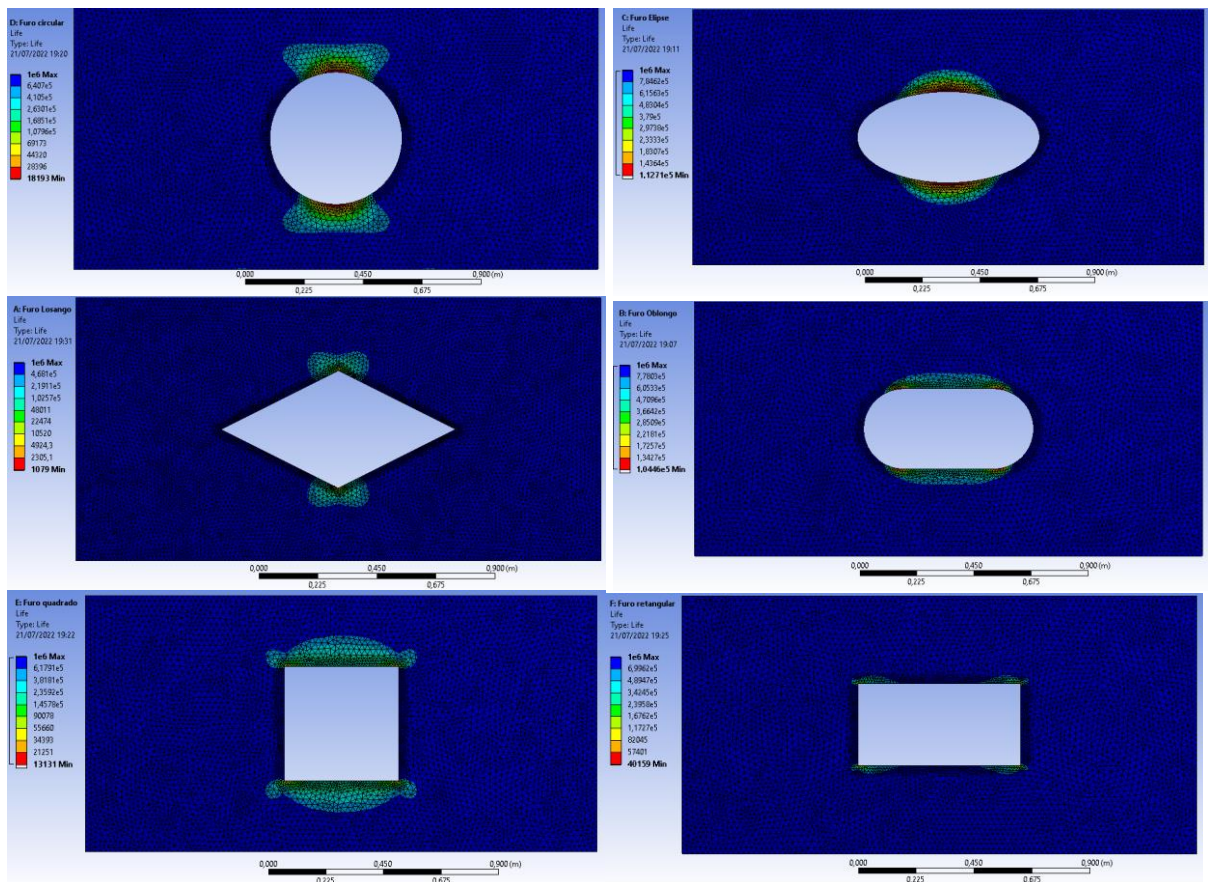
Figura 5 – Placa 2000 mm x 1000 mm x 12 mm com furo circular.



Fonte: Autores.

A Figura 6 apresenta os resultados obtidos nas simulações feitas através do modelo computacional verificado.

Figura 6 – Resultados de vida em fadiga para perfurações com 10% do volume total.



Fonte: Autores.

Nota-se na Figura 6 que as regiões em torno das perfurações são as maiores responsáveis pela delimitação da vida em fadiga, sendo estas as regiões onde temos as zonas mais críticas (menor vida em fadiga) mostradas em vermelho. Por outro lado, as zonas mais afastadas do acidente geométrico, causado pela perfuração, são representadas pela cor azul, caracterizando que são regiões da placa que possuem vida infinita.

Os resultados obtidos para vida em fadiga dos pontos críticos, para cada tipo de furo, estão expostos na Tabela 5:

Tabela 5 – Vida em fadiga (em ciclos) para furos com 10% do volume total da placa.

Circulo	Elipse	Losango	Oblongo	Quadrado	Retângulo
18193	112710	1079	104460	13131	40159

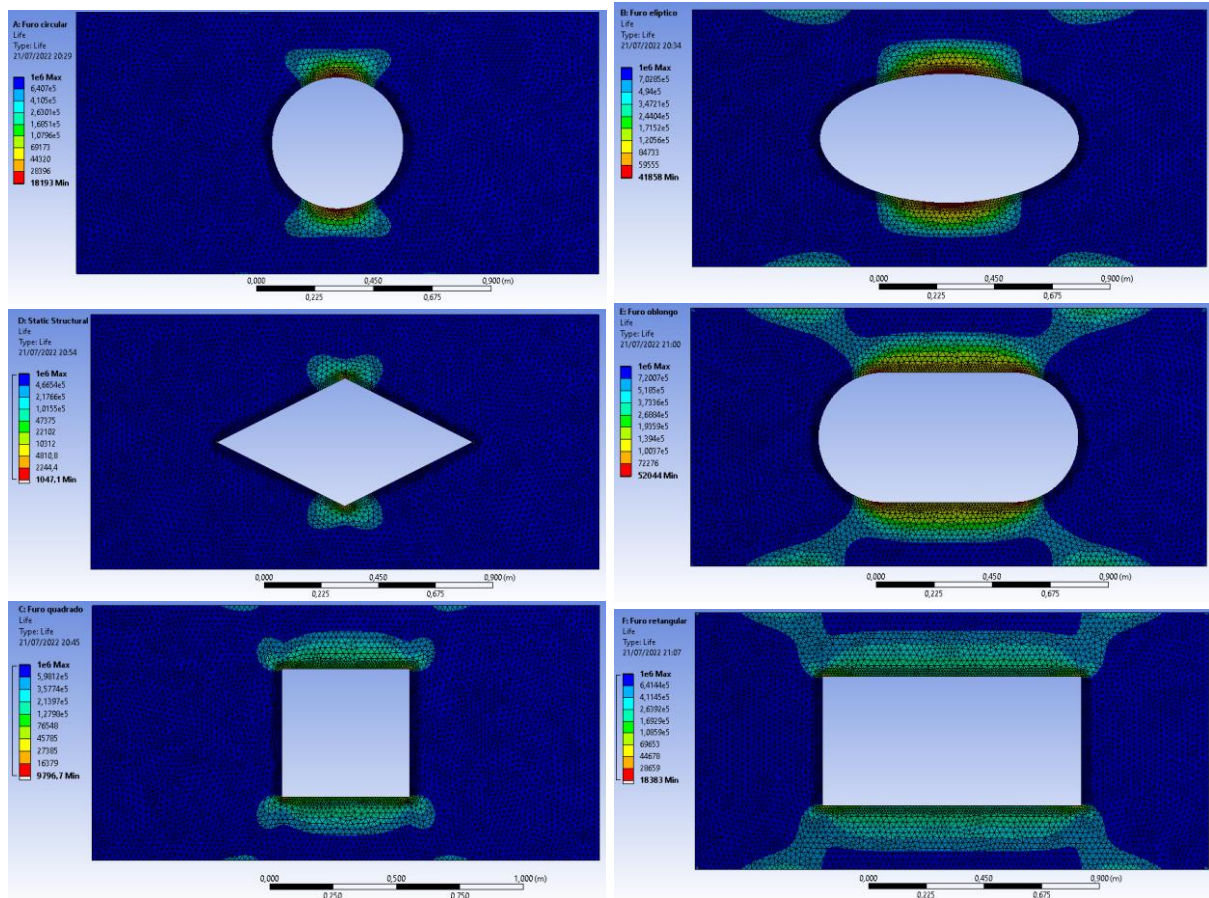
Fonte: Autores.

Algumas características podem ser notadas nos resultados apresentados na Tabela 5, entre elas o padrão de aumento de vida em fadiga nos furos com menor dimensão b_0 (elipse, oblongo e retângulo). Assim, em furos onde a dimensão b_0 é menor, existe uma menor variação nas tensões predominantes que fluem na direção do eixo x, devido ao carregamento aplicado e desse modo, há uma menor concentração de tensões no entorno da perfuração. Dentre todas as perfurações, para a mesma quantidade de material removido, destaca-se o furo elíptico com 112710 ciclos. Este valor mostra que a escolha da geometria elíptica melhora em 104,45 vezes a vida da placa se comparada à perfuração losangular, o que representa um aumento de 10345,78% da vida útil da placa.

4.2 ANÁLISE DE PLACAS COM SEÇÃO TRANSVERSAL IGUAL

Aplica-se o mesmo carregamento cíclico completamente reverso de 600 kN para as placas considerando a seção transversal mínima fixa (b_0 constante) e os resultados para essa nova configuração das perfurações são expostos Figura 7.,

Figura 7 – Vida em fadiga para perfurações com mesmo valor de b_0 .



Fonte: Autores.

Com base na Figura 7 percebe-se que as regiões mais afetadas pela descontinuidade geométrica se localizam em torno do furo imposto à placa, sendo esta uma região de alta concentração de tensões. As regiões onde há a falha por fadiga estão representadas pela cor vermelha enquanto que as áreas menos afetadas, de vida infinita, podem ser observadas na cor azul. Os valores de vida em fadiga das áreas críticas de cada perfuração são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 - Vida em fadiga (em ciclos) para furos com o mesmo b_0 .

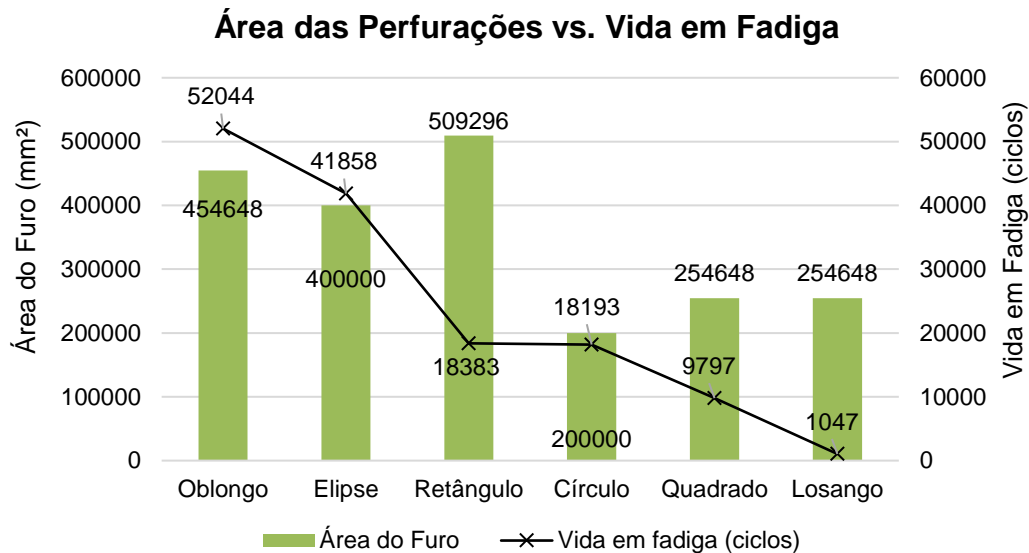
Circulo	Elipse	Losango	Oblongo	Quadrado	Retângulo
18193	41858	1047	52044	9797	18383

Fonte: Autores.

Mantendo a dimensão b_0 constante para todas as perfurações, e havendo diferentes volumes de material removido, nota-se (ver Tab. 6) que novamente o furo losangular apresenta o pior resultado para a vida em fadiga. Por outro lado, os furos elíptico e oblongo são os que se destacam pela maior vida útil, sendo agora o furo oblongo o melhor com 52044 ciclos, o que representa um aumento de 4870,77% em relação ao furo losangular. Cabe destacar que mesmo com a variação dimensional do furo losangular, a variação em número de ciclos diminuiu de 1049 para 1047, representando uma redução de menos de 0,20%, mostrando que para este tipo de furo o volume de material removido não foi um fator determinante.

Para uma melhor visualização dos resultados alcançados através da segunda análise, traz-se um gráfico que compara o volume de material que é removido aplicando cada tipo de geometria nas perfurações das placas. As dimensões trazidas para as perfurações tratam-se das áreas e para se obter o volume basta multiplicar pela espessura (t) da chapa, sendo essa igual para todos os casos e proporcionais tanto para o volume como também a massa reduzida de material em cada chapa.

Figura 8 – Gráfico de comparação volume das perfurações e ciclos em fadiga.

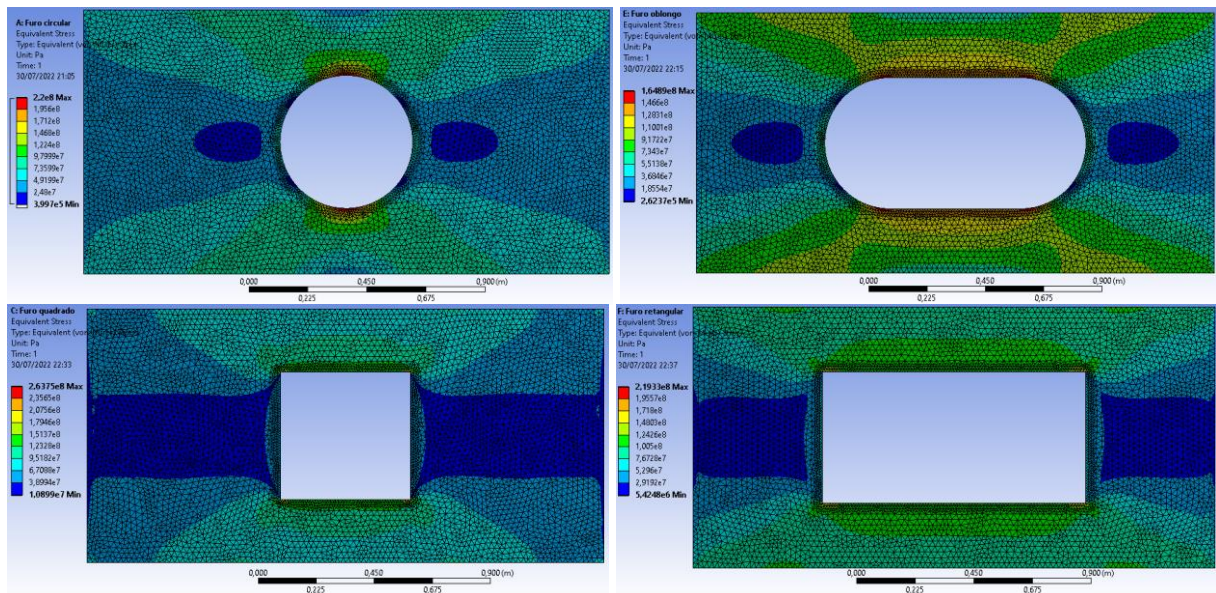


Fonte: Autores.

Tomando-se como base para a análise o furo circular, que possui a menor área, e comparando a geometria do furo retangular, que possui a maior área dentre as geometrias analisadas, nota-se um aumento de 154,6% na área da perfuração retangular e, conseqüentemente, da sua massa removida da placa. Em paralelo a isso, a vida em fadiga para as placas com as perfurações de geometria citada, possuem um desempenho similar, sendo assim vantajosa a aplicação de uma perfuração com geometria retangular no ponto de vista de redução de peso e aumento de área removida.

Outra análise que pode ser feita com os resultados é de que conforme a dimensão a_0 das perfurações aumentou, o fenômeno de concentração de tensão foi reduzido ao longo da borda da perfuração devido à melhor distribuição das tensões. Isso pode ser visto quando se compara a vida em fadiga do furo circular à do furo oblongo e, também, do furo quadrado ao retangular. Nos dois casos, as duas perfurações possuem como diferença somente a dimensão a_0 e com o aumento dessa dimensão, além de diminuir a massa da placa, aumentou-se a vida em fadiga em 186,1% quando comparamos a geometria circular ao oblongo e de 87,6% para a geometria retangular comparada ao quadrado. A Figura 9 mostra as tensões de von Mises para os dois exemplos, em que o aumento da dimensão a_0 reflete na melhoria da distribuição das tensões máximas.

Figura 9 – Distribuição de tensões de von Mises.



Fonte: Autores.

Quando comparamos o furo circular ao oblongo, há uma melhor distribuição das máximas tensões ao longo da borda do furo oblongo e conseqüentemente uma diminuição das concentrações de tensões, levando assim ao aumento da vida em fadiga. A mesma análise pode ser feita para comparar a distribuição das tensões do furo quadrado à do furo retangular.

Por fim, o furo de geometria losangular apresenta o pior desempenho por ser um concentrador de tensão agudo na direção do carregamento, gerando facilmente o início de uma trinca nessa região.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A verificação realizada, apresentou resultados condizentes com os do autor do trabalho (MIRJI, 2020) e possibilitou o desenvolvimento do estudo aqui apresentado. Além disso, o refino da malha permitiu gerar resultados confiáveis no menor tempo possível, melhorando assim a eficiência na realização das simulações.

Os resultados obtidos para uma remoção de material de 10% do volume total da placa, apresentaram que as placas com maior vida útil são as que possuem a menor dimensão b_0 permitindo que o fluxo das tensões seja menos afetado do que para as perfurações com maiores dimensões verticais. Ainda, constatou-se que a concentração das tensões é determinante para a vida em fadiga, como pode ser observado na perfuração losangular.

Em termos de uma segunda análise, que variou o volume de material removido, mas possibilitou os mesmos valores de b_0 para todos os furos, observou-se que quanto mais alongada for a geometria, melhores são os resultados. Isso se deve ao fato de as tensões se distribuírem melhor no entorno da perfuração, reduzindo as áreas de concentração de tensões. Desta análise observa-se também que é possível reduzir o volume de material da placa de forma a reduzir a sua massa e, ainda assim, o comportamento mecânico em fadiga foi melhorado, como visto no comparativo entre os furos quadrado e retangular e, também, para os furos circular e oblongo.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a análise da vida em fadiga de placas finas, de aço, perfuradas e submetidas à carregamento alternado. Com a aplicação do Método dos Elementos Finitos, através de um software comercial, um modelo computacional foi verificado de forma a atestar a eficácia do método e a veracidade dos resultados.

O modelo computacional verificado foi utilizado para estudar o comportamento mecânicos de placas retangulares com perfuração centralizada e com diferentes geometrias. Para perfurações com o mesmo volume de material removido, percebeu-se um melhor comportamento mecânico para o furo elíptico, seguido pelo furo oblongo. Já o pior comportamento mecânico observado foi para o furo losangular. A aplicação do furo elíptico, se comparado ao losangular, permite uma melhoria de 10345,78% da vida útil da placa.

Quando analisadas placas onde a dimensão b_0 do furo foi mantida constante e o volume de material removido foi variável, observou-se superioridade no comportamento mecânico da placa com furo oblongo, e mais uma vez a pior condição foi obtida para o furo losangular.

As perfurações que apresentaram os melhores comportamentos mecânicos foram as que melhor distribuíram as máximas tensões, reduzindo as zonas de concentrações de tensões. Por outro lado, tanto para placa com volume constante quanto para b_0 constante, a mesma vida em fadiga foi observada para os furos losangulares, independentemente da variação no volume de material a placa.

7 REFERÊNCIAS

ANSYS, Inc. ANSYS Meshing User's Guide, Release 13.0, 2010.

BUDYNAS, R. G., NISBET, J. K. **Shigley's Mechanical Engineering Design**, McGraw – Hill Primis, 8ª Edição, 2008.

LOLAND, M. L., SIRIWARDANE, S. C., HOLEN, D., STAKKELAND, F.: Optimal Design of Wire Sheave Used in Offshore Drilling Operations. **Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering**, 138(1), 014501, 2016.

MIRJI, P. Fatigue Life Analysis of Rectangular Plate with Central Hole using Finite Element Method. **International Research Journal of Engineering and Technology**. Ano de 2020.

PALMA, D. C. Metodologia de simulação por elementos finitos de polias para transportadores de correia de grandes capacidades utilizando o programa ANSYS Workbench. **Ufrgs**, 2009. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/25826>>. Acesso em: 5 Mar. 2022.

REZAEPAZHAND, J., JAFARI, M. Stress concentration in metallic plates with special shaped cutout. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 52, n. 1,

p. 96–102, 2010. Disponível em:
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002074030900215X>>. Acesso em: 26 Feb. 2022.

SKOGLUND, A. Environmentally assisted fatigue in LWR - Development of a calculation tool. **Chalmers.se**, 2021. Disponível em:
<<https://odr.chalmers.se/handle/20.500.12380/304411>>. Acesso em: 21 Feb. 2022.

VUKELIC, G., *et al.* Analysis of prolonged marine exposure on properties of AH36 steel. **Engineering Failure Analysis**, v. 135, p. 106132, 2022. Disponível em:
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350630722001066>>. Acesso em: 25 jul. 2022.

ZHU, Zhaoyi; LI, Xiaowen; CHEN, Qinglin; *et al.* Shear buckling of ship plates with different holes. **Mechanics & Industry**, v. 23, p. 4, 2022. Disponível em:
<<https://www.edp-open.org/articles/meca/abs/2022/01/mi210085/mi210085.html>>. Acesso em: 22 Feb. 2022.