

ANÁLISE DA VIDA ÚTIL EM FADIGA DE PLACAS FINAS COM PERFURAÇÃO ELÍPTICA, ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Anselmo Motta da Silveira
Thiago da Silveira

RESUMO

Devido à grande competitividade da indústria, cada vez mais busca-se reduzir os custos dos componentes mecânicos existentes. Porém, muitas vezes acaba-se por deixá-los com uma vida útil menor devido à inserção de descontinuidades como, por exemplo, perfurações. Dentro desta problemática, o presente estudo tem como objetivo fazer uma verificação de um modelo computacional para a análise da vida útil de placas finas perfuradas, através do método de elementos finitos, utilizando como forma de análise a abordagem da vida em fadiga. Foram feitas simulações no software ANSYS® tendo como modelo de análise uma placa plana que foi submetida a tensões de tração e compressão devido aos carregamentos totalmente alternados de diversas magnitudes. As simulações apresentaram resultados satisfatórios que acabaram por comprovar a confiabilidade do modelo computacional desenvolvido. Além disso, placas com perfurações elípticas foram analisadas para diferentes razões de aspecto do furo e observou-se que a variação geométrica da perfuração elíptica pode melhorar em até 78 vezes a vida útil de uma placa retangular, fina e perfurada, para as condições de contorno consideradas neste estudo.

Palavras-chaves: Método dos Elementos Finitos; Fadiga; Placas Finas;

ABSTRACT

Due to the huge industry competition and the efforts to reduce the manufacturing cost, the lifespan of mechanical components ended up getting lower. Based on this issue, the purpose of the present study is to verify a computational model whose function is to analyze the lifespan of perforated thin sheets, through the finite element method, using the fatigue life as form of analysis. It was done by means of simulations on software ANSYS® submitting to many magnitudes of tractive and compression stress a thin sheet prototype. The results of these simulations were satisfactory to prove the reliability of the developed computational model. Also, thin plates with elliptical cutouts were analyzed considering different aspect ratios of elliptical perforation and it was observed that the geometric variation of the elliptical hole can improve by up to 78 times the lifespan of a rectangular, thin and perforated plate, for the boundary conditions considered in this study

Keywords: Finite Element Method; Fatigue, Thin Plates

1 INTRODUÇÃO

Devido ao avanço da tecnologia, bem como a necessidade da otimização dos materiais e dos processos utilizados para a fabricação de componentes mecânicos, cada vez aumenta mais a necessidade de componentes mais leves, mais duráveis e com menor custo. Uma das grandes preocupações para a vida útil de um componente mecânico são as descontinuidades no mesmo, como furos para a fixação, através de parafusos, rebites, entre outros tipos, ou ainda a abertura para acesso, manutenção, alívio de peso ou com fins estéticos. Estas descontinuidades são

regiões críticas, pois ali tem-se as maiores tensões devido ao material retirado (HIBBELER, 2010; BUDYNAS E NISBETT, 2016).

Uma análise importante é a consequência de perfurações em componentes do tipo placa, na vida em fadiga, podendo em alguns casos a perfuração aumentar a vida útil dos componentes. Segundo o estudo feito por Loland (2016), os furos em uma polia aumentaram a sua vida útil em 123% comparada com uma mesma polia sem furos.

Nesta problemática de otimização de componentes e redução de custos torna-se cada vez mais comum o uso de análise numérica. Devido ao seu baixo custo e a alta confiabilidade que vem se comprovando através de estudos científicos ao redor mundo, a análise numérica de elementos finitos é uma grande aliada no estudo de novos componentes mecânicos e também da melhoria dos antigos.

O presente estudo é dividido em duas etapas, a primeira consiste em uma verificação de um modelo computacional para a análise da vida útil de placas finas perfuradas. Este foi realizado com base no estudo de Mirji (2020), onde obteve-se resultados satisfatórios das simulações, sendo assim assegurada a confiabilidade dos resultados obtidos neste trabalho. Já na segunda etapa serão feitas análises sobre a influência da geometria de um furo elíptico na vida em fadiga de uma placa fina com perfuração centralizada. Estas análises foram feitas através de simulações computacionais utilizando o software ANSYS®.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

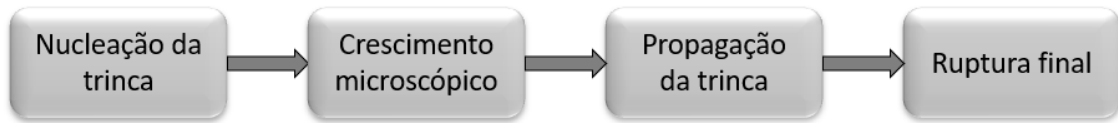
Neste tópico será apresentada a teoria utilizada para descrever os fenômenos que são vistos através das simulações.

2.1 FADIGA

A falha de um material ou de uma estrutura ocorre quando a mesma deixa de desempenhar a função para a qual foi projetada. Uma das principais causas de falha de estruturas e componentes mecânicos é a fadiga, porém, somente por volta do século XIX apareceram os primeiros estudos conhecidos sobre fadiga, tendo o engenheiro alemão August Wöhler como principal autor. Sua teoria foi baseada na análise de eixos de locomotivas de estradas de ferro, cujas rupturas por fadiga aconteciam frequentemente. Antes desse período, o problema de fadiga em serviço não era de grande importância pois as máquinas tinham funcionamento rudimentar, principalmente manual, com solicitações geralmente estáticas (DOWLING, 2007).

Para Moura Branco (1986) a falha por fadiga é provocada pela nucleação e propagação, razoavelmente lenta, de uma ou mais trincas que surgem em uma peça que é submetida a tensões cíclicas. O processo no qual ocorre a ruptura por fadiga pode ser dividido em quatro fases indicadas na figura a seguir:

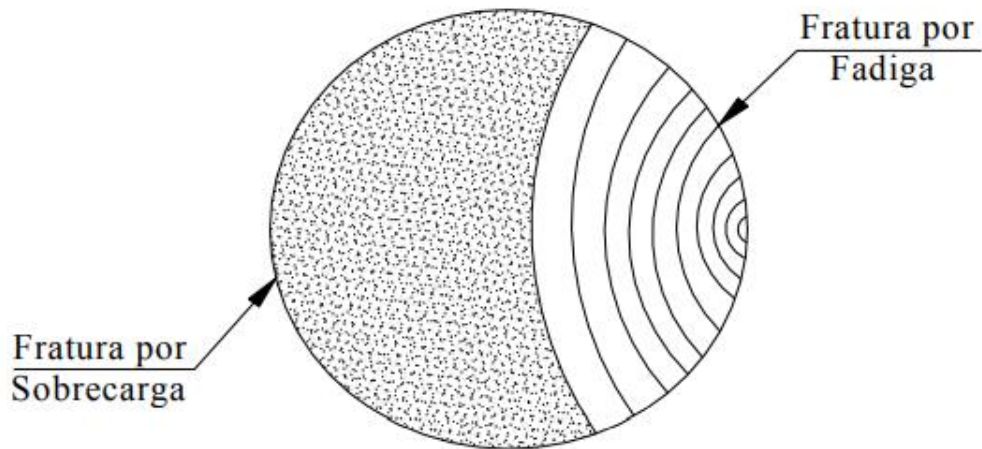
Figura 1: Fases de uma falha por fadiga



Fonte: Adaptado de Moura Branco (1986)

As duas primeiras fases consistem no período de iniciação de uma ou mais microtrincas, isto acontece devido a deformação plástica cíclica seguida pela propagação cristalográfica. Estas fases comumente não são discerníveis a olho nu. Já a fase de propagação macroscópica tem um aspecto característico chamado de marcas de praia. Este nome é devido a aparência de ondas que ocorre devido as alterações de cargas do ciclo de tensões, como podemos ver na figura 2. Estas marcas nunca se cruzam e também indicam a posição da trinca em um dado momento. As trincas continuam a se propagar até atingir um tamanho crítico, assim acaba por chegar à sua ruptura final. (PELLICCIONE; MORAES, 2012)

Figura 2: Regiões da fratura por fadiga



Fonte: Cimini JR, 2001

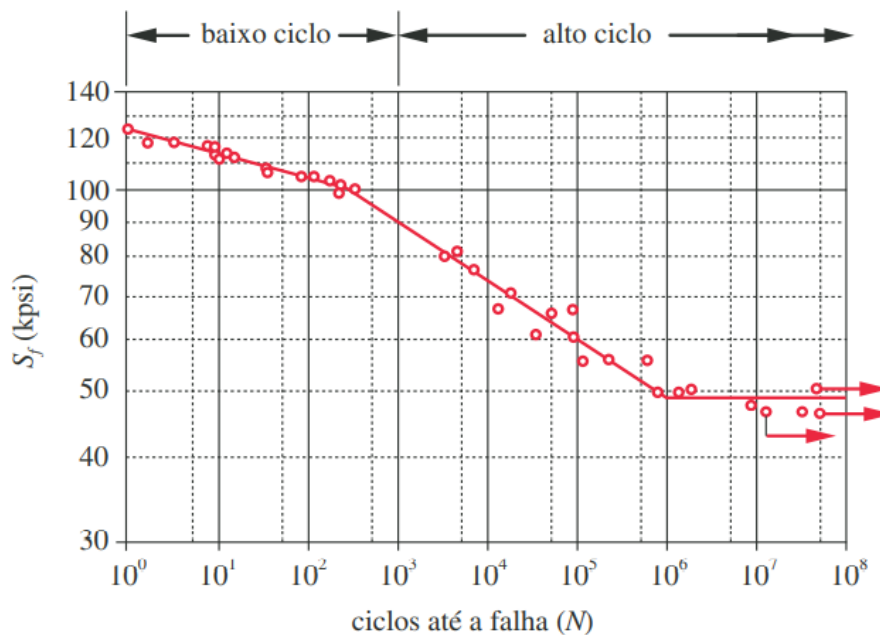
Uma das principais abordagens para caracterizar a fadiga é a metodologia desenvolvida por Wöhler, e que em grande uso até os dias atuais é conhecida como curva S-N, onde S é a magnitude da tensão que ocorre a falha e N é o número de ciclos correspondente a falha, ambos em escala logarítmica. Devido a isto a fadiga pode ser descrita através do número de ciclos de tensão ou deformação, no qual espera-se que a peça seja utilizada durante sua vida em serviço. Com base nisto tem-se dois tipos de regime de vida em fadiga, o regime de baixo-ciclo (FBC) e o regime de alto-ciclo (FAC). Para Shigley (2011), a divisão destes regimes é de $N = 10^3$ ciclos para regime de baixo-ciclo, e acima disto é considerado regime de alto-ciclo. Já o número de ciclos (N) igual ou maior 10^6 é considerado como vida infinita, como podemos ver na figura 3 onde é mostrada a curva S-N para um aço AISI 4340.

Para Mischke (2004), a tensão que gera a fadiga de baixo ciclo, $N = 10^3$, pode-se aproximar pela tensão de fadiga (S_f) como sendo 90% da resistência a tração do material. Porém, se o carregamento for puramente axial a tensão de fadiga se torna 75% da resistência a tração. Já para a fadiga em alto ciclo, $N > 10^3$ é possível aproximar a tensão de ruptura (σ) pela equação 1:

$$\log \sigma = \log C - c * \log N \quad (1)$$

onde: σ = Tensão
 N = Número de ciclos
 C e c = são constantes do material

Figura 3: Curva S-N de um aço 4340.



Fonte: SHIGLEY (2011)

2.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O método dos elementos finitos (MEF) destaca-se por sua confiabilidade e eficácia frente a diversos estudos das áreas industrial e acadêmica. Comumente ele é utilizado para a solução de problemas complexos que muitas vezes não possuem soluções analíticas. Este método utiliza como parâmetro as variáveis nodais de um número finito de pontos, denominados nós. O componente analisado é dividido em uma sequência de regiões, os elementos finitos, interligados entre si mediante um número discreto de nós. Esta divisão de regiões é conhecida como discretização do domínio, e todo este conjunto de nós é denominado malha. Cada nó possui um comportamento, assim formam-se as incógnitas do problema, por ser um método que fornece resultados aproximados, o objetivo fundamental é diminuir o máximo de erros das aproximações das equações. A solução deste sistema proporciona valores das incógnitas, desconhecidas anteriormente, nos pontos nodais. Logo, quanto mais refinada for a malha maior será convergência para valores próximos a realidade. (MARINHO et al, 2002).

Conforme Castro (2009), muitos engenheiros e cientistas por todo o mundo utilizam o MEF para analisar o comportamento estrutural, mecânico, elétrico, térmico e até mesmo químico de sistemas, muitas vezes utilizado na etapa de projeto e também muito utilizado na análise de desempenho.

O modelo computacional deste estudo foi desenvolvido no software ANSYS®, uma vez que devido à complexidade do problema torna-se muito difícil a sua solução de forma analítica. Devido a isso, usa-se o software que é capaz de gerar resultados confiáveis para análise da fadiga. Por meio do Ansys Workbench, é possível que o componente seja desenhado e as condições de contorno impostas e então, e a partir disto, podem ser feitas as mais diversas análises com base no método de elementos finitos para a resolução dos problemas de engenharia (ANSYS, 2004).

O programa de análises através do método de elementos finitos Ansys Workbench é um dos vários existentes no mundo. Ele integra a categoria de programas de Engenharia Auxiliada por Computador (CAE), ou *Computer Aided Engineering*. A sua principal finalidade é a de auxiliar o engenheiro no processo de decisão em etapas como a de desenvolvimento de projetos, especialmente no dimensionamento e validação dos mesmos. De um modo geral a aplicação do método dos elementos finitos, através de um software como este, permite a redução de custos e de tempo na etapa de desenvolvimento do projeto, devido a rapidez e confiabilidade na análise. Além disso, esta abordagem auxilia para melhoria de uma peça ou de um conjunto. Já na manufatura o uso do MEF auxilia na redução de chances de falha dos componentes, pois uma eventual falha pode ser identificada antes da peça ser produzida. O ANSYS® Workbench mostra seus resultados, através de animações e gráficos permitindo a percepção visual da geometria e resultados, assim facilitando a interpretação do que está acontecendo na peça ou no conjunto. (AZEVEDO, 2015).

3 METODOLOGIA

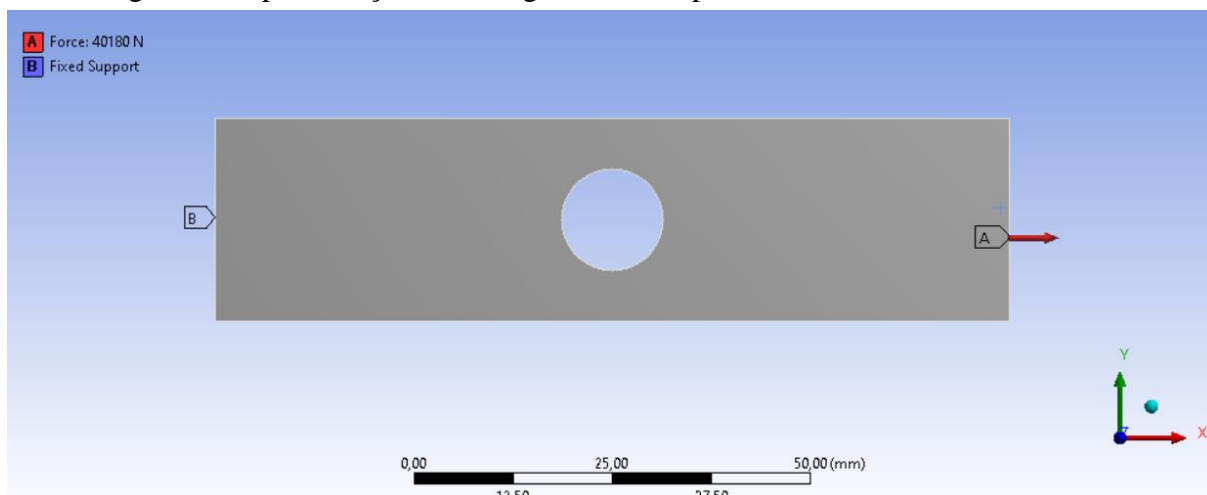
Neste tópico será apresentada a metodologia utilizada para fazer a verificação do modelo computacional e as simulações das placas com furo elíptico.

3.1 MODELAGEM COMPUTACIONAL

A primeira parte deste estudo é uma verificação de um modelo computacional com base no estudo de Mirji (2020). Através da utilização da plataforma Workbench dentro do software ANSYS® foi desenvolvido um modelo computacional que buscasse replicar os resultados obtidos por Mirji (2020), possibilitando que fosse feito um comparativo percentual das tensões máximas de von Mises distribuídas na placa e da sua vida em fadiga a partir de vários carregamentos para a mesma. Esta etapa tem por objetivo principal replicar os valores encontrados no estudo para mostrar que o modelo computacional apresenta resultados confiáveis.

O modelo desenvolvido no ANSYS® Workbench é uma placa plana, com dimensões de comprimento igual a $a = 100$ mm, largura de $b = 25,60$ mm e espessura de $t = 7,68$ mm, com um furo de diâmetro igual a $a_0 = b_0 = 12,80$ mm posicionado no centro. Os carregamentos axiais foram impostos na magnitude desejada e na direção de x na face A da placa, estando a placa fixa na face B, como pode ser observado na figura 4.

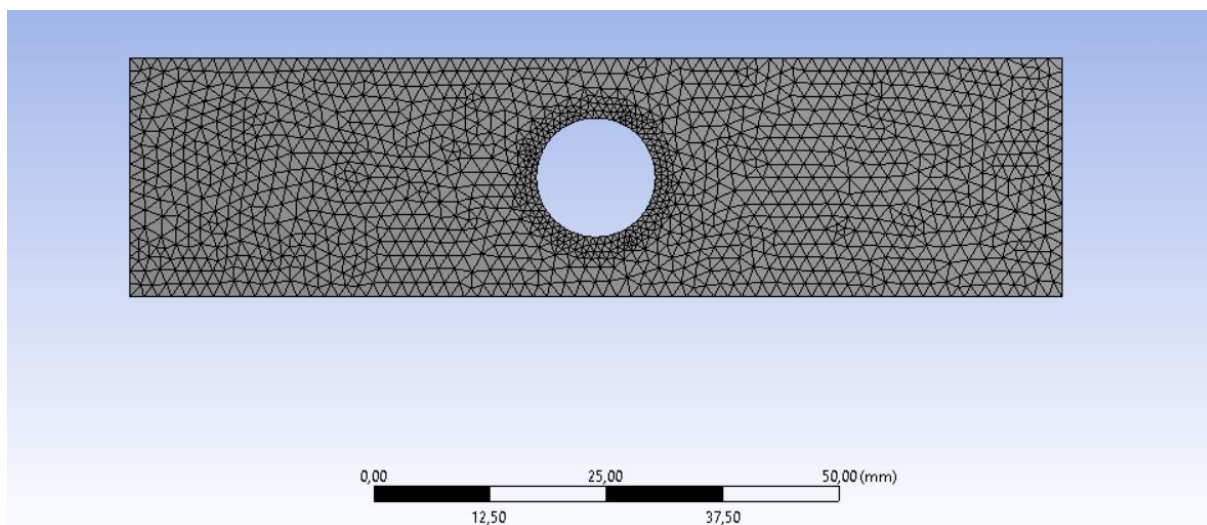
Figura 4: Representação de carregamento e suporte



Fonte: Autor

Para fazer a verificação do modelo, foi feito primeiramente o teste de convergência de malha. Foram feitos testes para ver qual o tamanho de malha se aproximava mais dos resultados do estudo em análise e o tamanho escolhido foi o de formato triangular com dimensão de 1,5 mm e refinamento na área da furação. A figura 5, mostra a malha utilizada nas simulações

Figura 5: Malha utilizada na verificação do modelo computacional



Fonte: Autor

As propriedades utilizadas para o material são especificadas na tabela 1.

Tabela 1: Propriedades mecânicas do material

Modulo 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: Autor

As tabelas 2 e 3 apresentam os comparativos entre os resultados de Mirji (2020) e os resultados obtidos pelo presente estudo.

Tabela 2: Comparativo das máximas tensões de von Mises.

Nº	Carregamento (N)	Mirji (2020) (MPa)	Presente Estudo (MPa)	Diferença (%)
1	62250	1359,30	1374,00	1,08%
2	53890	1176,70	1189,50	1,09%
3	47390	1034,80	1046,00	1,08%
4	40180	877,36	886,86	1,08%
5	40140	876,49	885,98	1,08%
6	31140	679,96	687,33	1,08%
7	25270	551,79	557,77	1,08%
8	22020	480,82	486,03	1,08%
9	20920	456,80	461,75	1,08%

Fonte: Autor

Tabela 3: Comparativo da vida em fadiga.

Nº	Carregamento (N)	Mirji (2020) (Ciclos)	Presente Estudo (Ciclos)	Diferença (%)
1	62250	110,11	107,20	2,71%
2	53890	157,55	153,39	2,71%
3	47390	217,65	211,64	2,84%
4	40180	334,31	325,08	2,84%
5	40140	335,18	325,92	2,84%
6	31140	648,65	630,73	2,84%
7	25270	1116,60	1085,80	2,84%
8	22020	1597,30	1553,20	2,84%
9	20920	1825,00	1774,60	2,84%

Fonte: Autor

Através dos resultados obtidos nas simulações feitas, podemos ver que o modelo computacional é confiável, conduzindo a valores muito próximos dos obtidos por Mirji (2020).

Logo, este modelo computacional pode ser utilizado na nova análise que será sobre o comportamento mecânico de uma placa com furo elíptico sob fadiga.

3.2 PLACAS COM FURO ELÍPTICO

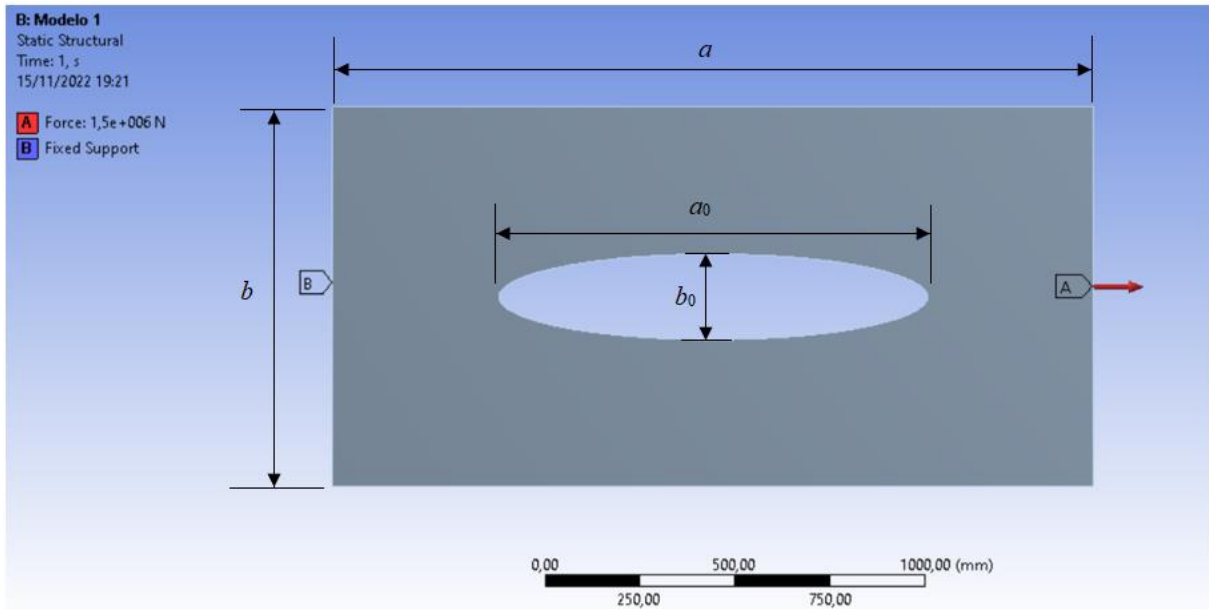
A segunda parte do estudo consiste em analisar o comportamento da vida em fadiga de uma placa com dimensões de 2000 mm x 1000 mm x 12 mm ($a \times b \times t$) sujeita à carregamentos alternados, com variação somente da geometria da perfuração elíptica, centralizada à placa, mantendo sempre a taxa de 10% do volume total da placa sendo retirados pelo furo.

O material escolhido para ser utilizado nas simulações é o aço AH-36, com tensão de escoamento de 355 MPa e tensão de ruptura de 490 MPa. Material este que é comumente utilizado na indústria naval.

Foi aplicado um carregamento de 1500 kN na direção x, sendo este mantido para todas as análises de forma a possibilitar um comparativo da influência da geometria do furo na vida em fadiga. O valor foi escolhido de modo que gere uma fadiga de baixo ciclo na chapa. Como a vida útil se dá por ciclos o carregamento faz um ciclo de 1500 kN a -1500 kN em um intervalo de 1 segundo. A configuração do modelo em relação ao carregamento e ao engaste está melhor exemplificado na figura 6, logo abaixo.

Outra análise realizada foi a comparação do melhor modelo com elipse a uma mesma placa sem furo, pois conforme o estudo de Loland (2016) pode ser obtida uma melhora na vida útil de um componente quando acrescentada uma determinada perfuração.

Figura 6: Condições de contorno da placa, sendo: (A) o carregamento e (B) o engaste.



Fonte: Autor

As configurações geométricas das placas analisadas estão apresentadas na tabela 4, onde são mostradas, detalhadamente, as dimensões das elipses utilizadas em cada simulação, onde V_i é o volume inicial da placa sem furo, V_f é o volume da placa após aplicada a perfuração e V_{elipse} é o volume de material removido pela perfuração.

Tabela 4: Dimensões

Modelo	a (mm)	b (mm)	t (mm)	V_i (mm ³)	V_f (mm ³)	V_{elipse} (mm ³)	a_0 (mm)	b_0 (mm)	Relação (b_0 / a_0)
1	2000	1000	12	24000000	21600000	2400000	1127	225,4	0,20
2	2000	1000	12	24000000	21600000	2400000	1050	242,2	0,23
3	2000	1000	12	24000000	21600000	2400000	960	264,96	0,27
4	2000	1000	12	24000000	21600000	2400000	873,7	291,23	0,33
5	2000	1000	12	24000000	21600000	2400000	740	343,24	0,46
6	2000	1000	12	24000000	21600000	2400000	618	412	0,66
7	2000	1000	12	24000000	21600000	2400000	504,6	504,6	1,00
8	2000	1000	12	24000000	21600000	2400000	463,04	550	1,19
9	2000	1000	12	24000000	21600000	2400000	439,04	580	1,32
10	2000	1000	12	24000000	21600000	2400000	412	618	1,50
11	2000	1000	12	24000000	21600000	2400000	374,41	680	1,82
12	2000	1000	12	24000000	21600000	2400000	356,85	713,7	2,00

Fonte: Autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico serão apresentados os resultados gerados através das simulações numéricas, utilizando o modelo computacional verificado, para a análise da vida útil e das distribuições das tensões de von Mises das placas com furo elíptico.

4.1 PLACAS COM FURO ELÍPTICO

Conforme exposto na tabela 4, todas as geometrias foram analisadas e tiveram os seus resultados obtidos. A tabela 5 apresenta as relações geométricas de cada elipse com os seus respectivos ciclos de vida em fadiga obtidos pelas análises.

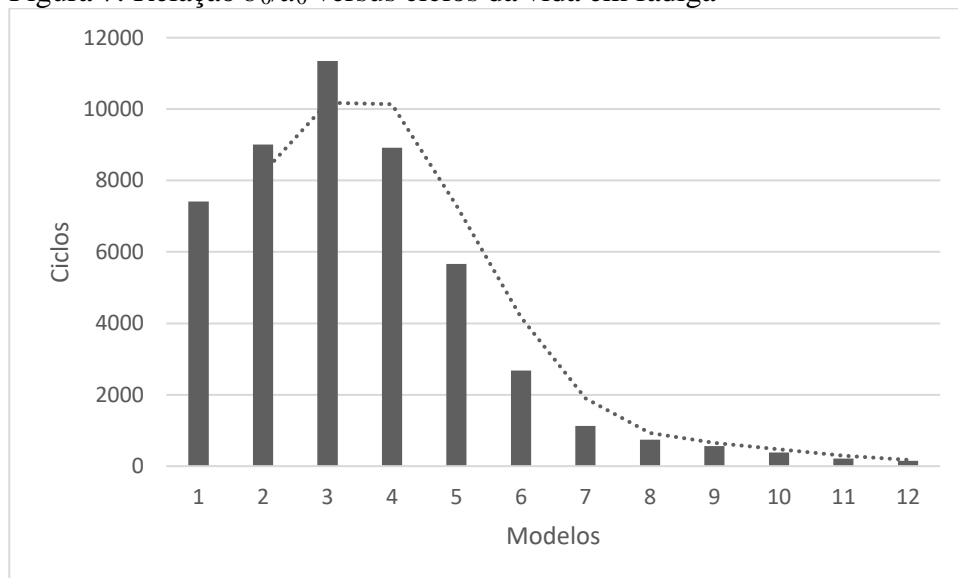
Tabela 5: Vida útil em fadiga de cada modelo

Modelo	a_0 (mm)	b_0 (mm)	Relação (b_0/a_0)	Min ciclos
1	1127	225,4	0,20	7412
2	1050	242,2	0,23	9007
3	960	264,96	0,27	11349
4	873,7	291,23	0,33	8919
5	740	343,24	0,46	5668
6	618	412	0,66	2678
7	504,6	504,6	1,00	1124
8	463,04	550	1,19	740
9	439,04	580	1,32	558
10	412	618	1,50	380
11	374,41	680	1,82	208
12	356,85	713,7	2,00	145

Fonte: Autor

Analisando os resultados apresentados na tabela 5 podemos ver que o melhor caso, ou seja, a configuração geométrica que obteve a maior vida útil, foi o modelo 3 com 11349 ciclos até a ocorrência da falha. Já o pior caso se deu no modelo 12 com 145 ciclos até o colapso global da placa. Esta diferença entre o melhor caso e o pior significa uma melhoria de 7747,59% na vida útil da placa, apenas devido à melhor configuração da perfuração imposta. Os dados obtidos e apresentados nesta tabela, podem ser analisados graficamente na figura 7.

Figura 7: Relação b_0/a_0 versus ciclos da vida em fadiga



Fonte: Autor

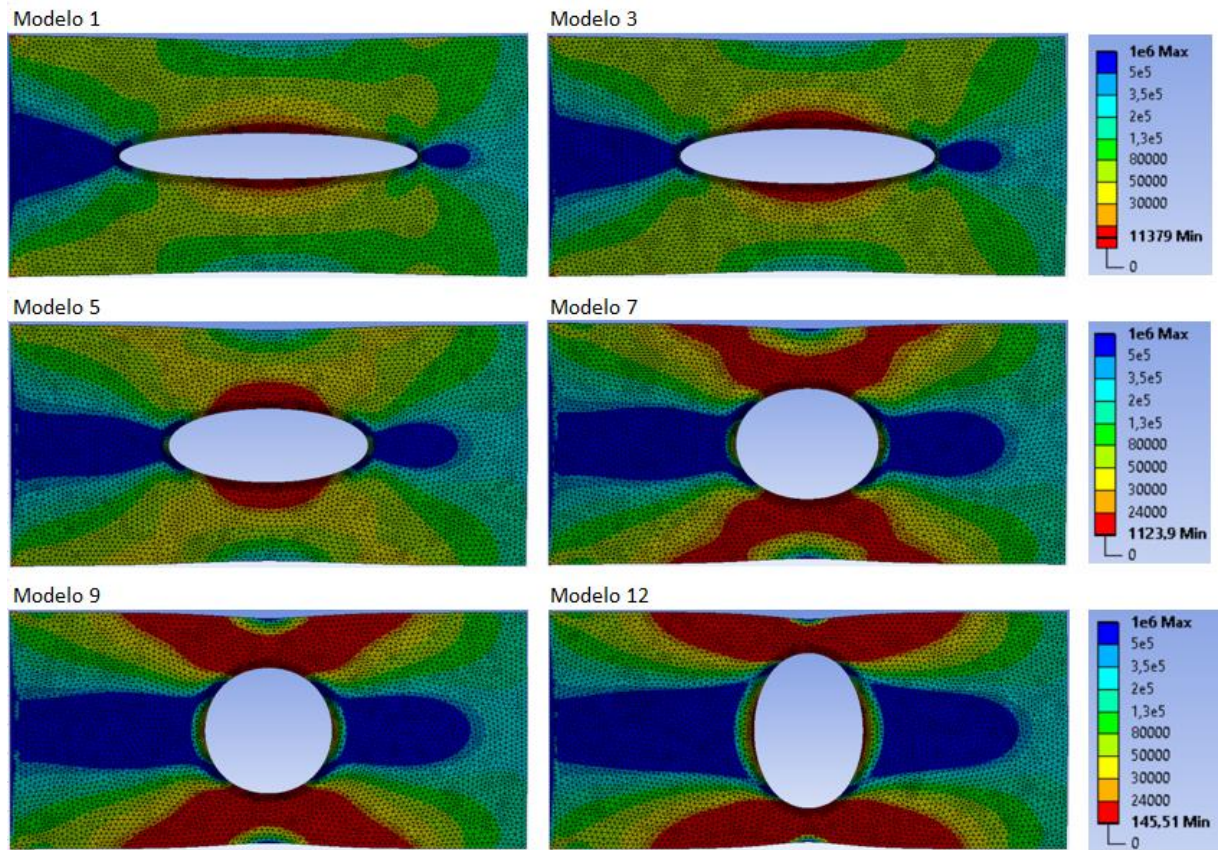
Outra constatação que pode ser feita com base na figura 7, é que conforme a relação b_0/a_0 vai aumentando, inicialmente, tem-se um ganho na vida útil em fadiga até atingir o máximo no modelo 3, pois inicialmente o fenômeno de concentração de tensões na região em torno do furo diminuiu com o aumento da relação (ver figura 9), assim acaba-se tendo uma melhora na sua performance. Porém passado este ponto, e continuando o aumento da relação, tem-se cada vez mais o aumento da concentração de tensões na região em torno da perfuração elíptica, o que acaba por diminuir significativamente a vida útil da chapa.

A figura 8 apresenta os resultados de algumas das simulações realizadas para a vida em fadiga.

A partir da figura 8 nota-se o tanto que a geometria influencia na vida útil em fadiga, pois o volume de material removido é mesmo para todas as geometrias. Conforme vai-se alterando a geometria alteram-se significativamente as regiões susceptíveis a falha por fadiga. Para cada alteração na geometria da elipse tem-se uma relativa mudança na vida útil em fadiga.

Esta mudança na vida útil se dá devido ao acúmulo de tensões que estão em torno da geometria da elipse, tendo ali, uma região crítica que delimita a vida em fadiga, região que está representada pela cor vermelha. Em contrapartida, as zonas mais afastadas da elipse e alinhadas com o eixo x tem a maior vida útil em fadiga, que em todos os casos apresentam pontos que chegam à vida infinita, sendo estas zonas representadas pela cor azul.

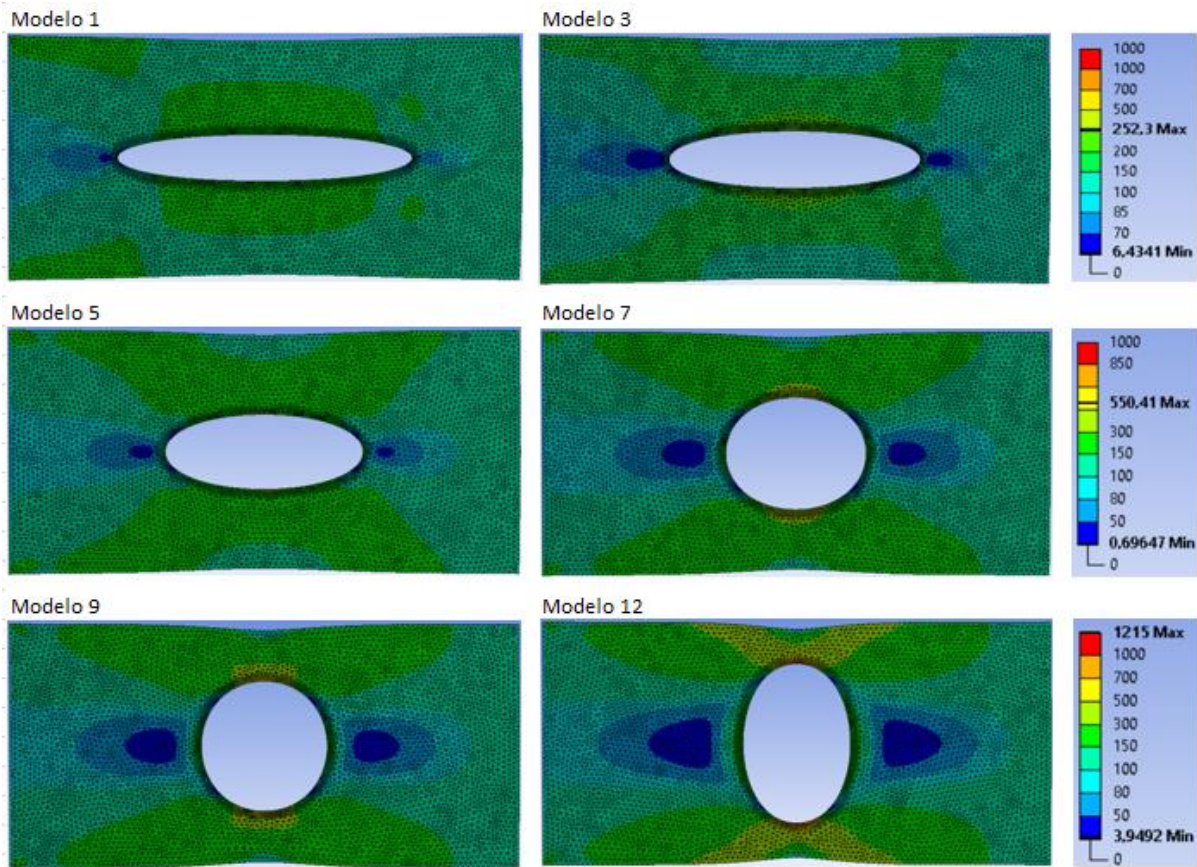
Figura 8: Distribuição da vida útil das placas



Fonte: Autor

Uma análise que apresenta de forma mais clara as a existência das concentrações das tensões é vista na figura 9, onde são apresentadas as tensões de von Mises para as mesmas placas já ilustradas na figura 8.

Figura 9: Distribuição das tensões de von Mises



Fonte: Autor

Através das tensões de von Mises podemos ver que o modelo 3, que tem uma razão de $a_0 = 3,62 b_0$, resultando em uma elipse maior ao longo de eixo x, tem uma melhor distribuição das tensões ao longo da sua geometria. As distribuições das tensões de von Mises observadas para este modelo estão, basicamente, representadas por tensões nulas, baixas e médias. Em contrapartida o modelo 12, que tem uma relação de $a_0 = 0,50 b_0$, tem um maior acúmulo das tensões em uma pequena região, apresentando uma concentração de máximas tensões (representadas na cor vermelha) no entorno da perfuração, assim formando-se uma região crítica naquele local.

Após todas as análises conduzirem ao modelo 3, como o de melhor comportamento mecânico, um comparativo foi feito entre este modelo e a placa sem furo. Para a placa sem perfuração a vida útil obtida foi de 6865 ciclos enquanto que para o modelo 3 a vida útil foi de 11349 ciclos. Assim, pode-se notar uma melhoria de 65,32% obtida pela placa perfurada, o que vai ao encontro do que foi estudado por Loland (2016), onde a polia de um tensionador de *risers* melhorou a sua performance devido à inserção de perfurações.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho trouxe análises em placas finas perfuradas que é um tema de altíssima relevância na engenharia, uma vez que estas placas podem ser utilizadas como elementos estruturais, ou complemento destes, em várias aplicações da engenharia, como nas áreas naval, civil, aeronáutica, entre outras.

Inicialmente buscou-se a verificação de um modelo computacional desenvolvido na plataforma Workbench do software ANSYS®. O trabalho utilizado para isso foi o de Mirji (2020), no qual o modelo computacional desenvolvido apresentou resultados muito próximos dos obtidos pela referência, sendo comprovada a eficácia do modelo computacional utilizado.

Uma vez verificado, foram feitas as alterações para os modelos de objetivo do estudo. Estes modelos foram as placas de 2000 x 1000 mm com espessura de 12 mm e furo elíptico, centralizado à placa, com a remoção de 10% do volume total da placa.

Era esperado que a geometria do furo influenciasse diretamente na sua vida útil, e isso se confirmou, a ponto de para alguns casos ter sido obtida uma melhoria de até 78 vezes na vida em fadiga da placa, se comparando o melhor caso (modelo 3) com o pior (modelo 12).

Outra análise feita foi a do melhor caso (modelo 3) com uma placa sem nenhum furo. Através desta, foi constatado que o modelo 3 teve um aumento de 65,32% na vida útil em fadiga em relação a placa sem furação e isto vai ao encontro do estudo guiado por Loland (2016).

Assim podemos ver a importância da escolha correta da geometria de um furo em uma placa pois, para um mesmo volume de material e mesmas dimensões da placa, apenas a variação geométrica da perfuração influenciou consideravelmente no comportamento mecânico da estrutura. É percebido que os modelos que tem os melhores comportamentos mecânicos foram os que melhor distribuíram as máximas tensões, assim reduzindo as zonas de concentrações de tensões e aumentando a vida útil do componente.

6 REFERÊNCIAS

ANSYS. **Analysis Guide**. Cannonsburg: Ansys Inc, 2004.

AZEVEDO, Domingos Flávio de Oliveira. **Análise estrutural com Ansys Workbench: Static Structural**. Mogi das Cruzes, 2015.

BUDINAS, Richard. G.; NISBETT, J. Keith. **Elementos de Máquinas de Shigley**. 10ª ed. São Paulo: McGraw Hill Brasil, 2016.

CASTRO, J. T. P., Meggiolaro, M. A. (2009) **Fadiga - Técnicas e Práticas de Dimensionamento Estrutural sob Cargas Reais de Serviço. Vol II**. 1ª ed., CreateSpace, 2009.

CIMINI JR, Carlos A. **Conceitos de análise estrutural em aeronaves**. Minas Gerais: UFMG, 2001

DOWLING, N. E. **Mechanical Behavior of Materials**, 3rd. ed. 2007.

HIBBELER, Russell. C. **Resistência dos Materiais**. 7ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

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.

MARINHO, I. J. P.; VAZ, L. E.; PIMENTEL, R. L. **Projeto Ótimo de Estruturas Metálicas de Arquibancadas Reutilizáveis via Ansys**. 2002. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

MISCHKE, C.R.; T.H. BROWN Jr.; J.E. SHIGLEY; **Standard Handbook of Machine Design**. 3º ed. Nova York: McGraw-Hill, 2004

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

MOURA BRANCO, Carlos A.G; Fernandes, Augusto A. **FADIGA DE ESTURAS SOLDADAS**. 2º Edição. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1986.

PELLICCIONE, André da Silva; MORAES, Milton Franco. **ANÁLISE DE FALHAS EM EQUIPAMENTOS DE PROCESSO**. 2º Edição. Rio de Janeiro: Intercência, 2012

SHIGLEY, J. E; Mischke, C. R. **Mechanical Engineering Design**, 8th ed., McGraw-Hill: New York, 2011.