ANÁLISE DE UMA BARRA EM FLEXÃO SIMPLES NO SOFTWARE CAST3M

Victor Hugo Rodrigues Nogueira George [1] (victorhugogeorge@alu.ufc.br), João Vitor de Araujo Silva [1] (joaovitorsilvaz@alu.ufc.br), David Diógenes Lopes [1] (daviddiogenes@alu.ufc.br), Caio Victor de Sousa Thomas [1] (victorcaio5033@gmail.com), Gustavo Dantas Martins[1] (gustavodantasm97@gmail.com) [2]

[1] Universidade Federal do Ceará; Departamento de Engenharia Mecânica
[2] Universidade Federal do Ceará (UFC); Departamento de Engenharia Metalúrgica

RESUMO: *A utilização de programas de simulação por elementos finitos se mostra cada vez mais importante para o desenvolvimento de projetos mecânicos e estruturais. Partindo desse contexto, o Cast3M é um software desenvolvido pela CEA (Comissariado de energia atômica e energias alternativas) para o ensino e pesquisa dessa área. Sem uma interface de desenho computadorizado, como outros softwares com o mesmo objetivo, utilizando-se de sua linguagem de programação própria, a ESOPE, uma extensão da linguagem Fortran, para a determinação da geometria e das condições de simulação. Para analisar a performance do software, foram desenvolvidas simulações com objetivos diversos em uma barra que, inicialmente, apresenta um comportamento isoelástico e, posteriormente, elastoplástico. O valor de tensão na superfície mais requisitada será então comparado com os valores obtidos a partir da fórmula da teoria da elasticidade, permitindo comparar os resultados dos dois métodos de cálculo.*

PALAVRAS-CHAVE: *SIMULAÇÃO, PESQUISA, ELASTICIDADE, ELEMENTOS FINITOS.*

ANALYSIS OF A BAR IN SIMPLE BENDING IN CAST3M SOFTWARE

ABSTRACT: *The use of finite element simulation programs is becoming increasingly important for the development of mechanical and structural projects. In this context, Cast3M is a software developed by CEA (French Alternative Energies and Atomic Energy Commission) for teaching and research in this field. Without a computer-aided design interface, unlike other software with the same purpose, it utilizes its own programming language, ESOPE, an extension of the Fortran language, for determining geometry and simulation conditions. To assess the software's performance, simulations were conducted with various objectives on a bar that initially exhibits isotropic behavior and later elasto-plastic behavior. The stress value on the most stressed surface will then be compared with values obtained from the elasticity theory formula, allowing for a comparison of the results from the two calculation methods.*

KEYWORDS: *SIMULATION, RESEARCH, ELASTICITY, FINITE ELEMENTS.*

1. INTRODUÇÃO

Na área de projeto, é comum a necessidade de simulação do comportamento de componentes mecânicos ou estruturas em diferentes condições de trabalho e esforço. Essas simulações têm como objetivo caracterizar esses sistemas sob tais situações e, assim, auxiliar na otimização e desenvolvimento dos projetos, permitindo prever resultados de desempenho para diferentes situações.

Uma simulação pode ser definida como uma imitação de um sistema real, utilizando um modelo e metodologia de teste que obtenha resultados mais próximos possíveis da realidade analisada, com o propósito de otimizar o sistema estudado.

Ao analisar o processo de deformação de uma barra sob a ação de uma força, por exemplo, é possível submeter um modelo de dimensões padronizadas a determinadas condições de esforço, identificando as deformações e danos ocorridos e comparando os resultados com cálculos e formulações da literatura. Isso visa validar a metodologia estipulada e, assim, adotar os resultados obtidos para prever o comportamento dessa barra em diferentes condições de trabalho (DUARTE, 2003).

Entretanto, situações mais complexas e detalhadas requerem simulações mais realistas, que tendem a ser mais dispendiosas em termos de custos de materiais e tempo, além de apresentarem possíveis erros de cálculo em algumas situações. Diante disso, os avanços dos computadores e da tecnologia desde a década de 50 tornaram-se peças-chave para o desenvolvimento e melhoria de novas formas de simulação, onde tem-se cada vez mais a aplicação de *softwares* confiáveis e rápidos para auxiliar nos mais diversos projetos (MIRLISENNA, 2016).

O processo de simulação por meio desses *softwares* leva em conta o conceito de uma ferramenta matemática importante, que é o Método dos Elementos Finitos (MEF), desenvolvido na década de 60 por Ray Clough. Mesmo apresentando grande volume de informações e podendo tornar-se complexo em alguns casos, esse método ainda assim apresenta boa convergência com os resultados. (SOFIA ET AL., 2021).

Esse método considera a continuidade física do problema, empregando funções de interpolação para obter uma convergência aproximada em relação aos resultados reais, ocasionando que quanto maior o número de elementos considerados na análise, maior a precisão dos resultados (BARROS, 2002).

Um conceito importante nesse método são os nós, que correspondem a partes integrantes em cada elemento que forma um modelo. Outro grande conceito importante que permeia o funcionamento de softwares de simulação corresponde à malha de análise. Essa representa a união das subdivisões dos elementos, e sua eficiência depende do refinamento realizado. Esse

refinamento envolve operações aritméticas proporcionais ao elemento finito, podendo a malha ser modelada de várias formas, como triângulos, quadriláteros, hexaedros, entre outros (OWEN, 1998).

Além disso, destaca-se que, para superfícies menos complexas, a malha pode ser feita no corpo como um todo, sem afetar significativamente o tempo de análise. Entretanto, em superfícies complexas, é necessário realizar um refinamento específico em áreas de maior importância, como curvas, intersecções e descontinuidades (COSTA, 2010).

Dessa forma, o refinamento é uma ferramenta crucial, pois define a subdivisão dos elementos e o número de nós, influenciando diretamente na qualidade da malha gerada. A densidade do refinamento depende da quantidade de nós gerados para a análise, sendo importante que a razão seja menor que 1 para evitar erros de estimativa inicial.

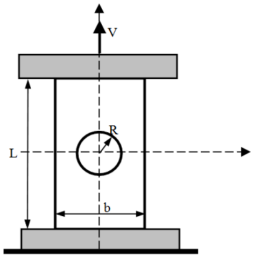
Esses conceitos são fundamentais para a base dos softwares de simulação existentes, incluindo o escopo deste trabalho: o *software Cast3M*, que é um programa de simulação estrutural por elementos finitos desenvolvido pelo Comissariado de Energia Atômica e Energias Alternativas (CEA) da França. Ele é distribuído gratuitamente para fins educacionais e de pesquisa, utilizando uma linguagem de programação derivada do *Fortran*, a ESOPE, e é inteiramente em francês.

Com isso, o objetivo deste artigo é apresentar o funcionamento do *software Cast3M* por meio de uma simulação de flexão de uma barra simples. Dada sua natureza educacional, os resultados obtidos precisam ser comparados com as teorias de resistência de materiais e elementos finitos que embasam o cálculo estrutural, a fim de garantir a validação dos dados da simulação.

2. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento da análise proposta, o primeiro passo refere-se a determinação do modelo a ser estudado, que nesse caso corresponde a uma barra simples com furo central submetida a uma força de flexão conforme visualizado na Figura 1:

FIGURA 1. Representação da barra isoelástica.



Fonte: CEA (2023).

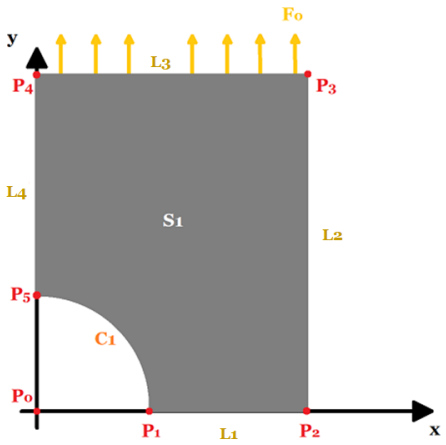
Após a definição do modelo a ser simulado, o próximo passo consiste na determinação da malha mais adequada para a simulação. Considerando as limitações computacionais na resolução de problemas por elementos finitos, não há uma resposta definitiva sobre como e qual tipo de malha deve ser utilizada em cada situação, sendo sempre uma relação de custo e benefício.

Um parâmetro importante ao analisar a criação da malha está relacionado ao tempo de processamento da simulação. Quanto mais refinada for a malha, maior será a potência computacional necessária e, por conseguinte, o tempo de cálculo.

Além desse parâmetro de otimização de tempo, outro fator que deve ser considerado é a geometria do modelo a ser simulado. No caso da placa em estudo, que possui um furo central, optou-se por refinar a malha na região próxima ao furo. Enquanto nas partes mais distantes, serão utilizados elementos maiores, devido à regularidade da superfície, conforme ilustrado na Figura 2.

Essa estratégia tem como objetivo evitar a ocorrência das chamadas singularidades, que são pontos de concentração de tensão irreais resultantes da brusca mudança na geometria da peça. Dessa forma, a utilização de diferentes tamanhos de elementos na malha possibilita a obtenção de resultados mais realistas sem aumentar significativamente o tempo de processamento do cálculo.

FIGURA 2. Representação da seção simulada.



Fonte: Autor (2023).

Após as devidas escolhas de projeto para geração na malha, é realizado a definição do valor da densidade de elementos desejada para cada parte da sua geometria no *Cast3M*. Para isso, é definido de forma arbitrária um valor na região mais importante ,o furo, enquanto as outras faces apresentam seus valores proporcionais a definição inicial, garantindo com isso a boa coesão e ligação entre cada um dos elementos. As relações definidas são informadas na Tabela 1:

TABELA 1. Relações entre a densidade de malha

C1	DensidadeC1
L1	DensidadeL1 = DensidadeC1
L2	DensidadeL2 = 3*DensidadeC1
L3	DensidadeL3 = 3*DensidadeC1
L4	DensidadeL4 = 1.5*DensidadeC1

Fonte: Autor (2023).

Após a determinação da malha e densidade, são informados as condições de contorno da simulação a ser realizada. Para isso, uma força de 10 N/mm é aplicada na face superior, tendo em vista que a placa possui 60 centímetros na sua largura total, a força total aplicada na parte simulada será de 300 N, visto que a simulação é realizada ao longo da metade da largura). A aresta L1 tem seu movimento em Y bloqueado, enquanto a aresta L4 tem o movimento em X bloqueado, já que correspondem a partes internas da peça real.

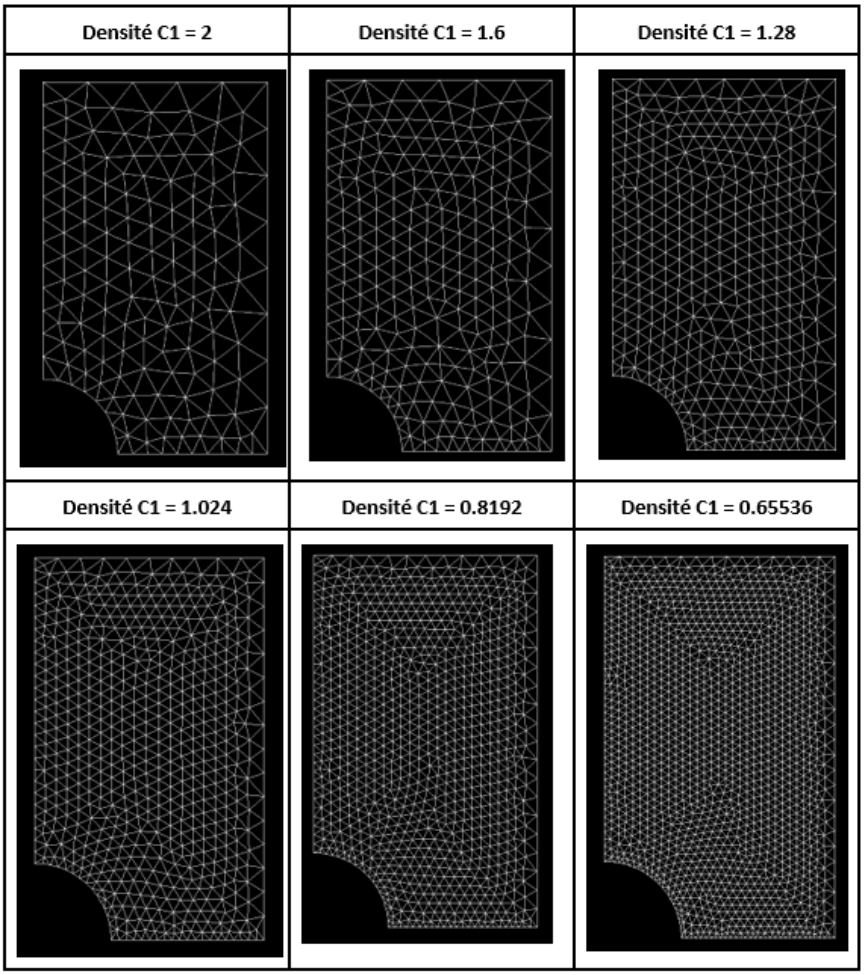
O material da peça apresenta as seguintes características: Módulo de elasticidade de 210 000 MPa, coeficiente de poisson de 0.3 e tensão de ruptura de 500 MPa (MATWEB, 2023).

3. RESULTADOS

A partir das relações estabelecidas para a criação da malha, foi definido arbitrariamente o valor para a densidade do círculo. Com isso, foram realizadas seis iterações com valores iniciais diferentes para analisar a criação da malha e o tempo computacional gasto.

Tal procedimento é necessário e importante para metodologia de projeto pois visa avaliar qual configuração de densidade de malha melhor atende a demanda computacional de tempo requerida neste trabalho. Com isso, os resultados dessas interações são representados na Figura 3 abaixo:

FIGURA 3. Representação da malha para cada uma das iterações.

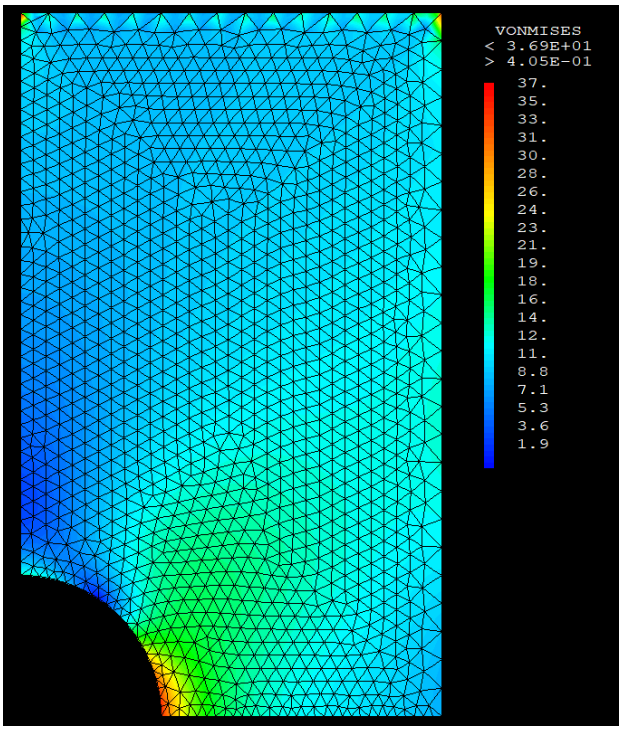


Fonte: Autor (2023).

Como nessa primeira análise feita o último valor para a densidade de malha (C1 sendo igual a 0,65536) apresentou um tempo computacional satisfatório, o mesmo é escolhido a priori como valor a ser utilizado na simulação inicial do modelo da barra.

Com base no modelo de malha selecionado, procede-se à realização de uma análise estrutural preliminar da placa, aplicando as condições de contorno do projeto. Como resultado, obtém-se uma tensão máxima de 36,9 MPa localizada na área mais destacada da malha (Figura 4). Essa configuração de tensão encontra-se dentro dos limites de segurança da simulação, uma vez que o limite elástico do material é de 500 MPa.

FIGURA 4. Resultado da simulação inicial



Fonte: Autor (2023).

Com o valor de tensão situado abaixo do limite elástico do material, para estimar o fator de segurança ,ou seja o valor máximo admissível, admite-se uma relação linear entre os valores. Onde a Equação 1 representa relação algébrica que permite estipular esse o valor limite:

$$\frac{F_e}{F_0} = \frac{\sigma_0}{\sigma_{max}} \quad (1)$$

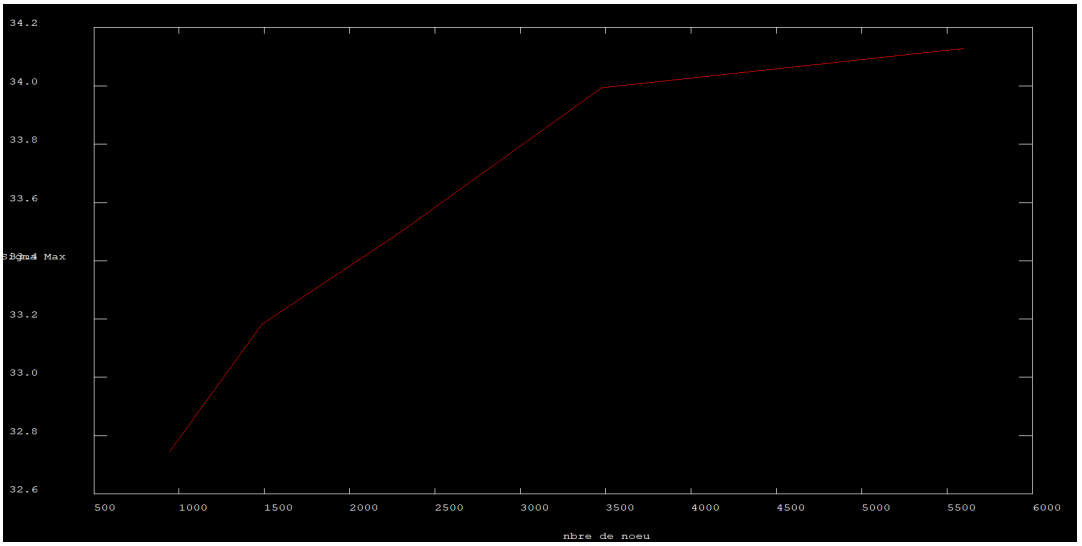
A equação 1 relaciona a tensão máxima (limite de elasticidade do material) e a tensão obtida pela simulação, bem como as respectivas forças aplicadas em cada uma dessas situações. Sendo F0 a força inicialmente aplicada (300N) e Fc a máxima força possível aplicada nesse objeto.

Dessa forma, aplicando-se os respectivos valores, encontra-se o valor de força máxima permitida equivalente a 4065,04 N. A partir desse dado, pode-se calcular o valor da pressão na face superior, que será utilizada como condição de contorno para as próximas simulações, no valor de 135,50 N/mm.

Em seguida, analisa-se a sensibilidade dos resultados de acordo com os parâmetros da malha. Para isso, foi alterado o código do programa a fim de realizar os cálculos dentro de um *for loop*, guardando os resultados de tensão, força e deslocamento máximos na memória. Com esses

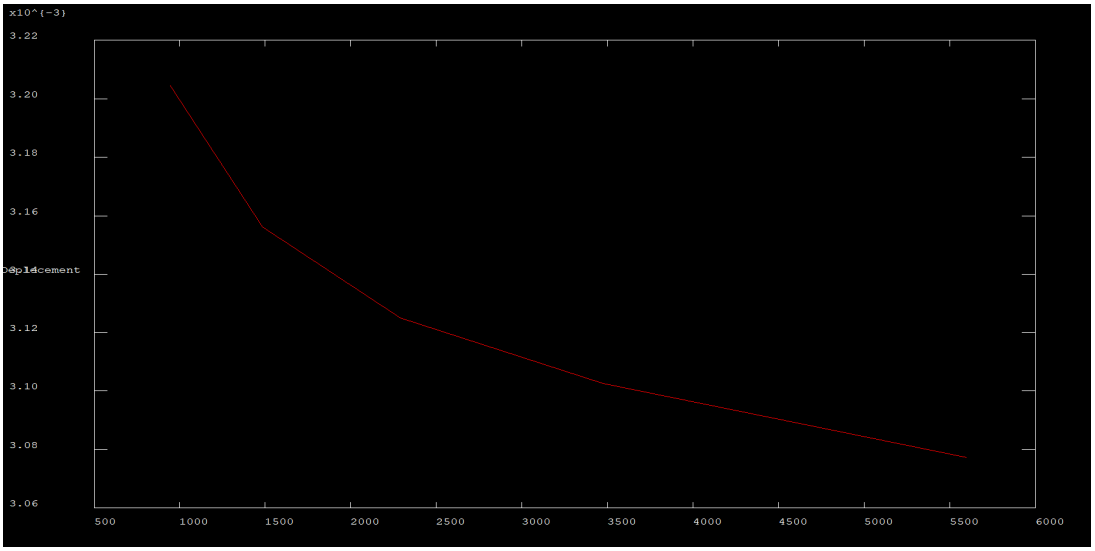
valores, foi plotado um gráfico que caracteriza a evolução de cada um desses valores comparando com a quantidade de nós na malha. Os resultados podem ser vistos nas Figuras 5, 6 e 7.

FIGURA 5. Tensão máxima em MPa em função do número de nós



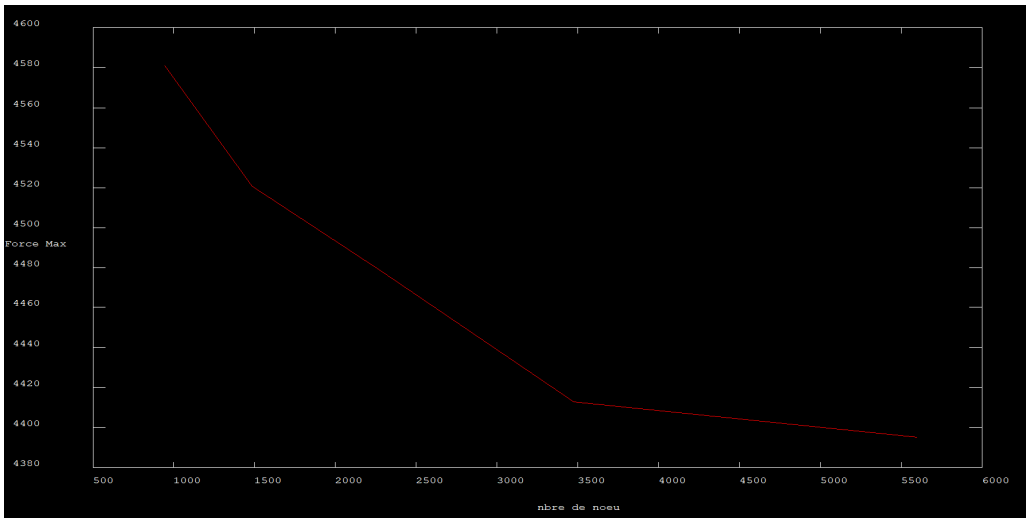
Fonte: Autor (2023).

FIGURA 6. Deslocamento máximo em mm em função do número de nós



Fonte: Autor (2023).

FIGURA 7. Força máxima em N em função do número de nós



Fonte: Autor (2023).

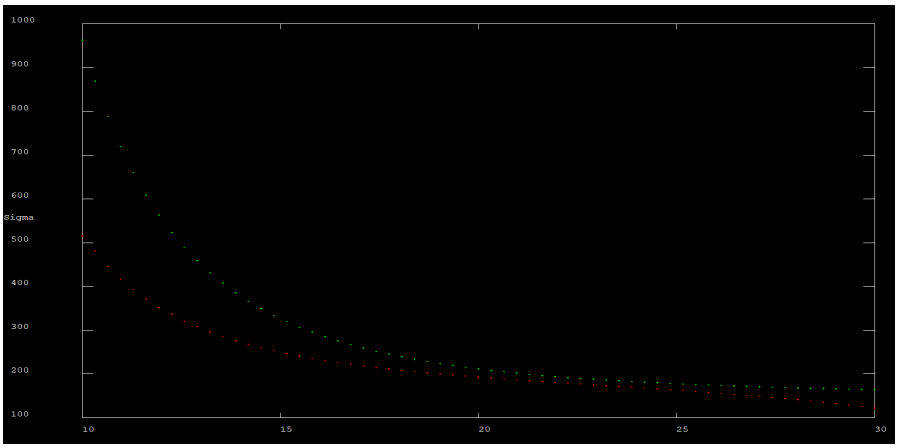
Em conformidade com as informações obtidas na literatura, a curva obtida apresentou um formato semelhante a uma distribuição exponencial. Com base nisso, tem-se que após certo valor da quantidade de nós na simulação, o ganho de precisão não compensa o gasto computacional necessário. Tal fato auxilia na escolha da melhor configuração de malha que alinha resultado satisfatório com otimização de processamento.

Em seguida, analisa-se também os valores encontrados nas simulações do *Cast3M* com os resultados encontrados por meio da teoria da elasticidade ao longo da aresta L1. A fórmula utilizada na literatura para esse caso é baseada na Equação 2. Sendo R o raio do furo e x_i a distância do ponto analisado ao longo do eixo das abscissas (RAGNEAU, 2023).

O resultado é disponibilizado na figura 8, sendo os pontos verdes os valores teóricos, e os pontos vermelhos os valores da simulação.

$$\sigma_{téorico} = F_{e_{maxi}} \cdot \left(1 + \frac{R^2}{2x_i^2} + \frac{3R^4}{2x_i^4}\right) \quad (2)$$

FIGURA 8. Comparação entre os valores da teoria da elasticidade e da simulação.

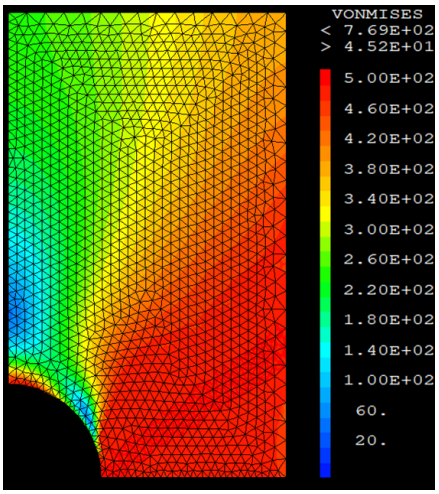


Fonte: Autor (2023).

Visto que os comportamentos das duas curvas se mostraram muito próximos, é possível concluir a plausibilidade dos resultados obtidos. Isso indica que os resultados da simulação são satisfatórios quando comparados com os modelos teóricos adotados. As discrepâncias entre os valores, principalmente na região esquerda da linha, são decorrentes das interpolações realizadas entre cada nó da malha para o cálculo das forças. Além disso, essa região próxima ao furo é mais sensível às forças devido às mudanças abruptas na geometria.

Finalmente, uma última análise foi conduzida, na qual foi aplicado um deslocamento constante de 0,01 mm/s na aresta superior. Isso foi feito sob a suposição de uma espessura da peça de 10 mm e considerando que a placa apresenta um comportamento elasto-plástico. O cálculo foi dividido em 20 etapas, com passos distribuídos de maneira linear até atingir o deslocamento máximo estabelecido de 5 mm.

FIGURA 9. Resultado final da simulação em MPa

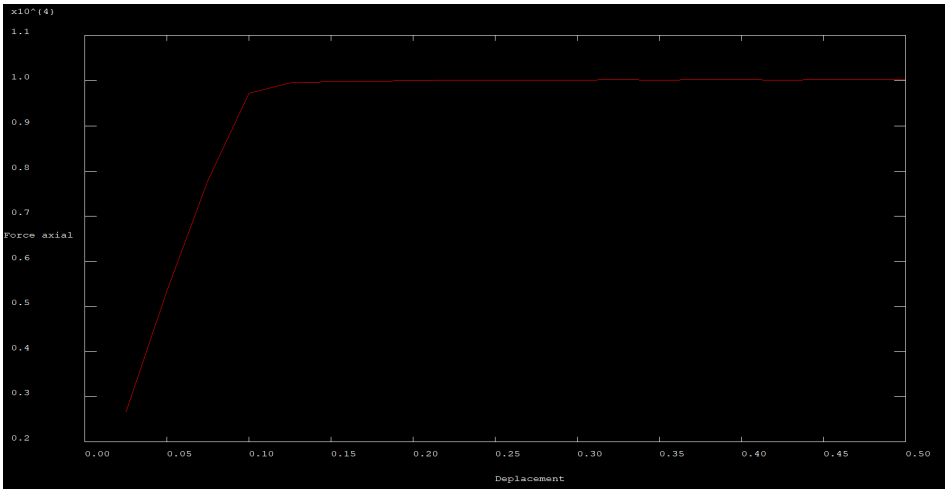


Fonte: Autor (2023).

Conforme é ilustrado pela Figura 9, observa-se que ao alcançar a tensão máxima de 769 MPa, o valor da tensão demonstrou uma estabilização, ao mesmo tempo que sua área de atuação foi se expandindo, mas sem aumentar em intensidade.

A partir dos resultados obtidos, uma curva foi gerada para relacionar a força axial F em função do deslocamento aplicado na extremidade livre da peça. Isso foi feito com o objetivo de examinar o comportamento elastoplástico do material. O gráfico que relaciona a força com o deslocamento é apresentado na Figura 10, onde se percebe um padrão linear até atingir o valor de 0,10 mm de deslocamento. A partir desse ponto, ocorre a transição do domínio plástico para o domínio elástico, onde as deformações se tornam permanentes.

FIGURA 10. Comparação entre os valores da teoria da elasticidade e da simulação



Fonte: Autor (2023).

4. CONCLUSÃO

O programa demonstrou boa performance, considerando suas limitações, como a ausência de uma interface para desenho tridimensional computadorizado da peça. Vale ressaltar que, em situações envolvendo geometrias com faces menos contínuas, como no caso estudado, o processo de desenvolvimento da geometria no software se torna mais exigente.

Em relação à determinação das condições de contorno da simulação, o programa produziu resultados satisfatórios, permitindo estabelecer as condições do projeto conforme desejado. Entretanto, para situações mais complexas, como aquelas que envolvem interações entre componentes, por exemplo, isso provavelmente aumentaria consideravelmente o tempo de simulação e a complexidade do código. Isso poderia resultar em limitações e possíveis disparidades nos resultados para esses casos mais complexos. Por fim, considerando o caráter pedagógico do programa, ele atinge todas as suas metas e oferece a oportunidade de ensinar os

conceitos de elementos finitos de maneira mais simples. Isso ocorre pois não exige o conhecimento de outros softwares de desenho e é capaz de simular de maneira adequada situações específicas de projetos.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

REFERÊNCIAS

AZEVEDO, F. M. Álvaro, Método dos Elementos Finitos, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Portugal (2003), 1° ed.

BARROS, Felício Bruzzi. Métodos Sem Malha e Método dos Elementos Finitos Generalizados em Análise Não-Linear de Estruturas. 2002. 222 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

CEA. **Le CEA, acteur clef de la recherche scientifique et technologique**. Disponível em: <https://www.cea.fr/Pages/le-cea/acteur-clef-de-la-recherche-technologique.aspx>. Acesso em: 24 jul. 2023.

DUARTE, R.N. Simulação Computacional: análise de uma célula de manufatura em lotes do setor de autopeças. Universidade Federal de Itajubá. Dissertação em engenharia de Produção. 2003. 187pg.

LE FICHOUX, E.; CAST3M, D. **UTILISER CAST3M: Présentation et Utilisation de Cast3M**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://www-cast3m.cea.fr/html/Documentation_Cast3M/Presentation_Cast3M.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2023.

MATWEB. Disponível em: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=10b74ebc27344380ab16b1b69f1cffbb&ckck=1>. Acesso em: 25 Jul. 2023.

MIRLISENNA, G. Método dos elementos finitos. Site da ESSS, 2016. Disponível em: <https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>. Acesso em: 25 Jul. 2023.

DI, F.; MAILLAGE, P. **UTILISER CAST3M: Maillage**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://www-cast3m.cea.fr/html/Documentation_Cast3M/Maillage.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2023.

RAGNEAU, E. **Polycopié de Travaux Dirigés et Travaux Pratiques**.

SOFIA, BÁRBARA; CURRALO, AFONSO. ESTUDO DE MALHAS DE ELEMENTOS FINITOS. [s. l.], 2021.