

ANÁLISE ESTRUTURAL PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS: FUNDAMENTOS E APLICAÇÃO COMPUTACIONAL

Victor Hugo Garcez de Magalhães, Daniel Almeida Colombo, Antonio Carlos Rodrigues e Rodolfo Alexandre Hildebrandt*

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo compreender e aplicar o Método dos Elementos Finitos (MEF) na análise estrutural de uma mesa de trabalho industrial. A pesquisa justifica-se pela crescente utilização de ferramentas computacionais na engenharia, tornando essencial o domínio dos fundamentos teóricos que sustentam os métodos numéricos empregados em simulações estruturais. O estudo busca promover uma visão crítica sobre o uso do MEF, destacando sua importância tanto como ferramenta de análise quanto como base conceitual para a tomada de decisões em projetos de engenharia. A metodologia adotada envolveu a modelagem tridimensional da estrutura e a análise estrutural por meio do software SolidWorks Simulation, complementada por uma simulação numérica desenvolvida no MATLAB, fundamentada na formulação clássica do MEF. A comparação entre as duas abordagens permitiu avaliar a consistência dos resultados e a aplicabilidade prática do método. O trabalho aborda etapas fundamentais do processo, como a discretização da malha, a aplicação das condições de contorno, a montagem das matrizes globais e o cálculo das tensões e deformações equivalentes, demonstrando a relação entre o modelo matemático e sua implementação computacional. Os resultados mostraram boa concordância entre as simulações, com deslocamento máximo de aproximadamente 8,5 mm no SolidWorks e tendência semelhante no MATLAB. As tensões concentraram-se na região dos engastes centrais, atingindo valores próximos de 388 MPa, enquanto o restante da estrutura permaneceu abaixo do limite de escoamento do aço AISI 304 (206 MPa). Apesar das concentrações localizadas, o comportamento global manteve-se estável no regime elástico, indicando coerência entre os modelos e adequada representação do fenômeno estrutural analisado.

Palavras-chave: Método dos Elementos Finitos; Análise Estrutural; Simulação Numérica.

* Autor correspondente (e-mail): rodolfo.hildebrandt@sistemapiep.org.br

STRUCTURAL ANALYSIS USING THE FINITE ELEMENT METHOD: FUNDAMENTALS AND COMPUTATIONAL APPLICATION

ABSTRACT

This study aims to understand and apply the Finite Element Method (FEM) in the structural analysis of an industrial workbench. The research is justified by the increasing use of computational tools in engineering, making it essential to master the theoretical foundations that support numerical methods used in structural simulations. The study seeks to promote a critical perspective on the use of FEM, highlighting its importance both as an analytical tool and as a conceptual basis for decision-making in engineering design. The adopted methodology involved three-dimensional modeling of the structure and structural analysis using SolidWorks Simulation software, complemented by a numerical simulation developed in MATLAB, based on the classical FEM formulation. The comparison between both approaches allowed the evaluation of result consistency and the practical applicability of the method. The work addresses fundamental steps of the process, including mesh discretization, boundary condition application, assembly of global matrices, and calculation of equivalent stresses and deformations, demonstrating the relationship between the mathematical model and its computational implementation. The results showed good agreement between the simulations, with a maximum displacement of approximately 8.5 mm in SolidWorks and a similar trend in MATLAB. Stresses were concentrated in the central fixed regions, reaching values close to 388 MPa, while the remaining structure remained below the yield strength of AISI 304 steel (206 MPa). Despite localized stress concentrations, the overall behavior remained stable within the elastic regime, indicating consistency between the models and an adequate representation of the analyzed structural phenomenon.

Key words: Finite Element Method. Structural Analysis. Numerical Simulation.

1 INTRODUÇÃO

A análise estrutural constitui etapa fundamental no desenvolvimento de projetos de engenharia, pois permite prever o comportamento de componentes submetidos a diferentes condições de carregamento e contorno, contribuindo para decisões de projeto mais seguras e eficientes. Com o avanço das tecnologias computacionais, os métodos numéricos passaram a desempenhar papel central na engenharia moderna, destacando-se o Método dos Elementos Finitos (MEF) como uma das principais ferramentas para a solução de problemas estruturais complexos (UGURAL, 2009).

O MEF baseia-se na discretização de um domínio contínuo em elementos finitos interconectados, permitindo a resolução aproximada das equações governantes do comportamento físico do sistema. Essa abordagem possibilita a análise de geometrias complexas, diferentes propriedades de materiais e variadas condições de contorno, frequentemente inviáveis por métodos analíticos tradicionais. Nesse contexto, o método consolidou-se como base da Engenharia Assistida por Computador (CAE), integrando modelagem geométrica, simulação numérica e interpretação de resultados em ambientes computacionais (ALVES FILHO, 2001).

Entretanto, a aplicação adequada do MEF exige não apenas o domínio de softwares especializados, mas também a compreensão dos fundamentos físicos e matemáticos que sustentam o método. Uma formação teórica consistente permite ao engenheiro avaliar a qualidade dos resultados obtidos, compreender a influência da malha, das propriedades dos materiais e das condições de contorno, além de evitar interpretações incorretas decorrentes do uso indiscriminado de ferramentas computacionais (LOGAN, 2012; ZIENKIEWICZ; TAYLOR; ZHU, 2005).

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo aplicar o MEF na análise estrutural estática de uma mesa de trabalho industrial fabricada em aço inoxidável AISI 304, fornecida por uma empresa do setor metalmeccânico. A investigação concentra-se na avaliação do comportamento estrutural do tampo e de seus reforços sob carregamento, utilizando simulações computacionais nos softwares

SolidWorks Simulation e MATLAB. A comparação entre as abordagens visa não apenas validar os resultados obtidos, mas também evidenciar a importância da compreensão teórica do método como suporte à tomada de decisões estruturais mais racionais e seguras.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

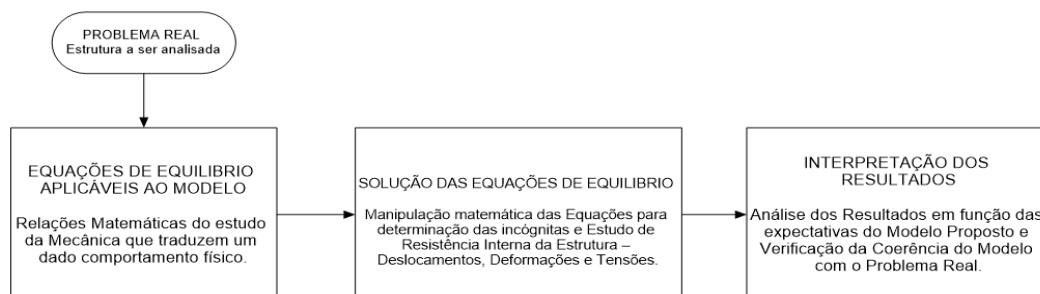
2.1 Cálculo Estrutural

No desenvolvimento de projetos de engenharia, o cálculo estrutural desempenha papel fundamental na garantia da segurança e da estabilidade de componentes submetidos a diferentes condições de operação. Essa análise baseia-se na idealização da estrutura real por meio de modelos de cálculo, permitindo a aplicação dos princípios da Estática e da Resistência dos Materiais para determinar forças internas, tensões e deformações (ALVES FILHO, 2001; HIBBELER, 2009).

A formulação do modelo estrutural consiste em representar a estrutura física por meio de uma abstração matemática que preserve suas características mecânicas essenciais, possibilitando a aplicação das equações de equilíbrio e a previsão do comportamento sob carregamentos externos. Esse processo de idealização constitui etapa crítica da análise, pois a qualidade dos resultados obtidos depende diretamente da fidelidade entre o modelo adotado e o comportamento real do sistema.

A Figura 1 apresenta, de forma esquemática, os principais passos envolvidos na análise estrutural, desde a definição do modelo até a obtenção dos resultados, destacando a importância da modelagem adequada para a confiabilidade das soluções obtidas.

Figura 1 – Passos principais para análise de uma estrutura



Fonte: Adaptado pelo autor de Alves Filho (2001).

De maneira geral, a resposta estrutural depende das propriedades mecânicas dos materiais e das condições de carregamento aplicadas, sendo o conhecimento dessas variáveis essencial para a correta avaliação do desempenho estrutural (TIMOSHENKO; YOUNG, 1968).

2.2 Análise de Equilíbrio

A análise de equilíbrio estrutural consiste na avaliação do comportamento mecânico de corpos submetidos a carregamentos aplicados de forma lenta, permitindo desprezar efeitos dinâmicos de inércia e aceleração. Nessas condições, o sistema encontra-se em equilíbrio estático, sendo atendidas as equações fundamentais do equilíbrio estático da mecânica (1):

$$\sum F = 0 \text{ e } \sum M = 0 \quad (1)$$

A partir dessas condições, tornam-se possíveis a determinação das reações de apoio, dos esforços internos e, posteriormente, das tensões e deformações desenvolvidas na estrutura (RADE, 2011; BEER; JOHNSTON, 2010). A resposta estrutural depende diretamente das propriedades mecânicas do material e das condições de carregamento aplicadas.

2.2.1 Comportamento elástico

O comportamento elástico caracteriza-se pela deformação reversível do material quando submetido a carregamento, sendo descrito pela Lei de Hooke na equação (2):

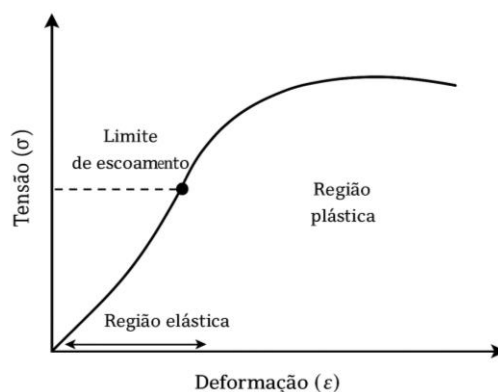
$$\sigma = E\varepsilon \quad (2)$$

em que σ representa a tensão, E o módulo de elasticidade e ε a deformação. Nesse regime, a estrutura retorna às suas dimensões originais após a remoção da carga, e o limite de escoamento corresponde à tensão máxima para a qual essa proporcionalidade ainda é válida (UGURAL, 2009). A maioria das estruturas é projetada para operar dentro dessa faixa, garantindo segurança e estabilidade dimensional.

2.2.2 Comportamento plástico

Quando a tensão aplicada ultrapassa o limite de escoamento, o material passa a apresentar deformações permanentes, caracterizando o regime plástico. O comportamento típico tensão–deformação é ilustrado na Figura 2, na qual se observam as regiões elástica e plástica do material.

Figura 2 – Diagrama Tensão – Deformação



Fonte: Adaptado de Hibbeler (2009). (2001).

No entanto, o presente estudo considera comportamento linear elástico, uma vez que a análise estrutural foi conduzida sob hipóteses de pequena deformação.

De forma geral, métodos analíticos clássicos permitem soluções exatas apenas para geometrias simples e condições de contorno idealizadas, o que limita sua aplicação em problemas reais de engenharia. Diante dessas limitações, métodos numéricos, como o Método dos Elementos Finitos, tornam-se ferramentas fundamentais para a análise de estruturas com maior complexidade geométrica e de carregamento (ALVES FILHO, 2001).

2.3 Simulação Computacional na Engenharia

A simulação computacional tornou-se uma ferramenta fundamental na engenharia moderna, permitindo a análise de problemas complexos por meio de métodos numéricos e reduzindo a dependência de soluções analíticas restritas a geometrias simples. O avanço da capacidade computacional possibilitou a aplicação desses métodos em diversas áreas da engenharia, destacando-se o Método dos Elementos Finitos (MEF) como uma das técnicas mais relevantes para análise estrutural (BRASIL; LENZ; GÓIS, 2015).

O MEF foi inicialmente desenvolvido para aplicações na engenharia estrutural aeronáutica e, atualmente, encontra ampla utilização em problemas de mecânica dos sólidos, transferência de calor, mecânica dos fluidos e eletromagnetismo (RADE, 2011).

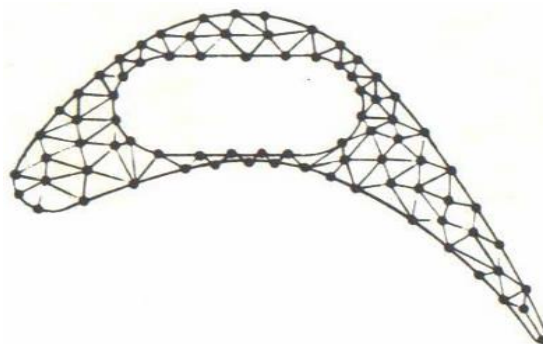
2.4 Método dos Elementos Finitos (MEF)

O Método dos Elementos Finitos consiste em uma técnica numérica utilizada para obter soluções aproximadas de problemas governados por equações diferenciais, especialmente aqueles associados ao comportamento físico de sistemas

contínuos. O princípio fundamental do método baseia-se na discretização do domínio em regiões menores denominadas elementos finitos, interligados por pontos nodais, nos quais são definidas as variáveis incógnitas do problema.

A Figura 3 ilustra o processo de discretização de um domínio contínuo em elementos finitos, evidenciando a malha utilizada na representação numérica da estrutura.

Figura 3 – Ilustração da malha de um modelo de elementos finitos.



Fonte: Rade (2011).

Após a discretização, o problema contínuo é transformado em um sistema finito de equações algébricas, cuja solução fornece os valores nodais das variáveis de interesse, permitindo posteriormente o cálculo de deformações e tensões no interior dos elementos. A precisão da solução depende da qualidade da malha e das funções de interpolação utilizadas (RADE, 2011; ALVES FILHO, 2001).

2.4.1 Tipos de análise

A classificação da análise estrutural depende das condições de carregamento e do comportamento mecânico considerado. Quando os carregamentos variam lentamente no tempo e os efeitos dinâmicos podem ser desprezados, utiliza-se a análise estática. Caso contrário, torna-se necessária a análise dinâmica.

Outra distinção importante refere-se à linearidade do problema. Na análise linear, considera-se que os deslocamentos são pequenos e que a relação entre

tensões e deformações permanece linear. Quando essas hipóteses não são válidas, devem ser empregadas análises não lineares, que envolvem maior complexidade computacional (AZEVEDO, 2003).

O presente trabalho está fundamentado na análise estática linear, adequada para a avaliação estrutural proposta.

2.4.2 Formulação geral do MEF

A formulação do MEF para problemas estruturais conduz a um sistema global de equações que relaciona forças e deslocamentos nodais, expresso de forma geral por:

$$KU = F \quad (3)$$

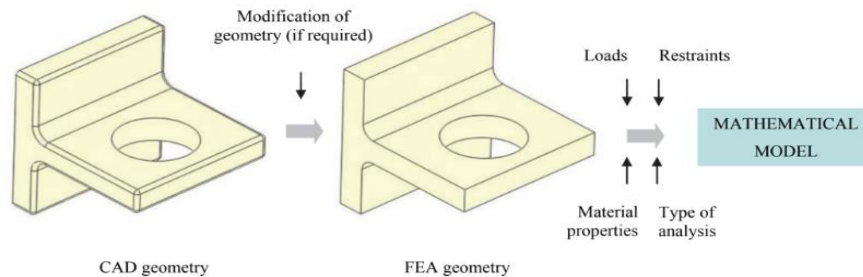
onde K representa a matriz global de rigidez, U o vetor de deslocamentos nodais e F o vetor de forças externas aplicadas. A partir da solução desse sistema, tornam-se possíveis o cálculo das deformações e das tensões na estrutura analisada (ALVES FILHO, 2001; RADE, 2011).

2.5 Aplicação do MEF em Ambiente CAD/CAE

Softwares de engenharia assistida por computador (CAE), como o SolidWorks Simulation, integram ferramentas de modelagem geométrica com algoritmos baseados no Método dos Elementos Finitos, permitindo a análise de tensões, deformações e deslocamentos em componentes mecânicos (KUROWSKI, 2015).

O processo de análise envolve etapas principais, incluindo preparação da geometria, definição das propriedades do material, aplicação das condições de contorno, geração da malha de elementos finitos e resolução numérica do problema. Frequentemente, a geometria CAD necessita ser simplificada para facilitar a discretização e reduzir o custo computacional, conforme ilustrado na Figura 4.

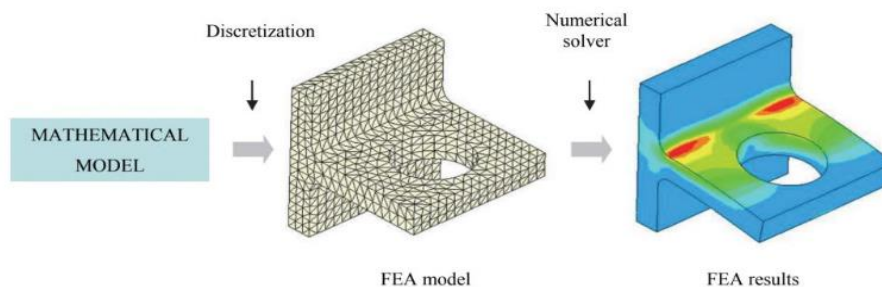
Figura 4 – Simplificação da geometria para análise.



Fonte: Kurowski (2015).

Após a preparação do modelo, procede-se à geração da malha de elementos finitos, etapa que subdivide o domínio em elementos discretos e permite a obtenção da solução numérica aproximada. A qualidade da malha influencia diretamente a precisão dos resultados obtidos, conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Geração de malha e resultados pós processamento.



Fonte: Kurowski (2015).

2.6 Critério de Von Mises

Em análises estruturais multiaxiais, a avaliação da condição de escoamento do material pode ser realizada por meio do critério de von Mises, amplamente utilizado na engenharia por permitir a comparação direta entre estados de tensão complexos

e o limite de escoamento do material (ALVES FILHO, 2001). A tensão equivalente de von Mises é expressa por:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (4)$$

O escoamento ocorre quando a tensão equivalente atinge o limite de escoamento do material. Esse critério possibilita identificar regiões críticas da estrutura e avaliar a segurança do componente sob carregamentos combinados.

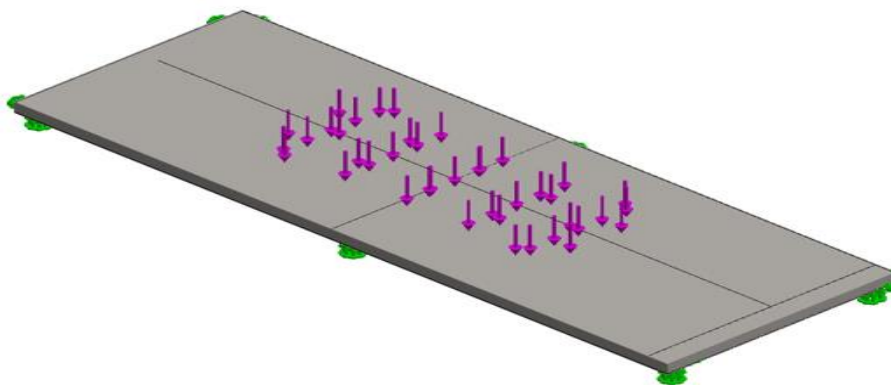
2.7 Interpretação e Validação dos Resultados

A interpretação dos resultados obtidos por MEF requer análise crítica das simplificações adotadas no modelo, incluindo condições de contorno, propriedades do material e discretização da malha. Boas práticas incluem a verificação da convergência de malha e a comparação com soluções analíticas, experimentais ou resultados obtidos por diferentes métodos numéricos, aumentando a confiabilidade da simulação (KUROWSKI, 2015).

3 METODOLOGIA

A mesa industrial foi modelada em 3D e analisada estruturalmente por MEF no SolidWorks Simulation. Para reduzir o custo computacional, foram suprimidos detalhes geométricos não estruturais, mantendo-se o tampo e os reforços como regiões de interesse. Adotou-se análise estática linear, assumindo comportamento elástico do aço inoxidável AISI 304. As condições de contorno foram representadas por restrições nos pontos de apoio inferiores, simulando o suporte da mesa no piso. Aplicou-se uma carga vertical total de 1570 N, representativa de aproximadamente 160 kg, distribuída na região central do tampo como apresentado na Figura 6.

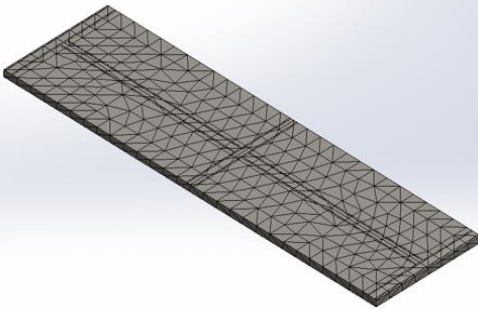
Figura 6 – Aplicação do carregamento e apoios fixos no tampo da mesa.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A discretização foi realizada com elementos sólidos tetraédricos, com refinamento local nas interfaces entre tampo e reforços, visando maior precisão nas regiões de concentração de tensões conforme mostra a Figura 7. A malha final apresentou 1.444 elementos e 3.032 nós. As respostas avaliadas foram deslocamentos e tensões equivalentes de von Mises.

Figura 7 – Malha de elementos finitos aplicada ao modelo após o refinamento.

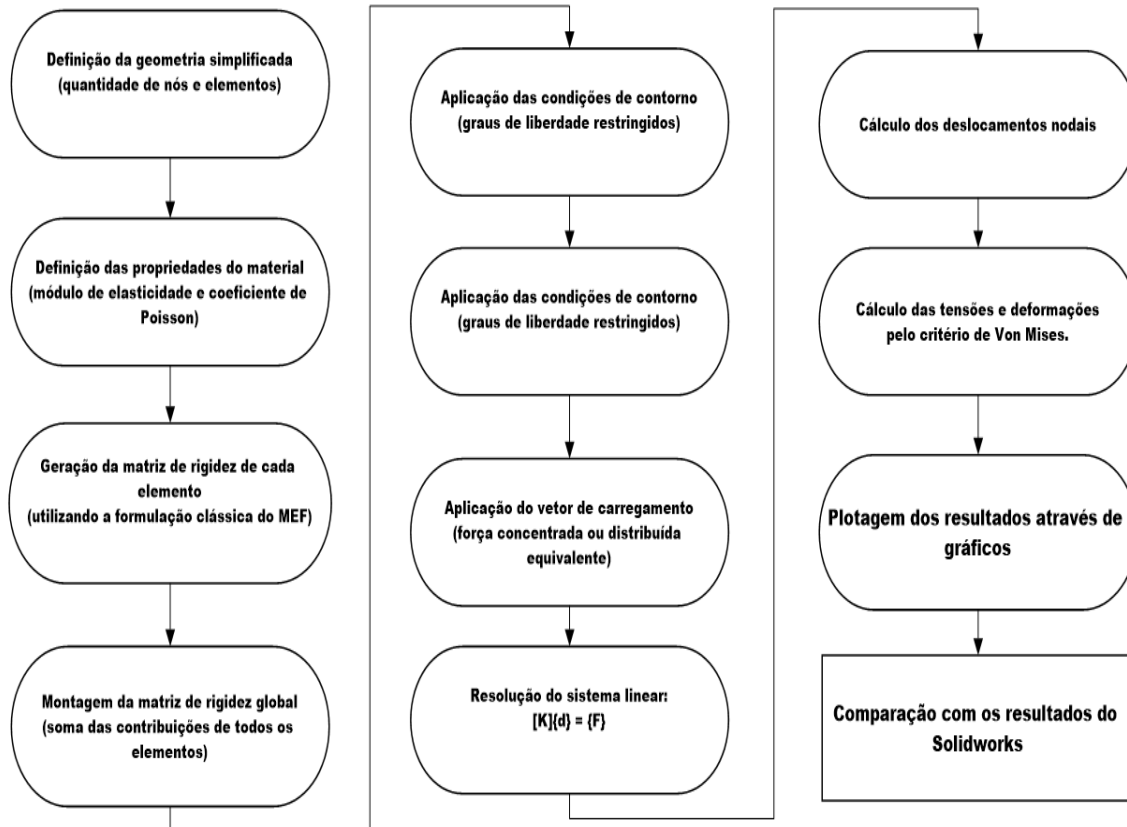
Total de nós	3032
Total de elementos	1444
Tempo para conclusão da malha (hh:mm:ss):	00:00:07
<p>Nome do modelo: MESA LISA - 2020/100 Nome do estudo: Análise estática 1 - MESA LISA (valor predeterminado) Tipo de malha: Malha de casca com superfícies médias</p> 	

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Como verificação independente, foi implementado em MATLAB um modelo numérico baseado na formulação clássica do MEF, com discretização e aplicação de carregamentos e restrições compatíveis com o modelo CAE. Os resultados de deslocamento e tensão foram comparados entre as duas abordagens por diferença percentual, permitindo avaliar a consistência e confiabilidade das simulações.

O fluxograma da figura 8 apresenta de forma clara e estruturada todas as etapas que compõem o algoritmo desenvolvido no MATLAB.

Figura 8 – Fluxograma do algoritmo em MATLAB.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

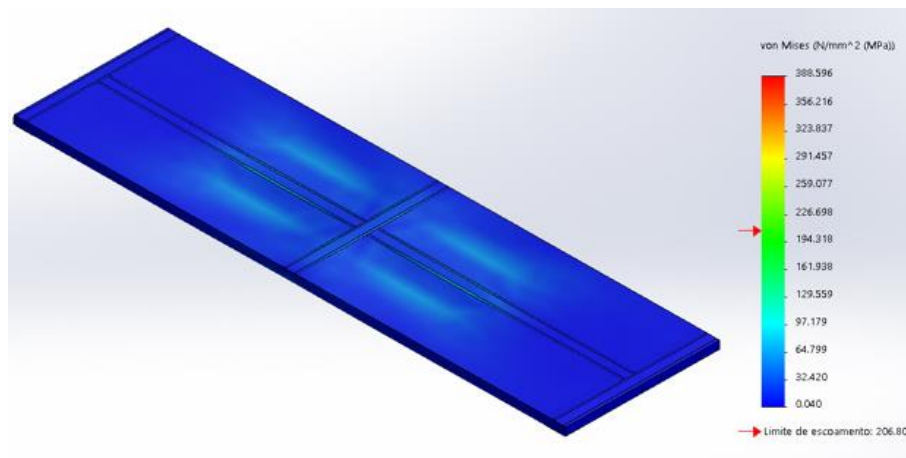
Esta seção apresenta os resultados obtidos a partir das simulações numéricas realizadas no SolidWorks Simulation e no MATLAB, com o objetivo de avaliar o comportamento estrutural do modelo sob as condições de carregamento estabelecidas e comparar a coerência entre as duas abordagens baseadas no Método dos Elementos Finitos (MEF). São analisadas as distribuições de tensões equivalentes de von Mises, deslocamentos e deformações, bem como as regiões críticas identificadas em cada modelo.

4.1 Resultados da Simulação pelo SolidWorks Simulation

A análise estrutural foi conduzida no SolidWorks Simulation utilizando modelo tridimensional com propriedades geométricas e condições de contorno equivalentes às adotadas na simulação numérica em MATLAB, garantindo comparabilidade entre os resultados. As fixações foram aplicadas nas extremidades e na região central do tampo, representando as condições reais de apoio do equipamento.

A distribuição das tensões equivalentes de von Mises é apresentada na Figura 9. Observa-se que a maior parte da estrutura permaneceu submetida a tensões inferiores ao limite de escoamento do aço inoxidável AISI 304 (206,80 MPa), com valores variando entre aproximadamente 0,04 MPa e 194,31 MPa.

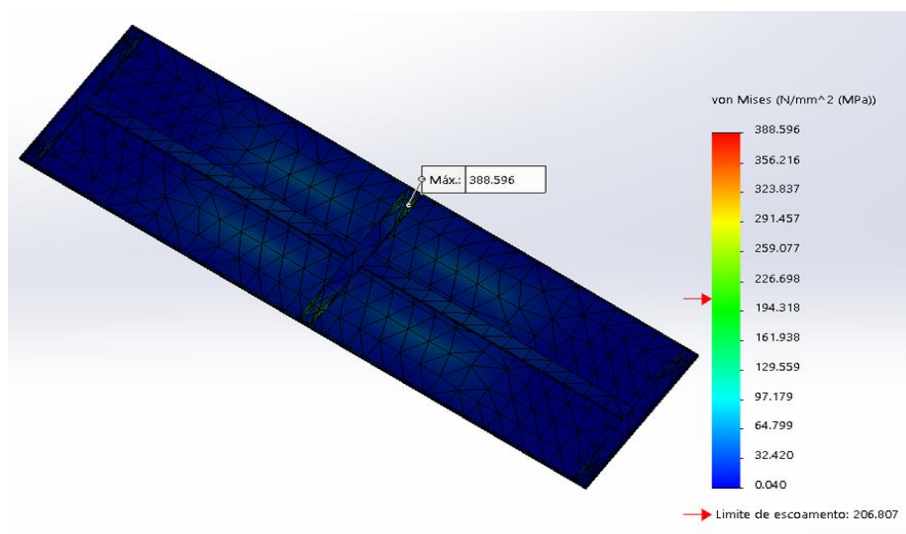
Figura 9 – Distribuição de tensões equivalentes de von Mises.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Entretanto, foram identificadas concentrações localizadas que atingiram valores máximos de 388,59 MPa, conforme detalhado na Figura 10.

Figura 10 – Análise de tensão localizada na região de engastamento dos pés centrais.



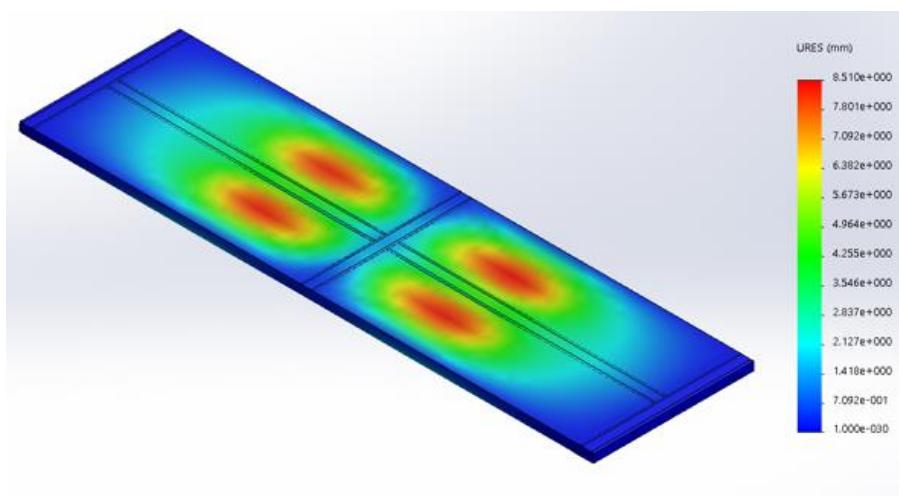
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A análise das regiões críticas indica que as maiores tensões ocorreram nos pontos de engastamento dos pés centrais ao tampo, coincidindo com áreas de união soldada. Essa condição evidencia a influência das descontinuidades geométricas e da rigidez local na concentração de tensões, sugerindo atenção especial ao dimensionamento estrutural e ao processo de união nessas regiões.

4.1.1 Análise de deslocamento da estrutura

O comportamento deformacional obtido na simulação é apresentado na Figura 11. O deslocamento máximo atingiu aproximadamente 8,51 mm, ocorrendo na região central do tampo, especialmente nas áreas com menor presença de reforços estruturais. Os valores mínimos ocorreram próximos aos pontos de apoio, coerentes com as restrições impostas.

Figura 11 – Mapeamento dos deslocamentos resultantes.



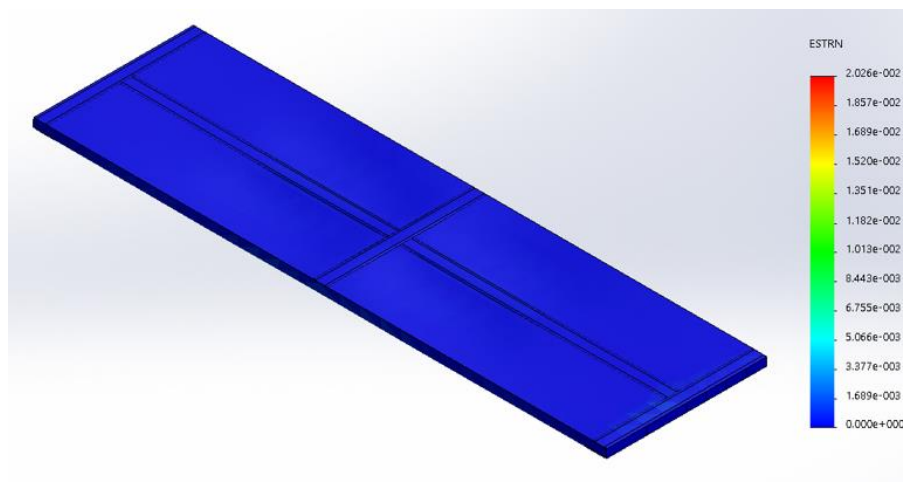
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

De forma geral, a distribuição dos deslocamentos indicou predominância de flexão na região central da estrutura, enquanto as regiões próximas aos apoios apresentaram maior rigidez. Mesmo com concentrações localizadas de tensão acima do limite de escoamento, o comportamento global da estrutura permaneceu compatível com a condição de carregamento aplicada.

4.1.2 Análise deformacional da estrutura

A distribuição das deformações equivalentes é apresentada na Figura 12.

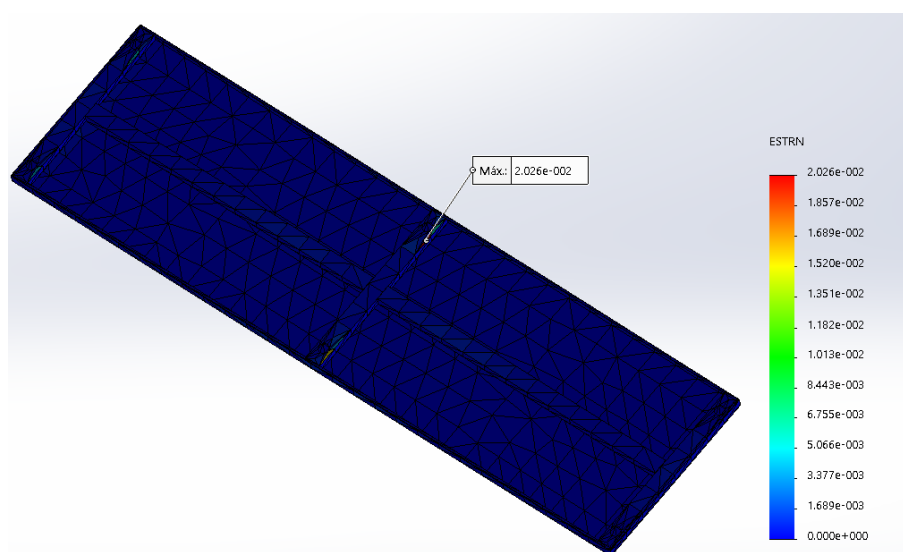
Figura 12 – Mapeamento de deformações equivalentes.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A maior parte da estrutura apresentou deformações reduzidas, variando aproximadamente entre 0,00168 e 0,00337, indicando comportamento predominantemente elástico. Entretanto, nas regiões próximas aos engastes centrais foram observados valores mais elevados, atingindo cerca de 0,020, conforme ilustrado na Figura 13, corroborando as concentrações de tensão previamente identificadas.

Figura 13 – Região com deformação próxima aos engastes dos pés centrais.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

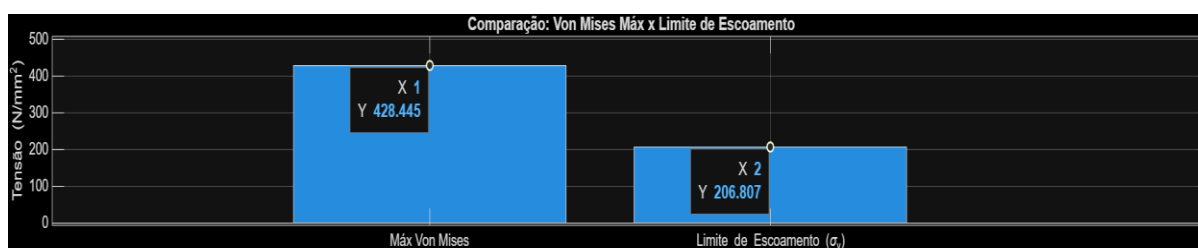
Esses resultados confirmam a influência dos reforços estruturais na limitação das deformações ao longo do tempo e evidenciam que as regiões centrais desprovidas de reforço apresentam menor rigidez estrutural.

4.2 Resultados da Simulação Numérica pelo MATLAB

Os resultados obtidos a partir da implementação numérica no MATLAB são apresentados nas Figuras 14 a 16. Apesar da simplificação geométrica do modelo, a simulação permitiu reproduzir o comportamento global da estrutura sob as mesmas condições de carregamento e contorno adotadas no modelo tridimensional.

A distribuição das tensões equivalentes de von Mises é apresentada na Figura 14, indicando valor máximo de aproximadamente 428,45 MPa. Assim como observado na análise realizada no SolidWorks, as maiores tensões concentram-se nas regiões de maior sollicitação estrutural.

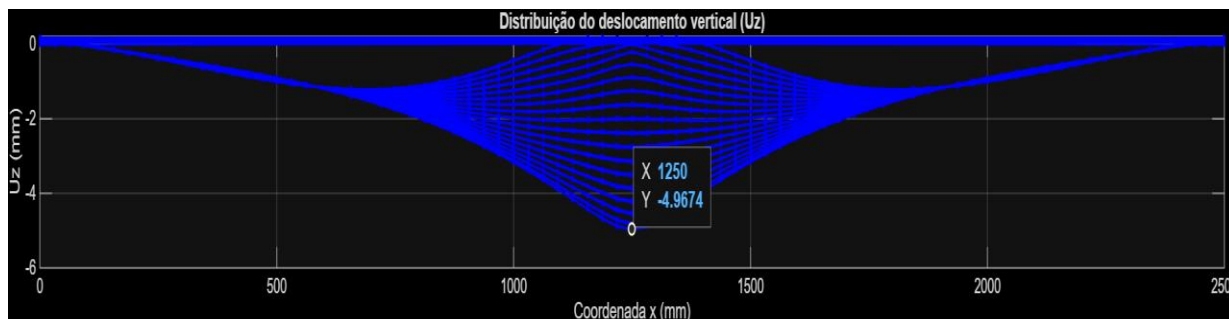
Figura 14 – Gráfico comparativo de tensão de Von Mises x limite de escoamento.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

O comportamento dos deslocamentos verticais é apresentado na Figura 15, evidenciando máximo deslocamento de aproximadamente 4,96 mm na região central da estrutura, com redução gradual em direção aos apoios, compatível com as condições de contorno impostas.

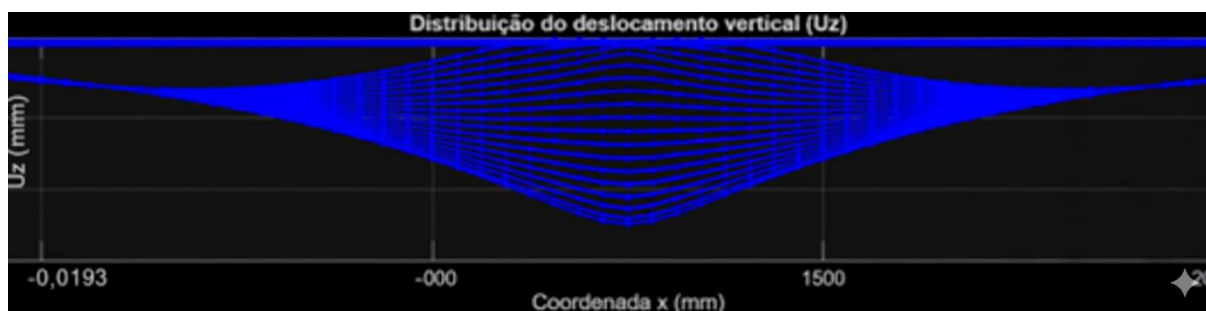
Figura 15 – Deslocamento vertical.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A distribuição das deformações equivalentes, apresentada na Figura 16, mostrou padrão simétrico em relação ao eixo central, com valores máximos próximos de 0,0193, coincidentes com as regiões de maior deslocamento e tensão.

Figura 26 – Mapeamento bidimensional das deformações equivalentes.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

4.3 Análise Comparativa dos Resultados

A comparação quantitativa entre os resultados obtidos nos dois ambientes de simulação é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Comparativo percentual dos resultados

Parâmetro	SolidWorks	MATLAB	Diferença (%)
-----------	------------	--------	---------------

Tensão de von Mises máxima [Mpa]	388,59	428,45	9,31%
Deslocamento máximo [mm]	8,51	4,98	71 %
Deformação equivalente máxima [mm]	0,020	0,0193	3,63%

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Observa-se que os valores de tensão máxima apresentaram diferença inferior a 10%, enquanto as deformações equivalentes apresentaram variação inferior a 4%, indicando boa concordância entre as abordagens numéricas. O deslocamento máximo apresentou diferença mais significativa, da ordem de 71%, atribuída principalmente às simplificações geométricas e à representação das condições de contorno no modelo MATLAB em relação ao modelo tridimensional mais detalhado do SolidWorks.

Apesar dessas diferenças, ambos os métodos indicaram comportamento estrutural semelhante quanto à distribuição de tensões e deformações, bem como a ocorrência de valores superiores ao limite de escoamento em regiões localizadas próximas aos engastes dos pés centrais. Esse resultado sugere a possibilidade de plastificação local sob as condições de carregamento analisadas, mantendo-se, entretanto, comportamento global coerente entre os modelos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise comparativa entre as simulações realizadas no SolidWorks Simulation e no MATLAB permitiu avaliar o comportamento estrutural da mesa de trabalho industrial sob as condições de carregamento estabelecidas. Observou-se uma coerência geral entre os resultados, especialmente quanto à distribuição das tensões e deformações equivalentes. Apesar disso, a diferença significativa observada no valor do deslocamento máximo, cerca de 70% superior no SolidWorks em relação ao MATLAB, demonstra a influência direta da formulação dos elementos, da densidade de malha e da precisão na definição das condições de contorno.

Ainda que tenham sido verificadas estas discrepâncias no resultado de flecha máxima, a comparação entre os dois métodos cumpriu o papel de demonstrar a importância da compreensão conceitual do MEF. Por meio do exemplo apresentado, foi possível associar a fundamentação teórica às respostas numéricas obtidas, permitindo interpretar o comportamento estrutural com base em uma análise física e matemática do problema.

Essa integração entre teoria e prática reforça a necessidade do engenheiro compreender os princípios que sustentam os softwares de simulação, garantindo o uso crítico e responsável das ferramentas computacionais.

Para trabalhos futuros, recomenda-se aprimorar a definição das condições de contorno na implementação em MATLAB, de modo a reduzir as diferenças observadas em relação ao modelo tridimensional desenvolvido no SolidWorks Simulation. Além disso, o refinamento da malha e o uso de modelos mais representativos do contato e da aplicação de carga poderão contribuir para aumentar a precisão dos resultados e fortalecer a correlação entre as abordagens numéricas e computacionais.

REFERÊNCIAS

ALVES FILHO, Avelino. **Elementos finitos: a base da tecnologia CAE**. São Paulo: Érica, 2001.

AZEVEDO, Álvaro F. M. **Método dos elementos finitos**. 1.ed. Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.

BRASIL, R. M. L. R. F.; LENZ, W. B.; GÓIS, W. **Métodos numéricos e computacionais na prática de engenharias e ciências**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2015. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 03 set 2025.

BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R. Jr. **Vector Mechanics for Engineers: Statics & Dynamics**. 9. ed. New York: McGraw-Hill, 2010.

HIBBELER, Russell Charles. **Resistência dos materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson, 2009. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 03 set 2025.

KUROWSKI, S. M. **Engineering Analysis with SOLIDWORKS Simulation 2015**. Mission: SDC Publications, 2015.

RADE, D. A. **Método dos elementos finitos aplicados à engenharia mecânica**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2011.

TIMOSHENKO, Stephen P.; YOUNG, David H. **Elements of strength of materials**. 5th ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1968.

UGURAL, Ansel C. **Mecânica dos materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2009.



Esta obra está licenciada com Licença Creative Commons Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.
[Recebido/Received: Abril 30, 2023; Aceito/Accepted: Agosto 29, 2023]