

ANÁLISE NUMÉRICA DAS TENSÕES NORMAIS E DO DESLOCAMENTO DE UM PILAR DE AÇO ENGASTADO EM BALANÇO COM APLICAÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)

Pedro Henrique Justo dos Santos – Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD)

pedro.justo032@gmail.com

Vithalion de Oliveira Ocampos – Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD)

vitalion101@gmail.com

André Felipe Aparecido de Mello – Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD)

andremello@ufgd.edu.br

RESUMO

Este artigo apresenta uma análise de um pilar de aço por meio da aplicação do Método dos Elementos Finitos (MEF) com a utilização da plataforma de *software* livre *Salome-Meca* na versão *SALOME Plataforma 9.10.0* em conjunto com o solucionador *Code_Aster* na versão *2023 msi*. O objetivo principal deste estudo foi analisar um pilar de seção W610 x 155, com 6 metros de comprimento, engastado na base e livre no topo, submetido a um carregamento de compressão de 1 000 kN e uma força cisalhante de 20 kN ambos no topo. A metodologia envolve a modelagem geométrica e definição dos grupos que serão aplicados os carregamentos e as restrições no módulo *Geometry* e a geração de malha no módulo *Mesh*, ambos no *SALOME*, a definição das propriedades do material e dos carregamentos no módulo *AsterStudy*, e a visualização dos resultados no módulo *ParaViS* do *SALOME*. Os resultados numéricos de tensões normais máxima e mínima, bem como a deflexão máxima foram obtidos no programa e são comparados com os valores analíticos calculados com base na teoria clássica de Resistência dos Materiais. Os resultados demonstram que os valores numéricos obtidos pelo *software* apresentam uma precisão de até 4,49% em relação aos valores analíticos, o que demonstra a sua viabilidade para o uso em trabalhos e projetos. **Palavras-chave:** Método dos Elementos Finitos; Pilar de aço; Análise numérica; Tensão normal; Deflexão.

ABSTRACT

This paper presents an analysis of a steel column through the application of the Finite Element Method (FEM) using the *Salome-Meca* free software platform (*SALOME Platform 9.10.0*) in conjunction with the *Code_Aster* solver (*msi 2023*). The main objective of this study was to analyze a W610 x 155 column, 6 meters long, fixed at the base and free at the top, subjected to a compression load of 1,000 kN and a shear force of 20 kN, both at the top. The methodology involves geometric modeling and definition of the groups to which the loads and restraints will be applied in the *Geometry* module and mesh generation in the *Mesh* module, both in *SALOME*. The definition of material properties and loads in the *AsterStudy* module, and visualization of the results in *SALOME's ParaViS* module. Numerical results for maximum and minimum normal stresses, as well as maximum deflection, were obtained using the program and compared with analytical values calculated based on classical Strength of Materials theory. The results demonstrate that the numerical values obtained by the software have an accuracy of up to 4.49% compared to the analytical values, demonstrating their viability for use in projects and projects. **Keywords:** Finite Element Method; Steel column; Numerical analysis; Normal stress; Deflection.

1. Introdução

Em engenharia, na área de análise estrutural, trabalha-se com estruturas reticuladas com barras prismáticas (quando a seção não varia ao longo do comprimento da barra) e com estruturas contínuas (quando não são compostas por barras) (Martha, 2017). Em geral, para as estruturas reticuladas com barras prismáticas, pode-se obter soluções analíticas com base na estática dos corpos deformáveis, mecânica dos sólidos e análise de estruturas, uma vez que aquelas são fáceis de serem modeladas por estas teorias (Hibbeler, 2017, Beer *et al*, 2015 e Gere; Goodno, 2012). Contudo, para o caso de estruturas contínuas não são simples de se obter soluções analíticas, porque envolve geometrias e modelagem complexas, o que torna o processo trabalhoso. Com isso, uma forma de sanar essas dificuldades é de trabalhar-se o Método dos Elementos Finitos (MEF).

Há mais de uma definição do MEF: uma completa, pode-se dizer que é um Método Aproximado de Cálculo de Sistemas Contínuos, de modo que: a estrutura, o componente mecânico ou, em geral, o corpo contínuo é subdividido em um número finito de partes (os elementos), conectados entre si pelos pontos discretos, que são chamados de nós. A montagem de elementos, que constitui o modelo matemático, possui o seu comportamento especificado por um número finito de parâmetros. Em particular, nos problemas de análise estrutural, os parâmetros são os deslocamentos nodais, que são as incógnitas do problema. A estratégia de solução do sistema, isto é, a montagem dos elementos, é a mesma do Método Geral para Análise de Sistemas Discretos (Alves Filho, 2013). Já uma definição simples e intuitiva, pode-se dizer que os elementos finitos são elaborados com o uso de funções polinomiais por partes em domínios geométricos simples (funções lineares por partes em tetraedros, um exemplo) (Monk, 2003).

Há diversas aplicações do MEF, desde a análise estrutural (Alves Filho, 2013), inclusive eletromagnetismo (Monk, 2003). Northon (2013) destaca que o MEF também é utilizado em problemas de mecânica dos fluidos, transferência de calor, acústica, eletromagnetismo, e outros casos mais especializados, como projetos de máquinas. Segundo Vaz (2011), o MEF, cuja aplicação se iniciou em análise estática de estruturas de comportamento linear elástico, foi estendida à análise estática de estruturas com não linearidade física e geométrica e à análise dinâmica de estruturas. O autor ainda enaltece que o MEF pode ser trabalhado em outras áreas, como a engenharia geotécnica, a interação fluido-mecânica e as análises de fluxo térmico e hidráulico.

Este trabalho tem por objetivo em analisar um pilar a partir da aplicação do MEF, com o uso dos programas *Code_Aster* / *Salome-Meca* © e bibliotecas em *Python*. Os resultados numéricos foram comparados com os modelos analíticos clássicos da Resistência dos Materiais. É importante destacar que neste trabalho não foi estudado o efeito de flambagem que, embora seja importante para a análise em conjunto com a compressão, envolve outros módulos e programação, que não foram estudados durante a pesquisa.

2. Referencial teórico

Na área de análise de estruturas, a formulação do MEF pode ser feita a partir do Princípio da Mínima Energia Potencial Total, do Método dos Ponderados ou do Princípio dos Trabalhos Virtuais (Vaz, 2011). Conquanto o conceito da análise pelo MEF é muito simples, todavia os fundamentos matemáticos que são basilares para a disciplina, como adverte Northon (2013), ultrapassam o escopo deste trabalho. Estes podem ser encontrados nos trabalhos de (Alves Filho, 2013, Frey; George 2008, Hughes, 2000, Monk, 2003 e Vaz, 2011).

Os programas utilizados foram o *Salome-Meca* na versão *SALOME Platform 9.10.0* (CEA/DES; EDF R&D; Open Cascade, 2022) e o *Code_Aster* na versão *2023 msi* (EDF, 2023). O *Salome-Meca* é uma plataforma *open source* (de código aberto), gratuito para simulação numérica em engenharia. Sua principal função é integrar diferentes ferramentas e módulos em um único ambiente, tornando o processo de simulação mais fluido e intuitivo (Salome, c2021). *Salome* é um acrônimo francês que significa "Simulação numérica por Arquitetura de Software em Código aberto e com Metodologia de Evolução" e *Meca* é uma abreviação francesa de "mecânica".

A plataforma *Salome-Meca* inclui diversas funcionalidades, como o pré-processamento, onde se realiza a criação e edição de geometrias (módulos como *Geometry*), e geração de malhas de elementos finitos (módulo *Mesh*), que são a base para a análise numérica (CEA/DES; EDF R&D; Open Cascade, 2022). Também realiza o pós-processamento, com a visualização de resultados de simulação de forma gráfica e detalhada, o que permite a análise de tensões, deformações, temperaturas, entre outros (módulo *ParaVis*). Este módulo funciona como um ambiente de pós-processamento e visualização de dados (CEA/DES; EDF R&D; Open Cascade, 2022). Ele é a interface gráfica do *ParaView*, um aplicativo de código aberto especializado em análise e visualização científica. A sua principal função é transformar os

resultados numéricos de uma simulação das quais são feitas com o MEF em representações visuais, como gráficos, modelos 3D e mapas de cores (CEA/DES; EDF R&D; Oenp Cascade, 2022). Finalmente, o *Salome-Meca* ainda faz a integração com solucionadores, do qual é projetado para trabalhar com diferentes programas que resolvem as equações matemáticas do problema, do qual o mais famoso deles é o *Code_Aster*.

Já o *Code_Aster* é um solucionador que realiza os cálculos do MEF (EDF, 2023). *Code_Aster* é uma sigla francesa para "Análise de Estruturas e Termomecânica para Estudos e Pesquisas". Inicialmente, ele é operado por meio de arquivos de texto com comandos complexos em francês. Isso exige um conhecimento profundo da sintaxe e da lógica do programa, tornando-o inacessível para muitos usuários. Para contornar essa dificuldade, foi criado o módulo *AsterStudy* na versão 0.11. Este, por sua vez, é integrado dentro da plataforma *Salome-Meca* que atua como uma interface gráfica (GUI) para o *Code_Aster* (CEA/DES; EDF R&D; Open Cascade, 2022). Em vez do usuário escrever códigos, o *AsterStudy* permite que configure sua análise por meio de uma série de menus e caixas de diálogo.

Das principais funções do *AsterStudy*, pode-se citar a configuração do estudo, que permite definir o tipo de análise (estática, dinâmica, térmica, entre outros), as propriedades dos materiais, os carregamentos aplicados e as condições de contorno. Pode-se incluir a importação de malha, do qual este carrega a malha criada no módulo *Mesh*, ao fazer as associações das propriedades e carregamentos aos grupos de elementos definidos. Ademais, permite a visualização dos resultados logo após o cálculo diretamente na interface gráfica, o que facilita a interpretação. Por fim, outrossim o *AsterStudy* efetua a geração automática de *script*, que embora seja ademais uma interface gráfica, é o arquivo de comando do *Code_Aster* (conhecido como arquivo *.comm*), o que permite que usuários vejam a sintaxe correta e há a opção de operar o *solver* de forma manual no futuro (EDF, 2023).

A Figura 1 apresenta um fluxograma da interação entre os programas, que elucida o funcionamento de cada um e como eles partilham dados, informações.

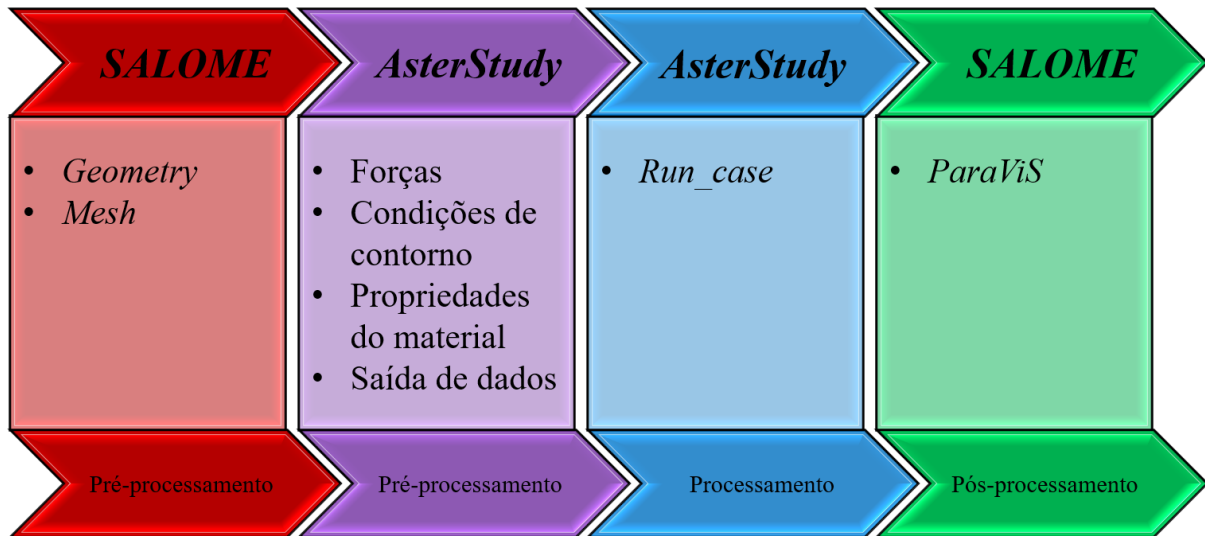


Figura 1 – Fluxograma de interação entre os programas *Code_Aster / Salome-Meca*
 Fonte: autores (2025).

Os resultados analíticos foram retirados da teoria clássica de Resistência dos Materiais (Hibbeler, 2017, Beer *et al*, 2015 e Gere; Goodno, 2010), bem como as equações para compararmos com os dados.

A equação da tensão axial média (Hibbeler, 2017) é dada por:

$$\sigma_A = \frac{N}{A} \quad (1)$$

onde

σ_A é a tensão axial média em qualquer ponto sobre a área da seção transversal;

N é a força normal resultante interna, da qual é aplicada sobre o centróide da área da seção transversal. N é determinada usando o método das seções e das equações de equilíbrio;

A é a área da seção transversal do pilar onde σ_A é determinado.

A equação da tensão normal de flexão (Hibbeler, 2017) é dada por:

$$\sigma_M = \frac{Mc}{I} \quad (2)$$

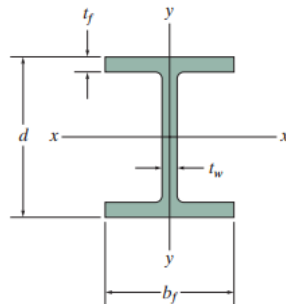
onde

σ_M é a tensão normal máxima de flexão no elemento, do qual ocorre em um ponto na área da seção transversal mais afastado do eixo neutro;

- M é a o momento interno resultante, determinado pelo método das seções e das equações de equilíbrio, e calculado em torno do eixo neutro da seção transversal;
- c é a distância perpendicular do eixo neutro para o ponto mais afastado deste. Este é onde σ_M ocorrerá;
- I é o momento de inércia da seção transversal em torno do eixo neutro.

3. Método de pesquisa

Para a pesquisa com o uso do MEF e dos programas *Salome-Meca* (CEA/DES; EDF R&D; Open Cascade, 2022) e *Code_Aster* (EDF, 2023), foi considerado um pilar de seção W610 x 155 (Figura 2), por ser uma seção robusta, com dimensões da alma de 611 mm de comprimento com 12,70 mm de espessura, dimensões das mesas de 324,0 mm de comprimento com 19,0 mm de espessura.



Wide-Flange Sections or W Shapes SI Units											
Designation	Area A	Depth d	Web thickness t_w	Flange		x-x axis			y-y axis		
				width b_f	thickness t_f	I	S	r	I	S	r
mm × kg/m	mm ²	mm	mm	mm	mm	10 ⁶ mm ⁴	10 ³ mm ³	mm	10 ⁶ mm ⁴	10 ³ mm ³	mm
W610 × 155	19 800	611	12.70	324.0	19.0	1 290	4 220	255	108	667	73.9

Figura 2 – Propriedades Geométricas da seção W610 x 155
 Fonte: HIBBELER (2017, p.824).

O pilar possui 6 m de comprimento, engastado na base e livre no topo. Os carregamentos foram aplicados no topo, uma força de 1 000 kN na direção do pilar que causa compressão, e outra força de 20 kN cisalhante que provoca a deflexão horizontal (Figura 3). A representação

gráfica foi elaborada pelo software *Ftool* na versão *4.01.00 Basic*, utilizado na análise de estruturas planas (Martha; PUC-RIO; TECGRAF/PUC-RIO, 2024).

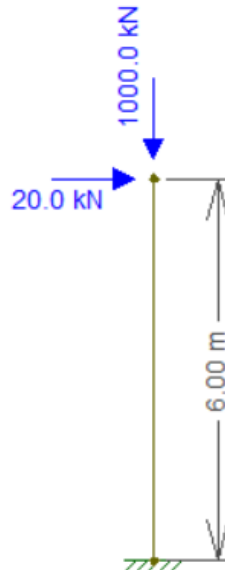


Figura 3 – Representação do pilar idealizado
Fonte: Autores (2025).

As tensões normais citadas não atuam separadas, mas sim combinadas (Beer *et al*, 2015). Logo, a superposição das forças ilustrada de maneira análoga por (Hibbeler, 2017) é análoga a situação-problema, da qual pode-se combinar as Equações (1) e (2), e pode ser dada por

$$\sigma_1 = \frac{N}{A} + \frac{Mc}{I} \quad (3)$$

$$\sigma_2 = \frac{N}{A} - \frac{Mc}{I} \quad (4)$$

onde

σ_1 é a tensão normal máxima na seção transversal, do qual ocorre em um ponto na área da seção transversal em que os carregamentos N e M atuam na mesma direção, porém em sentidos opostos;

σ_2 é a tensão normal mínima na seção transversal, do qual ocorre em um ponto na área da seção transversal em que os carregamentos N e M atuam no mesmo sentido.

A equação da deflexão da situação proposta (Hibbeler, 2017) é dada por

$$v_{max} = -\frac{PL^3}{3EI} \quad (5)$$

onde

v_{max} é o valor do deslocamento máximo situado no topo do pilar;

P é o valor do carregamento sobre o elemento;

L é o comprimento do pilar;

E é o módulo de elasticidade do material;

I é o momento de inércia da seção em torno do eixo neutro do pilar.

A equação para compararmos a precisão dos resultados analíticos com a análise numérica do *software* é dada por:

$$E(\%) = \left| \frac{V_{numérico} - V_{teórico}}{V_{teórico}} \right| \times 100 \% \quad (6)$$

onde

$E(\%)$ é o valor em porcentagem do erro de precisão;

$V_{numérico}$ é o valor numérico fornecido pela análise do programa;

$V_{teórico}$ é o valor analítico teórico das equações de Resistência dos Materiais.

Para a criação do pilar, empregou-se o *Salome-Meca* pelo módulo *Geometry* (CEA/DES; EDF R&D; Open Cascade, 2022). Primeiramente foi criada a seção transversal e fez-se a sua extrusão. Após isso, fez-se a atribuição dos grupos: de pilar para si; engaste para a face inferior; e carregamento para a face superior. No módulo *Mesh* foi gerada uma malha *any* (qualquer), pelo algoritmo *NETGEN 1D-2D-3D* (volumes livres), com a hipótese *NETGEN 3D simple parameters*, utilizando o argumento de que os elementos 1D tenham o comprimento de 0,015 m (Figura 4). Ao computar, a malha gerada possui ao todo 400 249 elementos, dos quais 5 128 são elementos de borda, 149 566 são elementos de face triangular e 245 555 são elementos de volume tetraédrico. Além disso, a malha possui 78 868 nós.

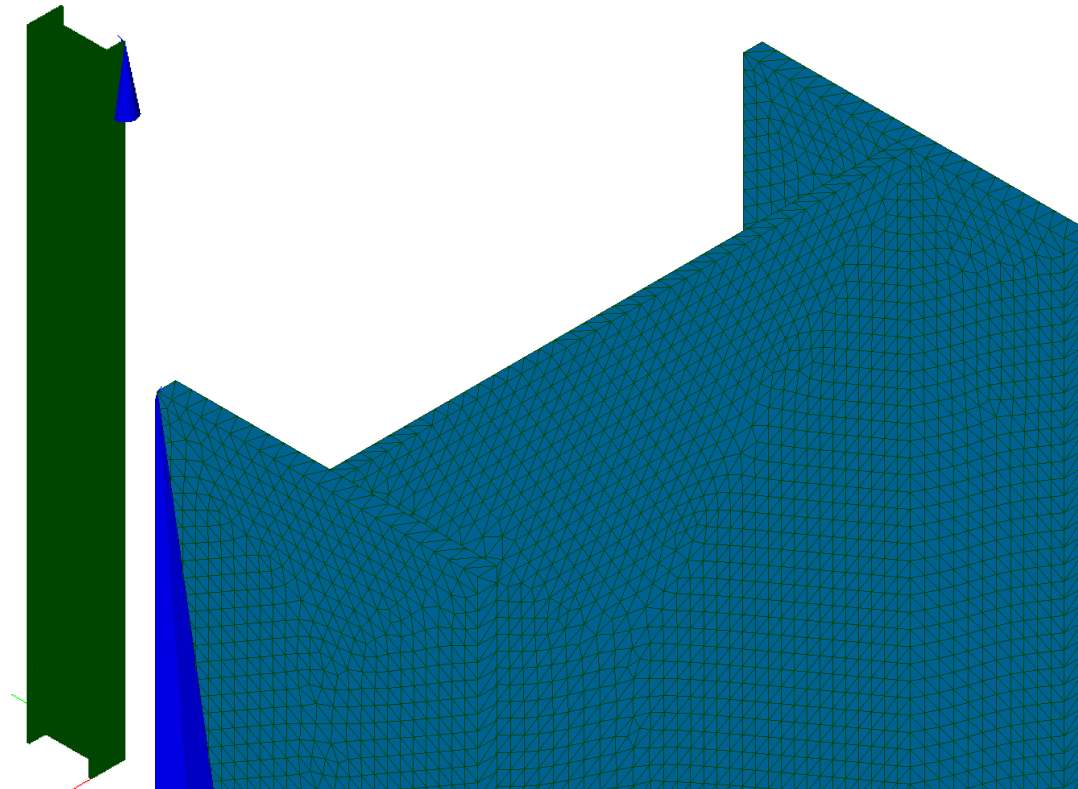


Figura 4 – Pilar idealizado pelo Salome (à esq.) e sua malha gerada (à dir.)
Fonte: Autores (2025).

Pelo módulo do *Aster Study*, do qual o *Code_Aster* é integrado ao *Salome-Meca* (EDF, 2023), a entrada da análise foi definida pelo comando *Isotropic Linear Elasticity*, que este adiciona um estágio assistido e pré-configura as propriedades do material, estabelece as condições de contorno e o valor de pressão a ser aplicado.

Como o pilar é de aço, então atribuiu as suas propriedades: o módulo de Young (ou de elasticidade) $E = 210 \times 10^9 Pa$ e o coeficiente de Poisson $\nu = 0,3$ (Gere; Goodno, 2012). O pilar é engastado na base, então as restrições atribuídas foram de não sofrer deslocamento nela, isto é, $D_x = D_y = D_z = 0$. Como o pilar está indeslocável na base, então não houve necessidade de restringir as rotações.

Como no comando só se atribui o valor de pressão, e que na pesquisa há a consideração de um carregamento horizontal, então fez-se a inserção destes pelo comando *BC and Load* \rightarrow *AFFE_CHAR_MECA* \rightarrow *FORCE_FACE*. Os valores foram de $FY = 1\ 010\ 101,01$ (em N/m^2) e $FZ = -50\ 505\ 050,51$ (em N/m^2). Esses dados são resultados da divisão dos carregamentos pela área da seção.

4. Resultados e discussão

Para os valores analíticos das Equações (3) e (4), primeiro foi utilizado o *software FTool* (Martha; PUC-RIO; TECGRAF/PUC-RIO, 2024) para encontrarmos os valores de N e M que são, respectivamente, $-1\ 000\ kN$ e $-120\ kN \cdot m$ (Figura 5).

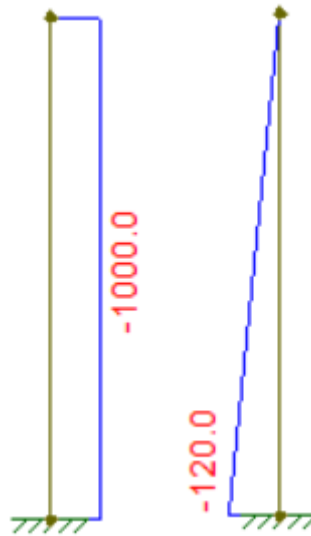


Figura 5 – Diagramas de esforços internos de força normal (à esq.) e de momento fletor (à dir.)
 Fonte: Autores (2025).

Logo, com os valores da propriedade da seção pela Figura 2, os valores analíticos pela teoria de Resistência dos Materiais foram de:

$$\begin{aligned}
 \sigma_1 &= \sigma_N + \sigma_m \\
 &= \frac{N}{A} + \frac{Mc}{I} \\
 &= \frac{(-1\ 000 \times 10^3)}{19\ 800 \times 10^{-6}} + \frac{(-120 \times 10^3) \cdot \frac{0,611}{2}}{1\ 290 \times 10^6 \times 10^{-12}} \\
 \sigma_1 &= -78,9237\ MPa \tag{7}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_2 &= \sigma_N - \sigma_m \\ &= \frac{N}{A} - \frac{Mc}{I} \\ &= \frac{(-1\,000 \times 10^3)}{19\,800 \times 10^{-6}} - \frac{(-120 \times 10^3) \cdot \frac{0,611}{2}}{1\,290 \times 10^6 \times 10^{-12}} \\ \sigma_2 &= -22,0865 \text{ MPa}\end{aligned}\tag{8}$$

$$\begin{aligned}v_{\text{máx}} &= -\frac{PL^3}{3EI} \\ &= -\frac{(20 \times 10^3) \cdot 6^3}{3 \cdot (210 \times 10^9) \cdot (1\,290 \times 10^6 \times 10^{-12})} \\ v_{\text{máx}} &= -5,3156 \text{ mm}\end{aligned}\tag{9}$$

Com o processamento dos dados pelo módulo do *AsterStudy*, utilizou-se o *SALOME-MECA* com o módulo *ParaViS* (CEA/DES; EDF R&D; Open Cascade, 2022), para representar os resultados numéricos da análise de MEF. Com isso, foi gerado uma imagem do pilar com todas as tensões normais (em Pa) associadas a cada ponto a partir dos dados processados (Figura 6). Pode-se observar que há destaque de coloração na demarcação de curvas de nível, de acordo com os valores das tensões normais de cada região.

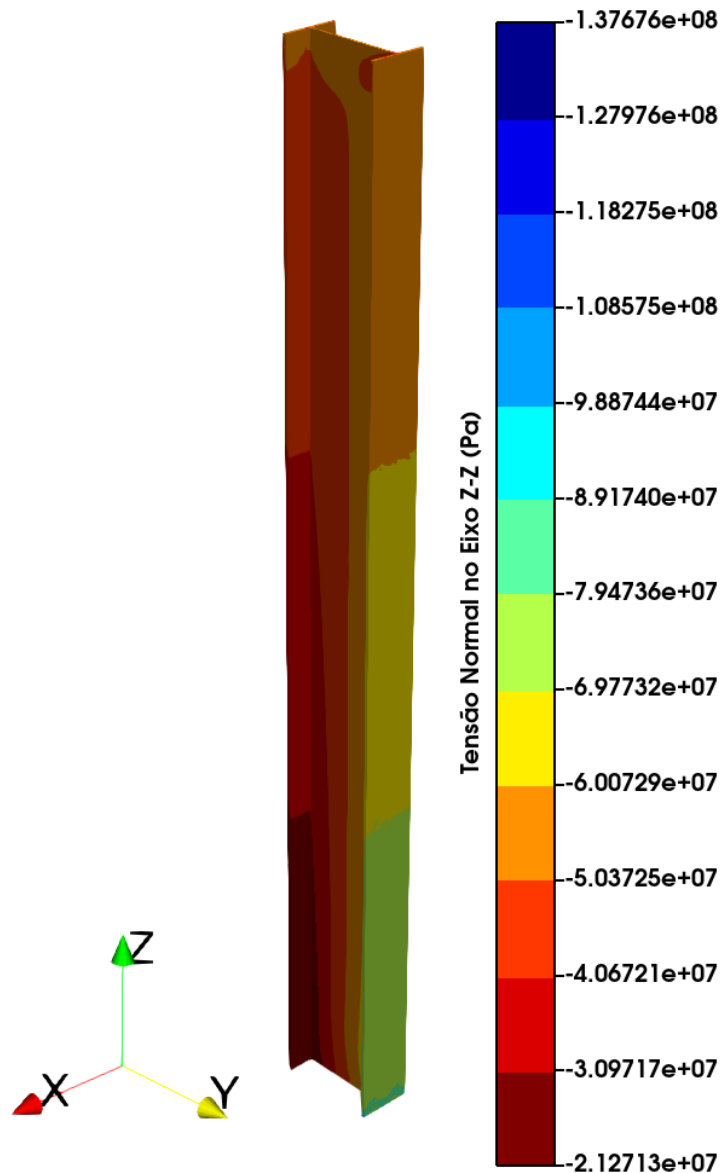


Figura 6 – Pilar gerado pelo módulo do *ParaViS*
Fonte: Autores (2025).

Desta forma, ao exibir a seção do engaste no *ParaViS* (Figura 7), e fazer a leitura, obteve-se os valores das tensões normais no eixo Z-Z, nas ligações das mesas com a alma, de $\sigma_1 = -79,4736 \text{ MPa}$ para a região de verde-amarelado, e de $\sigma_2 = -21,2713 \text{ MPa}$ para a região de vermelho-escuro.

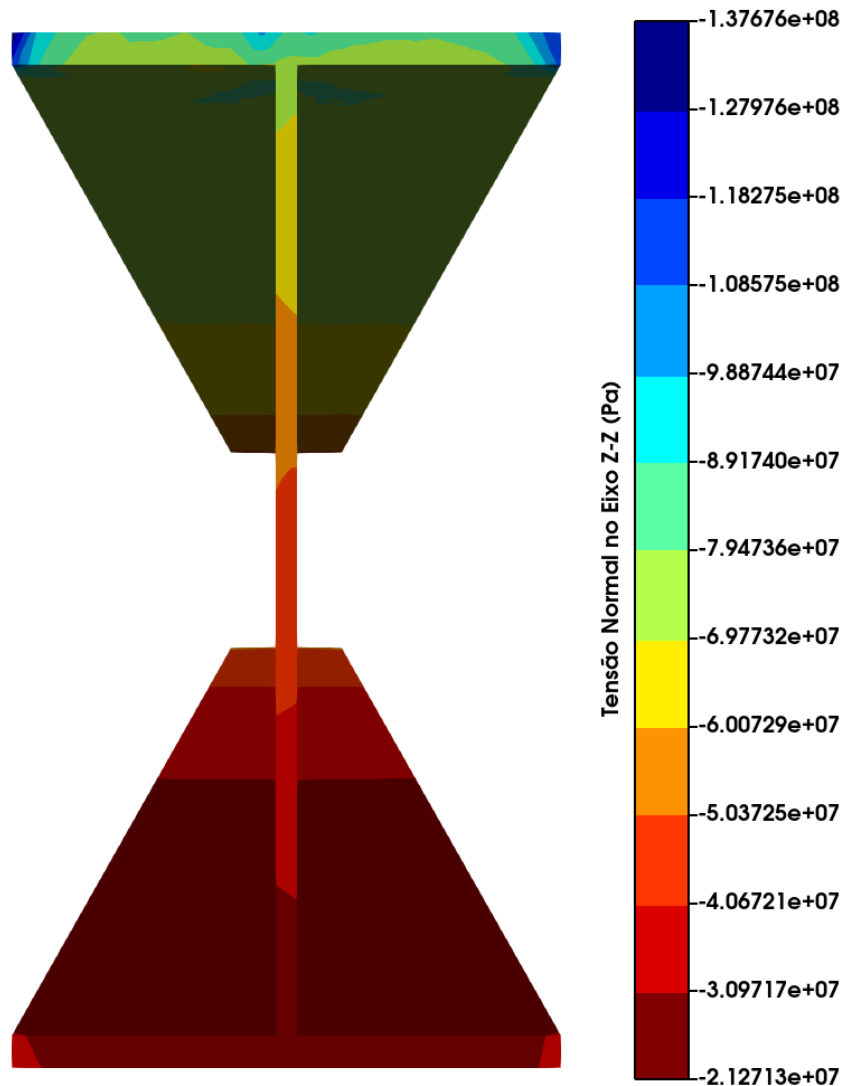


Figura 7 – Seção do engaste e suas tensões normais pelo *ParaViS*
Fonte: Autores (2025).

Por outro lado, ao exibir o pilar com a sua deflexão na direção do eixo Y-Y no *ParaViS* com um fator de ampliação de 150 (Figura 8), obteve-se o valor do deslocamento máximo no topo de $v_{m\acute{a}x} = -5,5545 \text{ mm}$ da região de vermelho-escuro.

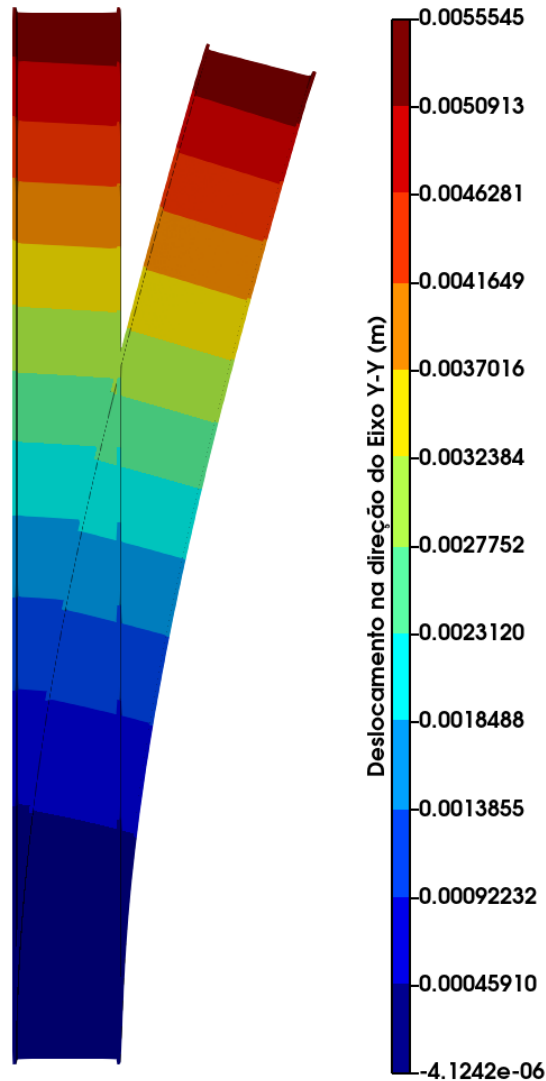


Figura 8 – Deflexão do pilar pelo *ParaViS* e o seu deslocamento
 Fonte: Autores (2025).

Ao comparar com os resultados numéricos obtidos pelo *Salome-Meca* (CEA/DES; EDF R&D; Open Cascade, 2022) com os valores analíticos obtidos pelas Equações (7), (8) e (9), pela Equação (6), obteve-se as precisões de:

$$\begin{aligned}
 E(\%)_{\sigma_1} &= \left| \frac{-79,4736 - (-78,9237)}{-78,9237} \right| \times 100 \% \\
 E(\%)_{\sigma_1} &= 0,69 \%
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E(\%)_{\sigma_2} &= \left| \frac{-21,2713 - (-22,0865)}{-22,0865} \right| \times 100 \% \\
 E(\%)_{\sigma_2} &= 3,69 \%
 \end{aligned}$$

$$E(\%)_{\sigma_1} = \left| \frac{-5,5545 - (-5,3156)}{-5,3156} \right| \times 100 \%$$
$$E(\%)_{\sigma_1} = 4,49 \%$$

Em suma, ao se comparar os valores numéricos obtidos pelo programa com os valores analíticos obtidos pela teoria de Resistência dos Materiais, pode-se verificar a confiabilidade do *Salome-Meca* (CEA/DES; EDF R&D; Open Cascade, 2022), com precisões de até 4,49%. E que eventual erro de precisão se dá pela modelagem com o intuito de modelar facilmente o problema na referida teoria.

5. Considerações finais

O programa *Salome-Meca* (CEA/DES; EDF R&D; Open Cascade, 2022) de fato é viável em realizar a modelagem geométrica do pilar de aço engastado na base e em balanço, composto de um carregamento de compressão e de um carregamento horizontal, ambos no topo, e em seguida, gerar a sua malha. Pode-se lançar as propriedades do material, as condições de contorno e os valores das cargas distribuídas para que o *Code_Aster* (EDF, 2023) realizasse todo o processamento de dados. Por fim, o *Code_Aster* devolveu os cálculos operados para o *Salome-Meca* que fez a interpretação dos resultados, e pode-os exibir para fazer as leituras.

As respostas numéricas do programa, quando comparadas aos cálculos teóricos, mostraram alta precisão, o que infere na sua confiabilidade e viabilidade para se trabalhar as simulações com MEF. E que eventuais erros de precisão decorrem pela modelagem com o intuito de modelar facilmente o problema na referida teoria. Isso aconteceu quando para a Resistência dos Materiais, fora considerado um pilar da forma de uma reta, enquanto no *Salome-Meca* o pilar fora elaborado com sua seção e daí há a representação mais fidedigna com a realidade.

O conjunto *Salome-Meca* e *Code_Aster* oferece várias vantagens para a simulação numérica. Por serem de código aberto e gratuitos, eles democratizam o acesso a ferramentas avançadas de engenharia. Além da análise estrutural, a plataforma é versátil e permite simulações em outras áreas, como a mecânica dos fluidos, termodinâmica e eletromagnetismo. É possível importar modelos de programas externos, como o *SOLIDWORKS*® (Dassault Systèmes, 2025), e o processo de modelagem é otimizado para a análise, o que permite, por

exemplo, a simplificação da geometria do pilar para uma linha e a associação da seção transversal em uma etapa posterior, o que gera um ganho no tempo de processamento.

Apesar de seus benefícios, a plataforma apresenta alguns desafios para o usuário. Uma das dificuldades é a barreira da língua, pois muitas funções e tutoriais do *Code_Aster* estão em francês. Adicionalmente, o acesso a materiais de apoio, como manuais e vídeos, é limitado e, em sua maioria, disponível apenas em inglês, o que exige um esforço extra para o aprendizado e a operação do software.

Em estudos futuros, pode-se, com este mesmo pilar, verificar as tensões de cisalhamento combinadas, as tensões principais e o ângulo de deflexão no topo. Além disso, é interessante considerar o efeito de flambagem, de como o pilar comporta-se ao ser submetido a uma carga de compressão, de representar a instabilidade, e de encontrar a sua tensão crítica. E finalmente, pode-se adicionar um furo ou filete na seção do pilar e verificar os efeitos de distorção.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem esta pesquisa por fomento de bolsa de Iniciação Científica a CNPq e a UFPA.

7. Referências

- ALVES FILHO, A. **Elementos finitos**: a base da tecnologia CAE. 6. ed. São Paulo: Érica, 2013.
- ASSAN, A. E. **Método dos elementos finitos**: primeiros passos. 2. ed. Campinas: Unicamp, 2003.
- BEER, F. P. *et al.* **Mecânica dos materiais**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2015.
- CEA/DES; EDF R&D; OPEN CASCADE. **SALOME Platform**: the open-source integration platform for numerical simulation. Versão 9.10.0. 2022. Disponível em: <<https://www.salome-platform.org/?p=2446>>. Acesso em: 04 set. 2025.
- DASSAULT SYSTÈMES. **SOLIDWORKS**. 2025. Disponível em: <<https://www.solidworks.com/pt-br>>. Acesso em: 04 set. 2025.
- EDF. **Code_Aster**: software de simulação numérica em mecânica estrutural. Versão 2023 msi. Clamart, 2023. Disponível em: <<https://code-aster-windows.com/download>>. Acesso em: 04 set. 2025.
- FAQ. **SALOME**. c2021. Disponível em: <https://www.salome-platform.org/?page_id=428>. Acesso em: 04 set. 2025.
- FREY, P. J.; GEORGE, P. L. **Mesh generation**: application to finite elements. 2. ed. London: ISTE, 2008.
- GERE, J. M.; GOODNO, B. J. **Mecânica dos materiais**. 2. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2012.
- HIBBELER, R. C. **Mechanics of materials**. 10. ed. Pearson Education, 2017.
- HUGHES, T. J. R. **The finite element method**: linear static and dynamic finite elements analysis. Mineola: Dover Publications, 2000.



- MARTHA, L F. **Análise de estruturas**: conceitos e métodos. 2. ed. Rio de Janeiro: Elseiver, 2017.
- _____; PUC-RIO; TECGRAF/PUC-RIO. **Ftool**: two-dimensional frame analysis tool. Versão 4.01.00 Basic. 2024. Disponível em: <<https://www.ftool.com.br/Ftool/site/news>>. Acesso em: 04 set. 2025.
- MONK, P. **Finite element methods for Maxwell's Equations**. New York: Oxford University Press, 2003.
- NORTON, R. L. **Projeto de máquinas**: uma abordagem integrada. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- VAZ, L. E. **Método dos elementos finitos em análise de estruturas**. Rio de Janeiro: Elseiver, 2011.