



AME-WEB: UM AMBIENTE DE SIMULAÇÃO PARA ANÁLISE DE ESTRUTURAS PLANAS UTILIZANDO O MÉTODO DA RIGIDEZ DIRETA

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2022.4066

Milton Mateus Guimarães dos Santos - milton.santos@ctec.ufal.br
Universidade Federal de Alagoas

Gleide Karolayne Melo Lins - gleide.lins@ctec.ufal.br
Universidade Federal de Alagoas

Matheus Amancio Miranda - matheus.miranda@ctec.ufal.br
Universidade Federal de Alagoas

João Carlos Cordeiro Barbirato - jccb@lccv.ufal.br
Universidade Federal de Alagoas

Resumo: *O estudo da teoria e mecânica das estruturas é essencial para a formação de todo engenheiro civil. Sua análise envolve conceitos de álgebra vetorial e matricial, trigonometria, sistema de equações lineares, métodos numéricos e mecânica de sólidos deformáveis. Entretanto, devido à complexidade dos procedimentos para solução dos sistemas estruturais, nota-se uma dificuldade de aprendizado por parte dos alunos. Nesse contexto, o uso de programas computacionais surge como ferramenta adicional para auxiliar a compreensão do comportamento das estruturas, bem como verificar resultados e etapas na solução de problemas, principalmente para aqueles que pretendem seguir carreira na área de estruturas. Diante disso, este trabalho apresenta a ferramenta educacional AME-WEB, uma aplicação web desenvolvida para realizar a análise de estruturas bidimensionais, como treliças, pórticos e grelhas, em uma plataforma interativa e simplificada. A ferramenta possui como principais diferenciais, a praticidade de sua utilização on-line e a possibilidade de verificar resultados parciais e etapas de solução do problema, como, por exemplo, a observação da matriz de rigidez da estrutura. Além disso, o ambiente também possibilita a visualização gráfica do sistema estrutural resolvido e suas solicitações mecânicas. O AME-WEB foi desenvolvido utilizando as linguagens de programação JavaScript e Python a fim de proporcionar interoperabilidade ao aplicativo durante seu uso e possui uma customização diferenciada para cada tipo de estrutura disponível na plataforma. A validação da ferramenta é realizada por meio da análise de exemplos com resultados disponíveis em literatura, assim como a comparação com softwares já*





validados.

Palavras-chave: *Análise Matricial de Estruturas, Mecânica Computacional, Aplicação WEB*



AME-WEB: UM AMBIENTE DE SIMULAÇÃO PARA ANÁLISE DE ESTRUTURAS PLANAS UTILIZANDO O MÉTODO DA RIGIDEZ DIRETA

1 INTRODUÇÃO

Conforme Sussenkind (2003), a análise estrutural compreende a parte da Mecânica que estuda as estruturas, caracterizando os esforços e as deformações a que elas estão submetidas quando solicitadas por agentes externos. Como resultado, verifica-se a aptidão da estrutura para seu uso, sendo assim uma parte fundamental do projeto de engenharia (BRANCHIER, 2017). Nesse sentido, evidencia-se a necessidade da busca por práticas que colaborem cada vez mais o aprendizado das disciplinas de estruturas por parte dos estudantes de engenharia. Segundo Bandeira e Gonzalez (2008), o não conhecimento do comportamento dos diferentes elementos estruturais pelo graduando, torna-o incompleto em sua formação como engenheiro estruturalista.

Uma das principais dificuldades no ensino da teoria das estruturas encontra-se na complexidade das formulações utilizadas para caracterizar os diversos efeitos causados pelas ações nos diferentes modelos e elementos estruturais (BANDEIRA e GONZALES, 2008) e sua conseqüente quantidade de operações matemáticas. Uma forma de contornar esta problemática é a utilização de programas computacionais, que permite a resolução de cálculos complexos e trabalhosos, servindo como ferramenta de verificação dos cálculos e, por conseguinte, possibilitando uma maior dedicação à interpretação dos resultados. Dessa forma, em coadunação com Bandeira e Chivante (2008), a adoção de práticas tecnológicas no ambiente educacional serve como grande motivador aos estudos, pois trabalha a aplicabilidade associada a interdisciplinaridade, além da elaboração de cenários (modelagem) e seus comportamentos.

Nesse contexto, é possível identificar alguns *softwares* utilizados como ferramentas de auxílio ao processo de aprendizagem, como o *Risa 2D*, *Trame 4.0*, *Insane 1.1* e o *Ftool*. O *Ftool*, por exemplo, é um programa bastante conhecido e difundido no meio acadêmico, que se destina ao ensino do comportamento estrutural de estruturas reticuladas planas, como pórticos, vigas e treliças (BRANCHIER, 2017). Segundo Martha (2002), o *Ftool* possui uma integração natural entre as fases do processo de análise estrutural, permitindo que o estudante experimente diferentes concepções estruturais para um modelo, entendendo melhor o seu comportamento. Entretanto, o *Ftool* não possibilita a análise de grelhas, sem falar que, assim como os demais *softwares* existentes, seu uso está limitado ao uso local em um computador e não é possível a visualização do passo-a-passo de resolução do problema.

Nesse sentido, o presente trabalho possui como objetivo apresentar a aplicação *AME-WEB*, um ambiente *web* de análise matricial de estruturas, no qual possibilita a análise de estruturas isostáticas e hiperestáticas planas reticuladas, como treliças, pórticos e grelhas. Além do diferencial da análise das estruturas em um ambiente *on-line*, é possível também visualizar resultados parciais de cada etapa de desenvolvimento do problema. O *AME-WEB* possui uma entrada customizada para cada modelo de estrutura e proporciona a visualização gráfica da estrutura de forma síncrona com a definição de suas coordenadas e após a análise do modelo, com a apresentação dos esforços internos e reações dos apoios.

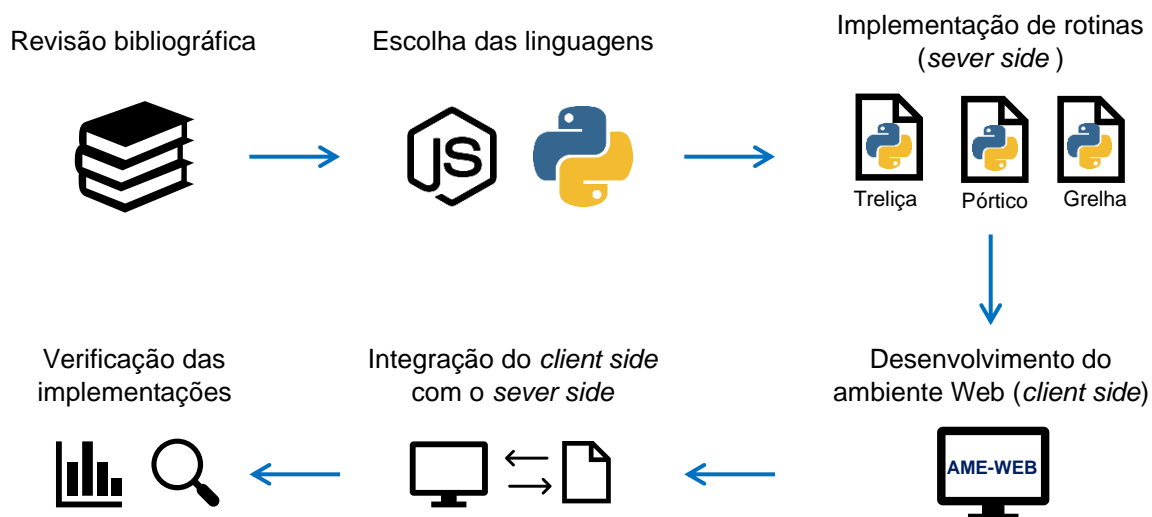
O *AME-WEB* é uma ferramenta gratuita de viés educacional desenvolvida para auxiliar nos estudos de teoria das estruturas. Como forma de verificação do ambiente

proposto, são realizadas algumas aplicações, comparando os resultados obtidos pelo *AME-WEB* com respostas encontradas em literatura e em outros *softwares* já validados e de amplo uso, como o *Ftool*.

2 METODOLOGIA

Para construir o ambiente *web* proposto, a metodologia de desenvolvimento do trabalho é baseada nas seguintes etapas: i) estudo sobre análise matricial de estruturas planas; ii) escolha de linguagens de programação para desenvolver a ferramenta proposta; iii) implementação de rotinas para análise de treliças, pórticos e grelhas; iv) Desenvolvimento do *client side* da aplicação; v) Integração do *client side* com as rotinas elaboradas (*server side*) e vi) realização de aplicações para verificar a implementação realizada. Essas etapas são ilustradas na Figura 1 e são melhor detalhadas nas subseções seguintes.

Figura 1 – Etapas da metodologia para desenvolvimento da aplicação *web* proposta.



Fonte: Autores, 2022

2.1 Estudo sobre Análise Matricial de Estruturas

O desenvolvimento desta aplicação surge como um produto da disciplina Análise Matricial de Estruturas do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas (UFAL). Nesse sentido, previamente ao início do desenvolvimento do programa, todo um estudo sobre a construção matricial para a solução de problemas hiperestáticos foi realizado, além de uma revisão sobre o conteúdo de Teoria das Estruturas.

Para a resolução das estruturas é utilizada a formulação matricial do Método dos Deslocamentos. Conforme Kassimali (2021), neste método, também chamado de Método da Rigidez, as principais incógnitas são os deslocamentos das articulações, que são determinadas resolvendo as equações de equilíbrio da estrutura. Com os deslocamentos nodais conhecidos, as forças incógnitas são obtidas por meio de considerações de compatibilidade e das relações força-deslocamento da barra. Embora qualquer método

possa ser usado, a maioria dos *softwares* comerciais disponíveis para análise estrutural é baseado no Método da Rigidez Direta.

2.2 Linguagens de programação adotada

O desenvolvimento da aplicação *web* é baseada no modelo cliente-servidor. O modelo cliente possibilita a execução da aplicação diretamente no navegador do usuário, sem a necessidade de *download* do *software* e possibilitando o uso da ferramenta em diferentes aparelhos que contenham o navegador disponível. Já a integração do modelo servidor proporciona uma maior facilidade de manutenção e uso, bem como uma melhor segurança e armazenamento dos dados.

Para o desenvolvimento das rotinas e, por conseguinte, elaboração do *server side*, foi adotada a linguagem de programação *Python* (VAN ROSSUM e DRAKE, 2009), tendo em vista que é uma linguagem de programação de alto nível, interpretada de *script*, imperativa, orientada a objetos e amplamente utilizada na UFAL e muitas outras instituições. Ademais, para a construção do *cliente side* é adotado *JavaScript*, pois é uma linguagem de programação de uso geral, aplicada principalmente para desenvolvimento *web* e a ampla maioria dos sites e navegadores modernos (FLANAGAN, 2004).

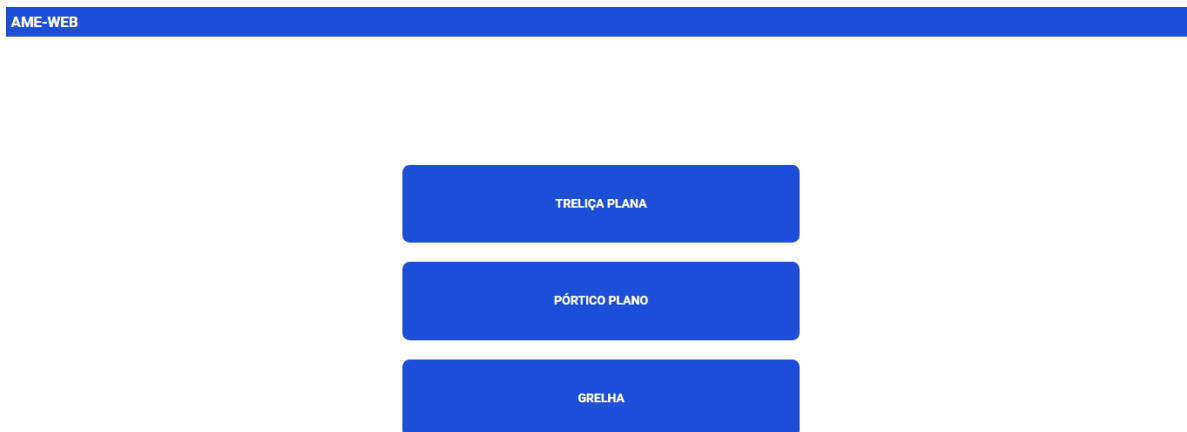
2.3 Implementação de rotinas (*server side*)

O *server-side* diz respeito ao lado do servidor. Assim, as rotinas desenvolvidas nesta etapa são aplicações que rodam diretamente no servidor. Diante disso, para cada modelo estrutural (treliça, pórtico e grelha) foi elaborado um conjunto de rotinas para geração do modelo, solução dos deslocamentos e das reações, cálculo dos esforços internos e retorno dos resultados.

2.4 Desenvolvimento do *client side*

O *client side* é a etapa do programa conectada diretamente ao usuário. Ela foi desenvolvida com entradas particulares para cada tipo de modelo estrutural (ver Figura 2). É a partir dela que o usuário consegue fornecer os dados do modelo (ver Figura 3) e encaminhar para o *server side*.

Figura 2 – Página inicial do Ambiente desenvolvido
(AME-WEB).



Fonte: Autores, 2022

Figura 3 – Entrada dos dados para o modelo de Pórtico Plano.

AME-WEB

Entrada de dados - Pórtico Plano

Entrada dos nós

x: y: **Inserir Nó**

Nó	Coordenada x	Coordenada y
Nó 1	0,00	0,00
Nó 2	0,00	4,00
Nó 3	5,00	4,00
Nó 4	5,00	0,00



Entrada dos apoios

Selecione o nó: Restrição em x (deslocamento): Sim Não Restrição em y (deslocamento): Sim Não Restrição em z (rotação): Sim Não **Inserir Apoio**

Apoio	Localização	Restrição de deslocamento em x	Restrição de deslocamento em y	Restrição de rotação em z
Apoio 1	Nó 1	Sim	Sim	Sim
Apoio 2	Nó 4	Sim	Sim	Não

Entrada dos materiais

Módulo de elasticidade longitudinal: **Inserir Material**

Material	Módulo de elasticidade longitudinal (E)
Material 1	100000000,00

Entrada das seções transversais

Área: Momento de inércia: **Inserir Seção**

Seção transversal	Área	Momento de inércia
Seção 1	0,09	0,000675

Entrada dos elementos

Primeiro nó: Segundo nó: Material: Seção transversal: **Inserir Elemento**

Elemento	Primeiro nó	Segundo nó	Material	Seção transversal
Elemento 1	Nó 1	Nó 2	Material 1	Seção 1
Elemento 2	Nó 2	Nó 3	Material 1	Seção 1
Elemento 3	Nó 4	Nó 3	Material 1	Seção 1

Entrada das cargas nodais

Selecione o nó: Fx: Fy: Mz: **Inserir Carga Nodal**

Carga nodal	Localização	Fx	Fy	Mz
Carga 1	Nó 2	10,00	0,00	0,00

Entrada das cargas distribuídas

Selecione o elemento: Selecione o tipo de carga: qx: qy: **Inserir Carga Distribuída**

Carga distribuída	Localização	Tipo de carga	qx	qy
Carga 1	Elemento 2	Uniforme (Global)	0,00	-2,00

Cálculo do modelo

Exemplo 1 **Calcular**

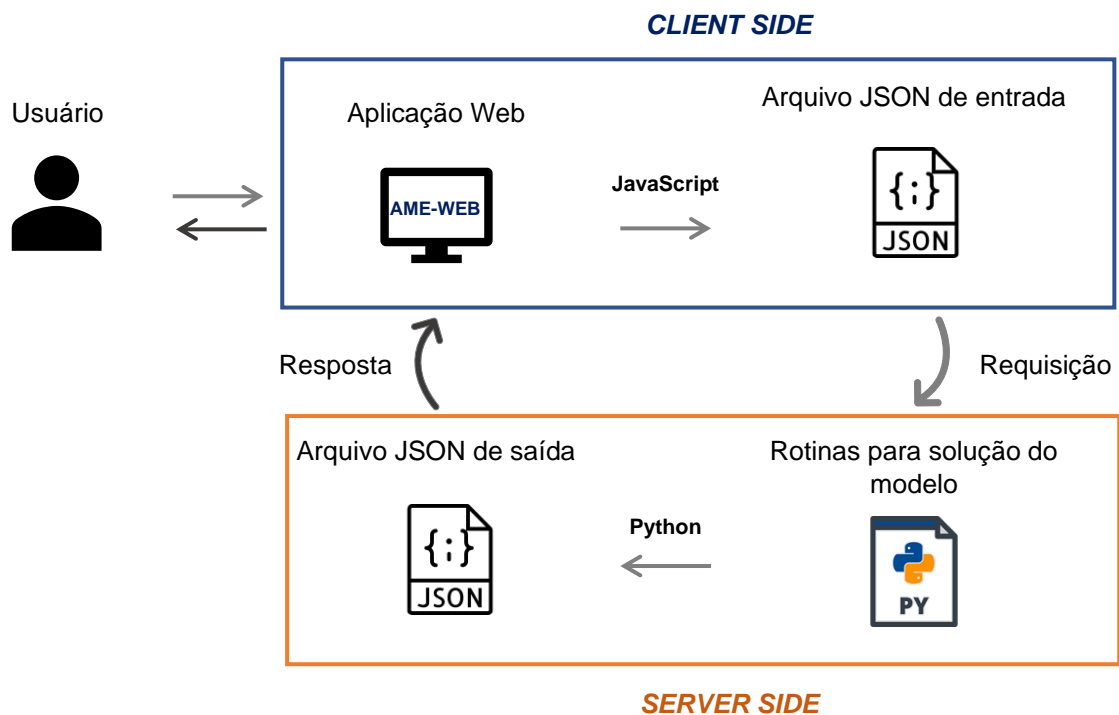
Fonte: Autores, 2022

2.5 Integração do *client side* com o *server side*

A partir dos resultados fornecidos pelo usuário no *client side*, é gerado um arquivo de texto com todas as informações do modelo. Diante disso, conforme o tipo de estrutura selecionada, o programa computacional específico é chamado. Assim, os cálculos são realizados e é retornado um arquivo de resultados que é utilizado novamente pelo *client side* para o pós-processamento. A Figura 4 resume como ocorre a integração entre o *client side* e o *server side* para a construção do ambiente *web* proposto. Ademais, a Figura 5 mostra a visualização dos resultados para um dos modelos propostos.



Figura 4 – integração entre o *client side* e o *server side*.



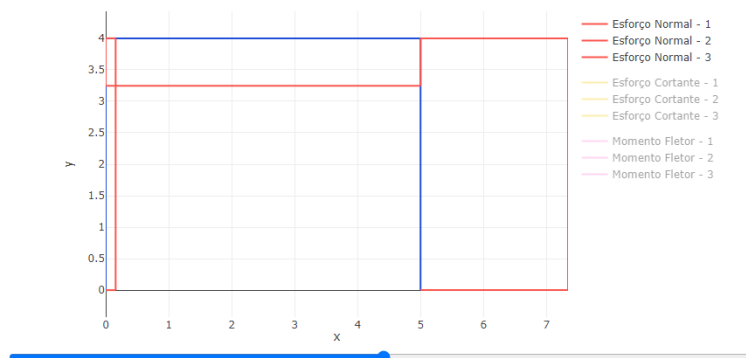
Fonte: Autores, 2022

Figura 5 – Visualização dos resultados para um exemplo de pórtico plano.

AME-WEB

Resultados - Pórtico Plano - Exemplo 1

Diagramas dos esforços internos solicitantes



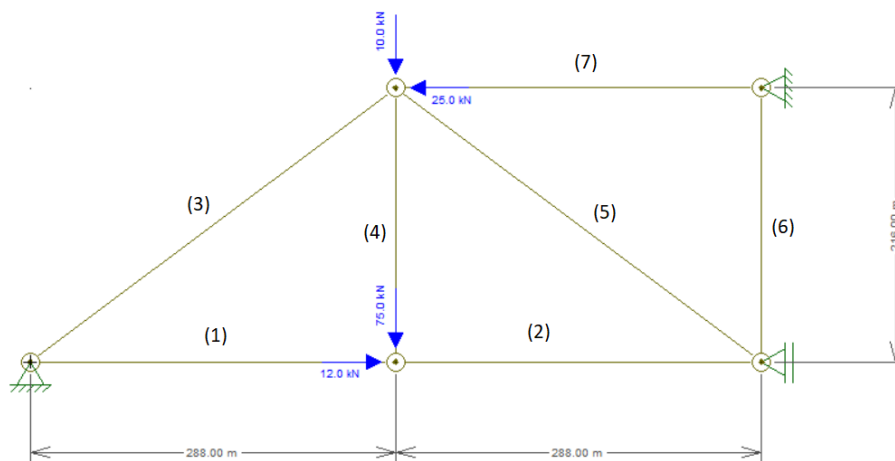
Fonte: Autores, 2022

3 APLICAÇÕES

Visto que a aplicação *web* desenvolvida se propõe a realizar análises mecânicas de treliças, pórticos e grelhas bidimensionais e por se tratar de uma ferramenta para fins educacionais, torna-se estritamente necessária avaliar a representatividade da aplicação para cada modelo estrutural disponibilizado na interface do *AME-WEB*. Nesse sentido, são realizadas análises comparativas com casos simulados no *Ftool* (MARTHA, 2002) para verificação do comportamento de estruturas bidimensionais, tais como treliças e pórticos, e com um caso disponível na literatura para o modelo de grelha.

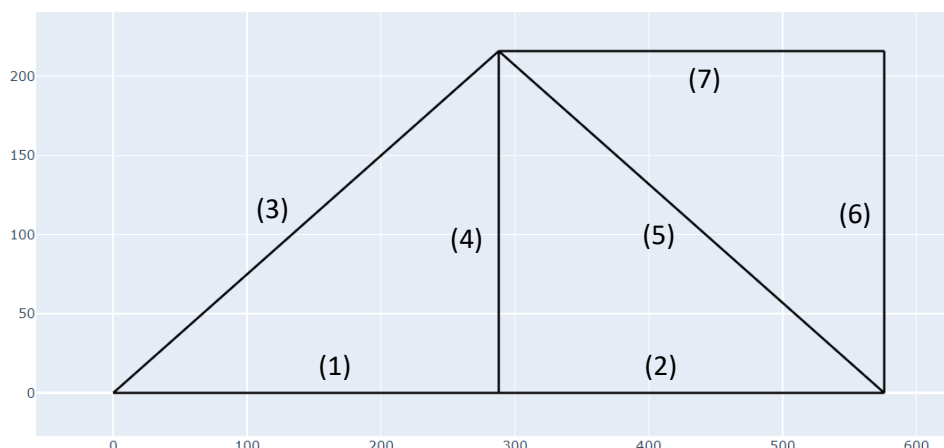
Na primeira aplicação, é modelada uma treliça hiperestática no *Ftool* (MARTHA, 2002) e na aplicação *AME-WEB*. Na Figura 6 é apresentada a configuração da treliça visualizada pelo *Ftool* (MARTHA, 2002) e na Figura 7 a visualizada no *AME-WEB*.

Figura 6 – Treliça hiperestática analisada (apresentação no *Ftool*).



Fonte: Autores, 2022

Figura 7 – Treliça hiperestática analisada (apresentação no *AME-WEB*).



Fonte: Autores, 2022

No exemplo avaliado, os elementos de 1 a 5 e os elementos 6 e 7 possuem, respectivamente, rigidezes axiais EA_1 e EA_2 , tal que $\frac{EA_1}{EA_2} = \frac{29}{15}$. A verificação deste modelo é realizada mediante a comparação dos valores dos esforços axiais nas barras. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 1, os quais demonstram a acurácia do *AME-WEB* para o módulo de treliça.

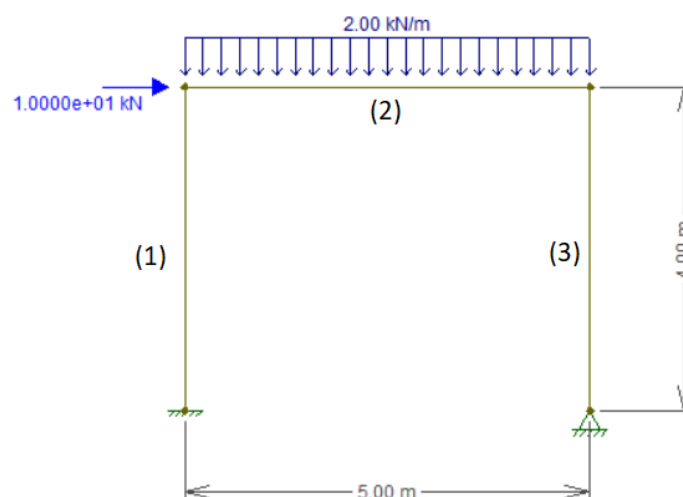
Tabela 1 - Esforços axiais nas barras em kN.

Barra	Esforço axial no <i>Ftool</i>	Esforço axial no <i>AME-WEB</i>
1	6,000	6,000
2	-6,000	-6,000
3	-85,173	-85,173
4	75,000	75,000
5	-56,493	-56,493
6	33,896	33,896
7	2,056	2,056

Fonte: Autores, 2022

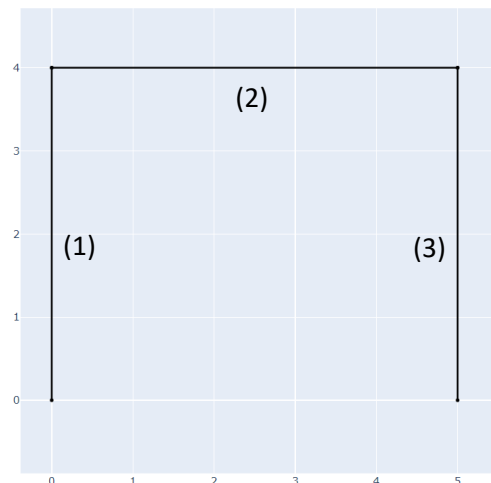
Em uma segunda aplicação foi analisada a representatividade a representatividade do módulo de pórticos, utilizou-se, novamente, o programa *Ftool* (MARTHA, 2002) para modelar o pórtico hiperestático, apresentado na Figura 8, e obter os dados de referência para a análise comparativa realizada com o mesmo pórtico modelado no *AME-WEB* (Figura 9).

Figura 8 – Pórtico hiperestático analisado, modelado no *Ftool* (MARTHA, 2002).



Fonte: Autores, 2022

Figura 9 – Pórtico hiperestático analisado, modelado no *AME-WEB*.



Fonte: Autores, 2022

Para validar o modelo de pórtico, os momentos fletores nas extremidades de cada barra, obtidos no *Ftool* (MARTHA, 2002) e no *AME-WEB*, foram dispostos para comparação na Tabela 2. Analisando os valores obtidos, nota-se que os dados da aplicação proposta estão de acordo com o programa de referência *Ftool* (MARTHA, 2002).

Tabela 2 - Momentos fletores nas extremidades das barras em kNm.

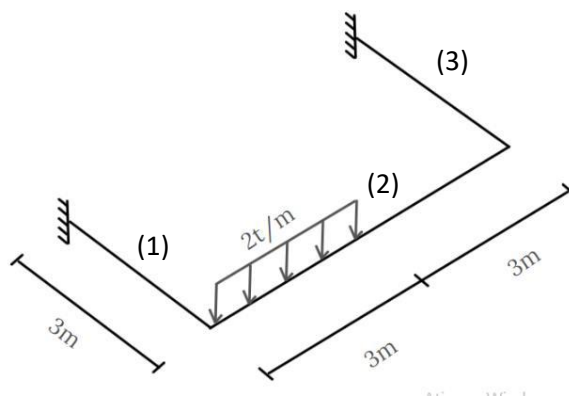
Barra	Momento fletor no <i>Ftool</i>		Momento fletor no <i>AME-WEB</i>	
	Nó i	Nó j	Nó i	Nó j
1	-18,155	9,788	-18,155	9,788
2	9,788	-12,058	9,788	-12,058
3	0,000	12,058	0,000	12,058

Fonte: Autores, 2022

Por fim, como terceira aplicação, faz-se necessário verificar o módulo de grelhas do *AME-WEB*. Este último foi validado com base no caso apresentado na Figura 10, uma grelha de um problema proposto em Sussekind (2003) $EI/GJ = 1,5$. Na Figura 11, apresenta-se a mesma grelha modelada na aplicação proposta.

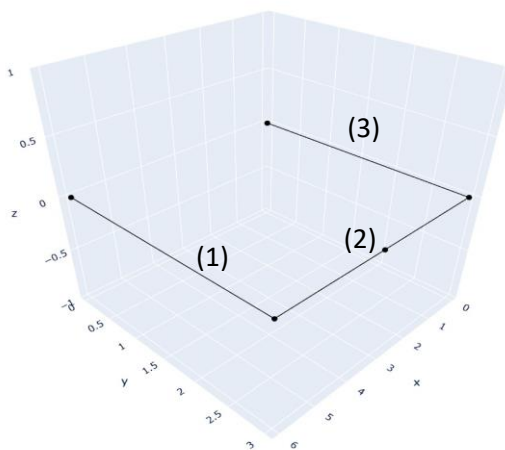
Os momentos fletores nas extremidades de cada barra pertencente à grelha do problema proposto por Sussekind (2003) foram comparados aos dados obtidos pela aplicação *AME-WEB*, valores estes dispostos na Tabela 3. Apesar de haver pequenas variações entre os valores, ocasionados pela precisão numérica utilizada por Sussekind (2003), verifica-se a compatibilidade entre os dados de referência e os valores obtidos pela ferramenta proposta, atestando a representatividade do módulo de grelhas.

Figura 10 – Grelha hiperestática analisada, adaptada de Sussekind (2003).



Fonte: Oliveira, 2022.

Figura 11 – Grelha hiperestática analisada, modelada no AME-WEB.



Fonte: Autores, 2022

Tabela 3 - Momentos fletores nas extremidades das barras em tf.m.

Barra	Sussekind (2003)		AME-WEB	
	Nó i	Nó j	Nó i	Nó j
1	-12,34	0,84	-12,339	0,835
2	-0,88	-1,52	-0,873	-1,527
3	-0,84	-5,66	-0,835	-5,661

Fonte: Autores, 2022

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para avaliar a acurácia da aplicação *web* desenvolvida, foram propostas 3 aplicações, avaliando modelos de treliça, pórtico e grelha, respectivamente. Os resultados da análise das estruturas propostas nos dois primeiros estudos foram comparados com os resultados do *software Ftool*, uma ferramenta educacional já verificada e bastante utilizada no ambiente acadêmico. Já para a verificação da terceira aplicação, foi utilizado um exemplo resolvido do volume I do livro de Sussekind (2003), haja vista que o *Ftool* não possibilita a análise de grelhas. Os resultados obtidos nas 3 aplicações convergiram para os resultados das referências utilizadas, evidenciando a eficácia do ambiente *web* desenvolvido.

O *AME-WEB* ainda se encontra em desenvolvimento, sendo necessária a implementação do *front-end* relacionada à folha de cálculo dos resultados e a definição de um ambiente para a hospedagem da aplicação. Após a finalização dessas etapas, o *AME-WEB* será implementado nas disciplinas de Teoria das Estruturas 1 e 2 dos cursos de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas, servindo como ferramenta de apoio para o estudo da análise estrutural.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem a Universidade Federal de Alagoas (UFAL) por todo apoio e espaço disponibilizado para a realização desse estudo.

REFERÊNCIAS

BANDEIRA, Alex A.; GONZALEZ, Marcio S. Didática para o ensino superior aplicada às disciplinas de teoria das estruturas e método dos elementos finitos. 2008. In: **XXXVI Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 2008, São Paulo**. Anais. São Paulo. Disponível em: <http://www.abenge.org.br/cobenge/legado/arquivos/11/artigos/3307.pdf>. Acesso em 15 maio 2022.

BANDEIRA, Alex Alves; CHIVANTE, Maurício Roberto de Pinho. A interdisciplinaridade da análise não linear de estruturas na engenharia civil. **Revista de Ensino de Engenharia**, v. 25, n. 1, 2008.

BRANCHIER, Henrique Scalcon. Contribuições dos softwares na aprendizagem de análise e cálculo de elementos estruturais. Acesso em: 15 maio 2022. Univates, Lajeado, Novembro, 2017. Disponível em: <https://www.univates.br/bdu/bitstream/10737/1924/1/2017HenriqueBranchier.pdf>. Acesso em: 15 maio 2022.

FLANAGAN, David. **JavaScript: o guia definitivo**. Bookman Editora, 2004.

KASSIMALI, Aslam. **Matrix analysis of structures**. Cengage Learning, 2021.

MARTHA, Luiz Fernando. FTOOL (MARTHA, 2002)- Um programa gráfico-interativo para ensino de comportamento de estruturas. **Versão educacional**, v. 2, p. 33, 2002.

OLIVEIRA, Christian Carneiro de. **Contribuição à análise de pavimentos em concreto: emprego da analogia de grelha e da rigidez de pilares**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharel em Engenharia Civil. Universidade Federal de Alagoas – UFAL, Maceió, Fevereiro, 2022.

SUSSEKIND, José Carlos. **Curso de Análise estrutural**. vol. I. Editora Globo. 4ª ed. Porto Alegre, 2003.

VAN ROSSUM, Guido; DRAKE, Fred. L. **Python 3 Reference Manual**. CreateSpace, Scotts Valley, CA. 2009.

AME-WEB: A SIMULATION ENVIROMENT FOR ANALYSIS OF PLANE STRUCTURES USING DIRECT STIFFNESS METHOD

Abstract: *The study of the theory and mechanics of structures is essential for the training of every civil engineer. His analysis involves concepts of vector and matrix algebra, trigonometry, system of linear equations, numerical methods and mechanics of deformable solids. However, due to the complexity of the procedures for solving the structural systems, there is a learning difficulty on the part of the students. In this context, the use of computer programs appears as an additional tool to help understand the behavior of structures, as well as verify results and steps in problem solving, especially for those who intend to pursue a career in the area of structures. Therefore, this work presents the educational tool AME-WEB, a web application developed to perform the analysis of two-dimensional structures, such as trusses, frames and grids, in an interactive and simplified platform. The tool's main differentials are the practicality of its use online and the possibility of verifying partial results and steps to solve the problem, such as, for example, the observation of the stiffness matrix of the structure. In addition, the environment also allows the graphic visualization of the resolved structural system and its mechanical demands. AME-WEB was developed using JavaScript and Python programming languages in order to provide interoperability to the application during its use and has a different customization for each type of structure available on the platform. The validation of the tool is carried out through the analysis of examples with results available in the literature, as well as the comparison with already validated software.*

Keywords: *Matrix Analysis of Structures, Computational Mechanics, Web application.*