

2FRAME eDU: SOFTWARE WEB PARA ANÁLISE ESTRUTURAL NÃO LINEAR GEOMÉTRICA DE PÓRTICOS PLANOS

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2023.4499

João Fyllipy de Lima Nunes - jfyllipy@gmail.com
UFAL

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

Resumo: Este trabalho desenvolveu um software para análise estrutural não linear geométrica de pórticos planos. Assim, busca-se utilizar os métodos matriciais, mais precisamente o Método da Rigidez Direta, juntamente ao Método Iterativo de Dois Ciclos para a não linearidade geométrica e a teoria da mecânica dos sólidos. Calcula-se, a partir de um pórtico modelado pelo usuário, a sua matriz de rigidez a partir dos parâmetros materiais inseridos e suas forças externas e internas. Nesse contexto, o aplicativo estará disponível tanto para estudantes de graduação e pós-graduação quanto para profissionais da área estrutural que necessitem de análises não lineares via web no modelo de computação em nuvem, utilizando o framework React.JS para o front-end. Seus resultados foram comparados com dados obtidos de exemplos resolvidos na literatura.

Palavras-chave: Análise Matricial de Estruturas, Análise Não Linear Geométrica, Desenvolvimento de Aplicativos de Engenharia, Computação em Nuvem

2FRAME eDu: SOFTWARE WEB PARA ANÁLISE ESTRUTURAL NÃO LINEAR GEOMÉTRICA DE PÓRTICOS PLANOS

1 INTRODUÇÃO

A análise estrutural é uma das principais atividades realizadas no projeto de estruturas civis e mecânicas. O objetivo da análise estrutural é determinar as forças e os esforços que atuam na estrutura, bem como sua resposta à carga aplicada. Com a evolução da tecnologia, o uso de ferramentas computacionais tem sido cada vez mais comum nesta área do conhecimento, permitindo que projetistas e engenheiros projetem estruturas mais eficientes e seguras. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um *software web* que permita ao usuário realizar a análise estrutural de pórticos planos, considerando a não linearidade da geometria da estrutura. Na análise estrutural é de extrema importância que tanto o engenheiro quanto o aluno de graduação ou pós-graduação em estruturas tenham a capacidade de visualizar o comportamento da estrutura em estudo sob carregamentos. Apesar de existirem *softwares* voltados à análise, como o SAP2000, Robot ou até mesmo gratuitos, como o Ftool, ainda há a necessidade por parte dos profissionais e estudantes em utilizar um *software* que possibilite a análise estrutural não linear de pórticos de forma rápida e prática. Assim, o desenvolvimento deste *software web* é uma contribuição para a análise estrutural, pois permite que os engenheiros projetem estruturas mais eficientes e seguras, levando em consideração o comportamento não linear geométrico, permitindo a obtenção de informações importantes sobre a capacidade de carga da estrutura de forma prática e rápida. Indo além, este trabalho abre diversas possibilidades, visto que se pode acrescentar, posteriormente, por exemplo, um módulo de dimensionamento para estruturas de aço, conforme NBR8800:2008.

Nesse contexto, o *software* foi desenvolvido para a *web* (*cloud computing*), permitindo a análise estrutural não linear geométrica, utilizando o Método da Rigidez Direta. O *software* permite uma interação com o usuário (*frontend*) utilizando o React.JS e linguagem de programação Javascript, e proporciona a visualização gráfica dos elementos de barra dos pórticos planos. Tem a intenção de contribuir com mais uma oportunidade de difusão de *software* para uso dos estudantes de graduação e pós-graduação, bem como os professores das disciplinas da área de estrutura, em especial as disciplinas que possuam análise de segunda ordem em suas ementas.

2 DA FORMULAÇÃO PARA A ANÁLISE ESTRUTURAL

2.1 Método da Rigidez Direta

A deformação de um material mantém relação direta com a tensão aplicada proporcionalmente a uma constante elástica E , dentro do regime elástico-linear de deformação. O método da rigidez direta faz o uso dessa estratégia ao calcular os esforços atuantes em cada barra do sistema estrutural, por meio da Equação (1) e, por meio do Princípio da Superposição dos Efeitos, representar o comportamento da estrutura como um todo (KASSIMALI, 2010).

$$\{F\} = [k]\{d\} \quad (1)$$

A matriz $[k]$ contém os chamados coeficientes de rigidez k de cada elemento e possui ordem $3n$, sendo n a quantidade de nós. Estes são coeficientes de proporcionalidade para relacionar deslocamentos unitários com deslocamentos reais. Ou seja: é razoável entendê-los como sendo o efeito resultante de um deslocamento unitário que, ao se relacionar com o deslocamento real, leva à força externa aplicada.

$$\beta_{i0} + X_{ni} = K_i D_i = 0 \quad (2)$$

A Equação (2) descreve o método dos deslocamentos. Cada deslocamento é calculado nos nós da estrutura e cada um deles possui, no caso plano, 3 graus de liberdade e 3 eixos de atuação de força, conforme ilustrado na figura 9. Ou seja: uma estrutura é composta por $3n$ ações e uma igual quantidade de graus de liberdade. O vetor força $\{F\}$ e o vetor deslocamento $\{d\}$ são escritos como segue:

$$\{F\} = \begin{Bmatrix} f_x^i \\ f_y^i \\ m^i \\ f_x^j \\ f_y^j \\ m^j \end{Bmatrix} \quad \{d\} = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ \theta_i \\ u_j \\ v_j \\ \theta_j \end{Bmatrix} \quad (3)$$

O subíndice na matriz $\{u\}$ e o superíndice na matriz $\{F\}$, ambos genéricos, denotam os nós de início i e fim da barra j , assumindo os índices correspondentes ao respectivo nó. Com relação ao vetor $\{u\}$ as variáveis u , v e θ são atribuídas, respectivamente, ao deslocamento horizontal, deslocamento vertical e rotação. A visualização da posição dos elementos pode ser melhor compreendida ao olhar, por exemplo, a indicação dos elementos do vetor de força $\{F\}$ na figura 1.

Figura 1 – Forças representadas no vetor de forças $\{F\}$.



Fonte: Autores

2.2 Análise Não Linear Geométrica

A análise estrutural busca compreender como as estruturas reagem às forças externas e essa análise deve ser feita da maneira mais rigorosa possível. Dessa forma, faz-se necessário compreender que há situações em que a estrutura não se comporta de acordo com a lei de Hooke, ou seja, obedecendo a uma relação linear entre tensão e deformação (não linearidade física).

Também é possível que deslocamentos laterais excessivos provoquem o aparecimento de momentos fletores não previstos inicialmente (não linearidade geométrica). Ambas as situações, não linearidades físicas e/ou geométricas, ocorrem em edifícios altos, elementos com fissuração, inconsistências no material, dentre outras. A esse tipo de análise se dá o nome de "análise não linear" e é de fundamental importância para o melhor entendimento do comportamento do sistema estrutural (PEREIRA, 2002). A análise não linear também é conhecida como análise de 2ª ordem. Geralmente, diante de processos matemáticos complexos que os métodos rigorosos utilizam, é preferível utilizar métodos simplificados que, apesar de sua simplicidade comparada aos métodos rigorosos, tem mostrado boa precisão, como se observa na literatura. Um desses métodos de análise não linear geométrica consiste, como Moura e Barbirato (2020) descrevem, em analisar as alterações que deslocamentos, ocasionados por forças externas, provocam nos Esforços Internos Solicitantes (EIS). Para isso, aplica-se uma carga horizontal fictícia, de modo a tirar a estrutura de sua condição não deslocada, e verificar como os carregamentos atuantes se comportam nesta nova configuração deslocada. O processo é, então, novamente realizado, desta vez com a configuração deslocada e novamente analisado. Ou seja: trata-se de um método iterativo, que busca a convergência ao equilíbrio da estrutura deslocada (SILVA; LAVALL, 2004).

A importância dessas metodologias simplificadas fica clara quando a NBR 8800 (2008) apresenta um modo simplificado, chamado de Método da Amplificação dos Esforços Solicitantes (MAES), também chamado Método B1, B2, como forma de reduzir o esforço laboral do projetista. Há métodos, entretanto, que levam em consideração a estrutura deformada de forma implícita em suas formulações, como é o caso do Método dos Dois Ciclos Iterativos (aqui chamado de M2CI). Este trabalho levou em consideração apenas a não linearidade geométrica.

É importante salientar que os efeitos de segunda ordem tem um impacto significativo em estruturas de grande altura, ou seja, aumentam conforme se adicionam mais pavimentos. A variação dos deslocamentos, dessa forma, mostra uma relação linear com a altura da edificação (KONAPURE; DHANSHETTI, 2015). De forma a diminuir a carga computacional para o cálculo do esforço de segunda ordem, pode-se adotar metodologias simplificadas. No desenvolvimento deste trabalho, dada a necessidade de diminuir o esforço computacional motivado pelo processamento ser realizado no lado do *client*, optou-se por seguir esta abordagem e, portanto, utilizar-se-á, graças a sua reduzida necessidade de esforço computacional, o método sugerido por Chen e Lui (1991), chamado Método dos Dois Ciclos Iterativos. O método consiste em realizar dois ciclos de cálculo: o primeiro ciclo utiliza a matriz $[k]$ - que no contexto deste método se atribui a nomenclatura $[k_L]$ para diferenciar da matriz de rigidez atualizada - não sofre qualquer tipo de modificação de segunda ordem, ou seja, é realizada apenas uma análise de primeira ordem convencional. Após a realização do primeiro ciclo e, conseqüentemente, a obtenção dos EIS, inclui-se os efeitos da não linearidade geométrica através da adoção de uma matriz de rigidez geométrica $[k_g]$, que depende desses esforços internos obtidos na análise do primeiro ciclo.

Inicia-se em seguida o segundo ciclo de cálculo em que a matriz de rigidez $[k_L]$ é somada a matriz de rigidez geométrica $[k_g]$, resultando em uma matriz de rigidez

atualizada, como mostra a Equação (4) (em que P nesta equação se refere ao esforço axial na barra). Por fim, efetua-se o cálculo convencional, como se fosse uma análise linear, mas utilizando a matriz de rigidez atualizada.

$$[k] = [k_L] + [k_g] \quad (4)$$

O Quadro 1 apresenta um quadro resumo das etapas do método.

Quadro 1 – Etapas do Método dos Dois Ciclos Iterativos.

Primeiro ciclo	Passo 1	Realizar uma análise linear da estrutura.
Segundo ciclo	Passo 2	Utilizando os esforços obtidos no passo 1, calcula-se a matriz de rigidez geométrica $[k_g]$.
	Passo 3	Soma-se a matriz $[k_g]$ com a matriz $[k_L]$ gerando uma matriz de rigidez atualizada.
	Passo 4	Faz-se uma nova análise, mas utilizando a matriz de rigidez atualizada.

Fonte: Autores

Dentro do método é possível a utilização de uma matriz de rigidez geométrica $[k_g]$ ainda mais complexa, utilizando os outros esforços internos além do axial, como a sugerida por Rodrigues (2017). Porém, como observado nos resultados obtidos o aparato matemático apresentado por Chen e Lui (1991) apresentou resultados satisfatórios.

3 DO SOFTWARE 2FRAME

O programa fruto deste trabalho foi pensado para suprir a necessidade de análise de engenheiros e estudantes de engenharia para o cálculo rápido, fácil e funcional de estruturas reticuladas planas. Seu uso e interpretação dos resultados é de inteira responsabilidade do usuário, resguardando o desenvolvedor de qualquer implicação. A função do programa é de servir como ferramenta de consulta e não de cálculo final do modelo, devendo o aluno, pesquisador ou engenheiro revisar e validar os resultados. O programa é chamado 2Frame. 2 (*two* em inglês) remete a preposição *to* do inglês, significando "para", enquanto Frame vem também do inglês, significando, em tradução aplicada a este contexto, "pórtico". Ou seja: é um programa "para pórticos". Além disso, o numeral 2 indica a possibilidade de realização de análises em segunda ordem.

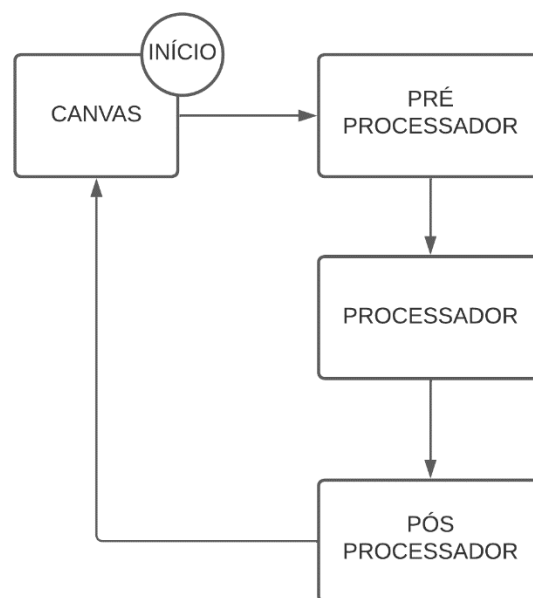
Dentre as diversas opções de programação a Linguagem JavaScript se destacou, pois é a sintaxe *de facto* para desenvolvimento *web*. Precisa ser, no entanto, aliada a linguagem de marcação HTML para desenvolver páginas *web*. Desta forma, utilizar-se-á a versão ECMAScript 6 do JavaScript.

Com o avanço dos dispositivos móveis e da estrutura de rede da internet, os desenvolvedores de aplicativo têm se voltado para o desenvolvimento *web*. Isso possibilita a existência de aplicativos em nuvem, ou seja, aplicativos que estão armazenados por um servidor e podem ser acessados via *browser* de qualquer dispositivo conectado à *internet*. Esse modelo de produção em desenvolvimento de sistemas é chamado de *cloud computing*. É possível compreender este tipo de arquitetura de *software* ao fazer analogia de uma corda com dois nós em cada extremidade. Em um nó o usuário entra e recebe dados, visualiza a aplicação e, geralmente, possui um UX (*User Experience*) mais amigável, chamado de *frontend*, enquanto o outro nó, chamado de *backend* processa as requisições,

realiza os cálculos, dentre outras tarefas, de forma a centralizar o processamento, aliviando a carga computacional no lado do cliente. Toda essa comunicação é feita por meio da "corda" que, nesta analogia, é a própria internet. Essa abordagem permite que o usuário possa interagir com a aplicação em qualquer momento e em qualquer lugar, bastando apenas o acesso à *internet*.

A arquitetura de uma aplicação é a forma em que seus diferentes módulos, funções e dados são organizados, seguindo uma ordem lógica. Sua função principal é facilitar o desenvolvimento e manutenção do código. A aplicação fruto deste trabalho está dividida, conforme a Figura 2, em 4 grandes módulos: Pós-processador, Processador, Pré-processador e Canvas.

Figura 2 – Arquitetura da aplicação



Fonte: Autores

O Módulo de Canvas armazena toda a lógica da interface gráfica do usuário. Por conta disso, ela faz o gerenciamento dos outros módulos realizando a troca de dados e supervisionando as requisições do usuário. O Pré-processador faz o tratamento dos dados de entrada do usuário. É responsável por converter a entrada gráfica em *arrays* de coordenadas e forças, bem como a manipulação de dados geométricos e de materiais. Para solucionar o sistema matricial o módulo de processamento recebe, gerenciado pelo Canvas, os dados tratados pelo Processador e realiza os cálculos necessários. Após a solução do modelo da estrutura, os resultados são geridos e organizados pelo Pós-processador, enviando os resultados tratados para a exibição pelo Canvas. Todo o tratamento de dados é feito aproveitando o fato de o Javascript ser uma linguagem orientada a objetos. Dessa maneira, nós e barras são instanciados como objetos e sua manipulação se torna simplificada pelos diferentes módulos, sem a necessidade de funções e métodos complexos.

Para possibilitar um maior controle do código sobre as funções de desenho, optou-se por não utilizar nenhum *framework* gráfico externo, preferindo a criação de uma *engine*

2D própria, batizada de *Object Display on Canvas Engine* ou *ODCE*. Essa decisão foi motivada devido ao maior controle que este autor teria em relação aos aspectos gráficos da aplicação e a não necessidade de depender de licenças externas. Uma *engine* gráfica é um conjunto de funções que propiciam que gráficos, nesse caso 2D, sejam gerados, transformando as instruções lógicas em equações lineares para exibir as formas necessárias e requisitadas na tela. A *engine 2D* aqui desenvolvida é rudimentar, utilizando os métodos de *canvas* do próprio Javascript. Por se tratar de algo bem simples e rudimentar, foi implementado apenas um espaço vetorial em metros e uma transformação de escala. Uma das características da *ODCE* é a possibilidade de escalonar o desenho e modificar o espaçamento entre as linhas de *grid*. Esse controle é possível com a barra de ferramentas inferior. Uma descrição da barra de ferramentas inferior é fornecida na Tabela 2.

Figura 3 – Barra de ferramentas inferior.

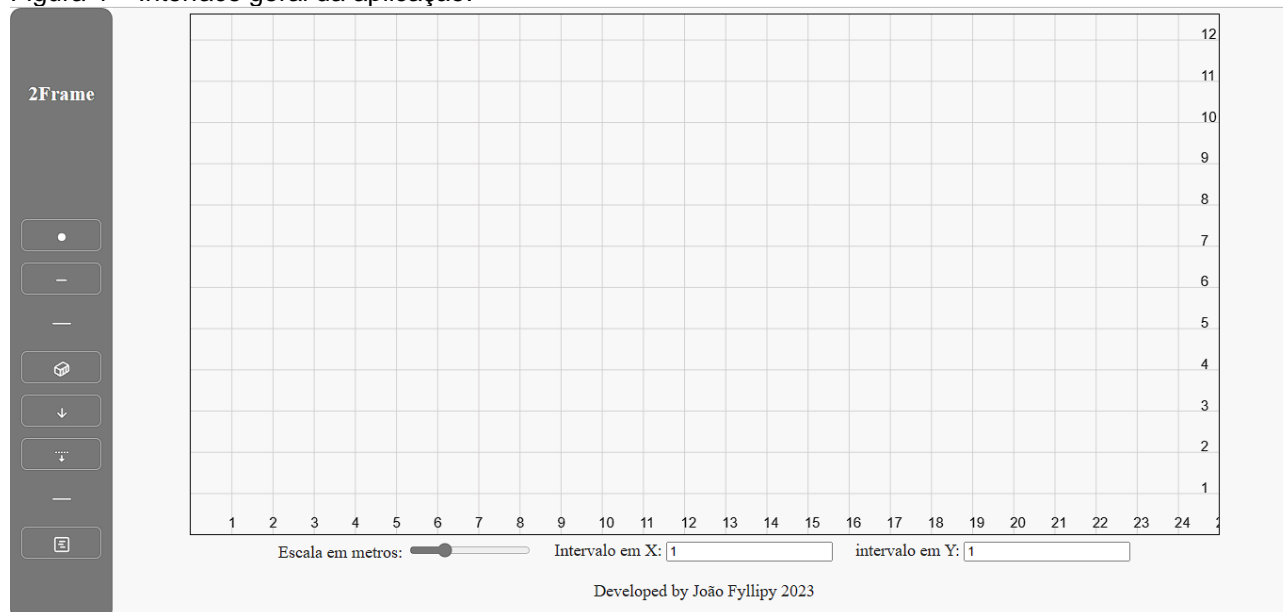


Fonte: Autores

A interface do usuário foi pensada levando em conta as seguintes diretrizes: experiência do usuário (UX), simplicidade e leveza.

Essas diretrizes foram seguidas sempre que possível, culminando com a interface padrão da aplicação (Figura 4), a qual é dividida em 4 áreas principais: barra lateral, barra inferior, mesa de desenho e *pop-ups* (ou janelas).

Figura 4 – Interface geral da aplicação.



Fonte: Autores

O Quadro 2 mostra a função de cada uma dessas áreas, aqui chamada de elementos de *UI* (*User Interface*).

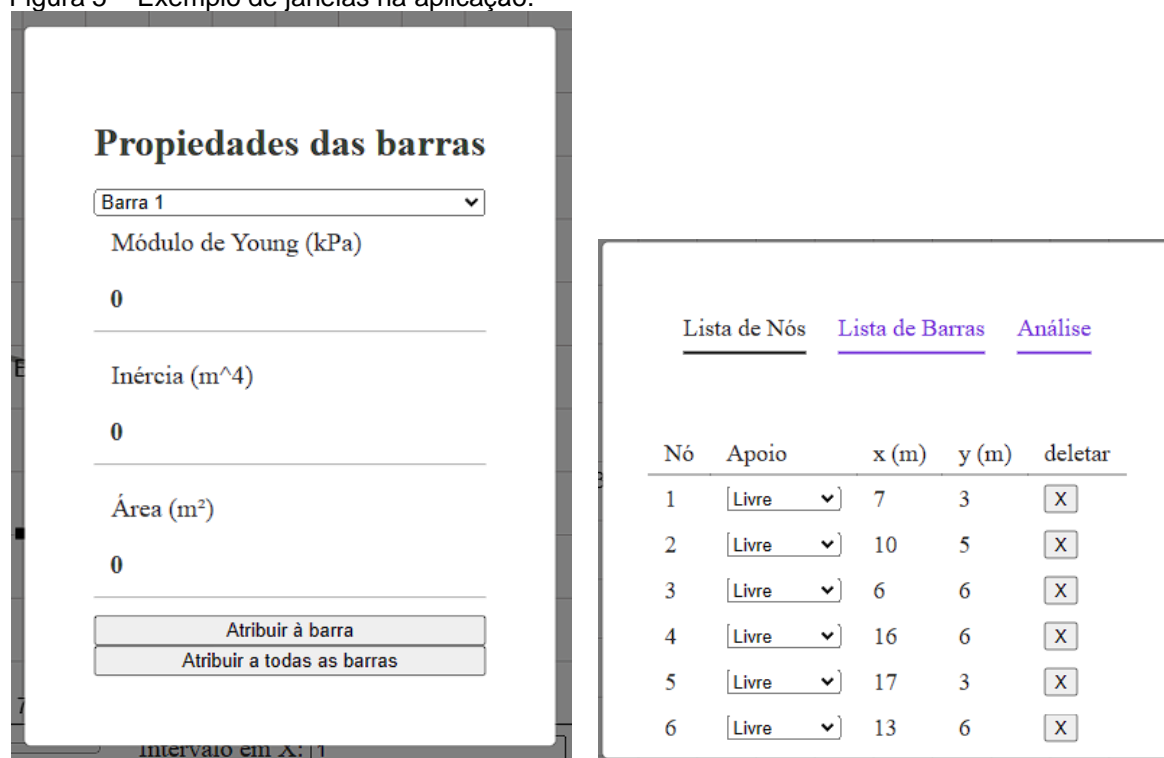
Quadro 2 – Elementos da interface de usuário.

Elemento	Descrição
Barra lateral	Guarda as ferramentas para a inserção de dados, como a inserção de nós, barras, inserção de propriedades geométricas e de material, inserção de forças e a ferramenta de revisão e análise.
Barra inferior	Controla a visualização da área de desenho, como o espaçamento do <i>grid</i> e sua escala.
Área de desenho	Local composto por um <i>grid</i> , onde o usuário faz o desenho da estrutura através de nós e barras.
janelas	<i>Pop-ups</i> que surgem ao selecionar algumas ferramentas com um formulário para sua manipulação.

Fonte: Autores

O conceito de janelas foi adotado (Figura 5) pois facilita a interação do usuário com os dados, funcionando como assistentes, exibindo campos de inserção de dados, suas descrições e unidades.

Figura 5 – Exemplo de janelas na aplicação.



Fonte: Autores

A janela de revisão e análise traz, ainda, o conceito de abas, onde é possível revisar cada elemento da estrutura em suas respectivas abas. Também é nesta janela que está a seção de análise e resultados (mostrado somente após a realização da análise).

A seção de resultados traz um relatório completo, com tabelas de reações, bem como gráficos de esforços internos solicitantes de cada uma das barras (Figura 6).

Figura 6 – Tabelas do relatório de análise de um exemplo genérico.

Reações

Nó	X	Y	Mz
1	-10.00 kN	50.00 kN	0 kN.m
2	-10.00 kN	50.00 kN	-0.00 kN.m

Deslocamentos

Nó	u	v	Theta
1	0.00000 m	0.00000 m	-0.13810 rad
2	0.00000 m	0.00000 m	0.13810 rad

Esforços Internos Solicitantes

Barra	N1	V1	M1	N2	V2	M2
1	0.00 kN	50.99 kN	-0.00 kN.m	0.00 kN	-50.99 kN	-0.00 kN.m

Fonte: Autores

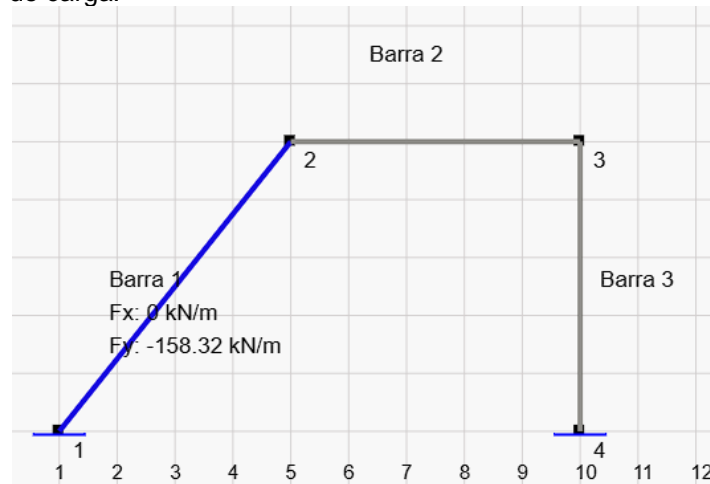
Um diferencial no presente trabalho é o caráter de facilitação de uso *on line*. Para tanto, precisou-se escolher um modelo de hospedagem para disponibilização do programa. O termo hospedagem, no meio da computação, significa "alocar um espaço na *web* para uma página", ou seja, é o ato de colocar no ar o servidor da aplicação. A hospedagem pode ser realizada pelo próprio produto (neste caso, *software*, com a implantação de um servidor *in house*). Porém, por conta da praticidade e custo, sempre é preferível utilizar serviços que realizem a hospedagem de páginas. No momento do desenvolvimento deste trabalho, o programa encontra-se hospedado em um *host* gratuito, ficando à mercê das políticas e cláusulas do serviço. Esta foi a principal dificuldade durante a elaboração do programa, pois funcionalidades pensadas originalmente para o 2Frame tiveram que ficar fora da *web* por questões relacionadas ao serviço gratuito e suas limitações. Assim, o autor deste trabalho não pode garantir a sua permanência na rede, ficando reservado ao mesmo apenas o código fonte.

4 APLICAÇÕES

Para a comparação dos resultados foi modelado, no 2Frame e no *software* AcadFrame, que realiza análise não linear geométrica utilizando o método dos elementos finitos posicionais, um pórtico com 3 barras, sendo uma destas inclinada, e carregamento linearmente distribuído nesta barra, conforme visto na Figura 7. O vão vencido pela viga (barra 2) é de 5 metros e a altura do pavimento é também de 5 metros. Os apoios são do tipo engaste. Foi utilizada uma única geometria de seção para todas as barras, atribuindo o perfil CVS 500x217. O módulo de elasticidade adotado foi de $E = 205000$ MPa. A análise foi realizada com 8 casos de carregamento, com incrementos de 12,5% na carga até o limite de 1266,56 kN/m. Portanto, o carregamento do primeiro caso equivale a 158,32 kN/m.

Salienta-se que os resultados apresentados são oriundos da análise não linear geométrica apenas. Todos os resultados comparados foram os referentes ao nó 2 da estrutura, conforme indicado na Figura 7.

Figura 7 – Pórtico modelado no 2Frame com o primeiro caso de carga.



Fonte: Autores

Na Tabela 1 são apresentados os resultados obtidos pelo AcadFrame e 2Frame para os deslocamentos do nó 2.

Tabela 1 – Comparação dos deslocamentos horizontais (m) no AcadFrame e no 2Frame no nó 2

P/P_{ref}	Deslocamento no AcadFrame (m)	Deslocamento no 2Frame (m)	Erro (%)
0,125	0,01248	0,0121	3,04
0,250	0,02497	0,0242	2,92
0,375	0,03746	0,0364	2,82
0,500	0,04996	0,0486	2,72
0,625	0,06246	0,0608	2,65
0,750	0,07497	0,0731	2,49
0,875	0,08748	0,0854	2,37
1,000	0,09999	0,0977	2,23

Fonte: Autores

Nota-se que, à medida em que a carga aumenta, chegando ao limite $P/P_{ref} = 1$, o erro diminui, chegando a 2,23%. Considerando que cargas maiores exigem maior confiabilidade, um erro cada vez menor a medida em que se aumenta a carga, considerando apenas o AcadFrame como referência, a segurança também está aumentando, pois se converge a um resultado cada vez mais similar. Isso mostra a segurança do 2Frame para o cálculo de flechas, por exemplo.

Por fim, as comparações de resultados e os erros percentuais obtidos para os Momentos Fletores são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Comparação dos Momentos Fletores (kN.m) no Acad-
Frame x 2Frame no nó 2

P/P_{ref}	Fletor no AcadFrame (kN.m)	Fletor no 2Frame (kN.m)	Erro (%)
0,125	272,19	271,74	0,16
0,250	546,89	545,12	0,32
0,375	824,1	820,17	0,47
0,500	1103,81	1096,87	0,62
0,625	1386,04	1375,25	0,78
0,750	1670,78	1655,3	0,92
0,875	1958,03	1937,04	1,07
1,000	2247,8	2220,46	1,21

Fonte: Autores

Os Momentos Fletores, como observado na Tabela 2, são os que apresentam a menor diferença, tendo um erro de apenas 1,21% para a carga limite P_{ref} . Importante ressaltar que, para a carga mais baixa, houve um erro também muito pequeno, de 0,16%. Esses resultados mostram, como os demais, a confiabilidade do 2Frame quando comparado ao AcadFrame. Em suma, os resultados comparativos apresentados demonstram a confiabilidade dos cálculos realizados pelo *software* desenvolvido.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do *software web*, nomeado de 2Frame, foi apresentado em detalhes, descrevendo as funcionalidades e recursos disponíveis para os usuários, além de destacar as principais vantagens e desafios enfrentados durante o desenvolvimento. Em seguida, foram realizadas análises comparativas entre os resultados obtidos pelo *software* desenvolvido e o *software* acadêmico AcadFrame.

Os resultados obtidos demonstraram que o 2Frame apresentou resultados satisfatórios, comparáveis com os demais métodos de cálculo. Além disso, foi possível destacar a vantagem do *software* em relação a facilidade de uso, acessibilidade e praticidade, uma vez que pode ser acessado por qualquer dispositivo com conexão à internet. Conclui-se, por fim, que o *software* desenvolvido é uma ferramenta valiosa para os profissionais da área e alunos de graduação e pode contribuir para o entendimento do comportamento de estruturas, tanto em análises lineares quanto em análises não lineares.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, 2008. 247 p.

CHEN, W.-F.; LUI, E. M. **Stability Design of Steel Frames**. [S.I.]: CRC Press, 1991.

CODA, H. B.; PACCOLA, R. R. **AcadFrame: Software Acadêmico para análise de pórticos e treliças planas**. 2006. Acesso em 18/05/2023. Disponível em: <http://web.set.eesc.usp.br/software_depto/acadframe/>.

KASSIMALI, A. **Matrix Analysis of Structures**. 2. ed. [S.l.]: Cengage, 2010

KONAPURE, C. G.; DHANSHETTI, P. V. **Effect of p-delta action on multi-storey buildings**. International Journal of Engineering Research & Technology, v. 4, 2015.

MOURA, B. C. de A.; BARBIRATO, J. C. C. **Contribuição para análise não linear de pórticos planos de edifícios utilizando o p-delta com a técnica das cargas laterais fictícias**. XLI CILAMCE, 2020.

PEREIRA, A. **Projeto ótimo de pórticos planos com restrição à flambagem**. 99 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

RODRIGUES, M. **Soluções integradas para as formulações do problema de não linearidade geométrica**. Tese (Doutorado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

SILVA, R. G. L. da; LAVALL, A. C. C. **Utilização de análises elásticas estimadas ou aproximadas de 2ª ordem para o dimensionamento de pórticos planos de aço**. XXXI Jornadas Sud-Americanas de Ingeniería Estructural, 2004.

2FRAME eDu: WEB SOFTWARE FOR NON-LINEAR GEOMETRIC ANALYSIS OF 2-DIMENSIONAL FRAMES

Abstract: *This work developed a software for nonlinear geometric structural analysis of plane frames. Thus, it seeks to use matrix methods, more precisely the Direct Stiffness Method, the Two Cycle Iterative Method for the geometric nonlinearity and the theory of solid mechanics to calculate from a frame modeled by the user, determining its stiffness matrix from the material parameters entered and its internal forces. In this context, the application will be available for undergraduate and graduate student as for structural professionals in need of nonlinear analysis via web in the cloud computing model, using the React.JS framework for the front-end side. Its results were compared against data obtained from solved examples in the literature.*

Keywords: *Structural Analysis, Matrix Analysis of Structures, Nonlinear Geometric Analysis, Engineering App Development, Cloud Computing.*