

COMPARAÇÃO DA ANÁLISE ESTRUTURAL DE PÓRTICOS HIPERESTÁTICOS A PARTIR DO MÉTODO DOS DESLOCAMENTOS E DO SOFTWARE FTOOL

1 INTRODUÇÃO

Um dos principais assuntos abordados durante o curso de Engenharia Civil é a análise das estruturas, visto que, de acordo com o Conselho Federal de Engenharia e Agronomia (2018), um dos atributos do engenheiro civil é possuir a habilidade de projetar estruturas e compreendê-las. No estudo de Brito, Barroso e Alencar (2021), realizado no curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, 95,24% dos discentes consideram importante a integração de ferramentas computacionais aos conteúdos ministrados. Entretanto, apenas 1,8% dos participantes acreditam que essa integração está satisfatória e 22,52% afirmam que esta nem existe.

Por conta disso, os professores pesquisadores da área tentam diversificar as metodologias de ensino atuais e desenvolver novas ferramentas, que foi o caso do professor Luiz Fernando Martha, criador do software Ftool. Ele percebeu que os programas já existentes não satisfaziam a necessidade de compreensão dos alunos e desenvolveu uma ferramenta que facilita a visualização do comportamento estrutural. Além do Ftool, outro instrumento que está sendo muito utilizado no ensino são os kits de mola estrutural, no qual é possível montar diversas estruturas em três dimensões e visualizar como são seus comportamentos. Segundo Gomes, Osório e Valente (2018), é possível verificar que o uso do instrumento apresenta um método de aprendizagem que engloba demonstração visual e assimilação de conhecimentos prévios dos alunos, facilitando a compreensão do discente em matérias de estruturas na grade curricular.

Em meados dos anos sessenta, foi desenvolvido uma nova metodologia chamada de Método dos Elementos Finitos, que está se sobrepondo à forma antiga e mais laboriosa de resolução de problemas estruturais. Para resolução manual de estruturas hiperestáticas, de acordo com Martha (2010), existem dois métodos clássicos, o das forças que tem como parâmetro as forças ou momentos e o dos deslocamentos, no qual os parâmetros são deslocamentos ou rotações. Nesses métodos são consideradas cargas estáticas e comportamentos lineares para a estrutura e podem ser base para o método dos elementos finitos.

2 PROBLEMA

Durante a graduação de Engenharia Civil, é necessário aprender diversos métodos de resolução de estruturas hiperestáticas. Para tal, conta-se com o auxílio de alguns softwares de análise estrutural. Um dos métodos abordados é o dos deslocamentos, no qual pode-se utilizar o software Ftool como ferramenta educacional na resolução de cálculos.

Tendo isso em vista, o método dos deslocamentos abrange a análise de estruturas compostas, tanto por barras inextensíveis como por barras extensíveis. Porém, há uma escassez de conteúdo acessível acerca da análise crítica de resultados encontrados a partir do método dos deslocamentos e sua conexão com o software Ftool.

Tal escassez se encontra na explicação da configuração dos comandos presentes

na aba "restrições das deformações" no software Ftool para cada tipo de consideração da estrutura. Ou seja, se essa é composta por barras extensíveis ou inextensíveis, ou se são pórticos, vigas ou treliças.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Aprimorar o entendimento e aprendizado do Método dos Deslocamentos utilizando o software Ftool como instrumento de confirmação dos resultados de cálculos estruturais.

3.2 Objetivos Específicos

- I. Resolver o problema considerando barras inextensíveis;
- II. Resolver o problema considerando barras extensíveis;
- III. Comparar os resultados calculados pelo Método dos Deslocamentos com os obtidos pelo software Ftool.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Método dos Deslocamentos

A fim de prever o comportamento de uma estrutura, é necessário realizar uma análise estrutural dessa, a qual é uma das etapas de um projeto estrutural. O método dos deslocamentos é, segundo Martha (2010), portanto, uma técnica pertencente dessa análise e considera os três grupos de condições básicas para encontrar a solução de uma estrutura, as quais são: condições de equilíbrio, condições de compatibilidade entre deslocamentos e deformações e condições constitutivas dos materiais.

Segundo Martha (2010), a metodologia de cálculo desse método pode ser descrita como a somatória de uma série de soluções básicas, chamadas de casos básicos, que satisfazem as condições de compatibilidade, mas que não satisfazem as condições de equilíbrio da estrutura original, para na superposição restabelecer as condições de equilíbrio.

De acordo com Soriano (2015), cada caso básico satisfaz, isoladamente, as condições de compatibilidade, continuidade interna e compatibilidade em relação aos apoios externos da estrutura, mas, a fim de satisfazer as condições de equilíbrio da estrutura original, são precisos forças e momentos adicionais para manter o equilíbrio. Estas adições serão restabelecidas a partir da superposição de todos os casos de soluções básicas.

4.2 Sistema Hipergeométrico e Deslocabilidade

De acordo com Martha (2010), a fim de realizar as superposições de configurações deformadas nos casos básicos, é necessário um modelo de estrutura cinematicamente determinada obtida da estrutura original com adição de vínculos (apoios fictícios).

As deslocabilidades são as componentes de deslocamentos e rotações nodais que estão livres que devem ser conhecidas para determinar a configuração deformada de uma estrutura segundo Martha (2010). Assim sendo, os parâmetros que definem a configuração deformada de uma estrutura são as deslocabilidades e são elas as incógnitas do método dos deslocamentos.

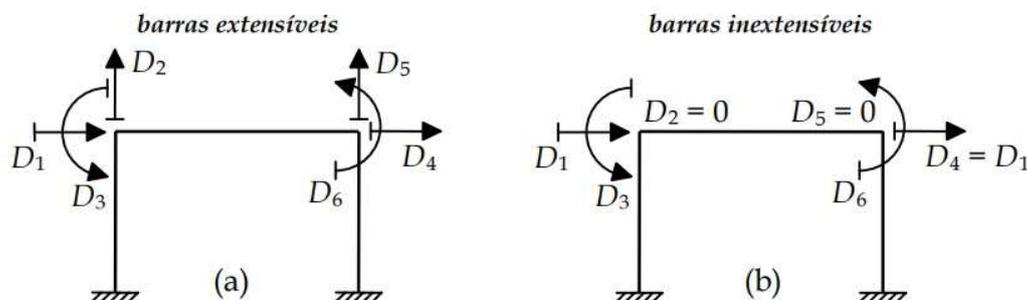
4.3 Barras inextensíveis e extensíveis

Como meio de simplificação de cálculos estruturais durante o curso de engenharia civil, são feitas considerações para que seja viável a solução manual do problema. De acordo com Barros e Martha (2016), o termo barras inextensíveis pode ser compreendido

como uma barra que possui rigidez axial infinita. Quando se trata de barras extensíveis, a deformação axial é considerada, ou seja, há um aumento ou diminuição desta devido aos esforços de tração e compressão na barra.

É importante ressaltar que, apesar de desprezar os esforços axiais ser uma aproximação válida, ela não demonstra o que ocorre na realidade. Em seu livro, Martha afirma que a análise da estrutura considerando as barras inextensíveis pode ser muito diferente da análise com barras extensíveis. Ele demonstra que com barras inextensíveis, quando um deslocamento é imposto em um dos nós superiores de um pórtico, por exemplo, os dois nós superiores sofrem o mesmo movimento horizontal, visto que a viga não pode ter seu comprimento alterado. Ou seja, a imposição de deslocamento em um nó acarreta o mesmo deslocamento de outro nó, o que não retrata a realidade da movimentação da estrutura, observada mais fielmente nos casos com barras extensíveis.

Figura 1 – Diferença de deslocabilidades entre barras extensíveis e inextensíveis.



Fonte: Métodos básicos da análise de estruturas de Luiz Fernando Martha.

4.4 Método dos Elementos Finitos

De acordo com Azevedo (2003), o Método dos Elementos Finitos (MEF) tem como finalidade determinar o estado de tensão e de deformação de um corpo de geometria aleatória sujeito a ações exteriores. Tal metodologia é, entretanto, relativamente recente, e antes do uso do MEF, a análise estrutural era realizada a partir da complexa resolução direta de sistemas de equações de derivadas parciais presentes na estrutura.

De modo geral, o MEF divide um sistema em componentes menores por meio da discretização das estruturas e é um método de solução aproximada de equações diferenciais, simulando situações reais em um espaço discreto, cujo limite infinitesimal tende ao contínuo (Alves, 2007).

Mais especificamente, segundo Alves (2007), a ideia do MEF consiste em subdividir o domínio do problema em subdomínios de dimensões finitas, onde o conjunto de todos os subdomínios seja igual ao domínio original. Posteriormente, sobre cada subdomínio adota-se um comportamento aproximado, local, para as incógnitas do problema.

A formulação do MEF pode ser baseada no método dos deslocamentos segundo Azevedo (2003), sendo esse o que apresenta maior simplicidade e versatilidade. Ou seja, o método dos deslocamentos pode ser utilizado como ferramenta base para um método de natureza computacional que possui maior aproximação da realidade estrutural de um corpo.

4.5 Ftool

O software Ftool foi criado nos anos noventa na PUC-Rio pelo professor Luiz Fernando Martha. Ele é um programa gráfico-interativo de Engenharia Civil que tem o objetivo de auxiliar no ensino do comportamento estrutural de pórticos planos.

Hodiernamente, ele se encontra com uma nova versão paga para os projetistas de estruturas que desejam utilizá-lo.

O método dos elementos finitos, que está sendo muito utilizado, é a base do Ftool. Porém ele se destaca devido a sua simplicidade, ao compará-lo com outros softwares, pois permite o cálculo de forma rápida das estruturas planas. É possível obter os esforços e deformações das barras, aplicar as propriedades dos materiais, definir seções transversais, dentre outros comandos muito úteis no aprendizado de análise das estruturas.

A primeira fase de utilização do Ftool é a de pré-processamento, a qual consiste na criação e modificação do modelo estrutural. Em seguida é feita a análise numérica pelo método da rigidez direta. E então, a última fase é a do pós-processamento, onde é possível visualizar os resultados. Esses resultados, diferentemente de outros softwares, podem ser visualizados em qualquer estágio da simulação e em qualquer ordem.

5 METODOLOGIA

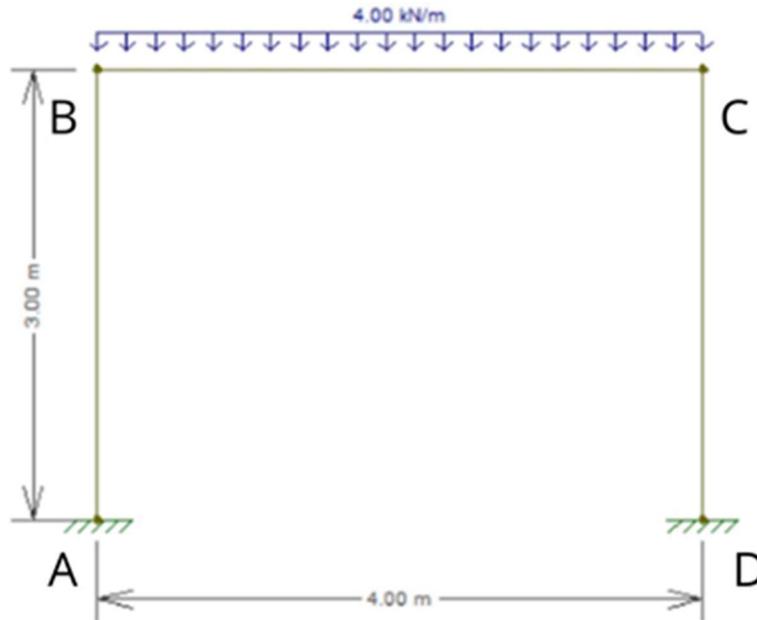
Resolução de um problema, representado na figura 2 abaixo, o qual é um pórtico hiperestático composto por 3 barras, as quais serão inextensíveis em uma primeira análise e extensíveis posteriormente.

Os cálculos para encontrar as incógnitas do problema foram feitos manualmente a partir do método dos deslocamentos, tanto para o caso de barras inextensíveis quanto as extensíveis.

O próximo passo foi a utilização do software Ftool para análise do mesmo problema com as mesmas condições (módulo de elasticidade e geometria). Em seguida, realizou-se, a partir de tentativa e erro, a análise da combinação dos comandos da aba "restrições de deformação" (figura 4) presente no "menu controle dos atributos dos nós e barras", ilustrado abaixo na figura 3.

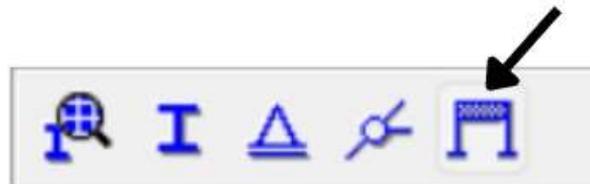
Essas combinações foram, portanto, nomeadas como combinação 1, 2, 3 e 4 e estão organizadas como mostrado na tabela 1 abaixo. O comando "membro rígido" não foi levado em consideração na análise por não fazer parte do escopo do trabalho e os comandos "deformação normal" e "deformação cortante" não podem ser ativados sem o comando "membro flexível". Por fim, a convenção adotada foi a de momento anti-horário como positivo.

Figura 2 – Problema a ser resolvido.



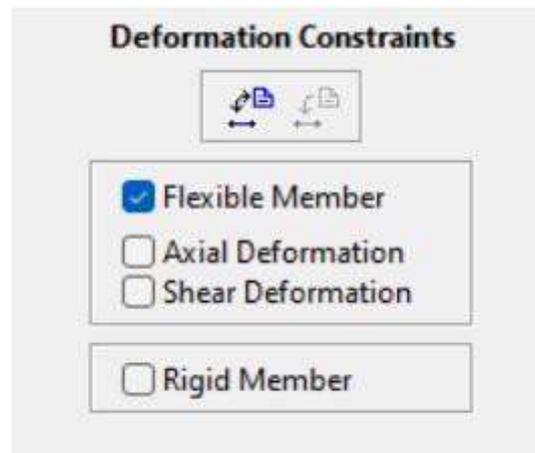
Fonte: os autores.

Figura 3 – Menu controle dos atributos dos nós e barras.



Fonte: os autores.

Figura 4 – Restrições de deformação.



Fonte: os autores.

Quadro 1 – combinações dos comandos.

Combinações dos comandos presentes na aba "restrições de deformação"			
	Membro Flexível	Deformação Normal	Deformação Cortante
Combinação 1			
Combinação 2			
Combinação 3			
Combinação 4			

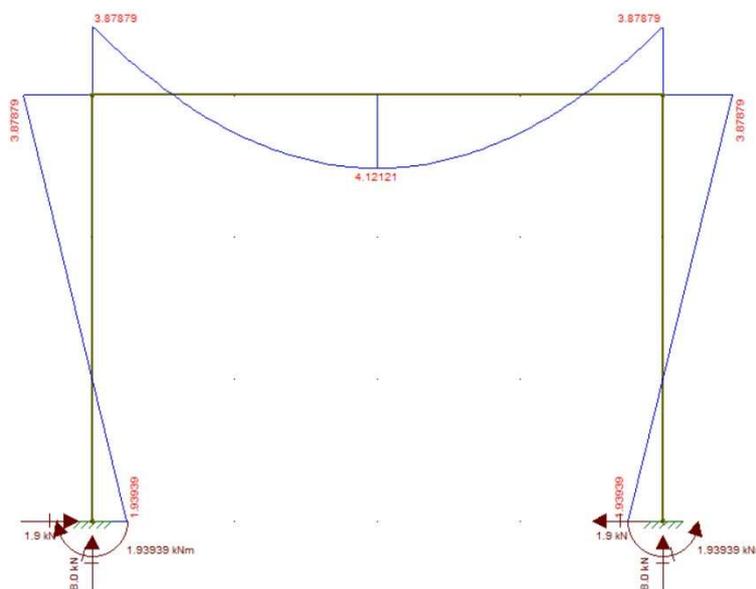
Fonte: os autores.

6 RESULTADOS

Ao realizar o cálculo de forma manual do pórtico, sem considerar a extensibilidade das barras foi obtido o resultado expresso na segunda coluna do quadro dois e considerando as barras extensíveis obteve-se os valores da terceira coluna. É possível observar que os valores não diferem muito, há apenas uma pequena majoração do valor na consideração de barras extensíveis.

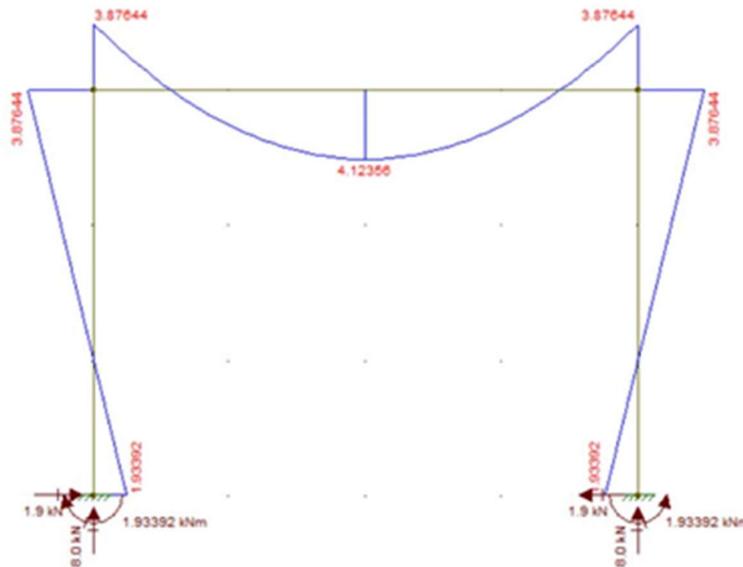
As figuras de cinco a oito são os gráficos de momento fletor com as reações, que representam os resultados gerados pelo Ftool com cada uma das possíveis combinações. E para uma melhor visualização, no quadro três foram computados os valores obtidos, sendo a coluna da combinação três a mais precisa, visto que todos os deslocamentos são considerados.

Figura 5 – Momento fletor da combinação 1.



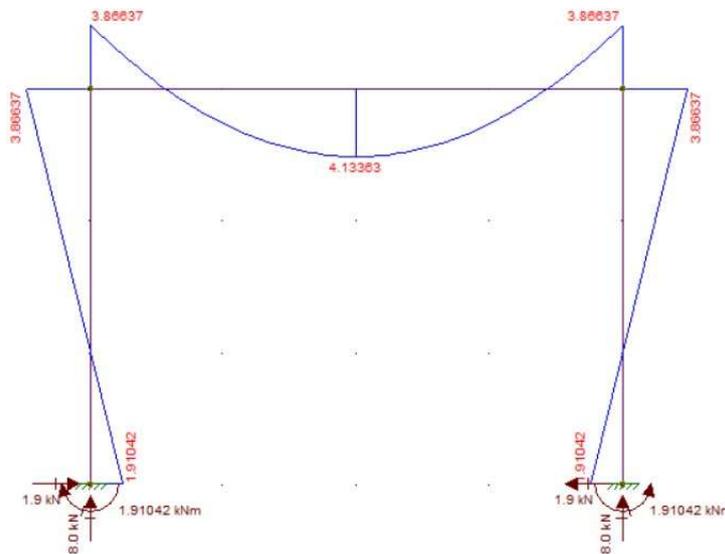
Fonte: os autores.

Figura 6 – Momento fletor da combinação 2.



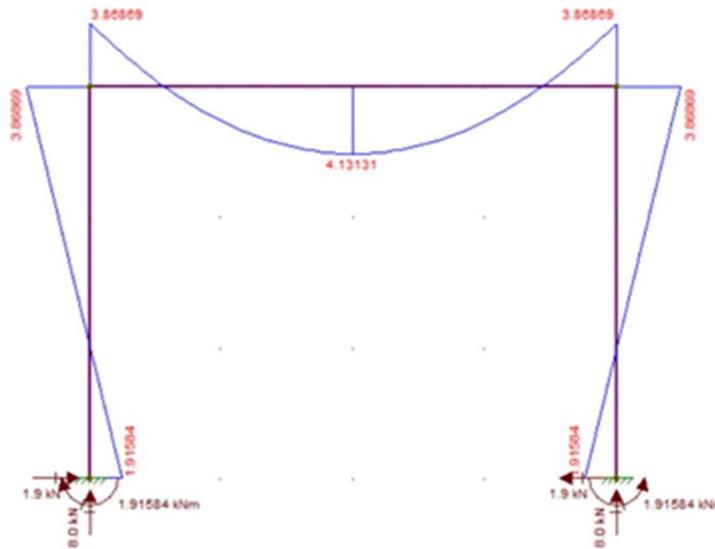
Fonte: os autores.

Figura 7 – Momento fletor da combinação 3.



Fonte: os autores.

Figura 8 – Momento fletor da combinação 4.



Fonte: os autores.

Quadro 2 – Esforços de momento fletor obtidos pelo método dos deslocamentos.

Método dos deslocamentos (manual)		
Esforços	Barras Inextensíveis (kNm)	Barras Extensíveis (kNm)
Ma	-1,939	-1,934
Mb (esquerda)	-3,879	-3,876
Mb (direita)	3,879	3,876
Mc (esquerda)	-3,879	-3,876
Mc (direita)	3,879	3,876
Md	1,939	1,934

Fonte: os autores.

Quadro 3 – Esforços de momento fletor obtidos pelo software Ftool.

Software Ftool				
Esforços	Combinação 1 (kNm)	Combinação 2 (kNm)	Combinação 3 (kNm)	Combinação 4 (kNm)
Ma	-1,939	-1,934	-1,910	-1,916
Mb (esquerda)	-3,879	-3,876	-3,866	-3,869
Mb (direita)	3,879	3,876	3,866	3,869
Mc (esquerda)	-3,879	-3,876	-3,866	-3,869
Mc (direita)	3,879	3,876	3,866	3,869
Md	1,939	1,934	1,910	1,916

Fonte: os autores.

7 CONCLUSÃO

Foi possível observar através dos resultados calculados que a combinação 1, a qual leva em consideração apenas o membro flexível, é condizente com os cálculos de barras inextensíveis pelo Método dos Deslocamentos. O resultado era esperado, devido ao fato de que barras inextensíveis consideram somente o esforço preponderante nas suas barras, o qual é a flexão no caso de pórticos.

Já a combinação 2, a qual leva em consideração o membro flexível e a deformação normal, é compatível com os cálculos de barras extensíveis pelo Método dos

Deslocamentos. Essa análise foi primordial para o entendimento do método, pois nele não é levado em consideração as deformações devido aos esforços cortantes, somente as normais.

Sendo assim, a combinação 3, a qual leva em consideração o membro flexível, a deformação normal e a deformação cortante, é a análise mais completa e mais generalizada do Método dos Elementos Finitos (MEF) disponível pelo software Ftool.

Por fim, a combinação 4, a qual leva em consideração o membro flexível e a deformação cortante, não foi compatível com nenhuma configuração dos métodos dos deslocamentos, visto que este não abrange a deformação gerada pelo esforço cortante.

O entendimento, portanto, do método dos deslocamentos, mais especificamente, da análise de barras extensíveis, foi impactado positivamente com a ajuda do software Ftool e da compreensão de seus comandos no método estudado.

8 REFERÊNCIAS

Livros:

AZEVEDO, Álvaro FM. Método dos elementos finitos. **Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**, v. 1, n. 7, 2003.

GOMES, M. J.; OSÓRIO, A. J.; VALENTE, L. CHALLENGES 2017: **Aprender nas nuvens – Learning the clouds** – Atas da X Conferência Internacional de TIC na Educação. BRAGA: Centro de Competência TIC na Educação do Instituto de Educação da Universidade do Minho. 2.^a edição, 2017

MARTHA, Luiz Fernando. Métodos básicos da análise de estruturas. **Rio de Janeiro: Campus**, 2010.

SORIANO, Humberto Lima. **Análise de estruturas: formulação matricial e implementação computacional**. Ciência Moderna, 2005.

Artigos de periódicos:

BARROS, Guilherme Coelho Gomes; MARTHA, Luiz Fernando. CONSIDERAÇÃO DE BARRAS RÍGIDAS E INEXTENSÍVEIS NA ANÁLISE MATRICIAL ATRAVÉS DA PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA.

BRITO, Jessica Rodrigues; DE ARAÚJO BARROSO, Suelly Helena; DE ALENCAR, Cely Martins Santos. Análise da formação proporcionada pelo curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, campus do Pici, de Fortaleza, e de seus docentes. **Revista de Ensino de Engenharia**, v. 40, 2021.

Monografias, dissertações e teses:

ALVES, Lucas Máximo. Método dos elementos Finitos. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, p. 438, 2007.

Internet:

CONFEA. **Engenheiro Civil: Garantia de autoridade técnica**. Disponível em: <https://www.confear.org.br/engenheiro-civil-garantia-de-autoridade-tecnica#:~:text=Estudar%2C%20projetar%2C%20analisar%20e%20avaliar%20t%C3%A9cnicas%20e%20obras%20relacionadas%20peculiares,ao%20saneamento%20urbano%20>

e%20rural%3B&text=%E2%80%A2-

,Estudar%2C%20projetar%2C%20analisar%20e%20avaliar%20t%C3%A9cnicas%20e,obras%20e%20servi%C3%A7os%20de%20urbanismo%3B&text=Projetar%20e%20construir%20%22pontes%20e%20grandes%20estruturas. Acesso em: 10 de julho de 2022.

MARTHA, Luiz Fernando. **Ftool: Um Programa Gráfico-Interativo para Ensino de Comportamento de Estruturas.** Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/124/124_PRINCIPAL.HTM. Acesso em: 24 de abril de 2022.

Abstract: *This article aims to present to the academic community a method to improve the learning of the displacement method of analysis in the Civil Engineering course. When using the displacement method of analysis to solve the structural problems presented in the graduation, the calculations are simplified by transforming the bars that are extensible into inextensible, thus eliminating a part of the displacements. The motivation for a better explanation of the method is the fact that by combining its teaching with the visualization of the structural behavior in the Ftool software, the understanding of the students is complete. Therefore, the manual calculation of a frame was made using the displacement method of analysis and, later, this same structure was placed in the Ftool to determine what would be the appropriate configuration and the justification for the result to vary according to the consideration, that is, whether they are extensible or inextensible bars. The results obtained were very satisfactory, since there was an accuracy of three decimal places between the manual result and the software.*

Keywords: *extensible bars, inextensible bars, displacement method of analysis, software Ftool.*