

# DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE ACADÊMICO PARA O ESTUDO DA ANÁLISE ESTRUTURAL

<sup>1</sup>MENDES, Thacio Guimarães.  
<sup>2</sup>FRAGA, Salmo Souza.

<sup>1</sup>Acadêmico do 10º período de Engenharia Civil das Faculdades Integradas Pitágoras de Montes Claros. <sup>2</sup>Professor especialista e orientador desta pesquisa, finalizada em junho de 2018, como pré-requisito para defesa do TCC e como parte das exigências curriculares para a graduação no curso de Engenharia Civil.

## RESUMO

A pesquisa em questão tem como objetivo o desenvolvimento de um software acadêmico para o estudo da disciplina Análise Estrutural denominado Professor Estrutural. A complexidade e a relevância desta disciplina motivaram o desenvolvimento deste software educacional. Para isso, utilizou-se a linguagem de programação Java e a API JavaFX para interface gráfica, o que torna possível a execução do software em qualquer dispositivo. O software fornece diagramas de esforços cortantes, momentos fletores, inclinação e deformação de modelos estruturais composto por vigas. Além disso, fornece também a resolução do cálculo da análise da estrutura através da equação de equilíbrio e dos métodos básicos da análise estrutural: método das forças e método dos deslocamentos. Ao longo do desenvolvimento deste artigo, discutiu-se os conceitos da análise estrutural, os métodos básicos de análise de estruturas, o método implementado para cálculo dos esforços internos e a linguagem de programação usada. Por fim, o Professor Estrutural foi validado em um comparativo dos diagramas supracitados de três exemplos com o software Ftool.

**Palavras-chave:** Professor Estrutural. Análise Estrutural. Software. Acadêmico.

## INTRODUÇÃO

A disciplina Análise Estrutural se perfaz como constante destaque nos cursos que a tem em sua grade, devido à sua complexidade, como afirma Martha (2017, p.IX): “a análise estrutural é uma tarefa relativamente difícil, [...] e muitos estudantes de engenharia e arquitetura têm dificuldade em compreender adequadamente os conceitos e métodos de análise estrutural”, e também em virtude da sua relevância, principalmente para aqueles que irão seguir a profissão de engenheiro estrutural ou o conhecido “Engenheiro Calculista”. É nesta disciplina que se aprende e compreende como as estruturas se comportam diante de carregamentos, conhecimento este, indispensável para um bom projeto estrutural.

Os Engenheiros Calculistas tinham como atribuição extensos cálculos manuais, que, com a evolução da informática, se tornou uma tarefa impraticável e desnecessária. Entraram no mercado diversos softwares oferecendo sofisticados

modelos de análise, aproximando o comportamento da estrutura real do modelo matemático, e trazendo rapidez e eficiência na execução destes cálculos (FRAGA, 2013).

Porém, apenas a utilização destes softwares citados acima não é o suficiente para ter um bom projeto estrutural, o profissional precisa ter conhecimento teórico (LIMA, 2017, p. III). Para o autor: “muitos engenheiros estão se tornando, ou sendo formados, apenas como usuários de programas, perdendo a capacidade crítica e o entendimento do sistema físico com os quais trabalham, atributos indispensáveis à capacidade de criação”. Para o Soriano e Lima (2006, p.1): “não é recomendável a sua utilização por usuário que não tenha capacidade e avaliação crítica dos resultados obtidos, [...] é necessário o conhecimento das potencialidades e limitações dos métodos implementados, e que se tenha “sentimento de comportamento das estruturas”. A má utilização desses programas pode trazer malefícios, como afirma Martha (2017, p.IX): “o uso de programas de computador sem o conhecimento adequado de análise estrutural pode ser muito perigoso, pois resultados errados de análise são a causa de graves acidentes com obras civis”.

A deficiência dos usuários dos softwares citados pelos autores acima pode ser explicada por La Rovere e Schneider (2003, p.2) que alegam carência de softwares educacionais para análise estrutural e completam: “o aluno de graduação deve passar diretamente dos fundamentos teóricos para a utilização destes programas comerciais, na maioria das vezes sem conhecer sua estrutura interna”. Para os mesmos, “apenas recentemente, graças à Internet, alguns programas educacionais estão surgindo na área de estruturas”.

Diante destes fatos, constatou-se a necessidade de utilizar a informática como uma ferramenta de estudo, instigando assim, o desenvolvimento de um software acadêmico chamado “Professor Estrutural”. Este, em especial, terá um papel fundamental por se tratar de um material puramente didático, no qual, de forma genérica, ensinará o usuário a calcular modelos estruturais reticulados compostos por vigas através dos métodos básicos da análise.

O programa buscará apresentar ao usuário a resolução do cálculo (passo a passo) das reações de apoio para vigas isostáticas e hiperestáticas através dos

seguintes métodos: equações de equilíbrio, método das forças e métodos dos deslocamentos. A escolha dos métodos a serem implementados se deu pelo fato de que estes propiciam o desenvolvimento no estudante do sentimento de comportamento estrutural (SORIANO E LIMA, 2006), (PALOSCHI, 2014). Além disso, formulará as funções dos esforços internos, inclinação e deformação da viga, bem como seus gráficos.

A implementação deste software possui como objetivo precípua aproximar o acadêmico da disciplina Análise Estrutural, podendo assim compreendê-la não somente na sala de aula, mas também em qualquer outro local, dado que se trata de uma aplicação de dispositivo móvel de fácil acesso, cujo propósito centra-se no embasamento do conhecimento teórico do discente. Intenta-se, portanto, com o produto final desta pesquisa obter, como público alvo, os acadêmicos dos cursos de Engenharia e Arquitetura que utilizam o cálculo estrutural, especialmente pela indispensabilidade desta disciplina na formação destes.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1. Materiais/Objeto de estudo**

Trata-se de um desenvolvimento de software interativo para dispositivos móveis com foco acadêmico como auxílio na disciplina Análise Estrutural. Para isso, foi utilizado a linguagem de programação orientada a objetos Java através do ambiente de desenvolvimento JavaFX na plataforma NetBeans IDE 8.1.

### **2.2. Tipo de pesquisa**

A produção da pesquisa em questão desenvolveu-se a partir de pesquisa bibliográfica de caráter aplicado. Para tanto, recorreu-se a autores conceituados da Análise Estrutural, que fundamentaram e instruíram o desenrolar do trabalho em comento. Para além, fora fundamental a utilização da pesquisa experimental, onde o software pôde-se constatar a veracidade dos cálculos, bem como a sua precisão.

### **2.3. Instrumentos para coleta de dados**

Para efeito de comparação, foram coletados dados de determinados casos de estrutura composta por vigas do software Ftool, garantindo assim a veracidade dos resultados do Professor Estrutural.

#### **2.4. Abordagem da análise de dados**

Trata-se de uma pesquisa quali-quantitativa no qual um software foi desenvolvido para auxiliar acadêmicos e profissionais na disciplina Análise Estrutural. O programa apresenta a resolução do cálculo das reações de apoio para vigas isostáticas e hiperestáticas. Além disso, formula as funções dos esforços internos, inclinação e deformação da viga, bem como seus gráficos. Ao final do trabalho, analisou-se o funcionamento do software comparando os resultados com outro programa existente.

### **3. RESULTADO E DISCUSSÃO**

#### **3.1. Análise Estrutural**

“A análise estrutural [...] é a etapa do projeto estrutural na qual é realizada uma previsão do comportamento da estrutura” (MARTHA, 2017, p.3). Essa previsão consiste na transformação do modelo real para um modelo matemático capaz de representá-la, para então, ser definido comportamentos como deformações, deslocamentos e esforços internos.

Sabe-se que as estruturas são formadas por peças ligadas entre si, formando um conjunto estável. Essas peças possuem três dimensões que são facilmente identificadas, sendo elas: altura, largura e comprimento. Na transformação supracitada podem ocorrer três casos: a) duas dimensões são pequenas em relação à terceira; b) uma dimensão é pequena em relação às outras duas; c) as três dimensões são consideráveis. Na maioria dos casos a dimensão maior é o comprimento da peça, sendo assim, o estudo sobre esse elemento estrutural é denominado barra, ou seja, pode ser considerada unidimensional representada pelo eixo geométrico dos centros de gravidade de suas seções transversais (SUSSEKIND, 1981).

Apesar da abstração das outras duas dimensões, esses dados ainda são considerados nos cálculos. Martha (2017, p.4) explica: “a informação tridimensional das barras fica representada por propriedades globais de suas seções transversais, tais como área e momentos de inércia”.

Portanto, as estruturas formadas por barras são denominadas de reticuladas. Para Soriano e Lima (2006), as estruturas em barras podem ser classificadas em viga, treliça plana, treliça espacial, pórtico plano, pórtico espacial e grelha. Martha (2017) denomina essa classificação de modelo estrutural. A escolha deste modelo estrutural a ser trabalhado depende dos recursos de cálculo do profissional e do nível de complexidade da obra. Para efeito de aprendizagem, considerou-se nesse trabalho o cálculo de estrutura reticulada composta por vigas.

O modelo de viga é formado por barras retas em um eixo bem definido e pode representar estruturas reais como vigas de ponte, vigas isoladas de edifício, dentre outras. Martha (2017) considera que o modelo estrutural composto por vigas está naturalmente associada a transferências de cargas verticais, ocasionando assim esforços internos de cortante e momento fletor. Tais esforços são representados por meio de gráficos e funções pelo Professor Estrutural.

### **3.2. Linguagem de programação**

Para o desenvolvimento deste software utilizou-se a linguagem de programação Java, por esta apresentar inúmeras vantagens frente à outras linguagens disponíveis. Das vantagens, cita-se o vasto conjunto de bibliotecas disponíveis denominadas Application Programming Interface (API), que são códigos pré-compilados prontos para serem utilizados, trazendo rapidez e eficiência no desenvolvimento do software (RICARTE, 2001). Destaca-se também a Programação Orientada a Objetos (POO), que facilita a reutilização de código, possibilita pequenas alterações sem que prejudique o código de forma massiva e possui um funcionamento natural, onde a estrutura do código reflete o mundo real (SOUZA, ???). E por fim, a flexibilidade de desenvolver para qualquer sistema operacional, desde que o arquivo Java esteja compilado e que no sistema operacional tenha uma Máquina Virtual Java (JVM) instalado.

No desenvolvimento da interface gráfica, utilizou-se a API JavaFX versão 8.1 que visa a interação do usuário com o programa. O JavaFX é uma das bibliotecas Java para interface gráfica e sua utilização foi preferida por esta ser multiplataforma, ou seja, pode ser executada em qualquer Desktop, Web ou Applet, além de ter um visual mais sofisticado.

A programação em Java requer a instalação do Java Development Kit (JDK). Utilizou-se como ambiente de desenvolvimento o programa NetBeans IDE versão 8.1.

**Figura 1:** Interface gráfica do software



Fonte: Autor, 2018

A figura 1 demonstra a interface amigável e intuitiva do software em funcionamento, no qual o usuário visualiza as características da estrutura de acordo ao solicitado. Para criar uma determinada estrutura, o usuário passará por três

etapas simples. A primeira é a criação das barras da viga através da aba Barras. Nela, o usuário poderá adicionar ou remover barras e determinar as propriedades geométricas e mecânicas das mesmas. Em seguida, através da aba Apoios, é possível determinar os tipos de vínculos nas extremidades das barras. Por fim, o usuário adiciona as cargas na estrutura na aba Cargas. A obtenção das reações de apoio é imediata.

### **3.3. Métodos de análise estrutural**

O processo de análise estrutural consiste na determinação das reações de apoio, para então, a obtenção dos esforços internos. Para isso, existe vários métodos a serem usados que se diferem pelos parâmetros a serem considerados, metodologias e volume de cálculo. A escolha de um método apropriado depende das configurações ou características da estrutura a ser analisada, como a sua estabilidade.

A classificação das estruturas quanto a sua estabilidade leva em consideração o equilíbrio de determinada estrutura. Süsserkind (1981, p.10) observa que para uma estrutura, submetida a forças, estar em equilíbrio “é necessário que elas não provoquem nenhuma tendência de translação nem rotação a este corpo”. Para isso, basta que tal estrutura satisfaça as condições de equilíbrio: a somatória das forças e momentos tem de ser nulas (SÜSSEKIND, 1981). A determinação da estabilidade de um modelo estrutural composto por vigas depende diretamente do número de vínculos, podendo esta ser hipostática, isostática e hiperestática. As estruturas hipostáticas são aquelas que não possuem estabilidade, ou seja, não tem o número de vínculos suficiente para atender as condições de equilíbrio (MARTHA, 2017). Essas estruturas instáveis não são objeto de estudo da análise estrutural. As estruturas isostáticas podem ter suas reações de apoio determinadas através das condições de equilíbrio supracitada e ocorrem quando o número de vínculos se iguala ao número de condições de equilíbrio (MARTHA, 2017). As estruturas hiperestáticas são aquelas que tem o número de vínculos excedentes em relação ao número de condições de equilíbrio. Essa, por sua vez, é necessário considerar além das condições de equilíbrio, outras condições que levam em conta a deformabilidade do modelo estrutural para determinar as reações de apoio (MARTHA, 2017).

Para estruturas hiperestáticas, há dois métodos básicos de análise: método das forças e métodos dos deslocamentos. Ambos os métodos levam em consideração em seu cálculo três grupos de condições básicas da análise estrutural: condições de equilíbrio, condições de compatibilidade entre deslocamentos e deformações, e condições impostas pelas leis constitutivas dos materiais (MARTHA, 2017). Tais condições requerem que as propriedades mecânicas e geométricas da barra sejam definidas. A propriedade mecânica considerada nos cálculos para o modelo estrutural trabalhado no software é o módulo de elasticidade (E), enquanto a propriedade geométrica é o momento de inércia (I). As diferenças entre esses métodos estão principalmente na ordem em que essas condições básicas se apresentam nos cálculos e nos tipos de parâmetros adotados como incógnita do problema (MARTHA, 2017).

O método das forças foi implementado no Professor Estrutural segundo o procedimento explícito no livro “Análise de estruturas: conceitos e métodos básicos” do Luiz Fernando Martha, como apresenta a explicação resumida e modificada abaixo.

O método consiste em “determinar um conjunto de reações e/ou esforços solicitantes superabundantes ao equilíbrio estático de estrutura hiperestática, permitindo que outras reações e/ou esforços sejam calculados com as equações da estática” (SORIANO E LIMA, 2006, p.75). Para isso, através da eliminação de vínculos, a estrutura real deverá ser transformada em isostática, que terá o nome de Sistema Principal (SP). A escolha do SP é arbitrária, por isso, qualquer estrutura estável é válida. As forças e momentos associados aos vínculos eliminados são chamados de hiperestáticos (X), e estes são as incógnitas do problema.

O SP será reproduzido em diversos casos básicos. A quantidade de casos básicos é igual ao grau de hiperestaticidade da estrutura, ou seja, a quantidade de forças e/ou momentos hiperestáticos eliminados da estrutura, somado mais 1, no qual, os carregamentos se diferem de um caso para outro. O primeiro caso básico é o 0 (zero) e terá o mesmo carregamento da estrutura real. Os casos básicos seguintes terão um carregamento unitário referente ao tipo de carga, na mesma direção e posição do hiperestático referente àquele caso. Na sequência, determina-se as deformações ou rotações (a depender do tipo de hiperestático: força ou

momento) em todos os casos básicos nos pontos onde haviam hiperestáticos. As deformações no caso básico 0 (zero) são chamadas de termos de carga, já nos casos seguintes, coeficientes de flexibilidade.

A partir dos resultados das deformações obtidas, utiliza-se a superposição dos efeitos para restabelecer as condições de compatibilidade violadas na criação do SP, formando assim, um sistema de equações de compatibilidade denominada matriz de flexibilidade, no qual as incógnitas são os hiperestáticos supracitados. Os deslocamentos encontrados no caso zero são as constantes do problema.

Os valores dos hiperestáticos calculados na matriz são as reações de apoio eliminados inicialmente, o que restará, apenas, o cálculo das reações nos vínculos restantes. Para isso, o software as calculam através das condições de equilíbrio.

Segundo Vasconcellos Filho (1986), o método das forças, por levar em geral a sistemas de equações lineares menores, foi o preferido por muito tempo entre engenheiros, até a automação desses cálculos pelo método dos deslocamentos. Martha (2017) compara os métodos quanto a implementação computacional de ambos. Ele afirma que o método das forças é menos utilizado por não conter um procedimento-padrão, pois há diversas possibilidades de definir o sistema principal, o que dificulta a elaboração de um algoritmo genérico. Além disso, o software pode encontrar dificuldade para identificar de forma automática uma possível instabilidade gerada pela eliminação de vínculos da estrutura. Já o método dos deslocamentos é implementado facilmente em softwares por apresentar simplicidade e genericidade na criação do sistema hipergeométrico, uma vez que, basta bloquear os deslocamentos em todos os nós da estrutura para esta ser calculada. Apesar da dificuldade de implementação computacional supracitada, o método das forças será uma das opções de escolha para o usuário visualizar a resolução do cálculo no software em questão.

O método dos deslocamentos foi implementado no software segundo o procedimento explícito no livro “Teoria das Estruturas” do Alcebíades de Vasconcellos Filho (1986), como apresenta a explicação também resumida e modificada abaixo.

Esse método é basicamente composto por etapas ou fases que terão na estrutura bloqueios nodais, de tal forma a impedir os seus deslocamentos e conhecer esforços, que quando somados, satisfazem as condições de compatibilidade da estrutura e, ao final, uma superposição restabelece as condições de equilíbrio. O primeiro passo é denominado de Fase Preliminar. Nela devem ser indicados na estrutura, os deslocamentos e/ou rotações nodais (incógnitas do problema,  $D$ ) e as reações de apoio denominadas  $AR$ . Uma vez indicado os deslocamentos e/ou deformações nodais, deve-se determinar as forças ou momentos correspondentes a eles, denominado de esforço  $AD$ . A etapa seguinte é a Fase  $L$  e nela deve-se impedir os deslocamentos identificados na fase anterior, aplicando apoios fictícios a esses nós. Com a estrutura bloqueada e carregada a menos dos esforços  $AD$ , essa fase consiste em determinar as reações de apoio que são denominadas de  $ARL$  nos apoios existentes e  $ADL$  nos apoios fictícios.

Em seguida, a estrutura, com os nós ainda bloqueados, deve ser totalmente descarregada. Nesta etapa chamada de Fase  $D$ , aplica-se, um por vez, um deslocamento unitário em cada um dos nós bloqueados, ou seja, enquanto um determinado nó bloqueado tiver o deslocamento unitário aplicado, os demais nós terão deslocabilidade nulas. A quantidade de vezes que esse procedimento se repete é igual a quantidade de deslocamentos identificados na estrutura na fase preliminar. As reações dos apoios devido aos deslocamentos aplicados devem ser coletadas em cada uma destas etapas da fase  $D$  (a cada vez que se aplica um deslocamento unitário), e são denominadas de  $ARD$  nos apoios existentes, enquanto as reações nos apoios fictícios de  $K$ . Todas as reações das fases  $L$  e  $D$  são determinadas através de tabelas.

Por fim, forma-se com os resultados um sistema de equações lineares denominado matriz de rigidez global, no qual as incógnitas são os deslocamentos identificados na fase preliminar e os coeficientes são as reações  $K$  determinadas na fase  $D$ . As reações nos apoios fictícios  $ADL$  da fase  $L$  formam as constantes da matriz.

Observa-se que em ambos métodos básicos, para definir os valores das incógnitas obtém-se uma matriz, que em todos os casos serão simétricas. O teorema de Maxwell justifica este fato. No intuito de melhor resolvê-las, adotou-se no

software o método de Cholesky para resolução de sistemas lineares. Esse método propõe que apenas matrizes simétricas e definida positiva sejam fatoradas (RUGGIERO; LOPES, 2000).

Definido os valores dos deslocamentos, calcula-se as reações de apoios AR através da mesma estrutura de equações lineares usadas no cálculo do sistema anterior, multiplicando o valor dos deslocamentos encontrados pela respectiva reação encontrada na fase D, somado ao valor da reação ARL.

### **3.4. Esforços internos de cortante e momento, inclinação e deformação**

Uma vez determinada as reações de apoio de uma estrutura, para efeito de dimensionamento, é importante que se conheça os esforços presentes no interior da mesma. Além disso, muitas vezes é preciso limitar o grau de deflexão que uma viga pode sofrer quando submetida a uma carga (HIBBELER, 2010). Para isso, deve-se calcular os parâmetros supracitados ao longo da estrutura, para então representá-los por meio de gráficos.

Predomina-se em vigas submetidas a cargas verticais, os esforços internos de cortante e momento. Quanto a deflexão, é importante o conhecimento de parâmetros como a inclinação e deformação ao longo da estrutura. Adotou-se para o cálculo de tais efeitos, o método de funções de descontinuidade e este pode ser compreendido na explicação abaixo:

Esse método é particularmente vantajoso para resolver problemas que envolvam vigas ou eixos submetidos a várias cargas, visto que as constantes de integração podem ser calculadas utilizando-se somente as condições de contorno, enquanto as condições de compatibilidade são automaticamente satisfeitas. (HIBBELER, 2010, p.438)

Portanto, preferiu-se implementar no Professor Estrutural o método de funções de descontinuidade por este ser totalmente genérico, uma vez que, existe infinitas possibilidades de carregamentos, dado que se trata de um software no qual o usuário define todas as características de carregamento da estrutura.

### **3.5. Análise dos resultados**

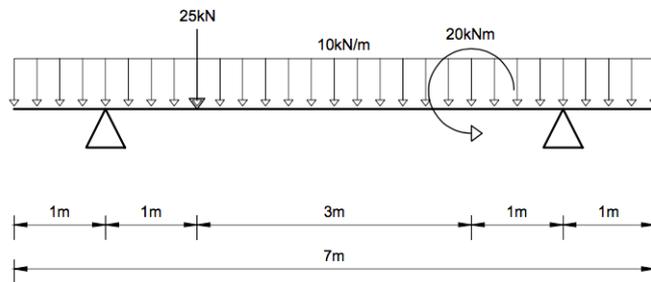
A fim de validar o software, três exemplos de estrutura composta por vigas foram calculadas pelos três métodos de análise estrutural implementados no

Professor Estrutural, e seus resultados foram comparados com o Ftool. As tabelas 1, 2 e 3 comparam os resultados através dos esforços internos de cortante e momento, inclinação e deformação. Esses parâmetros são representados respectivamente por: Q, M,  $du/dx$  e  $v$ .

### Exemplo 1

Neste exemplo da figura 2, a estrutura apresenta uma estabilidade isostática, e por isso, foi calculada pelas condições de equilíbrio pelo Professor Estrutural. Dados:

**Figura 2:** Viga do exemplo 1



Fonte: Autor, 2018

- Propriedades mecânicas e geométricas:
  - $E = 25.000,00$  MPa;
  - $I = 19.531,00$  cm<sup>4</sup>;

A tabela 1 compara os resultados entre os dois softwares. No cabeçalho, apresenta-se os parâmetros supracitados junto a unidade de medida. As posições na viga que apresentam dois valores, representam o esforço imediatamente anterior e posterior ao ponto analisado.

**Tabela 1:** Esforços de cortante e momento, inclinação e deformação na viga do exemplo 1 obtidos pelo Professor Estrutural e Ftool

Software		Professor Estrutural				Ftool			
Parâmetro		Q (kN)	M (kNm)	$du/dx$ (Rad)	$v$ (mm)	Q (kN)	M (kNm)	$du/dx$ (Rad)	$v$ (mm)
Posição na Viga (m)	0	0,00	0,00	-0,01691	17,00	0,00	0,00	-0,01691	17,00
	0,5	-5,00	-1,25	-0,01696	8,54	-5,00	-1,25	-0,01696	8,54

Fonte: Autor, 2018

**Tabela 1 (continuação):** Esforços de cortante e momento, inclinação e deformação na viga do exemplo 1 obtidos pelo Professor Estrutural e Ftool

Software		Professor Estrutural				Ftool			
Parâmetro		Q (kN)	M (kNm)	du/dx (Rad)	u (mm)	Q (kN)	M (kNm)	du/dx (Rad)	u (mm)
Posição na Viga (m)	1	-10,00	-5,00	-0,01725	0,00	-10,00	-5,00	-0,01725	0,00
		49,00				49,00			
	1,5	44,00	18,25	-0,01655	-8,55	44,00	18,25	-0,01655	-8,55
	2	39,00	39,00	-0,01360	-16,18	39,00	39,00	-0,01360	-16,18
		14,00				14,00			
	2,5	9,00	44,75	-0,00929	-21,93	9,00	44,75	-0,00929	-21,93
	3	4,00	48,00	-0,00452	-25,39	4,00	48,00	-0,00452	-25,40
	3,5	-1,00	48,75	0,00045	-26,42	-1,00	48,75	0,00045	-26,42
	4	-6,00	47,00	0,00538	-24,95	-6,00	47,00	0,00538	-24,95
	4,5	-11,00	42,75	0,00999	-21,09	-11,00	42,75	0,00999	-21,09
	5	-16,00	36,00	0,01405	-15,05	-16,00	36,00	0,01405	-15,05
			16,00			16,00			
	5,5	-21,00	6,75	0,01523	-7,69	-21,00	6,75	0,01523	-7,69
	6	-26,00	-5,00	0,01534	0,00	-26,00	-5,00	0,01534	0,00
10,00		10,00							
6,5	5,00	-1,25	0,01504	7,58	5,00	-1,25	0,01504	7,58	
7	0,00	0,00	0,01500	15,09	0,00	0,00	0,01500	15,09	

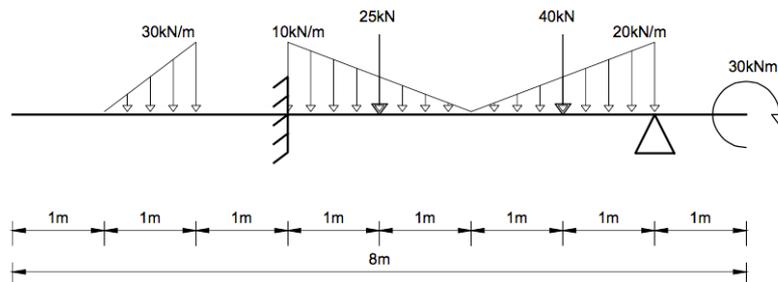
Fonte: Autor, 2018

Observando a tabela 1, verifica-se que o Professor Estrutural obteve os mesmos resultados do Ftool, validando assim o método de análise estrutural através das condições de equilíbrio.

## Exemplo 2

No exemplo da figura 3, a estrutura foi calculada pelo método dos deslocamentos. Dados:

**Figura 3:** Viga do exemplo 2



Fonte: Autor, 2018

- Propriedades mecânicas e geométricas:
  - $E = 25.000,00 \text{ MPa}$ ;
  - $I = 45.000,00 \text{ cm}^4$ ;

A tabela 2 contém a mesma estrutura e interpretação da tabela anterior e compara os resultados dos dois softwares.

**Tabela 2:** Esforços de cortante e momento, inclinação e deformação na viga do exemplo 2 obtidos pelo Professor Estrutural e Ftool

Software		Professor Estrutural				Ftool			
Parâmetro		Q (kN)	M (kNm)	du/dx (Rad)	u (mm)	Q (kN)	M (kNm)	du/dx (Rad)	u (mm)
Posição na Viga (m)	0	0,00	0,00	0,00122	-3,09	0,00	0,00	0,00122	-3,09
	0,5	0,00	0,00	0,00122	-2,48	0,00	0,00	0,00122	-2,48
	1	0,00	0,00	0,00122	-1,87	0,00	0,00	0,00122	-1,87
	1,5	-3,75	-0,62	0,00122	-1,26	-3,75	-0,63	0,00122	-1,26
	2	-15,00	-5,00	0,00111	-0,67	-15,00	-5,00	0,00111	-0,67
	2,5	-15,00	-12,50	0,00072	-0,19	-15,00	-12,50	0,00072	-0,19
	3	-15,00	-20,00	0,00000	0,00	-15,00	-20,00	0,00000	0,00
		40,60	-30,74			40,60	-30,74		
	3,5	36,23	-11,58	-0,00093	-0,27	36,23	-11,58	-0,00093	-0,27
	4	33,10	5,70	-0,00106	-0,80	33,10	5,70	-0,00106	-0,80
		8,10				8,10			
	4,5	6,23	9,23	-0,00072	-1,25	6,23	9,23	-0,00072	-1,25
	5	5,60	12,13	-0,00025	-1,50	5,60	12,13	-0,00025	-1,50
	5,5	4,35	14,72	0,00035	-1,48	4,35	14,72	0,00035	-1,48
	6	0,60	16,07	0,00104	-1,13	0,60	16,07	0,00104	-1,13
		-39,40				-39,40			
6,5	-45,65	-5,09	0,00130	-0,50	-45,65	-5,09	0,00130	-0,50	
7	-54,40	-30,00	0,00054	0,00	-54,40	-30,00	0,00054	0,00	
	0,00				0,00				
7,5	0,00	-30,00	-0,00080	-0,07	0,00	-30,00	-0,00080	-0,07	
8	0,00	-30,00	-0,00213	-0,80	0,00	-30,00	-0,00213	-0,80	
		0,00				0,00			

Fonte: Autor, 2018

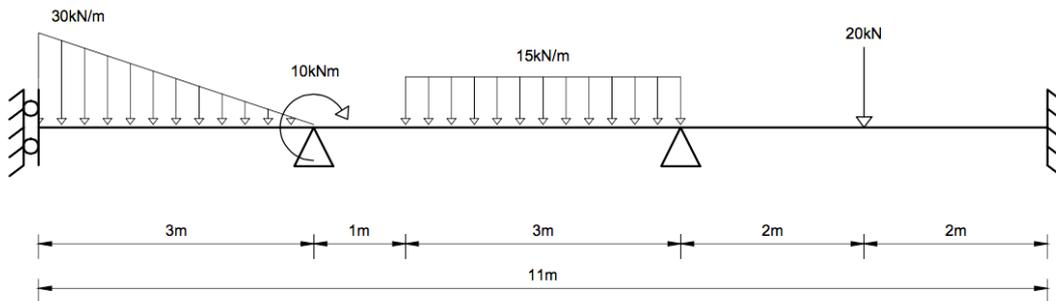
Observando a tabela 2, verifica-se que o Professor Estrutural obteve os mesmos resultados do Ftool, validando também o método dos deslocamentos.

### Exemplo 3

Neste exemplo da figura 4, a estrutura foi calculada pelo método das forças.

Dados:

**Figura 4:** Viga do exemplo 3



Fonte: Autor, 2018

- Propriedades mecânicas e geométricas:

- $E = 205.000,00 \text{ MPa}$ ;

- $I = 1.305,00 \text{ cm}^4$ ;

A tabela 3 compara os softwares e a interpretação segue a mesma das tabelas anteriores.

**Tabela 3:** Esforços de cortante e momento, inclinação e deformação na viga do exemplo 3 obtidos pelo Professor Estrutural e Ftool

Software		Professor Estrutural				Ftool			
Parâmetro		Q (kN)	M (kNm)	du/dx (Rad)	v (mm)	Q (kN)	M (kNm)	du/dx (Rad)	v (mm)
Posição na Viga (m)	0	0,00	41,82	0,00000	-40,06	0,00	41,82	0,00000	-40,06
	0,5	-13,75	38,27	0,00759	-38,13	-13,75	38,27	0,00759	-38,13
	1	-25,00	28,48	0,01392	-32,68	-25,00	28,48	0,01392	-32,68
	1,5	-33,75	13,69	0,01793	-24,60	-33,75	13,69	0,01793	-24,60
	2	-40,00	-4,85	0,01880	-15,28	-40,00	-4,85	0,01880	-15,28
	2,5	-43,75	-25,89	0,01596	-6,42	-43,75	-25,89	0,01596	-6,42
	3	-45,00	-48,18	0,00905	0,00	-45,00	-48,18		
		24,31	-38,18			24,31	-38,18		
	3,5	24,31	-26,03	0,00304	2,93	24,31	-26,03	0,00304	2,93
4	24,31	-13,87	-0,00068	3,42	24,31	-13,87	-0,00068	3,42	

Fonte: Autor, 2018

**Tabela 3 (continuação):** Esforços de cortante e momento, inclinação e deformação na viga do exemplo 3 obtidos pelo Professor Estrutural e Ftool

Software		Professor Estrutural				Ftool			
Parâmetro		Q (kN)	M (kNm)	du/dx (Rad)	v (mm)	Q (kN)	M (kNm)	du/dx (Rad)	v (mm)
Posição na Viga (m)	4,5	16,81	-3,59	-0,00226	2,61	16,81	-3,59	-0,00226	2,61
	5	9,31	2,94	-0,00226	1,43	9,31	2,94	-0,00226	1,43
	5,5	1,81	5,72	-0,00140	0,49	1,81	5,72	-0,00140	0,49
	6	-5,69	4,75	-0,00036	0,06	-5,69	4,75	-0,00036	0,06
	6,5	-13,19	0,03	0,00015	0,04	-13,19	0,03	0,00015	0,04
	7	-20,69	-8,44	-0,00058	0,00	-20,69	-8,44	-0,00058	0,00
		9,42				9,42			
	7,5	9,42	-3,73	-0,00172	-0,61	9,42	-3,73	-0,00172	-0,61
	8	9,42	0,97	-0,00198	-1,57	9,42	0,97	-0,00198	-1,57
	8,5	9,42	5,68	-0,00136	-2,44	9,42	5,68	-0,00136	-2,44
	9	9,42	10,39	0,00015	-2,78	9,42	10,39	0,00015	-2,78
		-10,58				-10,58			
	9,5	-10,58	5,1	0,00159	-2,31	-10,58	5,10	0,00159	-2,31
	10	-10,58	-0,19	0,00205	-1,36	-10,58	-0,19	0,00205	-1,36
10,5	-10,58	-5,49	0,00152	-0,42	-10,58	-5,49	0,00152	-0,42	
11	-10,58	-10,78	0,00000	0,00	-10,58	-10,78	0,00000	0,00	

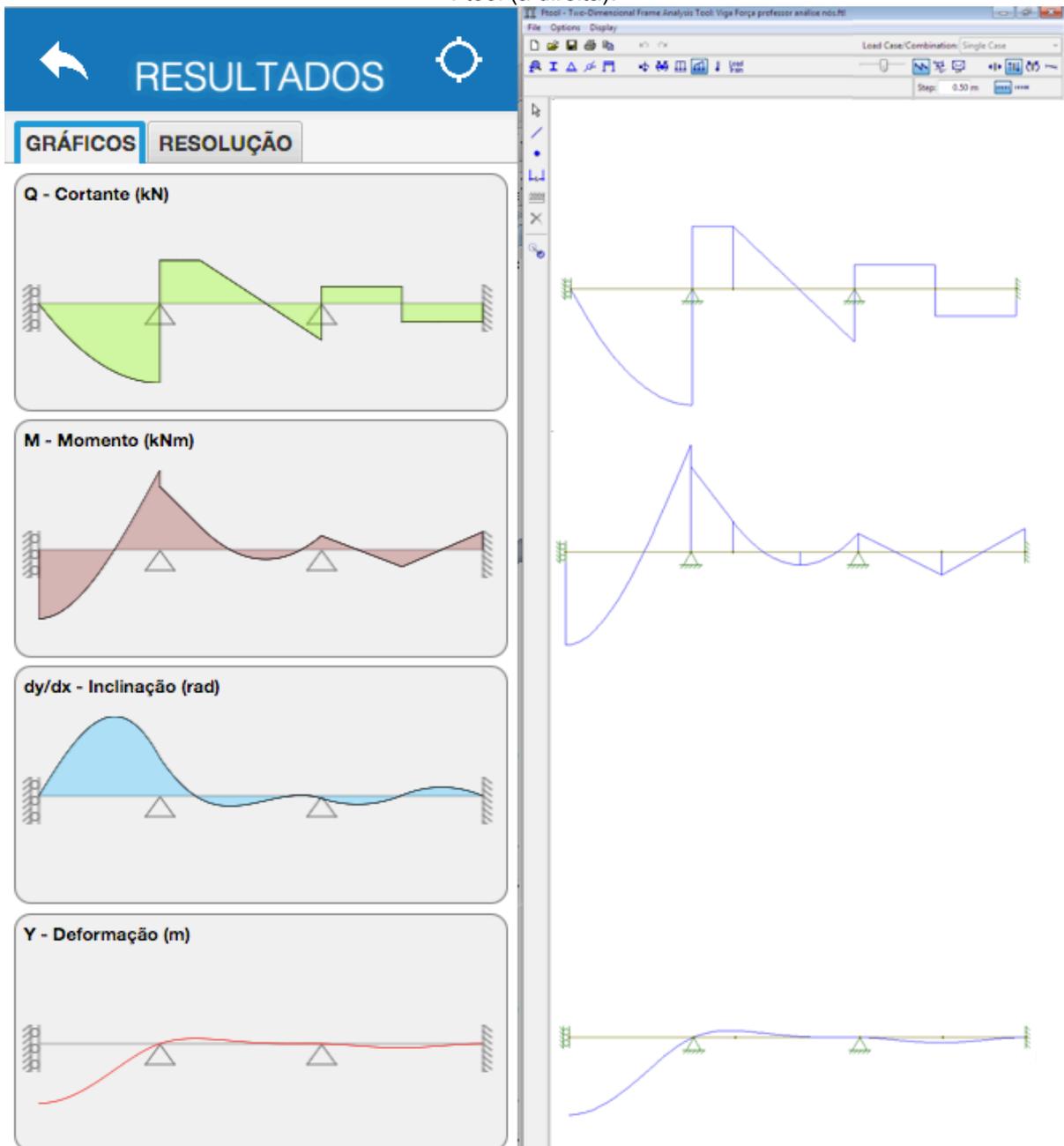
Fonte: Autor, 2018

Observando a tabela 3, verifica-se que o Professor Estrutural obteve os mesmos resultados do Ftool, validando também o método das forças. A figura 5 representa os parâmetros da tabela 3 por meio gráfico e compara a forma do diagrama desenhado por ambos softwares.

Apesar do Ftool fornecer os valores da variável de inclinação ao longo da estrutura, a mesma não é representada graficamente pelo software. Aos demais parâmetros, observa-se que o Professor Estrutural produziu os mesmos gráficos que o Ftool, diferindo apenas na escala gráfica.

Pôde-se constatar, através dos comparativos entre os softwares nos 3 exemplos, a veracidade dos resultados produzidos pelo Professor Estrutural, o que valida o software.

**Figura 5:** Comparativo dos gráficos do exemplo 3 gerados pelo Professor Estrutural (à esquerda) e Ftool (à direita).



Fonte: Autor, 2018

#### **4. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A pesquisa em questão desenvolveu o software Professor Estrutural com o objetivo de aproximar o acadêmico à disciplina Análise Estrutural. Com isso o acadêmico pode compreendê-la a qualquer momento, dado que se trata de uma aplicação de dispositivo móvel de fácil acesso e com uma interface amigável. O programa apresenta métodos de análise como: equações de equilíbrio, método das forças e método dos deslocamentos. Fornece também os diagramas de esforços internos de cortante e momento, inclinação e deformação de modelos estruturais composto por vigas.

Observa-se que vigas foram analisadas com o Professor Estrutural através dos três métodos implementados. Os resultados foram comparados com software educacional Ftool, validando assim os seus resultados.

Por fim, sugere-se para pesquisas futuras a implementação da disciplina Resistência dos Materiais, no qual, o software poderá mostrar as tensões em determinado ponto da estrutura. Além disso, recomenda-se também a expansão dos assuntos da disciplina Análise Estrutural, como linha de influência e o cálculo de treliças e pórticos planos.

## REFERÊNCIAS

DE VASCONCELLOS, Alcebiades. **Teoria das estruturas**: método dos deslocamentos, processo de Cross, tabelas. Belo Horizonte: UFMG, 1986. 457p.

FRAGA, Salmo Souza. **Desenvolvimento de um software gráfico interativo para análise de estruturas espaciais reticuladas**. Montes Claros, 2013. 18p.

HIBBELER, Russell Charles. **Resistência dos materiais**, 7.ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. 641p.

LA ROVERE, Henrite Lebre; SCHNEIDER, Alizeu Francisco. **ANEST**: programa educacional para análise de estruturas reticuladas. IN: XIV Simpósio Brasileiro de Informática na Educação, Rio de Janeiro, 2003. 10p.

LIMA, Silvio de Souza. **Análise de estruturas com computadores**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2017. 165p.

MARTHA, Luiz Fernando. **Análise de estruturas**: conceitos e métodos básicos. 2.ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017. 569p.

PALOSCHI, L. **Desenvolvimento de software para cálculo e análise estrutural em vigas de concreto armado**. 2014. Disponível em: <<http://pet.ecv.ufsc.br/2014/10/desenvolvimento-de-software-para-calculo-e-analise-estrutural-em-vigas-de-concreto-armado/>>. Acesso em: maio de 2018.

RICARTE, Ivan Luiz Marques. **Programação Orientada a Objetos**: Uma abordagem com Java. Campinas, 2001. 117p.

RUGGIERO, Márcia A. Gomes; LOPES, Vera Lúcia da Rocha. **Cálculo numérico**: Aspectos teóricos e computacionais. 2.ed. São Paulo: Pearson, 2000. 395p.

SORIANO, Humberto Lima; LIMA, Silvio de Souza. **Análise de Estruturas**: Método das Forças e Método dos Deslocamentos. 2. ed. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2006.

SOUZA, Cleidson. **Conceitos de Orientação a Objetos**. ????. Disponível em: <<http://www.ufpa.br/cdesouza/teaching/es/3-OO-concepts.pdf>>. Acesso em: maio. 2018.

SÜSSEKIND, José Carlos. **Curso de Análise Estrutural: Estruturas Isostáticas**. 6. ed. Rio de Janeiro: Globo, 1981. 366p.