

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA CÁLCULO DE FLAMBAGEM DE COLUNAS

Valécio Alves Duarte¹; Maxwell Cavalcante Jacome²

Resumo: Nos dias atuais existe uma busca contínua do avanço de tecnologias que facilitem cada vez mais a resolução de problemas. No presente trabalho foi desenvolvido um software prático e de fácil compreensão a fim de não só promover um melhor entendimento do assunto de flambagem de colunas abordado na disciplina de resistência dos materiais, como também incrementar uma ferramenta produtiva para análise das estruturas em questão. A partir da conceituação teórica obtida em artigos, apostilas e livros e dispondo do desenvolvedor de software NetBeans IDE 8.2 criou-se um algoritmo, utilizando a linguagem de programação JAVA, implementando uma interface simples mas que proporcionasse uma maior praticidade ao usuário. O software criado realiza operações na qual consiste na busca do valor da carga crítica e apresentou desenvoltura satisfatória em todos os métodos de cálculo.

Palavras-chave: software; flambagem; JAVA.

1. INTRODUÇÃO

Desde o crescente desenvolvimento das civilizações da humanidade a necessidade de desenvolver construções cada vez maiores foi se tornando um desafio a ser superado. Não somente no que compreende a suas dimensões, mas também a segurança dessas edificações. A arquitetura da Grécia Antiga é um exemplo de edificação antiga de grande extensão e que perpetua até hoje, no qual tem como um traço marcante o uso de colunas. Encontram-se colunas como elemento estrutural também em diversos templos da antiga Mesopotâmia e do antigo Egito.

Atualmente, as colunas fazem parte de quase todas as obras da construção civil e seu estudo torna-se importante tendo em vista ser um elemento estrutural que por vezes será utilizado para sustentação no suporte de cargas, o entendimento de sua estabilidade torna-se imprescindível e a flambagem um importante fenômeno a se compreender a fim de manter a capacidade de suportar determinado carregamento sem sofrer uma mudança brusca na sua configuração comprometendo seu desempenho no local [1].

Entende-se que coluna é um elemento estrutural comprido e esbelto no qual geralmente são submetidos a uma força de compressão axial [2]. Com o intuito de compreender melhor esse elemento, faz-se indispensável o estudo do fenômeno da flambagem das mesmas na disciplina de resistência dos materiais, no qual são abordados conceitos de comprimento efetivo ou comprimento de flambagem e carga crítica, além de fórmulas para colunas ideais e fórmulas empíricas especificadas por códigos e manuais de projeto, no qual se projeta colunas para cargas concêntricas e excêntricas.

Para o dimensionamento deste tipo de estrutura é necessário à análise da estabilidade a flambagem, esta que é uma deflexão lateral que tende a ocorrer em torno do eixo de sua seção transversal com menor momento de inércia, a partir de uma compressão axial [2]. A condição de estabilidade é referente à carga axial máxima, denominada carga crítica, que as colunas podem resistir tal que fique na iminência de sofrer flambagem [3].

Por conta da relevância da determinação dessa carga é preciso que não haja erro para projeto de colunas, já que qualquer erro, por menor que seja, pode ocasionar o rompimento da mesma e acarretar em um desastre da estrutura, possivelmente comprometendo vidas. Em virtude disso, ferramentas computacionais estão ganhando cada vez mais espaço nas mais diversas atividades e áreas da engenharia, minimizando os erros de projeto e anulando os erros de cálculo, além de otimizar o tempo relacionado a manipulação dos dados trabalhados.

Ferramentas essas que estão diretamente ligadas a uma linguagem de programação, que no referido estudo é o JAVA. Este que tem aplicações para diversas finalidades, sendo uma excelente escolha para segurança dos dados além de ser uma boa opção por conta de sua portabilidade das aplicações para diversas arquiteturas, juntamente com o fato de a linguagem ser orientada a objetos [4].

Nesse artigo buscaremos o desenvolvimento de um software no qual tem por objetivo a resolução de questões de flambagem de colunas, além de simular situações adversas para o cálculo de cargas críticas para o projeto da mesma, utilizando a linguagem de programação JAVA no software de desenvolvimento NetBeans IDE 8.2 a fim de auxiliar os estudantes de resistência dos materiais, proporcionando agilidade nas questões e uma maior compreensão do assunto, já que simulações podem ser feitas para outras considerações como casos ideais ou reais, além de fórmulas experimentais para diversos materiais.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão de literatura

2.1.1 Conceitos básicos do estudo de flambagem

O estudo de flambagem possui a utilização comum de termos como comprimento efetivo ou comprimento de flambagem, denominado L_{ef} , no qual é a distância entre pontos de momento fletor nulo e carga crítica, denominado P_{cr} , que em termos físicos representa a carga sob a qual o mecanismo está na iminência de sofrer flambagem [2]. Esta que ao ser atingido faz com que a coluna esteja na iminência de tornar-se instável, de forma que qualquer perturbação nela provoque sua deflexão lateral. Vale ressaltar que qualquer ligeira redução na carga axial aplicada fará com que a coluna retorne ao seu estado de estabilidade e qualquer acréscimo provocará aumentos adicionais na deflexão [2].

Outro conceito de fundamental importância é o índice de esbeltez, calculado por dados geométricos, em que é uma medida da flexibilidade da coluna e serve para classificar a mesma em comprida, intermediária ou curta, com seus intervalos variando de acordo com o tipo de material [2].

2.1.2 Coluna ideal

Para ser considerada uma coluna ideal a mesma tem que admitir que o elemento de sustentação esbelto seja perfeitamente reto antes da carga, feito de um material homogêneo, a carga é aplicada no centroide da seção transversal, o material comporta-se no regime linear elástico e a coluna sofre flambagem ou flexão em um único plano [2]. A partir de experimentos verifica-se que não é possível reproduzir tais considerações, entretanto trata-se de uma “coluna ideal” e, portanto, admitem-se tais condições para efeito de cálculo.

2.1.2.1 Determinação da carga crítica pelo método de Euler

A fórmula de Euler é deduzida a partir da equação (1), na qual considera que a inclinação da curva elástica seja pequena e que as deflexões ocorram somente por flexão [1]. Sendo que o procedimento de dedução é feito para determinados tipos de apoios, como biarticulada, biengastada, composta por um engaste em uma extremidade e na outra livre e composta por uma extremidade engastada e na outra articulada. A modificação na fórmula devido cada tipo de apoio é dado somente através de um fator de comprimento efetivo, denominado K , e assim, mediante essa generalidade, a fórmula de Euler é dada pela equação (2).

$$EI \frac{d^2v}{dx^2} = M \quad (1)$$

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (2)$$

Contudo, caso a carga crítica encontrada provoque uma tensão maior que a tensão de escoamento do material, o cálculo para projeto de coluna desse caso será dado pela equação (3).

$$P_{cr} = \sigma_e \cdot A \quad (3)$$

2.1.3 Projeto de colunas para cargas concêntricas

Como colunas não são perfeitamente retas, sendo que a maioria delas têm tensões residuais devidas principalmente ao resfriamento não uniforme durante a fabricação, os apoios para colunas não são muito exatos e os pontos de aplicação e direções das cargas não são exatamente no centroide e na vertical da seção transversal, faz com que as imperfeições de uma situação real impeçam o uso e as considerações de uma coluna ideal [2]. Entretanto, com o intuito de compensar esses efeitos que variam de uma coluna para outra, muitos códigos e manuais de projeto especificam a utilização de fórmulas empíricas para colunas mediante a formulação de um gráfico, tensão crítica por índice de esbeltez, a partir de inúmeros experimentos e assim desenvolver fórmulas que se ajustem a uma curva próxima dos dados obtidos [2].

Foi observado que o comportamento da curva dos gráficos é influenciado pelo comprimento da coluna e por isso, os catálogos e manuais de projeto especificam fórmulas apropriadas para determinadas faixas de comprimento de colunas, podendo elas ser curtas, intermediárias ou longas [1]. Ou seja, cada fórmula será aplicada somente a uma faixa específica de índice de esbeltez e, por isso, é importante o cuidado com os limites trabalhados, pois um erro nesta etapa compromete rigorosamente o resultado final da carga crítica.

Vale destacar que em colunas longas, geralmente a ruptura ocorre conforme a fórmula de Euler propõe e que depende apenas do módulo de elasticidade, denominado por E . Nas que são muito curtas, a ruptura ocorrerá por escoamento do material, com ênfase na tensão de escoamento, denominada por σ_e . Por fim, nas que apresentam um comprimento intermediário, a ruptura constituirá um fenômeno complexo e será influenciada tanto pelo módulo de elasticidade quanto pela tensão de escoamento [5]

2.1.3.1 Determinação da carga crítica pelas equações de projeto do AISC, da AA e da NFPA

O instituto americano de construção em aço, do inglês American Institute of Steel Construction (AISC), sediado em Chicago, é uma associação comercial sem fins lucrativos no qual serve a comunidade e indústria de construção estrutural de aço na qual elaborou fatores de segurança que são aplicados às fórmulas propostas pelo Structural Stability Research Council para o aço e adotadas como especificações para a construção de edifícios [2].

O instituto divide as fórmulas em duas de acordo com o índice de esbeltez, em colunas longas e curtas, no qual tem o intuito de indicar a tensão admissível que a coluna suporta imediatamente antes de flambar. Como o referido estudo busca essencialmente a carga crítica, basta multiplicar a tensão encontrada pelas fórmulas fornecidas pela sua respectiva área, expostas pelas fórmulas (4) e (5) juntamente com seus respectivos modelos de cálculo dos seus índices para colunas longas e curtas respectivamente.

$$Pcr = \frac{12\pi^2 EA}{23\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \quad \left(\frac{KL}{r}\right)_c \leq \frac{KL}{r} \leq 200 \quad (4)$$

$$Pcr = \frac{\left[1 - \frac{\left(\frac{KL}{r}\right)^2}{2\left(\frac{KL}{r}\right)_c^2}\right] \sigma_e A}{\left(\frac{5}{3}\right) + \left[\frac{\left(\frac{3}{8}\right)\left(\frac{KL}{r}\right)}{\left(\frac{KL}{r}\right)_c}\right] - \left[\frac{\left(\frac{KL}{r}\right)^3}{8\left(\frac{KL}{r}\right)_c^3}\right]} \quad 0 \leq \frac{KL}{r} \leq \left(\frac{KL}{r}\right)_c \quad (5)$$

No qual o termo que intercepta o intervalo entre a coluna curta e longa é dado pela equação (6)

$$\left(\frac{KL}{r}\right)_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{\sigma_e}} \quad (6)$$

A Aluminum Association (AA) foi a responsável pela criação de fórmulas para o projeto de colunas de alumínio estrutural. Entretanto, como existem vários tipos de ligas de alumínio, a associação especifica que as fórmulas são exclusivas para uma liga comum (2014-T6) usada em construção de edifícios [2] e que, como o estudo em questão dá ênfase na carga crítica ao invés da tensão admissível, novamente foi multiplicado pela área da seção utilizada. As fórmulas (7), (8) e (9) juntamente com seus respectivos modelos de cálculo dos seus índices para colunas curtas, intermediárias e longas respectivamente foram utilizadas no software e são expostos a seguir:

$$Pcr = 195A \text{ (MPa)} \quad 0 \leq \frac{KL}{r} \leq 12 \quad (7)$$

$$Pcr = \left[214,5 - 1,628\left(\frac{KL}{r}\right)\right] A \text{ (MPa)} \quad 12 < \frac{KL}{r} < 55 \quad (8)$$

$$Pcr = \frac{378.125A}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \text{ (MPa)} \quad 55 \leq \frac{KL}{r} \quad (9)$$

A National Forest Products Association (NFPA) publicou fórmulas para colunas de madeira retangulares de dimensões b e d, onde d é a menor dimensão da seção transversal [2]. Da mesma forma que ocorreu com o alumínio, foram divididos três fórmulas para colunas curtas, intermediárias e longas com seus respectivos intervalos dos seus índices de esbeltez. Com as devidas alterações para calcular a carga crítica da madeira, as fórmulas (10), (11) e (12) relacionadas aos respectivos tamanhos já mencionados foram usadas no software.

$$Pcr = 8,25A \text{ (MPa)} \quad 0 \leq \frac{KL}{d} \leq 11 \quad (10)$$

$$Pcr = 8,25A \left[1 - \frac{1}{3}\left(\frac{\frac{KL}{d}}{26}\right)^2\right] \text{ (MPa)} \quad 11 \leq \frac{KL}{d} \leq 26 \quad (11)$$

$$Pcr = \frac{3.781A}{\left(\frac{KL}{d}\right)^2} \text{ (MPa)} \quad 26 < \frac{KL}{d} \leq 50 \quad (12)$$

2.1.4 Projeto de colunas para cargas excêntricas

Para colunas no qual a carga não é aplicada no centroide, a excentricidade provoca um momento interno em

que precisa ser considerado e, portanto, podem-se utilizar dois métodos para a obtenção da carga crítica. Estes que são o Método da Tensão Admissível e o Método da interação tal que ambos admitem que a tensão máxima que a coluna está sujeita não deve ultrapassar a tensão admissível do material.

2.1.4.1 Determinação da carga crítica pelo método das tensões admissíveis

Fundamenta-se na suposição de que a tensão admissível para uma coluna com carga excêntrica é a mesma se a coluna contém a carga no seu centroide, propondo assim o modelo mais conservador entre os dois trabalhados [1]. Utilizando manipulações algébricas foi possível deixar a fórmula de modo a isolar a carga crítica mostrada em (13) e, assim, foi inserida no código do software.

$$P_{cr} = \frac{A \cdot I_x \cdot I_y \cdot \sigma_{(adm)}}{I_x \cdot I_y + e_y \cdot c_y \cdot A \cdot I_y + e_x \cdot c_x \cdot A \cdot I_x} \quad (13)$$

2.1.4.2 Determinação da carga crítica pelo método da interação

Baseia-se na consideração das contribuições isoladas dadas à área total da coluna pela força axial e pelos momentos gerados [2]. De maneira análoga, utilizando manipulações algébricas foi encontrado a fórmula (14) no qual a carga crítica encontra-se isolada e, assim, no código do software.

$$P_{cr} = \frac{A \cdot I_x \cdot I_y \cdot \sigma_{(c)} \cdot \sigma_{(f)}}{I_x \cdot I_y \cdot \sigma_{(f)} + e_y \cdot c_y \cdot A \cdot I_y \cdot \sigma_{(c)} + e_x \cdot c_x \cdot A \cdot I_x \cdot \sigma_{(c)}} \quad (14)$$

No qual tanto $\sigma_{(c)}$ quanto $\sigma_{(f)}$ representam tensões admissíveis, porém, centrada e de flexão respectivamente.

2.1.5 JAVA

Java é uma linguagem de programação orientada a objetivo, ou seja, é um método padronizado para comunicar instruções para um computador no qual podem ser usadas para expressar algoritmos, este definido por uma sequência de instruções finitas. O fato de ser orientada a objetivo permite não só que programas de ordem mais complexa e extensa sejam criados como também define os dados e as rotinas que podem atuar sobre eles. Com isso, um tipo de dado define rigorosamente que tipo de operações pode ser aplicado a determinadas variáveis.

O uso de uma linguagem orientada a objetos permite inúmeros benefícios operacionais, tais como um maior índice de reaproveitamento de código, maior facilidade de manutenção, maior confiabilidade no código, maior facilidade de gerenciamento do código, dentre outros. No que diz respeito à linguagem Java especificamente, além de herdar todos esses benefícios por ser uma linguagem orientada a objetivos, sua escolha foi fortemente influenciada por qualidades como a portabilidade das aplicações para diversas arquiteturas de hardware e software e possibilidade de intervir no carregamento das classes em tempo de execução [4]. Além disso, é uma escolha viável quanto à segurança dos dados já que o código Java é executado somente dentro dos limites da Java Virtual Machine (JVM), o que proporciona um ambiente seguro na execução do código [3].

Estas foram as razões que motivaram a utilização do Java, através do software de desenvolvimento NetBeans IDE 8.2, na elaboração do software para o estudo do fenômeno de flambagem de colunas.

2.2 Estratégia de programação para o software

Trata-se da abordagem sobre a lógica de programação usada para a construção do software, no qual foi utilizado o NetBeans IDE 8.2 junto do JavaFX Scene Builder que este basicamente é um construtor de tela no qual foi obtido as interfaces.

2.2.1 Obtenção dos dados fundamentais

A interface inicial do software consiste na escolha do perfil da coluna que será trabalhado ao longo de todo o procedimento de cálculo. Esta etapa mostra-se de grande importância, pois o perfil vai conduzir qual cálculo utilizar a fim de determinar algumas das propriedades geométricas da coluna, no caso, a sua área de seção transversal e os seus momentos de inércia em relação aos dois eixos principais da seção, nomeados respectivamente de A , I_x e I_y .

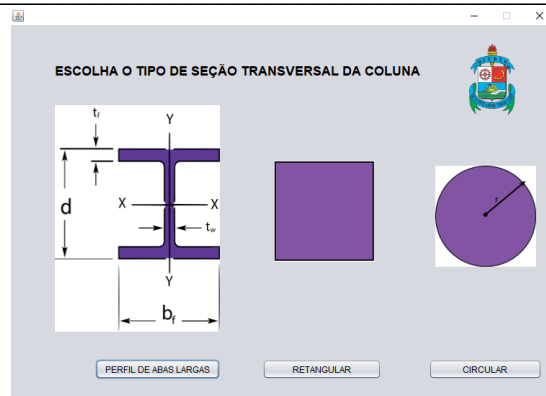


Figura 1: Interface inicial

Os valores das variáveis relacionadas às propriedades geométricas serão calculados, ou seja, a partir da escolha da seção da coluna outra interface será aberta no qual é preciso inserir todos os valores dimensionais necessários para o cálculo dessas propriedades. Há, portanto, a opção de escolha de cinco diferentes perfis, que são: abas largas, retangular maciço, retangular vazado, circular maciço e circular vazado.

Por conseguinte, a programação que a envolve foi desenvolvida de forma a solicitar ao usuário do programa a descrição da forma como a coluna está apoiada no problema em análise, dando as opções de encontrar-se biarticulada, biengastada, engastada em uma extremidade e livre na outra e engastada em uma extremidade e articulada na outra. Além de identificar o tipo de apoio da coluna, na mesma interface já é requerida a informação do seu respectivo comprimento, para que sejam obtidos os valores do fator de comprimento efetivo e o comprimento da coluna, nomeados respectivamente de K e L .

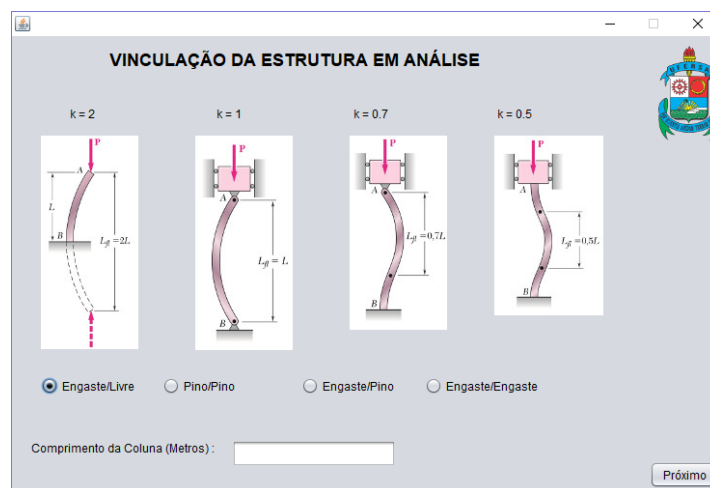


Figura 2: Interface vinculada aos apoios

2.2.2 Implementação dos métodos de resolução

A interface seguinte propõe o método de Euler, as equações de projeto e o projeto de colunas para cargas excêntricas. Estes três que são os principais métodos abordados nas literaturas de resistência dos materiais e, portanto, focadas no software em questão.

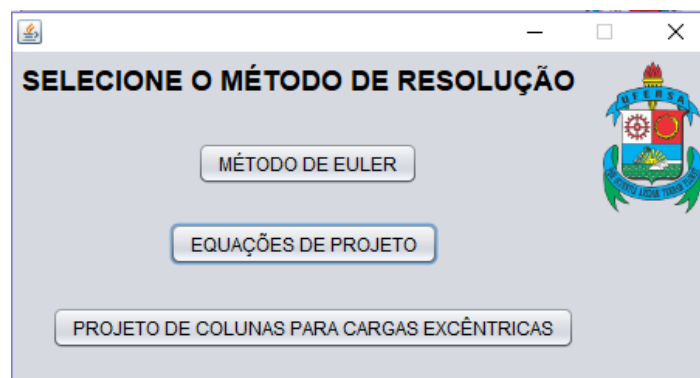


Figura 3: Interface dos métodos de resolução

2.2.2.1 Método de Euler

Com a escolha desse método a fórmula (2) é utilizada para o cálculo da carga crítica, e, para isso, é preciso que seja inserido o módulo de elasticidade, denominado por E . Além disso, caso a força encontrada pelos cálculos provoque um valor de tensão maior que a tensão de escoamento, denominada por σ_e , o cálculo será dado através da fórmula (3). Portanto, ao selecionar este método a resposta será dada assim que os valores de E e σ_e forem inseridos.

2.2.2.2 Equações de projeto

Com a escolha desse método uma nova interface será exposta com três opções de materiais, nos quais são aço, alumínio e madeira.

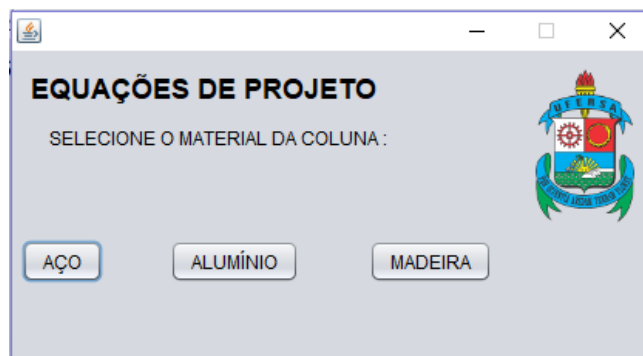


Figura 4: Interface da seleção do material

Ao escolher a opção do aço, da mesma forma que o método de Euler, abrirá uma interface no qual deve ser inserido o módulo de elasticidade e a tensão de escoamento. O software, utilizando da fórmula (4) ou (5), calculará a carga crítica e em seguida irá expor seu valor. Para o alumínio, diferentemente do aço, não será necessário inserir novos dados, portanto, ao clicar nessa opção, o valor será calculado pela fórmula (7), (8) ou (9) e em seguida exposto. Por fim, a opção da madeira que, assim como com o alumínio, não é necessário inserir novos dados. Entretanto, de acordo com as literaturas que basearam o estudo, esta última opção não é catalogada para outros tipos de perfis que não seja retangular, portanto, caso escolha outro tipo de perfil e a selecione, não será calculado a carga crítica e aparecerá um aviso informando esse fato. Caso seja escolhido um perfil retangular, será calculado pela fórmula (10), (11) ou (12) e em seguida exposto.

2.2.2.3 Projeto de colunas para cargas excêntricas

O terceiro e último método foi subdividido em dois, “método das tensões admissíveis” e “método da interação”, calculados respectivamente pelas fórmulas (13) e (14). Porém, ambos estão relacionados a cargas aplicadas fora do centroide geométrico da seção transversal. Portanto, faz-se necessário o acréscimo de novos valores para a utilização das fórmulas relacionadas aos métodos.

Ao escolher a subdivisão desejada, independente de qual seja, abrirá a interface dos materiais, assim como ocorre no método das equações de projeto e os procedimentos seguintes são os mesmos. Entretanto, ao invés de calcular, o software abrirá uma nova interface no qual se destina a inserção da excentricidade da carga, ou seja, as distâncias relativas aos dois eixos do centroide, denominados por e_x e e_y . A diferença entre as interfaces destinadas ao acréscimo dessas distâncias quando comparado às subdivisões é que pelo método da interação, além de inserir o e_x e e_y , faz-se necessário também a adição da tensão admissível para flexão, denominado por $\sigma_{(f)}$.

Portanto, ao atribuir valores para essas variáveis e avançar será dado o valor da carga crítica.

2.2.3 Fluxograma

A figura 6 consiste de um fluxograma que foi criado para facilitar a visualização dos procedimentos que devem ser realizados ao se utilizar o software desenvolvido. Para tal, ele representa a sequência de operações a serem realizadas pelo usuário do programa.

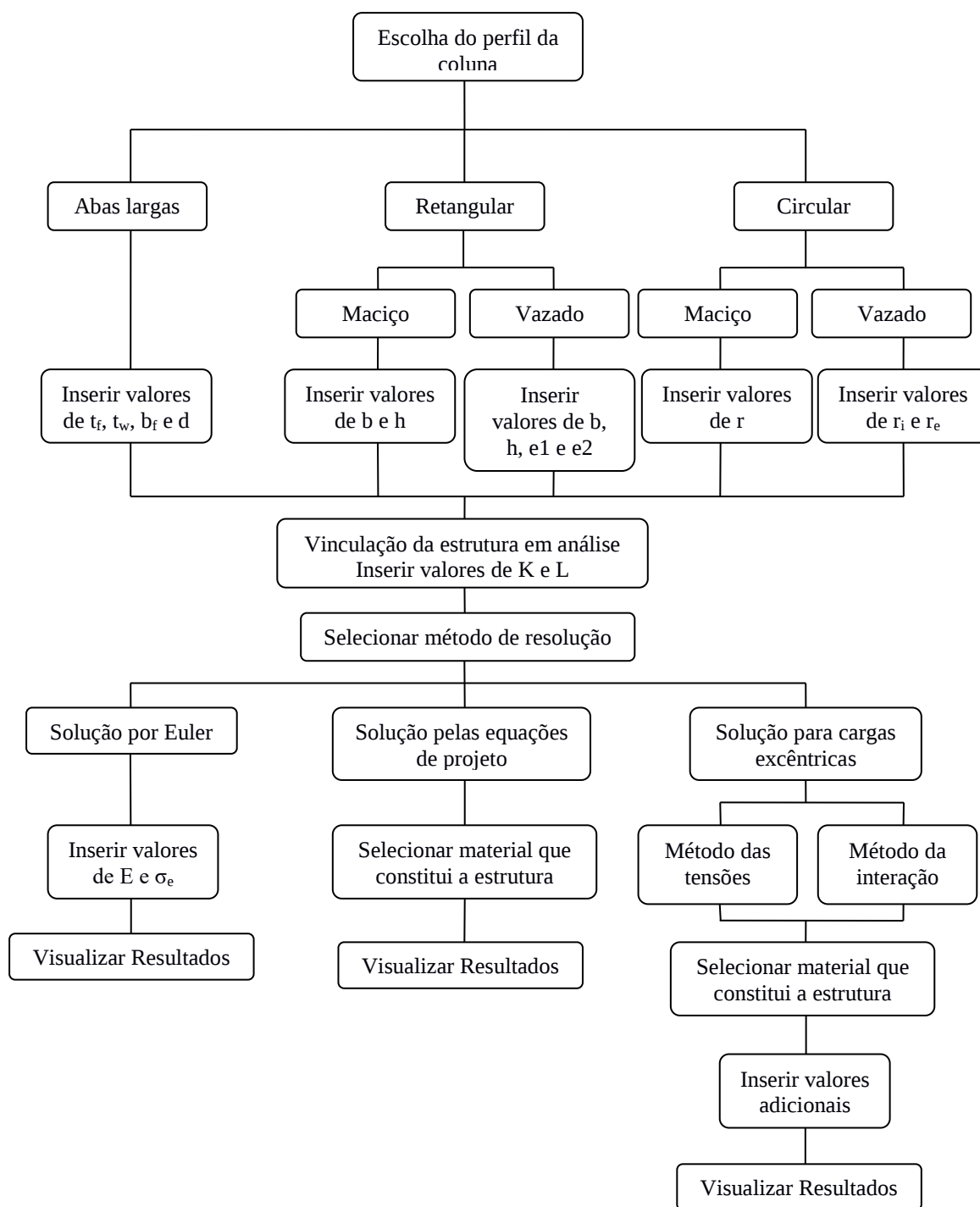


Figura 6: Fluxograma da lógica do software

2.4 Resultados e discussão

Ao desenvolver o software ele foi sucessivamente testado em diversas questões do livro Hibbeler no qual se observou uma pequena diferença entre os valores calculados e os obtidos nas resoluções, entretanto por essa diferença ser da ordem de 2% ela foi atribuída aos arredondamentos feitos no percurso seguido pelo método de resolução adotado no livro, já que através do software há um aproveitamento de mais de dez casas decimais, portanto, é mais exato.

Vale ressaltar também que em questões cuja finalidade coincide com o objetivo do programa, o cálculo da carga crítica, o mesmo obteve êxito em todos os casos, sendo que foram propostos mais de quarenta questões, abordando áreas de seção transversal, tipos de apoios e métodos de resolução diferentes.

É importante que o usuário use o software com atenção, pois existem campos de preenchimento de variáveis que pode ser escolhido a unidade e outros que não pode, no qual já informa a unidade desejada. Por fim, além da atenção, a interpretação da questão por via do usuário é essencial para a análise correta de todas as variáveis e obtenção do resultado satisfatório através do software.

3. CONCLUSÕES

Por meio dos resultados obtidos com as aplicações do software desenvolvido na resolução de problemas de flambagem, verificou-se que o objetivo principal deste trabalho foi alcançado, pois em todos os casos o programa foi capaz de determinar a carga crítica das estruturas analisadas com considerável exatidão. Tal fato foi confirmado através de questões do livro Hibbeler no qual foram comparados os resultados.

Verificou-se também a objetividade do software, por meio de interfaces simples e claras, no qual não deixa nenhuma ambiguidade para má interpretação, com o auxílio de figuras e indicações de tudo que é requerido para sua utilização.

É importante ressaltar as limitações do programa, pois o mesmo foi desenvolvido para cálculos diretos de carga crítica, entretanto, os problemas de flambagem abrangem também o dimensionamento da coluna e a busca de tensões aplicadas na superfície. Em virtude disso, para trabalhos futuros, pretende-se tornar o software mais abrangente, aumentando a sua aplicabilidade, no que diz respeito à resolução de problemas de dimensionamento, compreender maiores áreas de seção transversal e acrescentar novos métodos para determinação da carga crítica,

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BEER, Ferdinand P. et al. Mecânica dos Materiais-7ª Edição. AMGH Editora, 2015.
- [2] HIBBELER, Russell Charles. Resistência dos Materiais. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2003. 420 p.
- [3] LIANG, Sheng; BRACHA, Gilad. Dynamic class loading in the Java virtual machine. Acm sigplan notices, v. 33, n.10, p. 36-44, 1998.
- [4] LOBOSCO, Marcelo. Um Ambiente para Suporte à Construção e à Evolução de Sistemas. 1999. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado. IC/UFF.
- [4] LOBOSCO, M.
- [5] VANDERLEI, Romel Dias. Flambagem de Colunas. Disponível em: <<http://www.gdace.uem.br/romel/MDidatico/MecanicaSolidosII/Capitulo5FlambagememColunas.pdf>> Acesso em: 20. fev. 2013.
- [6] SCHILDT, Herbert. Java para Iniciantes. Bookman Editora, 2015.