

Desenvolvimento de interface em MATLAB para análise de estabilidade lateral de arcos em perfil I em estrutura de aço

Gabriel F. Andrade¹, Francisco C. G. S. Segundo², Matheus F. A. Silva³

¹ Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Campus Pau dos Ferros
Pau dos Ferros – RN – Brasil

^{2,3} Departamento de Engenharias e Tecnologia – Universidade Federal Rural do
Semi-Árido (UFERSA-CMPF), Campus Pau dos Ferros
Pau dos Ferros – RN – Brasil.

gabriel.andrade9@hotmail.com, francisco.segundo@ufersa.edu.br,
matheus.silva@ufersa.edu.br.

Abstract. *In this work the formulation for the lateral stability calculation of arcs in profile I in steel is described. The formulations were implemented in MATLAB, with the goal of developing a user-friendly interface. Finally, a parametric analysis of the results found for a given type of arc is made. It has been found that the arcs have greater strength in the plane when the radius is increased and out of plane, when bracing is applied.*

Resumo. *Neste trabalho é descrita a formulação para cálculo de estabilidade lateral de arcos em perfil I em aço. As formulações foram implementadas em MATLAB, com o objetivo de desenvolver uma interface amigável. Por fim, é feita uma análise paramétrica dos resultados encontrados para um determinado tipo de arco. Verificou-se que os arcos apresentam uma maior resistência no plano quando se aumenta o raio e fora do plano, quando se aplicam contraventamentos.*

1. Introdução

Arcos estruturais são submetidos a forças normais de compressão na maioria das situações, podendo existir também momentos fletores, assim Souza, Rodrigues e Mascia (2008) definem arcos. Estes arcos, quando analisadas no seu plano, podem apresentar compressão pura, possibilitando a estabilidade da estrutura em seu plano e uma melhor eficiência, que pode ser obtida quando o carregamento coincidir com o centro axial do arco (ALVES, 2015).

Perfis I apresenta uma boa resistência diante de cargas, por seu momento inércia apresentar valores que seções semelhantes quadradas, por exemplo, essa resistência advinda da inércia faz com uma estrutura usando perfil I apresente uma boa estabilidade. Normalmente são usados perfis I de aço, que apresentam a boa estabilidade do perfil combinado a boa resistência a cargas de tração que o aço suporta. Quando um perfil I é aplicado a uma estrutura como pilar, ou seja, está submetido a forças de compressão tenderá a flambar no eixo de menor inércia. Na cobertura do edifício apresentado na Figura 1, o sistema estrutural adotado é o de arcos. Estes arcos apresentam seus apoios

de extremidade rotulados, como pode-se perceber na ligação entre o arco e o elemento de fundação em concreto armado.



Figura 1 – Exemplo de arco em perfil I
(<https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-813319665-estrutura-metalica-galpo-cobertura-metalica-mezanino-JM>)

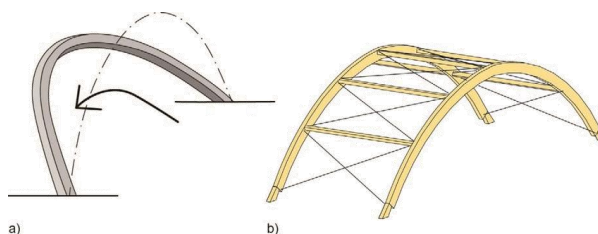


Figura 2: Estabilidade de arco fora do plano e com contraventamento
(CROCKETI, 2016, p. 6)

De acordo com Guo *et al.* (2014), arcos são elementos que apresentam maior estabilidade no plano e, quando submetidos a grandes esforços, apresentam uma tendência em se deformarem fora do plano de carregamento, e essa existência de flexão do plano do arco pode levar a estrutura a apresentar restrições elásticas. Pode-se observar na Figura 2 (a) um arco apresentando uma flexão fora de seu plano, já na Figura 2 (b) é demonstrada uma forma de aumentar a estabilidade da estrutura nesta configuração de perda de estabilidade, sendo o arco submetido a contraventamentos, tirantes aplicados entres os nós da estrutura para aumentar a rigidez nos nós, e por conseguinte, a estrutura como um todo.

Os arcos são averiguados como elementos semelhantes aos pilares, tendo em vista que ambos estão submetidos, preponderantemente, a esforços axiais de compressão, apresentando em seus devidos sistemas infinitesimais, esforços internos análogos. Segundo Crocetti (2016), as formas estruturais circulares devem estar submetidas a momentos de flexão da menor forma possível, pois deve-se evitar a influência que tais esforços exercem sobre os elementos, mesmo que pequenos, com isso, os arcos devem ser planejados para que suas geometrias fiquem nas linhas de maior carregamento.

Diante da escassez de informações técnicas nacionais sobre a estabilidade de arcos em perfil I para aplicação em coberturas, faz-se necessário o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para o cálculo de carga crítica deste tipo de estrutura. Acrescenta-se ainda o intuito da usabilidade simplificada de um *software* que auxilie na obtenção de dimensões para essas estruturas em fases preliminares de projetos (pré-dimensionamento).

Desenvolver uma interface para fins de verificação de comportamento de estabilidade de arcos em perfis I em aço considerando os dados de projeto. Mediante a falta de suporte digital básico para análise de estabilidade de arcos, tanto na flexão-torção como na perda de estabilidade no plano, é necessária uma ferramenta de aplicação simplificada, ou seja, um *software* para análise de estabilidade acessível, básico e intuitivo, no qual poder-se-á projetar estruturas de arcos e perfis I para fins preliminares. Além disso, por meio do *software* é possível simular situações variando a

geometria do arco e obter curvas de interesse para o seu pré-dimensionamento. Há a necessidade de uma ferramenta básica para o cálculo de estabilidade de arcos pelo fato de o único método viável para essa análise seria um estudo de estrutura por elementos finitos, que seria uma vertente mais complexa para a análise dessa estabilidade estrutural.

2. Revisão Bibliográfica

No campo de estudos estruturais, uma estrutura sai de seu estado de equilíbrio quando existem perturbações externas arbitrárias aplicadas na mesma. O equilíbrio pode ser classificado como estável, instável ou neutro, a depender do seu estado após as perturbações, ou seja, se volta ao estado inicial ou não (ver Figura 3).

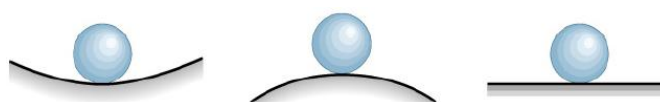


Figura 3: Situação de equilíbrio Estável, Instável e neutro

([\)](https://www.google.com.br/search?q=equilíbrio+estavel+e+instavel&rlz=1C1GGRV_enBR751BR751&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwinpeO8tMnZAhWOrVvKHToOBegQ_AUICigB&biw=1600&bih=769#imgrc=OOwyOruofPfiMiM:)

A carga crítica de flambagem para uma coluna ideal (material homogêneo e elástico-linear, excentricidade nula e barra sem imperfeições geométricas) foi deduzida por Euler em 1757. A equação deduzida a partir do equilíbrio de uma coluna na situação deformada relativa ao primeiro modo de Flambagem é dada a partir da carga crítica, P_{cr} expressa a seguir:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E (Ar^2)}{L^2} \Rightarrow \left(\frac{P_{cr}}{A}\right) = \frac{\pi^2 E}{(L/r)^2} \therefore \sigma_{cr} = \frac{P_{cr}}{A} \quad (1)$$

dessa forma, a tensão é dada pela seguinte expressão:

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(L/r)^2} \quad (2)$$

Onde σ_{cr} é a tensão crítica que é a tensão média na coluna imediatamente antes de a coluna flambar, essa tensão é uma tensão elástica e, portanto, $\sigma_{cr} \leq \sigma_E$, E é o módulo de elasticidade do material, L é o comprimento da coluna sem apoio, cujas extremidades são presas por pinos, r é o menor raio de giração da coluna, determinado por $r = \sqrt{I/A}$, onde I é o menor momento de inércia da área da seção transversal A da coluna.

Em estruturas de aço sempre existem excentricidades das cargas de compressão aplicadas nos elementos comprimidos; os perfis estruturais, laminados ou soldados, possuem tensões residuais decorrentes do seu processo de fabricação. Sendo assim, a formulação clássica de Euler não se aplica em situações práticas de projeto.

De acordo com Alves (2015), a perda de estabilidade está ligada as forças externas aplicadas e as propriedades da estrutura, incluindo condições de contorno, excentricidades de forças e eixos de peças, defeitos de material e esforços na fronteira (momentos aplicados nas extremidades). A flambagem pode ser classificada como instabilidade bifurcacional e instabilidade por ponto limite, ou melhor, a flambagem é

do tipo bifurcacional quando é decorrente da aplicação de forças sobre a estrutura em seu estado deformado, possibilitando uma deformação maior ou menor, e instabilidade por ponto limite é quando a estrutura se apresenta muito instável, sem poder ser suportada por alterações no nível das cargas às quais está submetida.

O carregamento que possui o semicírculo como a linha de pressão há a ação de cargas radiais. Esse tipo de carregamento pode surgir quando o vento envolvendo uma cobertura com estrutura de arco, por exemplo. Na maioria dos casos, carregamento será do tipo uniformemente distribuído, o que ocasiona o surgimento de efeitos de flexão nos arcos.

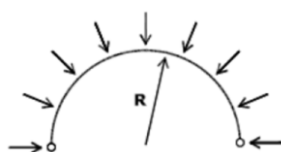


Figura 4 – Incidência de cargas distribuídas ao longo do arco

Verificando uma parte infinitesimal do arco da Figura 4, de acordo com Soriano (2014, p. 211) tem-se a seguinte expressão da tensão axial na qual o arco está submetido

$$N = - \frac{dV}{d\theta} - qR \quad (3)$$

onde N é tensão axial, dV é o infinitésimo de força cortante aplicada em um trecho infinitesimal de ângulo $d\theta$, q é a carga distribuída ao longo do arco e R é o raio.

Os arcos quando analisados no plano, estão predominantemente submetidos a esforços de compressão. “As especificações alemãs DIN 4114 e as Especificações Japonesas para Pontes Rodoviárias recomendam determinar a tensão admissível de compressão para membros de arco por uma fórmula de força de coluna” (SAKIMOTO E KOMATSU, 1983, p. 613). Arcos quando submetidos a grandes esforços saíram do seu equilíbrio, entrando em estado de instabilidade, e quando são em perfil I, podem se alterar as dimensões da alma e das mesas, para aumentar a resistência da estrutura e diminuindo a sua tendência a flambagem.

Fatores necessários para o dimensionamento de arcos são o tipo de aço e o perfil aplicado, daí analisa-se o aço e seu respectivo limite de escoamento e, a partir da obtenção das dimensões do perfil ter-se-á a seção transversal da estrutura em estudo.

Sakimoto e Komatsu (1983) propõem um modelo analítico para cálculo de carga crítica de Flambagem de arcos em perfis I em aplicações em pontes. A Flambagem Lateral se desenvolve conjuntamente com torção da seção transversal do elemento. Como simplificação para pré-dimensionamento, a formulação do autor foi utilizada neste trabalho para configurações de arcos em perfil I em coberturas.

Para a obtenção de dados de tensão crítica é necessário obter valores de esbeltez, e para chegar a tais valores, deve-se ter o valor equivalente do comprimento do arco, ou seja, para cálculos necessita-se do tipo de apoio, forma da aplicação de forças externas e da distância da projeção horizontal de travamentos do arco, caso existam, para isto, utiliza-se as fórmulas de Sakimoto e Komatsu (1983).

As equações para a obtenção da tensão crítica estão mostradas abaixo, σ_{cr} é a tensão crítica, σ_y é a tensão de escoamento do aço e λ a esbeltez.

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} = 1 - 0,136 \lambda - 0,3 \lambda^2 \quad \text{para } 0 \leq \lambda \leq 1 \quad (3a)$$

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} = 1,276 - 0,888 \lambda - 0,176 \lambda^2 \quad \text{para } 1 \leq \lambda \leq 2,52 \quad (3b)$$

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} = \lambda^{-2} \quad \text{para } 2,52 < \lambda \quad (3c)$$

Para se chega a esbeltez utiliza-se a fórmula descrita abaixo

$$\lambda = \frac{K L}{\pi r} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (4)$$

em que K é o fator de comprimento efetivo do arco, L é o comprimento do arco, r é o raio de giro em torno do eixo y e E é o módulo de elasticidade.

$$N_{cr,FP} = \sigma_{cr} A \quad (5)$$

Segundo o autor, a constante K depende da forma que as forças estão incidindo sobre o arco, se são de forma totalmente vertical ou não, depende dos tipos de apoio da estrutura, se é biengastado ou biarticulado, e deve ser feita uma análise acurada sobre o contraventamento presente na estrutura, verificar se há e seu possível comprimento horizontal.

Já para obter a carga axial crítica efetua os cálculos da Eq. (5), onde é necessária a tensão crítica a partir das fórmulas de Sakimoto e Komatsu (1983) e a área do perfil adotado. Com fins de obtenção da carga axial crítica no plano utilizou-se a fórmula presente em Sáles, Malite e Gonçalves (1994), que propõem a Equação 6, apresentada a seguir, onde S é o comprimento total do arco e μ é um parâmetro referente ao esquema estático do arco.

$$N_{cr,NP} = \frac{4 \pi^2 E I}{(\mu S)^2} \quad (6)$$

3. Materiais e Métodos

Foi utilizado o MATLAB (*MATrix LABoratory*) para a criação de uma interface simples usada para a obtenção de resultados mediante arcos em perfil I fornecidos pelo usuário. O MATLAB pode efetuar cálculos das formas mais simples até cálculos diferenciais, sendo similar a uma calculadora. Também funciona como uma linguagem de programação científica. O *software* é a interligação de programação lógica, cálculos e a possibilidade de criação de interfaces gráficas.

No ambiente GUIDE (*Graphical User Interface Development Environment*) do programa, foi desenvolvida a interface gráfica do aplicativo aqui tratado. Essa aplicação do MATLAB possibilita que seja criada uma interface de forma rápida e fácil, ele permite que a criação da interface gráfica seja feita de forma programática, por códigos de programação.

Na Figura 5 mostra as telas da interface criada, nela o usuário definirá qual o aço será aplicado na estrutura (Figura 5a), na segunda, (Figura 5b) será definido o perfil, e na Figura 5c são aplicados os dados de projeto, e por fim, na Figura 5d, fornecerá os resultados. Todas as janelas estão interligadas para que na medida que uma seja completada e o usuário clicar no “OK”, a janela seguinte seja aberta e fechando a anterior. É importante que o usuário saiba que o único campo que pode ser deixado em branco é a opção do comprimento contraventado.

A interface desenvolvida na GUIDE do MATLAB, onde se ligam janelas e são implementados artifícios condicionais para apresentar na tela as tensões obtidas para o plano e fora do plano. O *software* MATLAB foi escolhido por ser uma ferramenta conhecida e por possibilitar a criação de interface gráfica de forma simples. O *software* no qual foi desenvolvida a interface apresenta uma vasta biblioteca de ajuda, assim como há a possibilidade de executar cursos online mediante, possibilitando-se a utilização do MATLAB como uma ferramenta básica.



Figura 5– Janelas da interface desenvolvida no MATLAB

4. Resultados e Discussões

Para a análise do comportamento da estabilidade de um arco, foram implementados os dados de entrada na interface criada e com os resultados obtidos foram plotados os gráficos dispostos abaixo no EXCEL. Adotou-se parâmetros de forma arbitrária para observar como a estrutura se comporta quando se varia o vão com o arco apresentando contravento ao longo de todo o vão (Figura 6), analisar o comportamento do arco

quando se modifica o comprimento do vão para arcos sem nenhum contraventamento (Figura 7), e verificar a estrutura quando o raio é quem vai ser modificado (Figura 8). Foi aplicado o aço ASTM A36/ MR250, cujo limite de escoamento é de 25kN/cm², um perfil I de 5", com peso de 22kg/m.

Para se obter os dados apresentado na Figura 6, manteve-se o comprimento do raio constante, com 50 m e manteve o comprimento de contraventamento máximo, ou seja, o mesmo comprimento do vão. De acordo com os dados mostrados no gráfico pode-se observar que a estrutura analisada tende a flambar no seu plano, pois atinge a carga crítica no plano primeiro do que a carga de tender a flambar lateralmente. Com isso pode-se verificar que o contraventamento dá uma grande resistência a estrutura, fazendo com que a estrutura tende a flambar no seu plano precocemente.

Para a segunda análise, adotou-se os mesmos parâmetros atribuídos no estudo da Figura 6, a mudança foi que, para esse caso não se adotou nenhum contraventamento. A partir da Figura 7 nota-se que para um vão pequeno, o arco em estudo ainda apresenta uma grande diferença relacionada a carga axial, mas de acordo com o aumento do comprimento do vão a carga crítica se aproxima da tenção axial do plano, mostrado nas curvas da Figura 7. Pode-se concluir que, analisando as curvas da Figura 7, que a estrutura tenderá a apresentar pequenas variações na resistência do seu plano, e na medida que o vão aumenta, a resistência a flambar para fora do plano é cada vez menor.

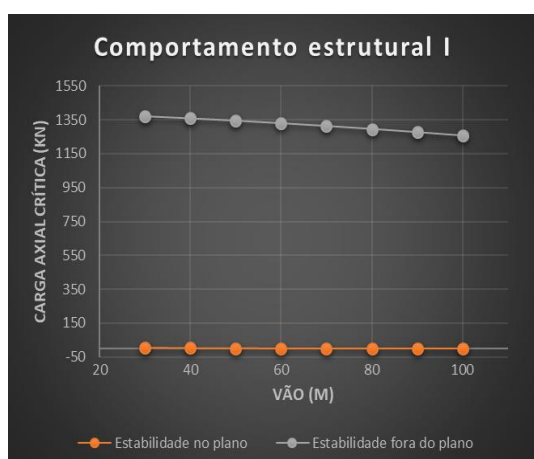


Figura 6 – Análise no vão do arco (L) na carga crítica

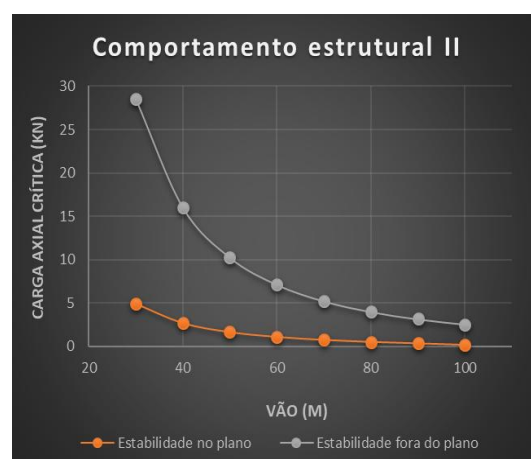


Figura 7 – Análise de Estabilidade no plano e fora do plano com a variação do vão

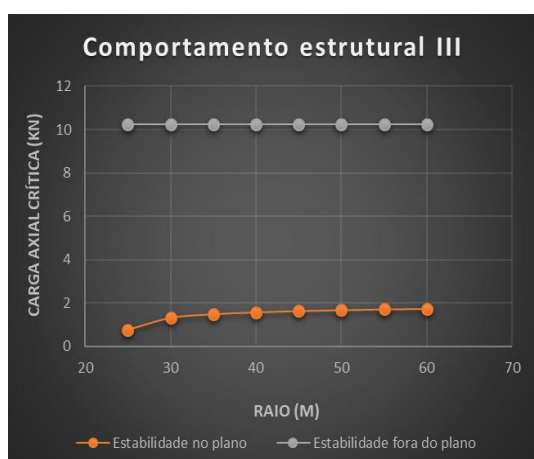


Figura 8 – Análise de estabilidade do arco com a variação do raio

Na obtenção dos dados da Figura 8, adotou-se o vão constante de 50m, sem contraventamentos e verificou-se as curvas na variação do raio plotadas na Figura 8. Obteve-se nas curvas do gráfico que a estrutura apresenta maiores resistências no plano quando se aumenta o raio, por apresentar uma curva crescente, na medida que fora do plano, pode-se concluir que a tensão axial se manteve constante. De acordo com o que se tem no gráfico, conclui-se que na medida que o raio aumenta, se tornará semelhante a uma viga, ou seja, como mostra a Figura 8, apresenta uma maior resistência no plano.

5. Conclusões e considerações finais

O presente artigo apresentou dados obtidos a partir da utilização do *software* MATLAB, no qual foi criada uma interface para cálculos preliminares e verificação de flambagem de arcos em perfil I. Os resultados mostram que, quando à contraventamento, a estrutura resiste a altas cargas axiais, porém, também mostrou que se deve aumentar a resistência dos arcos no plano, onde apresentaram uma resistência muito pequena. Verificou-se que com os parâmetros analisados, os arcos apresentam uma grande tendência a flambar no seu próprio plano, e que para ganhar resistência no plano, pode aumentar o raio, deixando o arco com altura muito pequena, a estrutura apresenta maior estabilidade.

Parâmetros que podem ser estudados que não são apresentados no presente artigo são a análise do comportamento para comprimentos de vão pequenos, estudos da variação da seção transversal, a modificação das chapas do perfil I, como também analisar a influência do aço na estrutura e, por conseguinte, verificar sua influência na estrutura como um todo.

6. Agradecimentos

Agrademos à UFERSA, Centro Multidisciplinar de Pau dos Ferros pelo apoio fornecido no trabalho de pesquisa desenvolvido. Assim como as pessoas que contribuíram para a execução deste estudo.

7. Referências

- ALVES, Vitória Marques. **Estudo sobre a estabilidade de arcos metálicos esbeltos como suporte de membranas**. 2015. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Técnico Lisboa, Lisboa, 2015.
- CROCETTI, Roberto. STRUTTURE IN LEGNO DI GRANDE LUCE. Alcune considerazioni ingegneristiche sulla progettazione_PARTE 2. **Structural**, [s.l.], n. 206, p.1-16, ago. 2016. De Lettera Editore s.a.s.. <http://dx.doi.org/10.12917/Stru206.16>.
- GUO, Yan-lin *et al.* Out-of-Plane Elastic Buckling of Circular Arches with Elastic End Restraints. **Journal Of Structural Engineering**, [s.l.], v. 140, n. 1, p.040140711-040140719, out. 2014. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0000987](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0000987).
- SAKIMOTO, Tatsuro; KOMATSU, Sadao. ULTIMATE STRENGTH FORMULA FOR STEEL ARCHES. **Journal Of Structural Engineering**, [s.l.], v. 109, n. 3, p.613-627, mar. 1983.
- SÁLES, José Jairo de ; MALITE, Maximiliano; GONÇALVEZ, Roberto M. **Cobertura em arco metálico treliçado**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 1994.
- SOUZA, Marta Francisca Suassuna Mendes de; RODRIGUES, Rafael Bezerra; MASCIA, Nilson Tadeu. **Sistemas estruturais de edificações e exemplos**. Disponível em: http://www.fec.unicamp.br/~nilson/apostilas/sistemas_estruturais_grad.pdf. Acesso em: 23 nov. 2017.
- SORIANO, Humberto Lima. **Estática das Estruturas**. 4. ed. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2014. 422 p.