

INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO DE CARREGAMENTOS USUAIS PARA A LINHA DE PRESSÕES E ESFORÇOS NORMAIS EM ARCOS TRIARTICULADOS COM O AUXÍLIO DE UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL

LUCAS NOGUEIRA DE ANDRADE¹, LEONARDO HENRIQUE BORGES DE OLIVEIRA²

¹Bel. em Engenharia Civil, UFERSA, Pau dos Ferros-RN, eng.lucas.nogueira@outlook.com;

²Me. em Engenharia Civil, Prof. Titular, UFERSA, Pau dos Ferros-RN, leonardo.oliveira@ufersa.edu.br;

Apresentado no
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC
Palmas/TO – Brasil
17 a 19 de setembro de 2019

RESUMO: O objetivo deste trabalho é estudar o comportamento de arcos triarticulados submetidos a carregamentos verticais através de uma ferramenta computacional desenvolvida pelo autor. Foram feitas análises a partir de gráficos gerados pela ferramenta de acordo com que se variava a distribuição do carregamento ao longo da estrutura. Diante dos resultados obtidos concluiu-se que a equação da linha de pressões de um arco triarticulado possui a mesma ordem da equação de momento fletor em uma viga de substituição e depende do carregamento o qual o arco está submetido. Verificou-se também que nos arcos os esforços normais máximos geralmente se localizam nos apoios e os mínimos na articulação central mais alta. Com relação à distribuição das cargas nos arcos triarticulados, observou-se que quanto mais se distribui a carga do centro em direção aos apoios, menores são os esforços normais gerados.

PALAVRAS-CHAVE: Arcos triarticulados, linha de pressões, esforço normal, VB Triarticulado, carregamentos usuais.

INFLUENCE OF THE DISTRIBUTION OF USUAL LOADS TO THE LINE OF PRESSURES AND NORMAL EFFORTS IN ARCHES TRIARTICULATED WITH THE AID OF A COMPUTATIONAL TOOL

ABSTRACT: The objective of this work is to study the behavior of triarticulated arches submitted to vertical loads through a computational tool developed by the author. Analyzes were made from graphs generated by the tool according to which the distribution of the load along the structure varied. In view of the results obtained it was concluded that the pressure line equation of a triarticulate arche has the same order of the equation of bending moment in a substitution beam and depends on the load at which the arche is submitted. It has also been found that at the arches the maximum normal forces are usually located at the supports and the minimum at the highest central joint. Regarding the distribution of the loads in the triarticulated arches, it was observed that the more the center load is distributed towards the supports, the smaller the normal loads generated.

KEYWORDS: Triarticulate arches, line of pressures, normal effort, VB Triarticulado, usual loads.

INTRODUÇÃO

Podem-se definir estruturas em arco como elementos com geometria curva que transmitem seu peso próprio e as sobrecargas a dois apoios, por meio apenas ou principalmente de esforços normais simples de compressão (NUNES, 2009).

O estudo de arcos teve destaque quando foi reconhecido que estes permitiam a construção de estruturas com grandes vãos, mais duráveis e resistentes. De acordo com Antunes (2010), os primeiros a utilizarem os arcos foram os etruscos. Posteriormente, os romanos obtiveram e aprimoraram o conhecimento sobre arcos e difundiram pela Europa. Nesta época, os arcos eram feitos de alvenaria onde suas conexões não possibilitavam rigidez aos esforços de flexão. Dessa forma, conforme

Sussekind (1981), pela falta de conhecimento dos princípios da estática, os construtores da antiguidade clássica utilizaram da intuição para vencer grandes vãos com arcos e abóbadas de alvenaria de pedra.

Logo, de acordo com Antunes (2010) o estudo da segurança de estruturas em forma de arco obteve um grande avanço desde a antiguidade, partindo de regras empíricas de dimensionamento, utilizadas pelos antigos construtores, até um conhecimento racional do funcionamento destas estruturas. A utilização de métodos numéricos facilitou o desenvolvimento e o melhoramento das técnicas de análise de segurança estrutural. Assim, foram aprimoradas técnicas de construção e a forma de classificação das estruturas arqueadas.

Os arcos podem ser classificados quanto à forma e quanto à estabilidade. Em especial, para este estudo destacam-se os arcos triarticulados que são classificados quanto à estabilidade como estrutura isostática. Os arcos triarticulados são estruturas cujos esforços e tensões atuantes são de difícil determinação, apesar de serem classificados como estruturas isostáticas e sua configuração ser determinada pelo equilíbrio das forças. A sua utilização se torna prejudicada devido às dificuldades impostas na determinação desses esforços e tensões, que serão utilizados no processo de dimensionamento.

Os arcos apresentam valor estético e estrutural. Estético, devido à beleza apresentada nas construções que o utilizam, e estrutural devido a sua capacidade de vencer grandes vãos em comparação com estruturas mais convencionais, como os pórticos. Apesar disso, a dificuldade de domínio do comportamento estrutural dos arcos prejudica a sua utilização nas edificações contemporâneas.

Com o domínio dessas estruturas, é possível prever a configuração mais adequada tornando-o capaz de vencer grandes vãos e obter a configuração de esforços mais adequada além de estimar as regiões de maiores concentração de tensões em uma seção transversal.

O pouco conhecimento do comportamento estrutural dessas estruturas tem consequências diretas na concepção de muitos sistemas estruturais. O arco, em algumas situações, pode ter uma viabilidade econômica mais favorável que um sistema apertado, porém os poucos conhecimentos de estudos físicos levam os responsáveis técnicos a utilizar um sistema mais consolidado estruturalmente.

Segundo Antunes (2010), “a instabilidade é a principal causa de colapso de estruturas em arco, sendo que o dimensionamento, para um dado carregamento e vão, consiste num processo de identificação das proporções corretas.” Assim, o auxílio de um software é importante para configurar arcos de um modo geral, e especificamente os triarticulados que são os de interesse para o estudo sugerido.

A análise de estruturas arqueadas com relação à distribuição do carregamento garante uma maior segurança para o uso na prática, além de proporcionar um conhecimento mais amplo sobre o comportamento dos arcos triarticulados que serão estudadas nesse trabalho.

Diante disso, objetiva-se neste trabalho analisar como se comportam as linhas de pressões e os esforços normais em arcos triarticulados de acordo com a distribuição de carregamentos usuais através de uma ferramenta computacional desenvolvida pelo autor.

MATERIAL E MÉTODOS

Para a concretização do estudo sugerido, utilizou-se de técnicas com o objetivo de abranger toda a área de estudo, envolvendo primeiramente atividades de embasamento teórico, estudando a literatura. O texto foi elaborado com base em publicações e pesquisas já existentes na literatura dentre elas: livros, artigos, dissertações e teses, as quais fundamentaram a pesquisa realizada.

Para realizar as análises presentes neste trabalho foi desenvolvida uma ferramenta computacional denominada de VB Triarticulado a qual foi desenvolvida na plataforma Visual Basic 2010 Express. A ferramenta foi desenvolvida com o intuito de otimizar as análises gerando respostas rápidas e precisas.

As análises tratam da comparação da variação da distribuição do carregamento na estrutura com o objetivo de estudar o comportamento da linha de pressões e esforços normais conforme se aumenta a distribuição do carregamento ao longo da estrutura. Para realização da referida análise, adotou-se uma carga de 10 kN concentrada no centro da distância entre os apoios. Foram feitas comparações variando a distribuição desta carga mantendo o módulo total de 10 kN . Fixou-se comprimento do vão igual a 10 m e altura da flecha igual a 5 m , variando apenas a distribuição do carregamento na estrutura. A carga inicial foi distribuída em trechos equivalentes a:

1 m, 2 m, 4 m, 6 m, 8 m, e 10 m, obtendo relações entre a distribuição do carregamento e o comprimento do vão do arco iguais a: 0,1; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 e 1. Conforme a Tabela 1 que contém os dados utilizados nas análises.

Tabela 1: Dados utilizados nas Análises

	$(xf - xi)$ [m]	Q $\left[\frac{kN}{m}\right]$	$Q \cdot (xf - xi)$ [kN]	L [m]	F [m]	$\left(\frac{xf - xi}{L}\right)$
Análise 1	(5,5 - 4,5)	10	10	10	5	0,1
Análise 2	(6 - 4)	5	10	10	5	0,2
Análise 3	(7 - 3)	2,5	10	10	5	0,4
Análise 4	(8 - 2)	1,67	10	10	5	0,6
Análise 5	(9 - 1)	1,25	10	10	5	0,8
Análise 6	(10 - 0)	1	10	10	5	1

Em que:

$(xf - xi)$ → Distribuição do carregamento ao longo do vão.

xf → Posição final do carregamento distribuído na estrutura.

xi → Posição inicial do carregamento distribuído na estrutura.

Q → Valor do carregamento aplicado.

L → Comprimento do vão.

F → Altura da flecha.

$\left(\frac{xf-xi}{L}\right)$ → Relação entre a distribuição do carregamento e o comprimento do vão.

$Q \cdot (xf - xi)$ → Carga inicial utilizada na análise.

Para a determinação dos resultados desse trabalho foram utilizadas a Equação 1 (solicitação horizontal no arco) Equação 2 (linha de pressões) e Equação 3 (esforço normal). A linha de pressões é a forma ideal em que um arco triarticulado pode estar devido corresponder a forma mais econômica de trabalho estrutural. Se o arco triarticulado estiver na forma da linha de pressões do carregamento atuante não se verifica momento fletor no arco, apenas esforços normais simples de compressão. A Equação 1 representa a equação da solicitação horizontal em um arco triarticulado. As equações citadas estão conforme estão conforme Sussekind (1981).

$$H' = \frac{Mg}{F} \quad 1)$$

$$y(x) = \frac{Ms(x)}{H'} \quad 2)$$

$$|N_S| = \sqrt{Q_S^2 + H'^2} \quad 3)$$

Em que:

$F(x)$ → Flecha do arco.

$Mg(x)$ → Momento fletor na viga de substituição em relação a rótula central.

$y(x)$ → Equação da linha de pressões.

$Ms(x)$ → Momento fletor em uma seção qualquer da viga de substituição.

H' → Solicitação horizontal no arco.

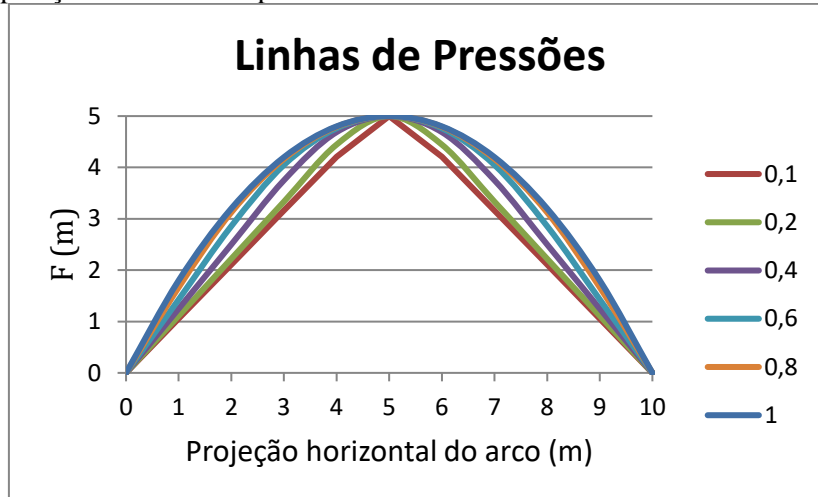
N_S → Representa a normal na seção S.

Q_S → Representa o cortante na viga de substituição.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados utilizados nas referidas análises apresentam-se na Tabela 1. Através dessas análises pretende-se observar como o arco triarticulado se comporta de acordo com o aumento da distribuição do carregamento ao longo do vão, sempre mantendo a carga e a geometria equivalentes para todos os casos. O Gráfico 1 ilustra a comparação das linhas de pressões para as relações entre $(xf - xi)/L$ apresentadas na Tabela 1.

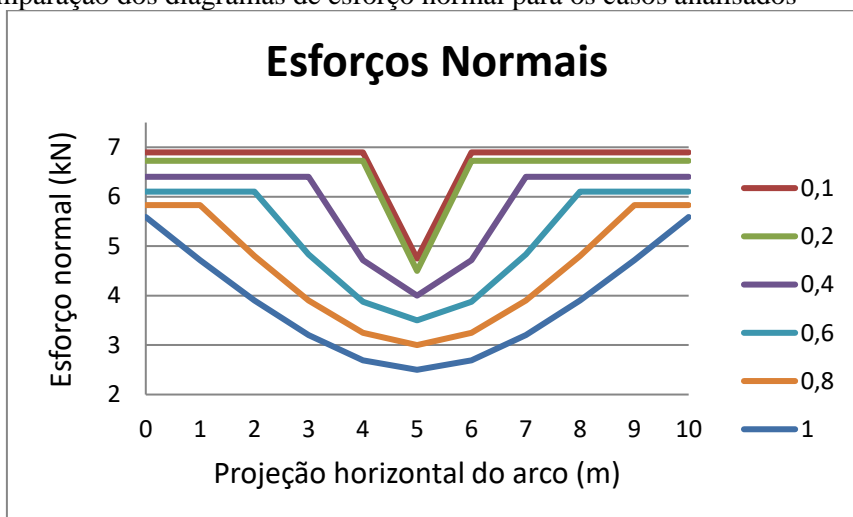
Gráfico 1: Comparação das linhas de pressões obtidas através do VB Triarticulado



Pôde-se observar no Gráfico 1 com relação à linha de pressões do carregamento atuante, que conforme se aumenta a distribuição do carregamento aplicado ao longo da estrutura a linha de pressões tende a ficar mais parabólica até formar uma parábola perfeita quando o carregamento é distribuído ao longo de todo o arco. Isto ocorre devido à equação da linha de pressões (EQUAÇÃO 2) possuir a mesma ordem da equação de momento fletor na viga de substituição. No trecho em que há o carregamento distribuído a linha de pressões tende a se comportar como uma parábola pois a equação gerada é de segundo grau. No trecho em que não há carregamento distribuído a equação de momento fletor para a viga de substituição de primeiro grau, portanto o gráfico se apresenta de forma linear.

Com relação à distribuição de esforços normais ao longo do arco, o Gráfico 2 ilustra a comparação da distribuição desses esforços.

Gráfico 2: Comparação dos diagramas de esforço normal para os casos analisados



No Gráfico 2 é possível observar que, para uma carga distribuída uniformemente os maiores esforços normais podem ser obtidos nas proximidades dos apoios (ver o diagrama de $\frac{x_f - x_i}{L} = 1$ no Gráfico 2). No centro do vão o esforço normal tem um módulo bem inferior em comparação com as regiões próximas do apoio, chegando a valores em torno de 45% para distribuição de carregamento igual ao comprimento do vão ($\frac{x_f - x_i}{L} = 1$) e de, aproximadamente 69% para distribuição de carregamento igual a 10% do vão ($\frac{x_f - x_i}{L} = 0,1$).

O esforço normal (EQUAÇÃO 3) no arco triarticulado depende da força cortante na viga de substituição e da solicitação horizontal no arco triarticulado (EQUAÇÃO 2). Nas proximidades da

rótula central (centro do arco, para curva que representa a análise 6) o esforço cortante na viga de substituição muda de positivo para negativo e, devido à própria geometria do arco apresenta uma diminuição do seu módulo. Assim, pode-se observar no Gráfico 2 que, para um carregamento uniformemente distribuído, o diagrama de esforço normal no arco triarticulado se comporta com uma parábola com concavidade para cima com esforços normais máximos próximos as extremidades (apoios) e mínimos no centro do arco (rótula central).

Para um carregamento mais próximo de uma carga concentrada (analisando por base o caso de $\frac{x_f - x_i}{L} = 0,1$) o diagrama apresenta partes constantes e lineares. O fato de o esforço normal diminuir de acordo com que se distribui a carga na estrutura está relacionado com o valor do momento fletor gerado com relação ao ponto da rótula central. Ao distribuir a carga ao longo da estrutura, o momento fletor calculado no ponto da rótula através da viga de substituição diminui. Logo, o esforço normal também diminui, visto que o valor da solicitação horizontal no arco depende diretamente do momento fletor gerado na rótula conforme (Equação 1), e o esforço normal no arco triarticulado depende dessa solicitação horizontal (Equação 3).

CONCLUSÃO

A ferramenta desenvolvida para realizar as análises deste trabalho mostrou-se de grande utilidade já que o software desenvolvido apresentou eficiência quando comparado com a resolução analítica de problemas didáticos encontrados na literatura.

Com relação à linha de pressões dos arcos triarticulados observou-se com o auxílio da literatura e do software desenvolvido que a equação da linha de pressões tem o mesmo grau da equação de momento fletor e está diretamente ligada ao carregamento aplicado na estrutura, isto é, um carregamento uniformemente distribuído proporciona uma linha de pressões parabólica, pois gera uma equação de segundo grau, assim como uma carga concentrada no meio do vão fornece uma linha de pressões triangular. Quando a estrutura está no formato da linha de pressões observam-se apenas esforços normais de compressão.

Com relação à distribuição de cargas nas estruturas percebe-se facilmente com o auxílio do software que para uma pequena distribuição das cargas surgem esforços normais com maiores módulos, quando se aumenta a distribuição do carregamento do centro do vão em direção dos apoios os esforços gerados diminuem. Isso ocorre pois quando distribui mais a carga a solicitação horizontal gerado no arco diminui.

De acordo com a interpretação dos gráficos gerados pela ferramenta desenvolvida, pode-se perceber que os esforços normais máximos geralmente se localizam nos apoios e os mínimos se apresentam na articulação central mais alta.

REFERÊNCIAS

- ANTUNES, Gonçalo José Justino. **Comportamento Estrutural de Edifícios Antigos Estruturas Arqueadas Planas**. 2010. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2010.
- NUNES, Patrícia Cristina Cunha. **TEORIA DO ARCO DE ALVENARIA: UMA PERSPECTIVA HISTÓRICA**. 2009. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.
- SÜSSEKIND, Jose Carlos. **CURSO DE ANÁLISE ESTRUTURAL: Estruturas Isostáticas**. 6. ed. Porto Alegre - Rio de Janeiro: Globo, 1981. 366 p.