

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE ARCOS COM FLECHA VARIÁVEL

Vitor Hugo de Oliveira Marques
Maicon Marino Albertini
Roberto Racanicchi
Curso de Engenharia Civil - Universidade Brasil - UB
vhmarques67@gmail.com
malbertini.ub@gmail.com
racanicchi.ub@gmail.com

RESUMO

Um dos elementos mais usados na engenharia de estruturas para se vencer grandes vãos sem dúvida nenhuma é o arco. Este elemento tem se demonstrado muito efetivo quanto ao modo como ele absorve os esforços solicitantes, fato que é explicado pela sua forma geométrica, onde o projetista “molda” seu arco de acordo com o tipo de carregamento predominante que a estrutura irá suportar. Teoricamente, o arco perfeito teria que sofrer apenas esforços axiais de compressão, eliminando os momentos fletores, mas na prática isso é um pouco diferente do idealizado na teoria, pois a inexistência de momentos fletores se torna praticamente impossível. Este trabalho tem o objetivo de avaliar e comparar a grandeza dos esforços de uma ponte em arco com várias flechas, e também encontrar a relação mais favorável entre o vão e a flecha, quanto aos momentos fletores. Neste trabalho a estrutura foi submetida apenas ao seu peso próprio, carregamento este, o predominante, ou seja, ele é que vai ser levado em consideração para a definição da geometria do arco. Para isso, foi utilizado o programa de computador específico.

Palavras-chaves: Arco, análise, flecha, esforços, programa de computador.

INTRODUÇÃO

Para este trabalho, foi usada uma vasta literatura que aborda o estudo das estruturas em arcos e, para a análise proposta foi usado o software de análise estrutural mundialmente conhecido. A estrutura foi lançada no software bi-dimensionamente usando somente elementos de barra.

Sistemas estruturais de forma ativa – cabos e arcos

Segundo Leet (2010), o arco aproveita o material de forma eficaz, pois devido a sua forma as cargas atuantes provocam predominantemente compressão axial em todas as seções transversais.

Para se compreender o funcionamento de um arco com clareza e o fenômeno mencionado acima, é preciso primeiramente entender o funcionamento de um cabo.

Segundo Sussekind (1987) devido a alta flexibilidade e a baixa rigidez que um cabo possui, ele é resistente apenas a esforços axiais de tração, tendo momentos nulos em todas as seções.

Conforme Fay (2006), um cabo sob ação de determinado carregamento, tende a adquirir a forma de seu diagrama de momento fletor quando comparado a uma viga retilínea de mesmo vão, chamada de forma funicular, como mostra a figura abaixo.

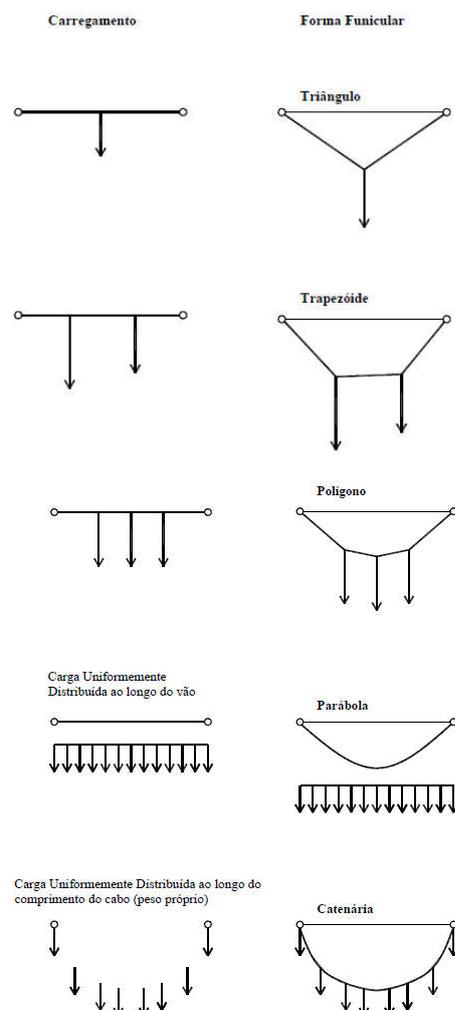


Figura 1: Exemplo de formas funiculares de um cabo

Fonte: Fay (2006)

A partir de compreendido o funcionamento básico de um cabo, compreender o

funcionamento do arco se tornará muito simples. Segundo Fay (2006), se as formas funiculares resultantes do cabo forem invertidas usando um elemento rígido ao invés de um totalmente flexível, este estará submetido somente à esforços de compressão simples, como esquematizado na figura a seguir.

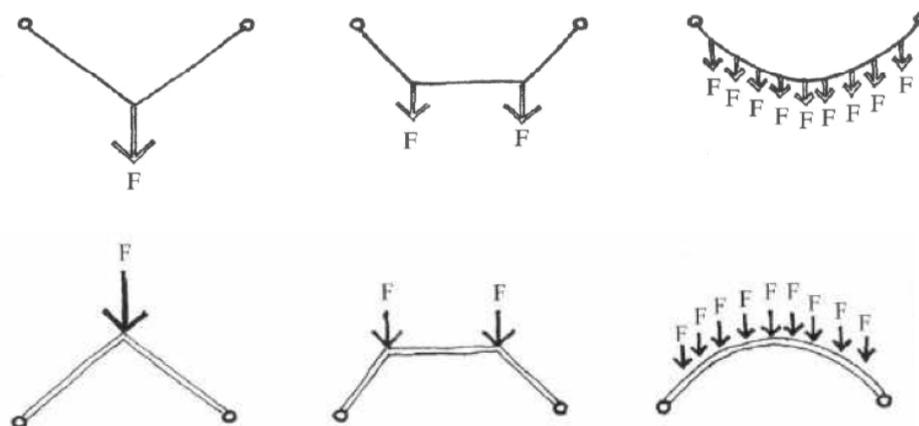


Figura 2: Exemplo de formas funiculares de um arco
Fonte: Fay (2006)

Segundo Rebelo (2012), é essencial, atribuir aos arcos, formas que se aproximem ao máximo das funiculares, pois quanto mais a forma do arco se afasta da funicular maior os esforços de flexão presentes no arco, e quanto maior esses esforços de flexão menor a eficiência dele, visto que o grande objetivo da estrutura em arco é reduzir ao máximo os momentos fletores.

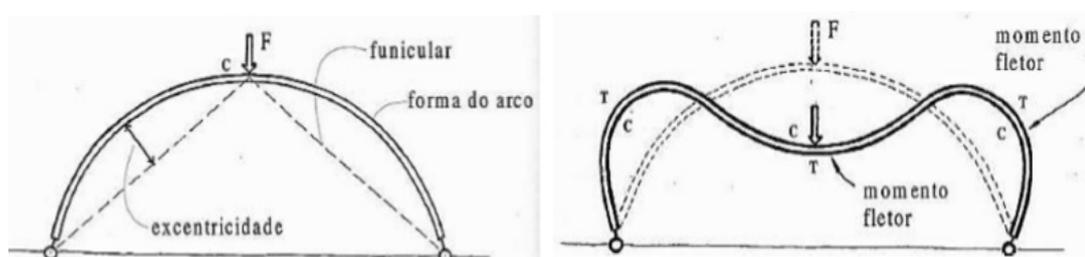


Figura 3: Arco não funicular
Fonte: Rebelo (2012)

Assim como ocorre no cabo, o arco também provoca uma reação horizontal nas extremidades, denominada de empuxo horizontal. A diferença em relação ao cabo é que no arco, essa reação horizontal tende a abri-lo. Conforme Fay (2006), a reação horizontal que surge nos apoios é inversamente proporcional à flecha, ou seja, fixado um vão e um carregamento, quanto

menor for a flecha do arco maior será a reação horizontal nos apoios, e quanto maior a flecha menor a reação horizontal nos apoios.

Existem três tipos de arcos, podendo ser eles, bi-engastado e bi-articulado (hiperestáticos), e o tri-articulado (isostático). Um arco pode ter no máximo três articulações, pois acima disso ele se torna hipostático.

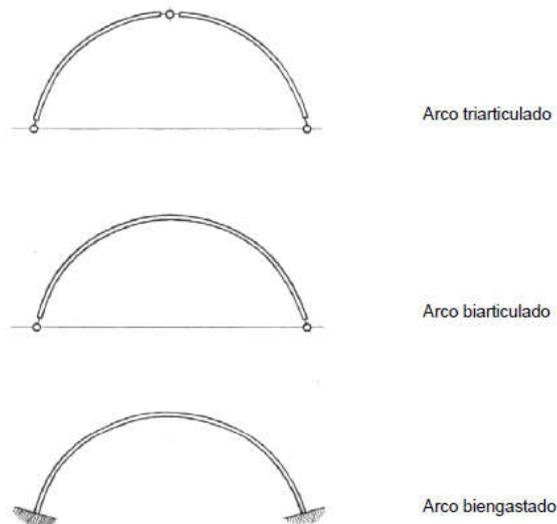


Figura 4: Tipos de arcos
Fonte: Fay (2006)

MATERIAIS E MÉTODOS

Escolha do modelo

Primeiramente, deve-se frisar que o grande objetivo desse trabalho é avaliar o comportamento do arco mediante a variação da relação vão/flecha (L/f), visto que, de acordo com a literatura, essa relação é a principal característica desse tipo de estrutura. Segundo Pinto (2012), a maioria das estruturas em arco, apresenta uma relação L/f entre 10 e 2, e seguindo este parâmetro, este trabalho apresentará uma sequência de análise de uma ponte em arco com uma variação L/f de 10 até 2, ou seja, nove análises, com a flecha crescente, ponte após ponte. Como o objetivo deste trabalho é avaliar a relação L/f , e a predominância dos esforços nesse tipo de estrutura são as cargas permanentes, optou-se por uma análise bi-dimensional, pois uma análise tri-dimensional para esse objetivo não seria relevante.

No que diz respeito às dimensões da estrutura foi padronizado um vão para o arco de 60 metros. A distância entre pilares 5 metros, sendo a altura deles a necessária para unir o arco ao

tabuleiro. A distância vertical entre o topo do arco e o tabuleiro foi padronizado em uma distância correspondente a $f/20$, para se ter uma proporcionalidade entre as dimensões.

Como a característica principal da estrutura em arco é a predominância de esforços de compressão, o material escolhido para a análise foi o concreto. O f_{ck} escolhido foi 25 Mpa, por se tratar de uma classe de concreto bem comum. De acordo com a NBR 6118/2014: “Estruturas de concreto – procedimento”, considerando um concreto C25 com agregado graúdo de arenito, seu módulo de elasticidade é 28 GPa (28.000 Mpa)

Em relação as ligações, optou-se por um arco bi-engastado, pelo fato de a maioria dos arcos de concreto terem esse esquema estático. Os pilares foram rotulados com o intuito de não transferirem esforços do tabuleiro para o arco, ou seja, eles transferem apenas o peso do tabuleiro para o arco.

Quanto às seções das peças, não cabe nesse trabalho avaliar a efetividade ou a usualidade das seções adotadas, pois tal avaliação levaria a um desvio no objetivo, portanto, seções genéricas foram adotadas. O tabuleiro será de laje maciça, de 9 metros de largura (2 faixas de rodagem + passeios laterais) e 0,60 metros de altura. Os pilares-parede com largura de 5 metros e espessura de 0,25 metros; O arco terá seção contínua de extremidade a extremidade, com 5 metros de largura e 1,20 metros de altura.

Quanto à geometria do arco, como os carregamentos aplicados nele se aproximam de um carregamento distribuído, e a forma funicular do carregamento distribuído é uma parábola, o arco será parabólico em todas as análises, apenas variando a flecha.

Ações consideradas

De acordo com Pinto (2009), são as ações permanentes que definem a forma do arco, portanto somente ações permanentes serão consideradas nesse trabalho. O peso próprio de toda a estrutura (tabuleiro, pilares-parede e arco) é calculado automaticamente pelo programa de acordo com as respectivas seções e peso específico do concreto armado, que de acordo com a NBR 6120/2019: “Cargas para o cálculo de estruturas e edificações” é de 25 kN/m³. Para os guarda corpos de concreto será considerada uma carga de 5 kN /m. Quanto a pavimentação, a NBR 7187/2003: “Projeto de pontes de concreto armado e de concreto protendido - procedimento” indica um peso específico de no mínimo 24 kN/m³, prevendo uma carga extra de 2 kN/m² de um futuro recapeamento. Conforme a tabela 1 da NBR 8681/2003: “Ações e segurança nas estruturas”, o coeficiente de ponderação γ_f do peso próprio da estrutura de concreto será 1,35, e o γ_f dos elementos construtivos será 1,40.



Figura 5: Ponte real similar ao modelo proposto
Fonte: Sousa (2012)

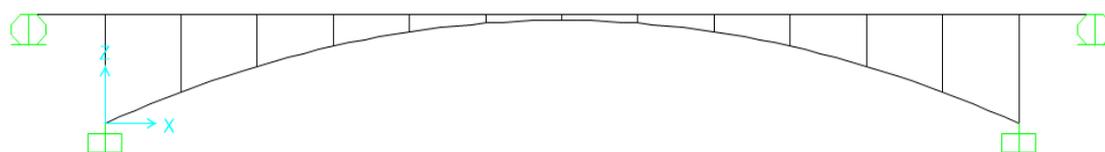


Figura 6: Primeira estrutura lançada
Fonte: Próprio autor

DISCUSSÃO

Os resultados serão apresentados em formas de diagramas e também de gráficos, para uma melhor visualização da análise comparativa entre todas as estruturas. Após apresentados os diagramas e gráficos necessários, será feita uma avaliação dos resultados para mostrar a coerência dos mesmos, ou eventuais confrontações.

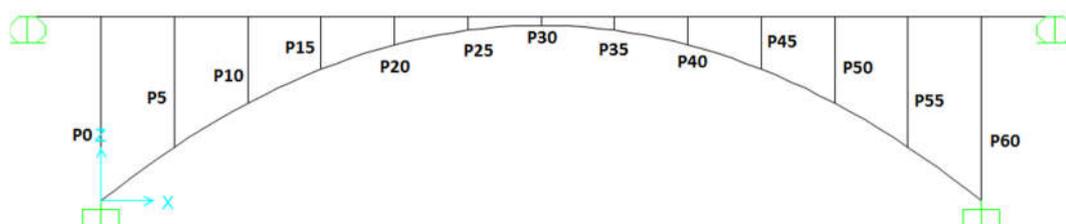


Figura 7: Nomenclatura dos pilares.
Fonte: Próprio autor

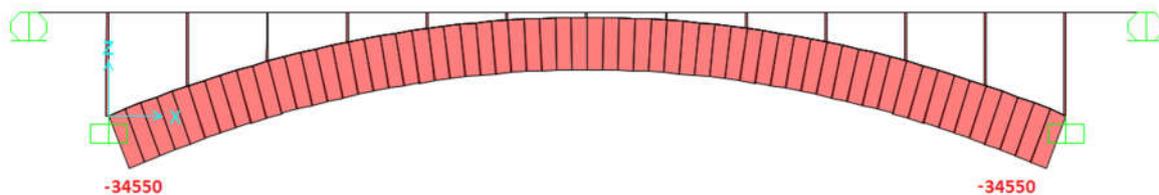


Figura 8: Esforço axial; arco L/f 10
Fonte: Próprio autor

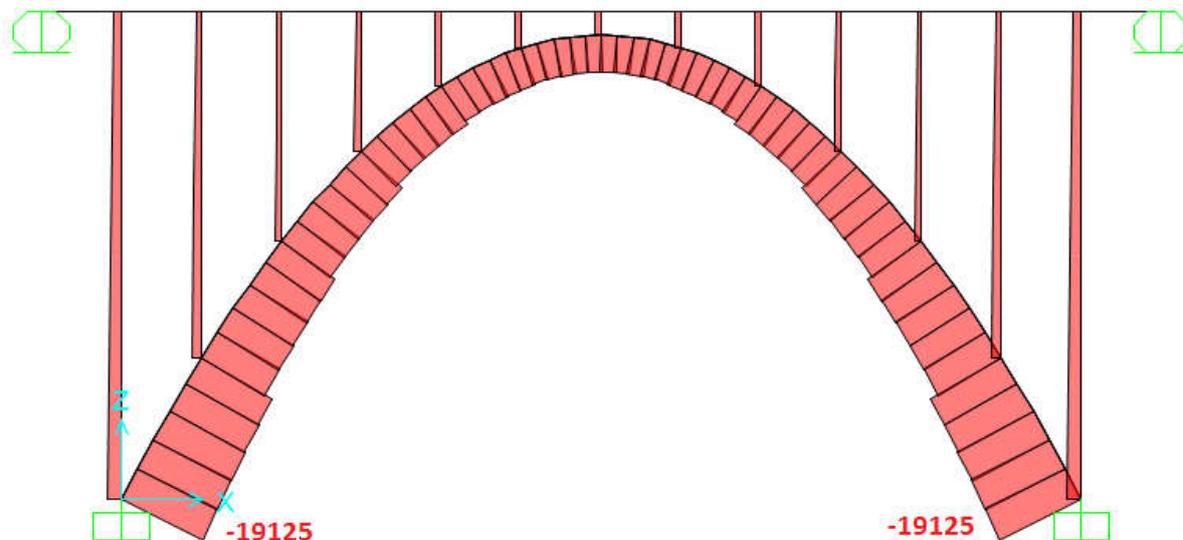


Figura 9: Esforço axial; arco L/f 2
Fonte: Próprio autor

Analisando primeiramente os esforços axiais nos nove arcos propostos (relação Vão/flecha entre 2 e 10), tem-se a confirmação de somente existir esforços axiais de compressão, desde o arco com menor flecha (L/f 10) até o arco de maior flecha (L/f 2). Os diagramas dos outros arcos não estão mostrados em forma de imagem por uma questão de que a forma do diagrama não muda, somente os valores se alteram, e também em todos os casos a maior compressão surge nas extremidades do arco e a menor surge no topo. Dessa justificativa surge a primeira conclusão no âmbito das compressões. Para entender com clareza esse comportamento em relação aos esforços axiais, é apresentado o gráfico que mostra a variação do maior esforço axial de compressão de cada arco analisado.

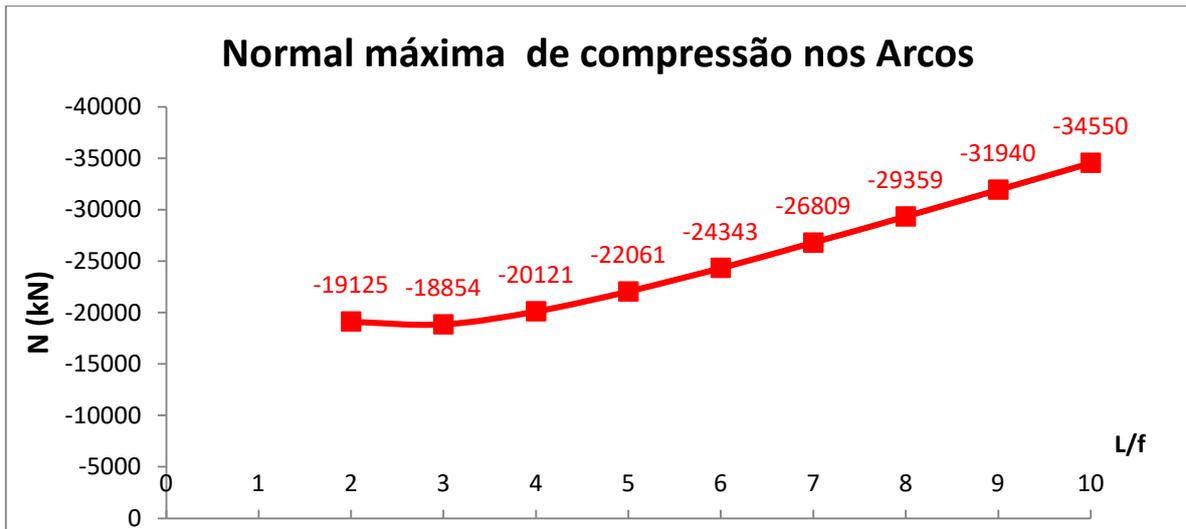


Figura 10: Esforço normal máximo de compressão nos arcos, conforme variação da relação L/f
Fonte: Próprio autor

Deste gráfico podemos ver que a variação do esforço normal de compressão varia quase que linearmente entre $L/f = 3$ e $L/f = 10$, onde conforme a flecha diminui a compressão máxima em cada arco aumenta. Porém, para uma relação muito baixa como $L/f = 2$, onde a flecha é relativamente muito grande, a curva inicia uma mudança de comportamento que tende a maiores compressões. Tal comportamento pode ser explicado pelo grande aumento das dimensões da estrutura, a ponto de esse aumento ser mais interferente do que a geometria do arco propriamente dita, pois os pilares tem suas alturas aumentadas conforme o aumento da flecha, e o arco tem seu comprimento aumentado também conforme o aumento da flecha, acarretando um aumento muito grande do peso próprio da estrutura.

Como já dito anteriormente nesse trabalho, a principal característica de um arco ideal é trabalhar sob ação de esforços de compressão, mas o aparecimento dos momentos fletores em estruturas semelhantes à estudada aqui é inevitável, e o estudo desses momentos fletores se torna crucial. À seguir, são mostrados os diagramas de momentos fletores das nove análises.

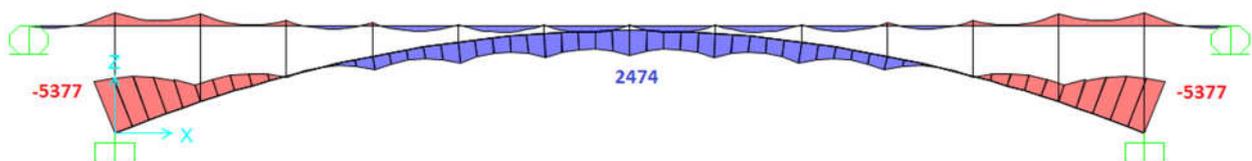


Figura 11: Arco L/f 10; Diagrama de momentos fletores (kN.m)
Fonte: Próprio autor

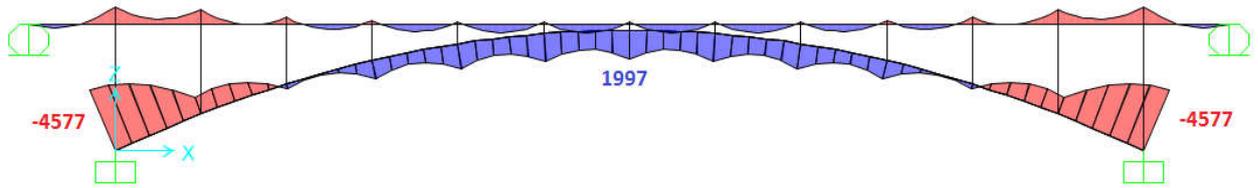


Figura 12: Arco L/f 9; Diagrama de momentos fletores (kN.m)
Fonte: Próprio autor

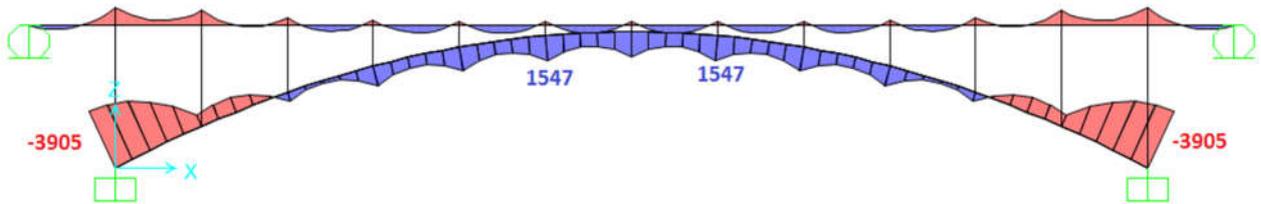


Figura 13: Arco L/f 8; Diagrama de momentos fletores (kN.m)
Fonte: Próprio autor

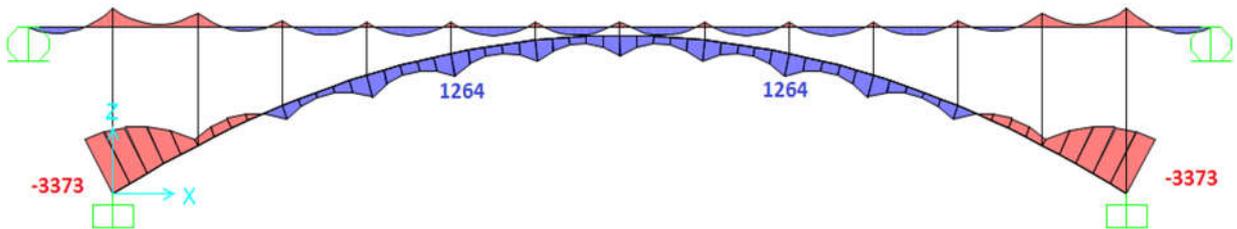


Figura 14: Arco L/f 7; Diagrama de momentos fletores (kN.m)
Fonte: Próprio autor

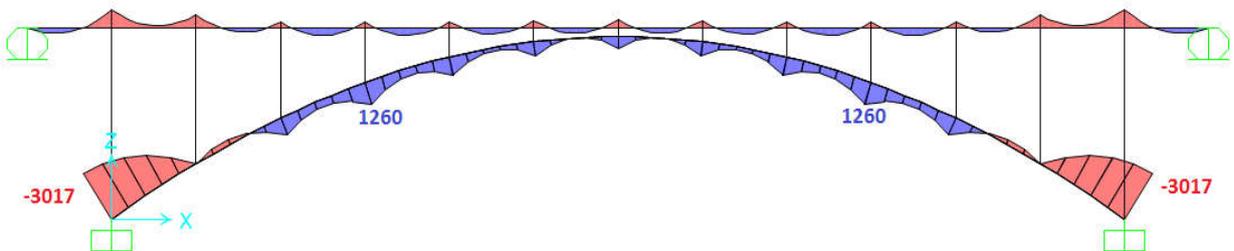


Figura 15: Arco L/f 6; Diagrama de momentos fletores (kN.m)
Fonte: Próprio autor

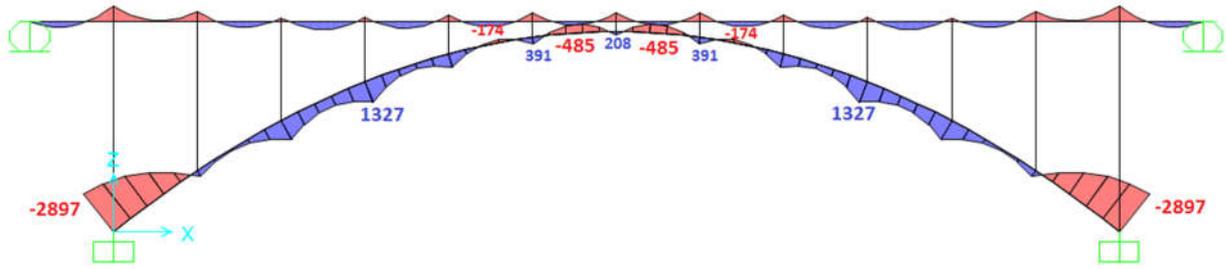


Figura 16: Arco L/f 5; Diagrama de momentos fletores (kN.m)
Fonte: Próprio autor

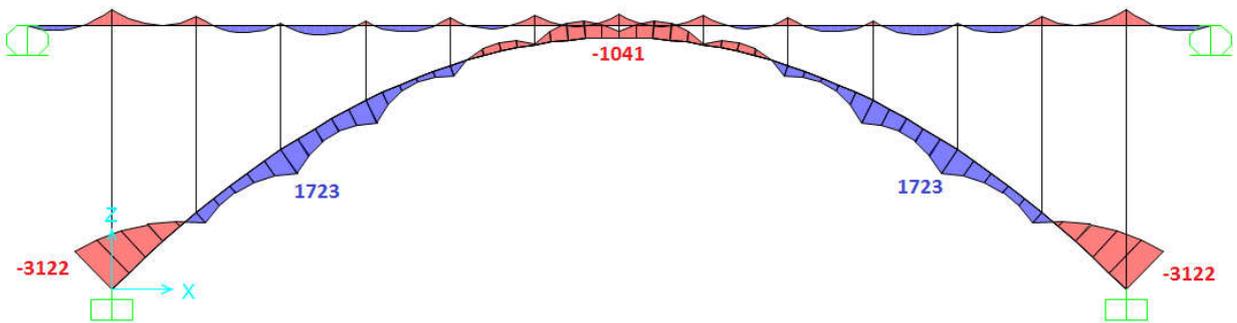


Figura 17: Arco L/f 4; Diagrama de momentos fletores (kN.m)
Fonte: Próprio autor

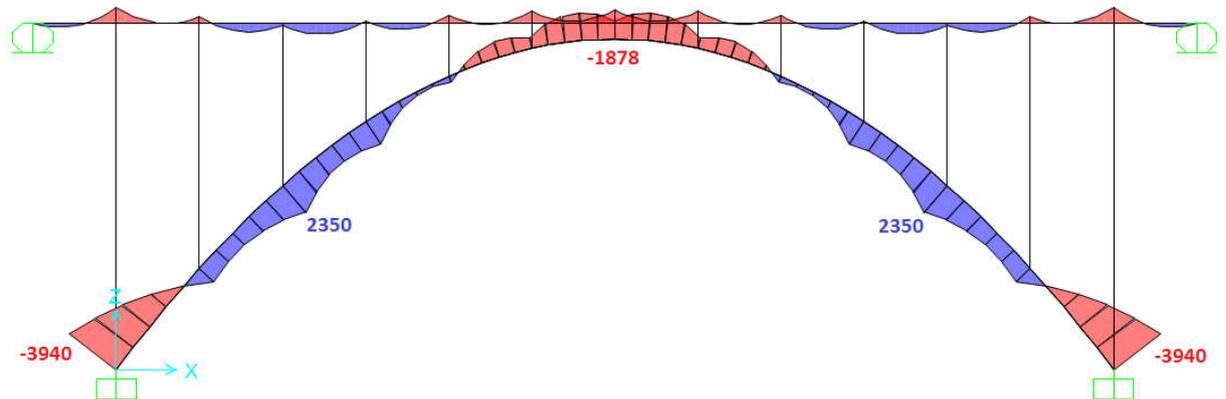


Figura 18: Arco L/f 3; Diagrama de momentos fletores (kN.m)
Fonte: Próprio autor

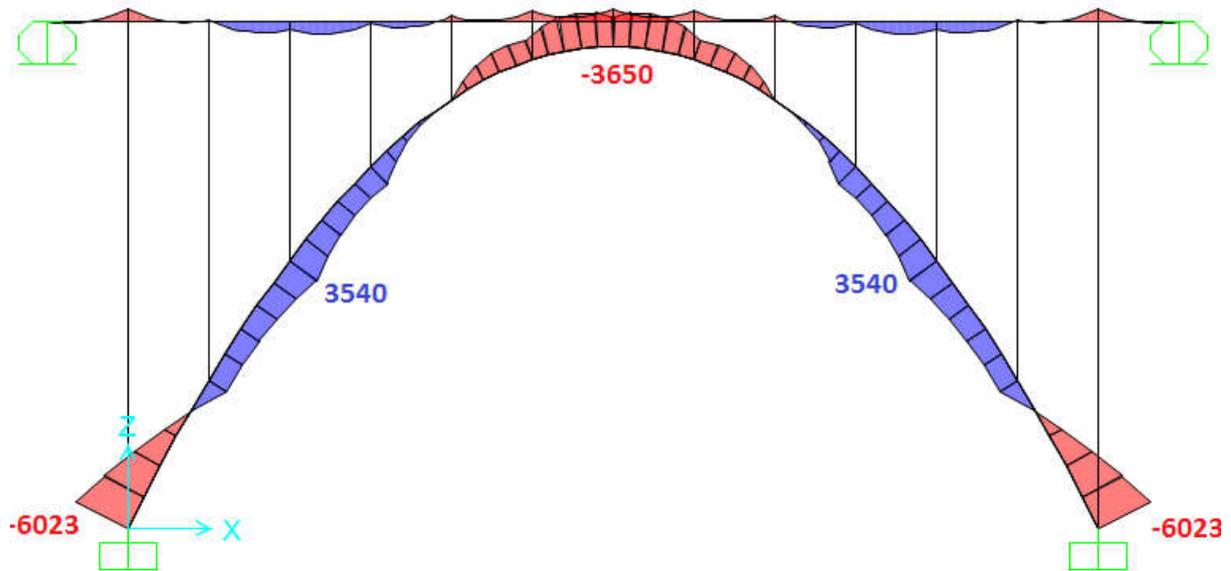


Figura 19: Arco L/f 2; Diagrama de momentos fletores (kN.m)

Fonte: Próprio autor

Analisando cuidadosamente os diagramas das estruturas como um todo, e com o auxílio do gráfico acima, surgem muitas considerações a serem feitas no âmbito dos momentos. Primeiramente é importante salientar que os maiores momentos negativos em todos os casos sempre ocorre nas extremidades, justamente como o esperado, pois o arco estudado é bi-engastado. Nota-se que no arco L/f 10 cujo qual é o arco de menor flecha, os momentos se propagam semelhante a uma viga bi-engastada, ou seja, as extremidades sob momento negativo e a parte central sob momento positivo, sendo exatamente o topo do arco (sob o P30), o ponto de máximo momento positivo. O próximo arco, o L/f 9, tem seus momentos distribuídos semelhantes ao L/f 10 mas com uma diminuição do máximo momento negativo e também do máximo momento positivo. A distribuição dos momentos começa a mudar no arco L/f 8, pois apesar do momento máximo positivo diminuir em relação ao arco anterior, ele já não ocorre exatamente no meio do vão, e sim sob os pilares P25 e P35. Percebe-se então que a transição do L/f 9 para o L/f 8 desloca simetricamente para a esquerda e para a direita o máximo momento positivo do meio do vão. No arco L/f 7 esse tendência de o aumento da flecha deslocar o momento máximo positivo do meio do vão se mantém, e esse momento, também menor do que no arco anterior, ocorre no trecho sob os pilares P20 e P40, ou seja, mais afastados ainda do meio do vão, já o momento máximo negativo também teve uma diminuição em relação ao arco anterior. No arco L/f 6 o maior momento positivo se afasta ainda mais do topo do arco, desta vez ocorrendo sob os pilares P15 e P45, também menor do que no arco anterior, e o máximo

momento negativo teve outra diminuição em relação ao arco anterior. Já o arco L/f 5 apresenta um comportamento em relação aos momentos fletores um tanto quanto diferente. O máximo momento positivo ocorre nos mesmos pontos do arco anterior, não se afastando ainda mais do topo do arco, e agora com um valor maior do que o arco anterior. Outra curiosidade é que esse arco apresentou uma alternância diferente de picos de momentos fletores, partindo da extremidade (P0) com momentos negativos (como ocorre em todos os casos), passando para momento positivo sob o pilar P15, para momento negativo entre os pilares P20 e P25, novamente para positivo sob o pilar P25, para negativo entre os pilares P25 e P30, e retornando para positivo sob o Pilar P30, acontecendo o mesmo na outra metade do arco, assim como em todos os arcos analisados, devido a simetria dos carregamentos. Seu máximo momento negativo também teve uma diminuição em relação ao arco anterior. Analisando o gráfico da figura 20, essa peculiaridade do arco L/f 5 evidencia que o topo do arco que estava até então sempre sob momentos positivos, começa agora a estar também sob momentos negativos, pois o próximo arco, o L/f 4, já deixa isso bem claro, com o trecho central do arco somente sob momentos negativos, porém o seu máximo momento positivo começa novamente a se afastar do topo do arco, estando agora sob os pilares P10 e P50 e com valor maior do que o arco anterior, e claro, com as extremidades sob momentos negativos, mas agora maiores do que no arco anterior, mostrando uma quebra de padrão no que se refere ao máximo momento negativo (momento no engaste), pois até então, um aumento de flecha ocasionava a diminuição do momento no engaste, e agora um aumento considerável da flecha inverteu esse parâmetro. O próximo arco, o L/f 3 deixa clara a nova tendência de o máximo momento negativo aumentar a partir de uma certa relação L/f. Seu máximo momento positivo também teve um aumento em relação ao arco anterior, porém ocorrendo sob os mesmos pilares (P10 e P50). A parte central do arco também se manteve somente sob momentos negativos, mas com um aumento desse momento em relação ao arco anterior. O último arco, o L/f 2, teve um aumento muito significativo do máximo momento negativo em relação ao arco anterior, mesma situação do máximo momento positivo, ocorrendo sob os mesmos pilares do arco anterior (P10 e P50). A parte central do arco se manteve somente sob momentos negativos, e também com um aumento muito significativo em relação ao arco anterior.

Após a abordagem de todas as análises uma a uma, discute-se agora, sob uma visão geral, e com o auxílio do gráfico da figura 20, o comportamento dos arcos conforme a relação L/f se altera.

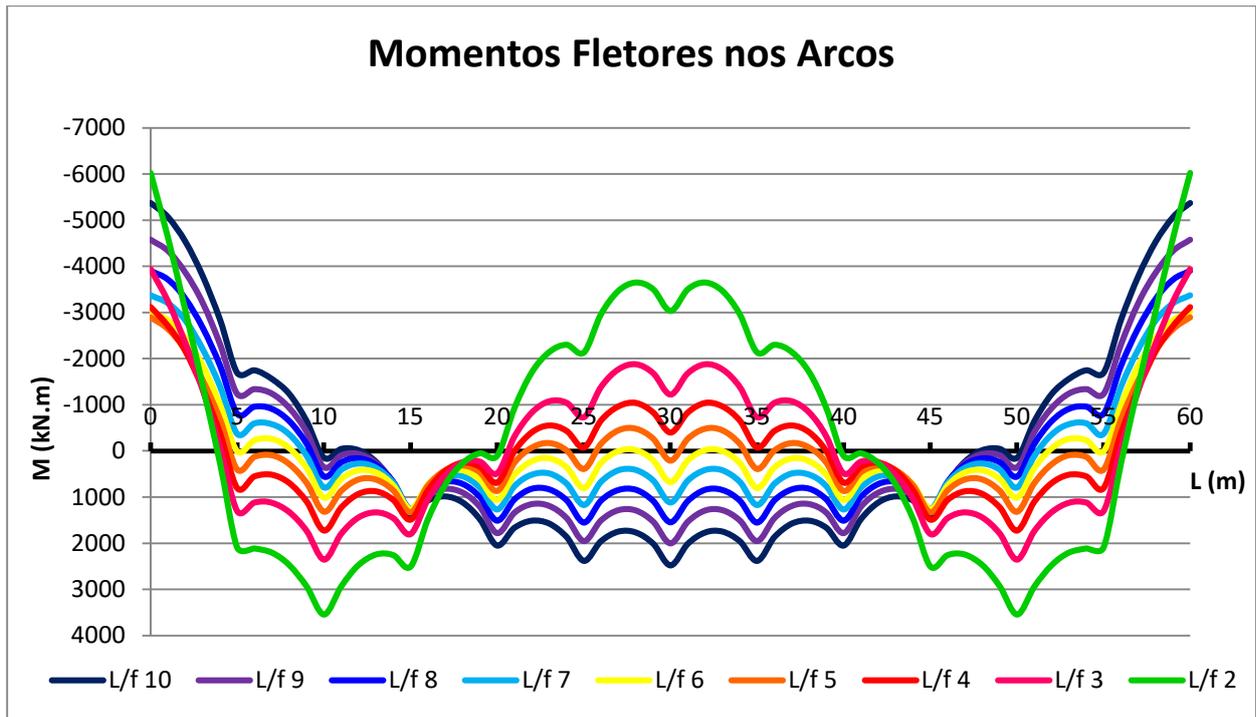


Figura 20: Momentos Fletores nos Arcos, conforme variação da relação L/f

Fonte: Próprio autor

Analisando o gráfico, e partindo do arco de menor flecha (L/f 10) para o arco de maior flecha (L/f 2) percebe-se um claro padrão nas curvas, onde no trecho central do gráfico (aproximadamente entre os pilares P20 e P40) as curvas tendem a subir, mostrando que, conforme a flecha aumenta os momentos fletores positivos nesse trecho diminuem até uma hora em que começam a ser positivos, sendo o L/f 10 o arco de maior momento positivo na parte central e o L/f 2 o arco de maior momento negativo na parte central. O trecho entre aproximadamente os pilares P5 e P15 e P45 e P55 se apresenta de maneira contrária à parte central, pois nesse trecho as curvas estão descendo conforme a flecha aumenta, mostrando numa parte, a diminuição dos momentos negativos até se tornarem positivos e consequentemente continuarem crescendo, e numa outra parte somente o aumento dos momentos positivos. Observando mais atentamente o gráfico, nota-se um aspecto interessante. Os momentos na região dos pilares P15 e P45, ou seja, a $\frac{1}{4}$ do vão, são praticamente da mesma ordem de grandeza nos arcos com relação L/f entre 10 e 4, só tendo uma grande variação a partir do arco L/f 3, onde a flecha tem um aumento muito significativo em relação ao arco L/f 4. O trecho perto dos engastes apresenta uma distribuição de momentos um pouco diferente. As curvas dos arcos L/f 10 até o L/f 5 estão descendo, mostrando que os momentos negativos próximos as extremidades diminuem a medida que a flecha aumenta. Mas tal padrão muda a partir do arco L/f 4, pois em

determinada parte entre os pilares P0 e P5 e P55 e P60, sua curva sobe em relação ao arco L/f 5, mostrando o aumento dos momentos negativos. O mesmo ocorre com os arcos L/f 3 e L/f 2, sendo o último, o arco de maior momento negativo. Quanto a forma dos diagramas, nota-se que quando o momento é positivo, os picos ocorrem sempre exatamente onde estão localizados os pilares, pois eles descarregam no arco forças localizadas, sendo assim, este comportamento esperado. Mas quando o momento é negativo, os picos já não ocorrem exatamente onde estão localizados os pilares, e sim entre os pilares. Tal aspecto se deve ao fato de os próprios pilares “aliviarem” o momento negativo exatamente sob eles com sua resultante de força concentrada.

Ainda sobre os momentos fletores, à seguir, é apresentado um gráfico que filtra o maior momento negativo e positivo de cada arco.

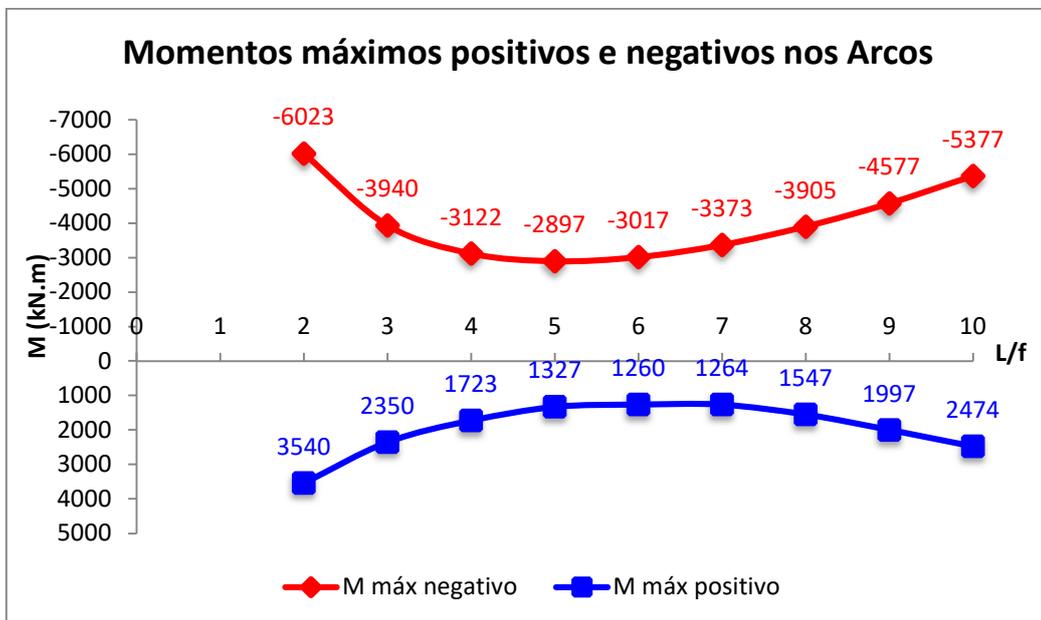


Figura 21: Momentos máximos positivos e negativos nos arcos, conforme variação da relação L/f

Fonte: Próprio autor

Sobre o máximo momento negativo, sabe-se que em todos os arcos ele ocorre nas extremidades, ou seja, nos engastes. Analisando o gráfico da direita para a esquerda, partindo do arco de menor flecha para o arco de maior flecha, nota-se que a curva mantém um padrão até o arco L/f 5, onde conforme a flecha aumenta o momento máximo negativo no engaste diminui. Mas após o arco L/f 5 esse padrão se inverte, pois o aumento da flecha provoca um aumento do momento negativo no engaste. A primeira situação, entre o arco L/f 10 e o L/f 5, já era esperada, pois, fazendo uma analogia, quanto mais baixa é a flecha de um arco, mais ele se aproxima de uma viga, e conseqüentemente maiores serão os momentos negativos no engaste, mas o segundo

padrão da curva, entre o arco $L/f 5$ e o $L/f 2$, confronta tal analogia. Isso se deve a um fator muito simples, o peso próprio da estrutura. Ao aumentar a flecha do arco, aumenta-se o comprimento do arco e também a altura dos pilares, fazendo com que o peso próprio da estrutura se eleve, e a partir de um certo aumento de flecha, esse peso é tão grande a ponto de influenciar na distribuição dos momentos nos engastes mais do que a própria geometria do arco.

Já sobre o máximo momento positivo, a situação é semelhante à do momento máximo negativo. Analisando o gráfico da direita para a esquerda, partindo do arco de menor flecha para o arco de maior flecha, nota-se que a curva mantém um padrão, mas agora até o arco $L/f 6$, onde conforme a flecha aumenta o máximo momento positivo diminui, mas após o arco $L/f 6$ esse padrão se inverte, ou seja, o aumento da flecha provoca um aumento do momento máximo positivo. Essa mudança de comportamento se deve a fato de o máximo momento positivo sofrer um deslocamento do centro do arco em direção às extremidades conforme a flecha aumenta. Nos arcos de flecha baixa o máximo momento positivo ocorre à grosso modo, no trecho central do arco, e determinados aumentos de flechas o desloca simetricamente em direção às extremidades, diminuindo o momento positivo exatamente no meio do vão, até se tornar negativo, e aumentando o momento positivo entre o trecho central do arco e o trecho da extremidade. Portanto, essa variação da localização do máximo momento positivo explica a mudança de comportamento do gráfico.

Ainda no âmbito dos momentos fletores, é inevitável não perceber o comportamento do tabuleiro perante a variação da flecha do arco. Embora o foco desse trabalho seja o estudo do arco, é interessantíssimo entender como a variação da relação L/f influencia no comportamento do tabuleiro. Como mencionado no início desse trabalho, o tabuleiro foi lançado no software como uma barra contínua, sobre pilares rotulados, e era de se esperar que seu comportamento em relação ao momento fletor seria como o de uma viga contínua, com momentos negativos próximos aos pilares e positivos no trecho central entre os pilares. Mas analisando as figuras 11 a 19, não ocorreu exatamente como o esperado. Como a estrutura trabalha conjuntamente, não é só o tabuleiro e os pilares que influenciam no comportamento do arco, mas também o arco influencia no comportamento do tabuleiro.

Um primeiro olhar sobre os diagramas de momento fletores, dá para se dizer, que os momentos do tabuleiro “acompanham” aproximadamente os momentos do arco, ou seja, o trecho do arco em que predomina momentos negativos, no mesmo trecho do tabuleiro essa distribuição de momentos é semelhante à do arco, e vice-versa. Agora, pensando na estrutura como um todo, e não só apenas no tabuleiro, essa distribuição de momentos no tabuleiro é muito lógica. As deformações do arco que acarretam a mudança de comportamento do tabuleiro, pois ele serve de

apoio para os pilares que sustentam o tabuleiro, mas não limitam completamente os deslocamentos verticais e horizontais. A medida que a flecha do arco varia, os deslocamentos dele também se alteram, interferindo diretamente nos esforços do tabuleiro. Para comprovar essa teoria, foi escolhido uma das nove estruturas analisadas e alterou-se algumas propriedades geométricas do arco e dos pilares, de modo com que eles ficassem praticamente indeformáveis, sem alterar as suas outras características, através da função “*Set Modifiers*”

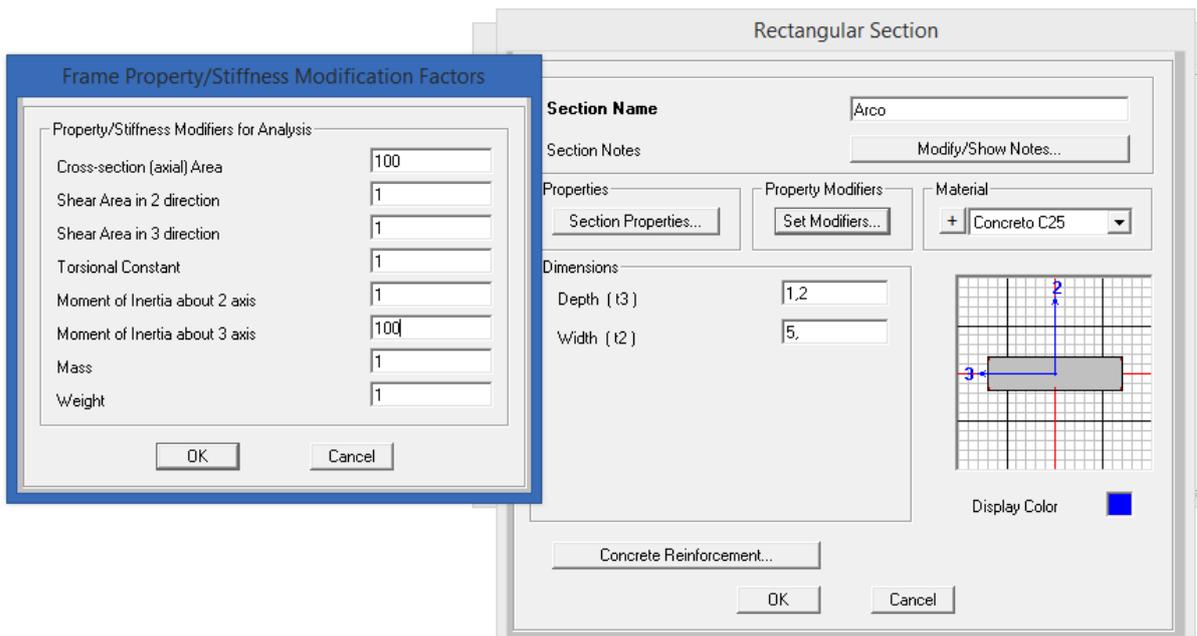


Figura 22: Alterando propriedades geométricas do arco através da função *Set Modifiers*
Fonte: Próprio autor

As propriedades alteradas foram a área da seção transversal e a Inércia em torno do eixo local 3 da seção (eixo horizontal), tanto do arco quanto dos pilares, multiplicando-as por 100, ou seja, com as áreas da seção aumentadas em 100 vezes, os pilares e o arco ficam muito próximos de serem axialmente indeformáveis, e com as inércias aumentadas em 100 vezes eles praticamente não sofrem rotação. Feito isso, calculou-se a estrutura, e os resultados ocorreram como o esperado, onde o arco e os pilares não se deformando não interferem na distribuição dos esforços no tabuleiro, e os momentos fletores no tabuleiro ficaram distribuídos como os de uma viga contínua, e com os valores da mesma ordem de grandeza em todos os trechos. É de suma importância mencionar aqui que este artifício de deixar o arco indeslocável majora os esforços no tabuleiro, porém, minora os esforços no próprio arco, portanto seu uso neste trabalho foi apenas para se entender a variação do comportamento do tabuleiro frente aos deslocamentos do arco.

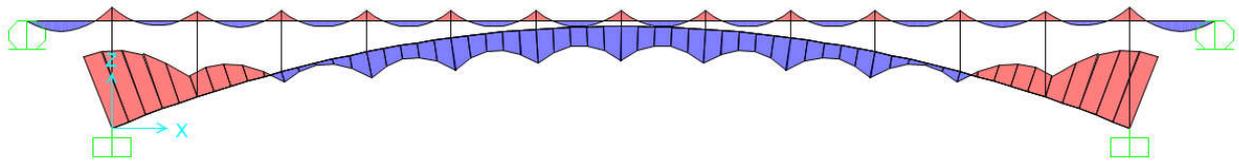


Figura 23: Diagrama de momentos fletores da estrutura com arcos e pilares indeformáveis
Fonte: Próprio autor

Para se compreender com clareza como o arco interfere no tabuleiro, e também é de suma importância nesse estudo dos arcos, entra-se agora no âmbito dos deslocamentos.

Na engenharia de estruturas entender como determinada estrutura tende a se deformar quando exigida, é fundamental. No caso dos arcos esse aspecto se torna ainda mais curioso. A seguir são mostradas as deformadas da estrutura de flecha mais baixa e mais alta, para se ter ideia de como os dois casos extremos se comportam, e os deslocamentos de todas as nove estruturas analisadas estão demonstrados nos gráficos da figuras 16 e 17. É importante salientar que os desenhos das deformadas das estruturas são apenas para mostrar como a estrutura se deforma, e não para quantifica-los. Sendo assim, para conseguir uma visualização melhor da estrutura deformada, a escala dos desenhos não estão interligadas entre si.

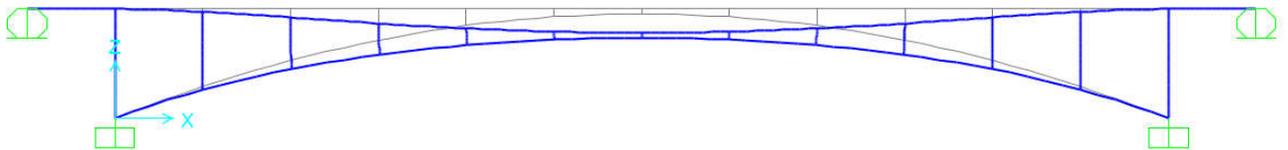


Figura 24: Arco L/f 10 – Estrutura deformada
Fonte: Próprio autor

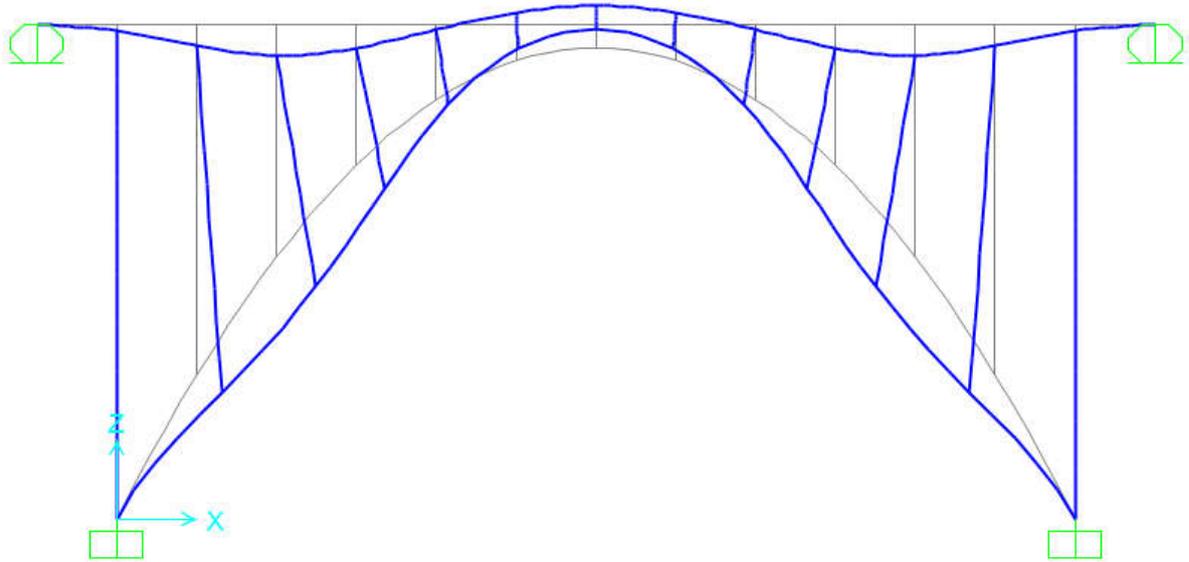


Figura 25: Arco $L/f = 2$ – Estrutura deformada
Fonte: Próprio autor

Ao observar as estruturas deformadas algumas informações já podem ser tiradas das imagens. À grosso modo, arcos relativamente mais baixos tendem a se deformar inteiramente para baixo, com deformações maiores próximas ao meio do vão, enquanto arcos relativamente muito altos têm sua parte central se deformando para cima. Novamente recorre-se a gráficos para visualizar e compreender melhor o comportamento do arco em relação aos deslocamentos.

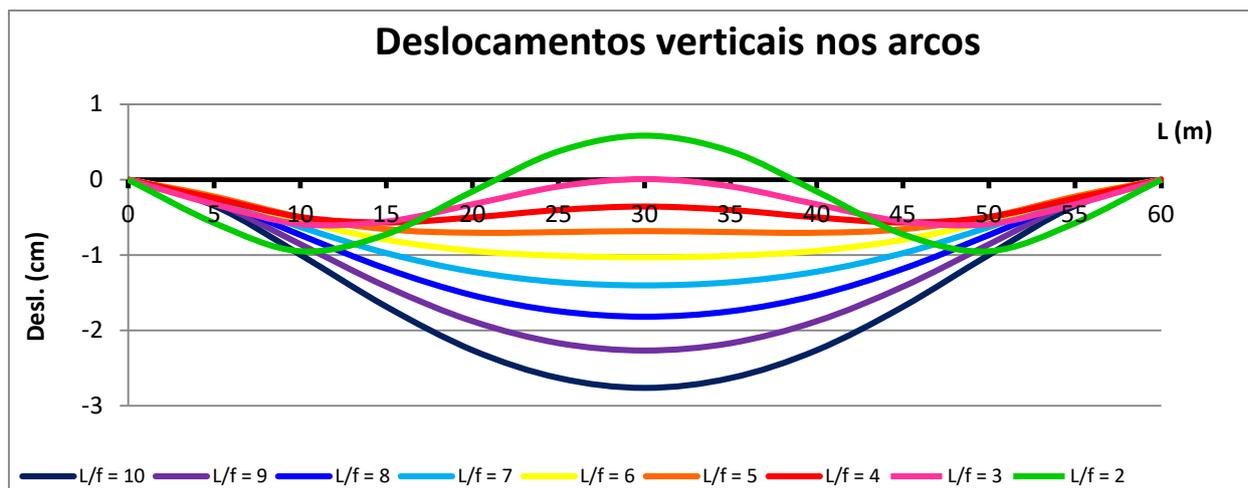


Figura 26: Deslocamentos verticais do arco, conforme variação da relação L/f
Fonte: Próprio autor

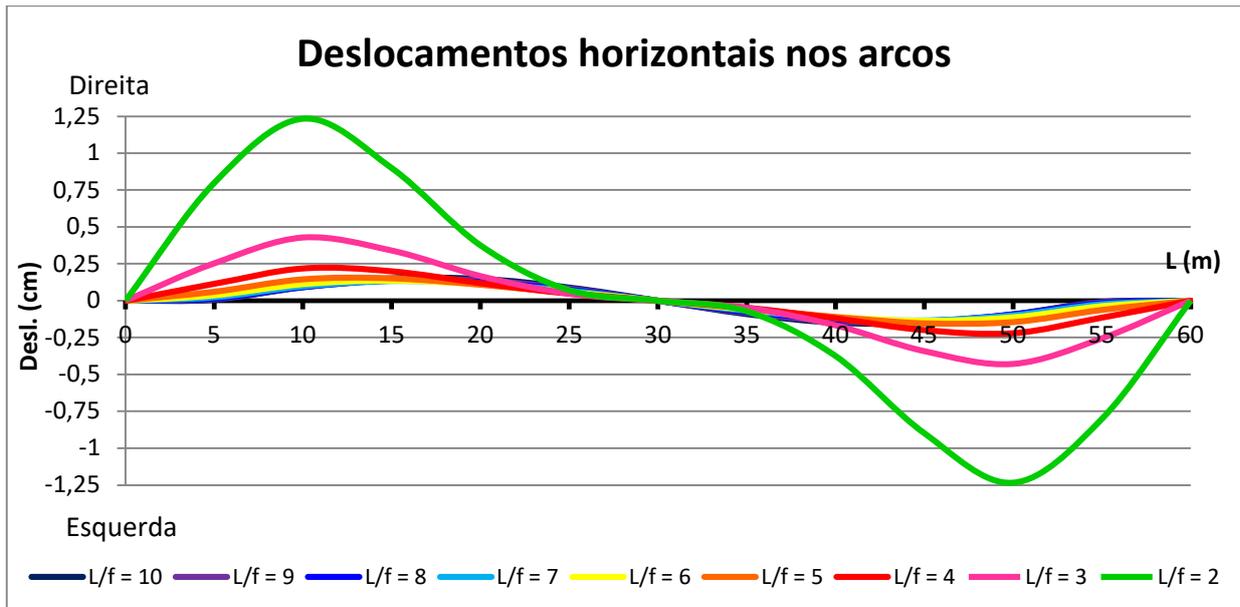


Figura 27: Deslocamentos horizontais do arco, conforme variação da relação L/f

Fonte: Próprio autor

Inicialmente, pode-se dizer que arcos mais baixos sofrem maiores deslocamentos verticais que horizontais, e conforme sua flecha aumenta os deslocamentos horizontais se tornam maiores e mais influentes na estrutura.

Em relação aos deslocamentos verticais, partindo do arco de menor flecha para o arco de maior flecha, a curva dos deslocamentos segue um padrão entre aproximadamente os pilares P20 e P40, onde ela sobe o gráfico, mostrando que conforme a flecha aumenta os deslocamentos nesse trecho do arco diminuem, até começarem a ser positivos no topo do arco, ou seja, o topo do arco desloca para cima. Conforme o arco ganha flecha e os deslocamentos no trecho central diminuem, os deslocamentos próximos às extremidades aumentam, chegando a serem maiores que os deslocamentos no trecho central, como nos arcos L/f 5, L/f 4, L/f 3 e L/f 2.

Já em relação aos deslocamentos horizontais, nota-se que quanto maior for a flecha do arco, mais ele se desloca horizontalmente em quase toda sua extensão. Agora, o topo do arco sempre com deslocamento horizontal 0, onde a metade esquerda do arco se desloca horizontalmente para a direita e a metade direita do arco se desloca horizontalmente para a esquerda, com valores iguais, devido a simetria de carregamentos.

Arcos de flecha relativamente baixas, se aproximam mais de serem perpendiculares aos carregamentos provenientes dos pilares explicando os maiores deslocamentos verticais em relação aos horizontais, já os arcos de flecha relativamente altas se aproximam de serem paralelos aos carregamentos provenientes dos pilares, explicando os menores deslocamentos verticais em relação aos arcos de menor flecha, e também a maior influencia dos deslocamentos

horizontais.

Cruzando agora, as informações dos gráficos das figuras 16 e 17 com o gráfico a seguir, fica claro como os deslocamentos do arco interferem na distribuição de momentos fletores no tabuleiro.

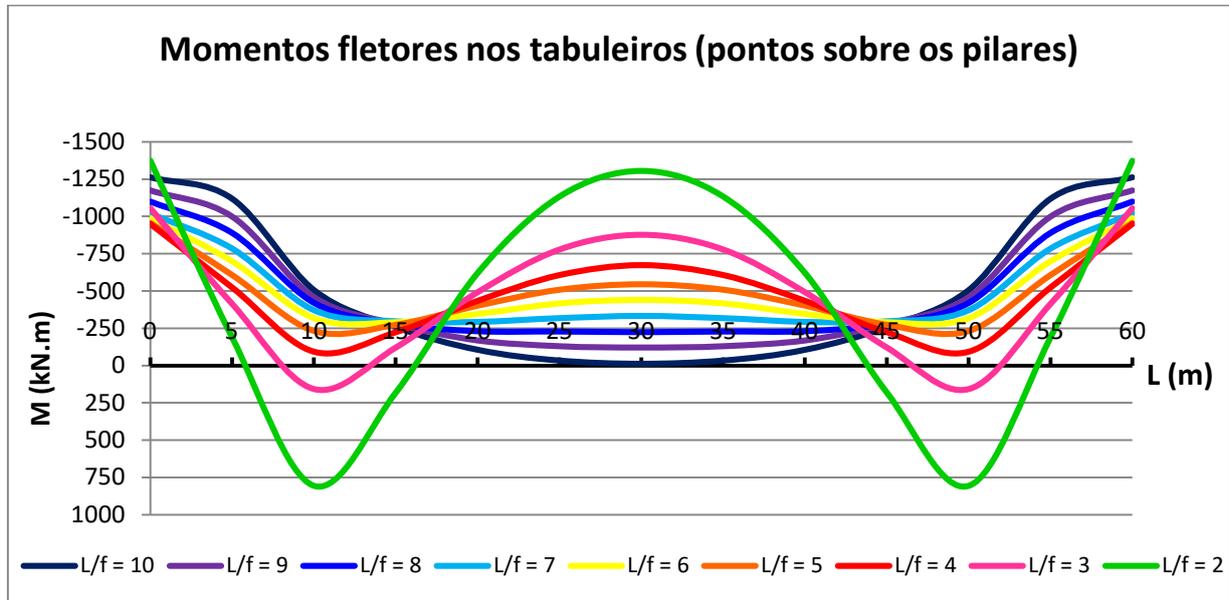


Figura 28: Momentos fletores no tabuleiro nos pontos sobre os pilares, conforme variação da relação L/f

Fonte: Próprio autor

Percebe-se que os arcos que se deslocam mais verticalmente, que são os de flecha menores, “puxam” o tabuleiro junto consigo, explicando os picos de momento negativo muito menores no trecho central que nas extremidades, onde a curva de momentos se assemelha a de uma viga bi-engastada. E os arcos de maior flecha, que tem seus deslocamentos verticais reduzidos até um ponto em que chegam a ser para cima, provoca o mesmo efeito no tabuleiro, consequentemente aumentando seus momentos negativos.

Finalmente, chega-se no âmbito das tensões. Apesar de os arcos serem elementos cujos quais, os esforços axiais de compressão são predominantes, analisar as tensões em todas suas seções é talvez, o tópico mais aguardado neste trabalho, pois é aqui que se verifica o quanto influente são os momentos fletores, capazes ou não, de provocarem tensões de tração consideráveis em alguma seção do arco. Isso se dá através da fórmula:

$$\sigma = \pm \frac{M \cdot y}{I} \pm \frac{N}{A}$$

Onde, M = Momento fletor na seção em relação a determinado eixo, Y = coordenada do ponto desejado em relação ao C.G. da seção, I = Inércia da seção em relação a determinado eixo,

N = Normal na seção e A = Área da seção.

Foi verificada as tensões nos pontos críticos da seção, ou seja, na extremidade inferior e na extremidade superior, pois são os pontos mais afastados do C.G. da seção. Os gráficos abaixo mostram as tensões inferiores e superiores respectivamente, ao longo de todos os arcos analisados, e por fim, a máxima tensão de compressão e de eventual tração em cada arco.

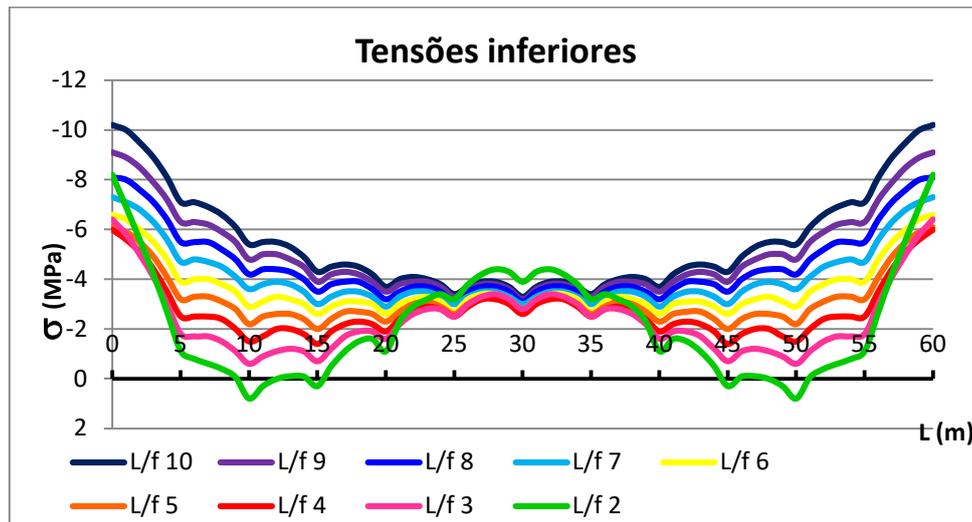


Figura 29: Tensões inferiores no arco, conforme variação da relação L/f

Fonte: Próprio autor

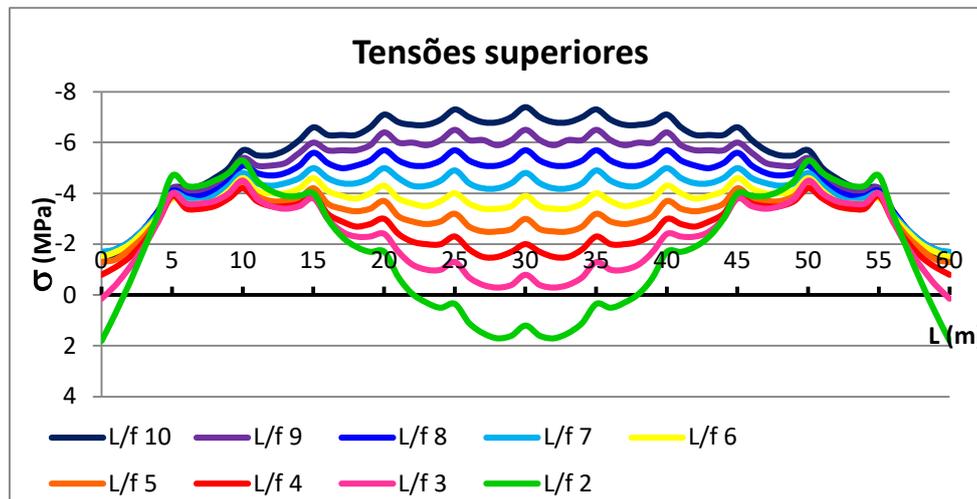


Figura 30: Tensões superiores no arco, conforme variação da relação L/f

Fonte: Próprio autor

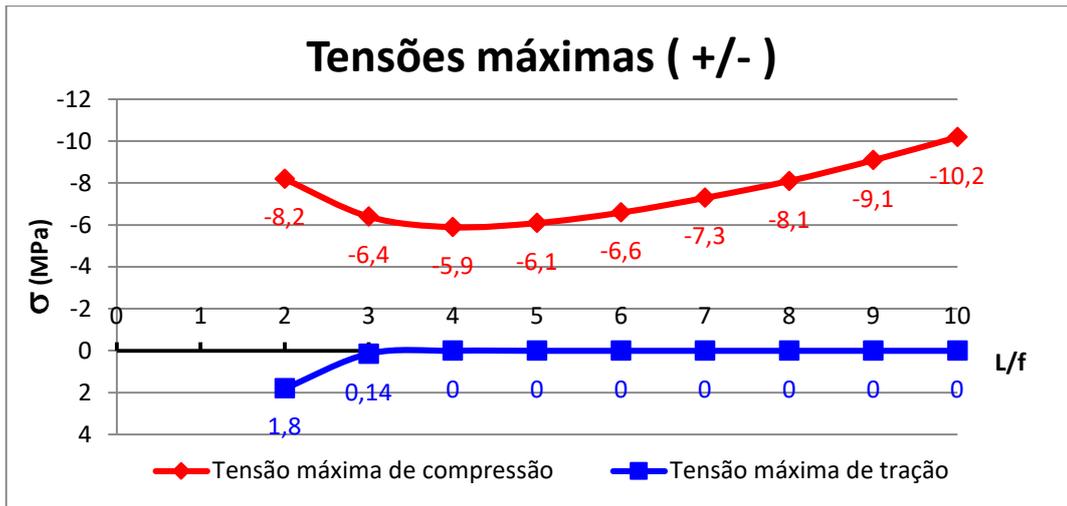


Figura 31: Tensões máximas de compressão e tração em cada arco
Fonte: Próprio autor

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve o intuito de abordar o comportamento de um arco mediante a variação da relação L/f , e também tentar encontrar a relação L/f que o arco responda melhor aos esforços solicitantes predominantes, e para isso analisou-se alguns aspectos estruturais mais significativos, como esforço axial, momento fletor, deformação e tensão. Apresentados os devidos diagramas e gráficos, uma cuidadosa análise dos resultados foi feita, detalhando o comportamento de cada uma das nove análises feitas (relação L/f variando de 10 a 2). Finalmente chega-se a algumas conclusões importantes.

Como já se esperava, no que se diz respeito aos esforços axiais, todos os arcos se mantiveram comprimidos em toda sua extensão. Em relação aos momentos fletores, tópico abordado com um pouco mais de atenção, alguns arcos responderam melhor a eles. De uma maneira geral, os arcos que responderam melhor aos momentos fletores ao longo de sua extensão foram o L/f 4, L/f 5 e L/f 6, pois como mostra o gráfico da figura 20, tiveram sua distribuição de momentos mais uniforme, e se aproximando mais de serem nulos, pois é esse o grande objetivo das estruturas em arcos. O arco que apresentou o menor momento negativo (momento no engaste) foi o L/f 5, e o arco que apresentou o menor momento positivo foi o L/f 6. Pode-se dizer então que os arcos com relação L/f entre 6 e 4 foram os que mais responderam positivamente.

Ainda sobre os momentos fletores, ficou comprovado que quanto menor a flecha do arco, mais sua distribuição de momentos se aproxima de uma viga bi-engastada. Também, quanto maior for a flecha do arco, os momentos positivos no trecho central diminuem até

passarem a ser negativos, ou seja, arcos relativamente muito altos tem sua distribuição de momentos parecidos com a de uma viga contínua, com o topo do arco fazendo o papel de “apoio”.

No âmbito das tensões, o desejado aconteceu em quase todos os arcos analisados, onde em toda sua extensão, somente tensões de compressão agem na seção, aparecendo tensões de tração apenas nos dois arcos mais altos, e mesmo assim de valores quase desprezíveis, menores que 2 MPa, sendo que o concreto utilizado nas análises foi o C25 e sua resistência a tração é na casa de 10% do f_{ck} , ou seja, ele resiste sozinho a essas tensões de tração.

Feito isso, fica evidente a importância de se analisar a melhor relação L/f de um arco, pois quanto menores os esforços de flexão, mais eficiente é o arco, e conseqüentemente mais econômico, necessitando menos do uso de armadura, e aproveitando ao máximo a principal característica do concreto, que é a resistência a compressão.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120: **Ações para o cálculo de estruturas e edificações**. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Estruturas de concreto - procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8681: **Ações e segurança nas estruturas - procedimento**. Rio de Janeiro, 2003.

FAY, Liliana. **Estruturas arquitetônicas: composição e modelagem**. Rio de Janeiro, 2006.

LEET, et al. **Fundamentos da análise estrutural**. 3 ed. Porto Alegre: AMGH, 2010.

PINTO, Ricardo Marques. **Estudo comparativo de arcos de vão crescente e flecha decrescente num desfiladeiro existente**. Relatório de Dissertação submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de mestre em engenharia civil. Universidade do Porto. 2009.

REBELLO, Yopanan Conrado Pereira. **A concepção estrutural e a arquitetura**. São Paulo: Zigurate Editora, 2012.

SOUSA, Gonçalo Nuno Abreu Costa de. **Estudo do comportamento estrutural de uma ponte em arco**. Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de mestre em engenharia civil. Universidade do Porto. 2012.

SÜSSEKIND, José Carlos. **Curso de análise estrutural**. 7 ed. Rio de Janeiro: Globo, 1987.