



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Otimização multi-objetivos aplicada ao projeto de pontes estaiadas

Redescar José Virel Rivero¹, Ronaldo Carvalho Battista^{2,1}, Michèle Schubert Pfeil³

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro / Programa de Engenharia Civil – COPPE / redescar@coc.ufrj.br

²Controllato – Projeto, Controle e Monitoração de Estruturas / controllato1@gmail.com

³Universidade Federal do Rio de Janeiro / POLI – COPPE / mpfeil@coc.ufrj.br

Resumo

O projeto de uma ponte estaiada é, em geral, elaborado de acordo com a metodologia tradicional, denominada espiral de projetos, a qual demanda uma quantidade considerável de tempo e recursos humanos e, portanto, financeiros. Esta metodologia consiste numa sequência de iterações até o ajuste definitivo das características geométricas e físicas de uma concepção estrutural capaz de cumprir os requisitos de resistência, estabilidade, utilização em serviço e durabilidade, frente às ações permanentes, variáveis e acidentais consideradas no projeto.

Neste artigo é proposta uma metodologia alternativa baseada na técnica de programação multi-objetivos, denominada *Goal-programming*. Tem como princípio a busca de valores de variáveis e parâmetros que atendam o ótimo de Pareto para satisfação simultânea de um conjunto de objetivos, visando a construção de uma solução ótima ajustada aos requisitos próprios do projeto. Para avaliar a técnica proposta, um caso de estudo é tomado como exemplo, consistindo em duas pontes curvas estaiadas num único mastro com formato parabólico. Os resultados mais relevantes obtidos do processo de otimização - em termos da configuração geométrica deformada, da distribuição de esforços seccionais nas longarinas e forças de tração nos estais - para a estrutura submetida a combinação dos carregamentos permanentes e das forças de tração instaladas nos estais, são apresentados e discutidos com relação aos correspondentes aspectos da estrutura descrita no projeto original.

Os resultados obtidos do processo de otimização sob carregamentos permanentes evidenciam a redução das quantidades de materiais, tanto em termos da quantidade de cordoalhas (ou peso total de aço duro), quanto em termos do volume de concreto dos componentes da estrutura. Adicionalmente, a otimização da configuração geométrica deformada de equilíbrio dos tabuleiros resulta numa melhor distribuição e redução dos picos de esforços seccionais nos componentes estruturais e minimização dos deslocamentos em pontos dos tabuleiros e do mastro.

Palavras-chave

Pontes estaiadas; otimização multi-objetivos; metodologia projetiva; ações e segurança.

Introdução

Tradicionalmente, o projeto de uma ponte estaiada tem sido, em geral, realizado segundo a técnica de espiral de projetos, cuja sequência de tarefas pode ser resumida no seguinte ciclo: Primeiramente, é feita a busca sequencial dos valores iniciais dos parâmetros e das variáveis de projeto; em seguida, é verificado se o sistema estrutural satisfaz os requisitos preestabelecidos incluindo os normativos. Caso os requisitos não sejam cumpridos, os valores das variáveis e parâmetros são modificados até que o projeto satisfaça aproximadamente os pré-requisitos. Essa metodologia torna-se mais viável quando existe um conhecimento prévio e acumulativo de parâmetros e de certas relações geométricas adquiridas ao longo de muitos anos de experiência prática no projeto desse tipo de estrutura.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Modernamente, novas metodologias alternativas baseadas em técnicas de otimização e algoritmos de busca têm sido empregadas como objetivo de definir um arranjo ótimo, adequado aos requisitos de projeto, permitindo que o processo de projetar seja desenvolvido em uma forma mais fluida, com interação entre o projetista e o sistema de busca da solução ótima. Algumas pesquisas orientadas à aplicação de métodos de otimização ao projeto de pontes estaiadas iniciaram nos anos 90: o trabalho de SIMÕES e NEGRÃO (1994) voltado à minimização do peso e de esforços em seções críticas em tabuleiros de pontes estaiadas e o estudo de NAKAYAMA *et al.* (1995), que explorava a aplicação de métodos de otimização no controle da precisão durante o estágio construtivo, para minimizar erros residuais na tensão instalada em cabos e no ajuste no nível do greide em relação aos valores do projeto executivo. Outros trabalhos focados em uma distribuição ótima das forças de protensão nos estais podem ser encontrados na literatura técnica, destacando-se os de WANG *et al.* (1993), CHEN *et al.* (2000) e LEE *et al.* (2008).

No Brasil, destacam-se o trabalho de NEVES (1997), dedicado ao desenvolvimento de uma ferramenta computacional de otimização aplicada na análise estrutural de pontes estaiadas e o de CARVALHO (2002) dirigido ao desenvolvimento de uma interface gráfica no pré e pós processamentos. Mais recentemente, o trabalho de SANTOS *et al.* (2019) apresenta uma abordagem do processo de otimização do projeto de pontes estaiadas mediante a utilização de algoritmos genéticos, levando em conta carregamentos permanentes e variáveis. Dando continuidade aos estudos feitos nessa linha de pesquisa, a principal motivação desse trabalho consiste em mostrar a utilidade prática de uma técnica de otimização no projeto de uma ponte estaiada, deixando em evidência quão eficiente pode se tornar a ferramenta em termos de tempo investido para o desenvolvimento do projeto.

Programação Multi-Objetivos via *Goal Programming*

O problema da programação da técnica de otimização com multi-objetivos é caracterizado por um vetor m dimensional de funções objetivos dentro de uma determinada região. Para considerar uma solução como ótima, pelo menos uma das funções deve apresentar uma melhora em um determinado ponto dentro da região, enquanto as outras devem permanecer, no mínimo, inalteradas.

Em geral, um objetivo é uma declaração associada ao desejo do tomador de decisões, geralmente relacionado à ação de minimizar ou maximizar. Cada objetivo pode estar associado com um nível de aspiração, que permite priorizar o alcance de cada um dentro do problema. De outra parte, os objetivos podem ter desvios, que consistem na diferença entre o que se realiza e o que se aspira relacionando o desempenho real do projeto para o nível desejado de desempenho.

O processo de formulação dos objetivos consiste em transformar um objetivo ou uma restrição na forma de programação do *goal programming*. Seja $f_i(x)$ a representação matemática do objetivo i , função das variáveis de decisão $x=(x_1, x_2, \dots, x_n)$; e b_i o valor da meta associado com o objetivo i . Uma forma possível para a representação do objetivo seria a seguinte:

$$f_i(x) \leq b_i \quad (1)$$

Nesse caso, a função que representa os objetivos $f_i(x)$, que poderia estar associada à função dos deslocamentos em uma viga, por exemplo, teria que ser menor do que b_i , que representa uma meta ou restrição, que no exemplo citado pode estar associado ao valor limite abaixo do qual devem estar os deslocamentos da viga. A formulação do *goal* acrescenta em cada função, variáveis de desvio positivas d_i^+ e negativas d_i^- , como segue:

$$f_i(x) + d_i^- - d_i^+ = b_i \quad (2)$$

sendo que para satisfazer o objetivo $f_i(x) \leq b_i$, deve-se minimizar o desvio positivo d_i^+ .



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Uma vez que cada objetivo e restrição são transformados para a formulação do *goal programming*, é preciso um critério que indique o nível de prioridade das soluções propostas. Isto é feito por meio da função alcance, de forma tal que seja possível tomar decisões entre soluções que são geradas ao longo do processo de otimização.

Para medir o quão aceitável é uma solução dentro do problema de otimização, são utilizados critérios associados à minimização dos desvios (IGNÍZIO, 1982), ou seja, quanto menores forem os desvios da função objetivo, maior será o nível de aceitabilidade da solução. Para fins deste trabalho, a medida do alcance é feita em termos da minimização lexicográfica de um conjunto de desvios dos objetivos ordenados, sendo possível a utilização de pesos.

A função alcance (de decisão) é da seguinte forma:

$$a=(a_1, a_2, \dots, a_k, \dots, a_K) \quad (3)$$

onde a é o vetor alcance para o qual se procura o mínimo lexicográfico e k é a ordem da prioridade. As componentes do vetor têm a forma:

$$a_k = g_k (d_i^-, d_i^+) \quad (4)$$

sendo $k=1,2,\dots,K$ níveis de prioridade, o k -ésimo valor dos desvios das funções-objetivos dentro daquela prioridade, com $g_k (d_i^-, d_i^+)$ sendo a função linear das variáveis de desvio, usadas para os objetivos e/ou restrições, que devem ser minimizadas na prioridade k .

Implementação Computacional do programa de otimização

O fluxograma da Figura 1 apresenta a interação entre um módulo de análise estrutural e um módulo propriamente de otimização, cujo acoplamento foi desenvolvido por NEVES (1997).

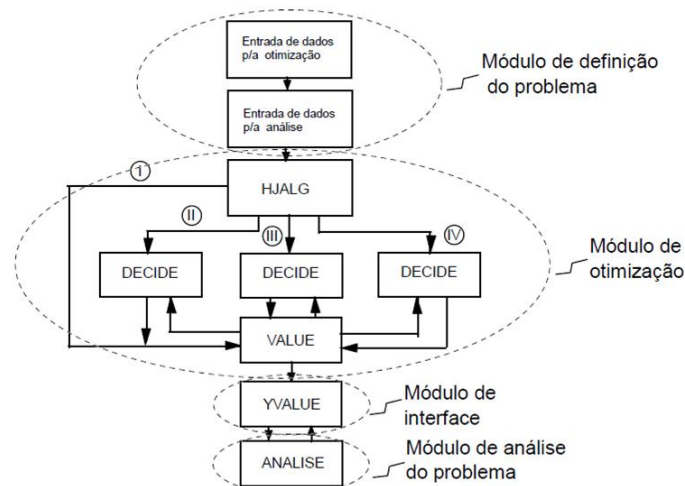


Figura 1 – Fluxograma de acoplamento do módulo de otimização com o programa de análise estrutural.

Primeiramente, o problema é definido mediante dois conjuntos de dados de entradas. O primeiro deles é relativo à definição da estrutura, especificando número de nós e de elementos, propriedades mecânicas dos materiais e características das seções transversais, assim como os detalhes dos carregamentos atuantes. Em seguida, é realizada a entrada de dados do módulo de otimização, especificando as funções objetivos e as variáveis de decisão do problema, em conjunto com os dados da geometria de partida e o número de ciclos de busca.

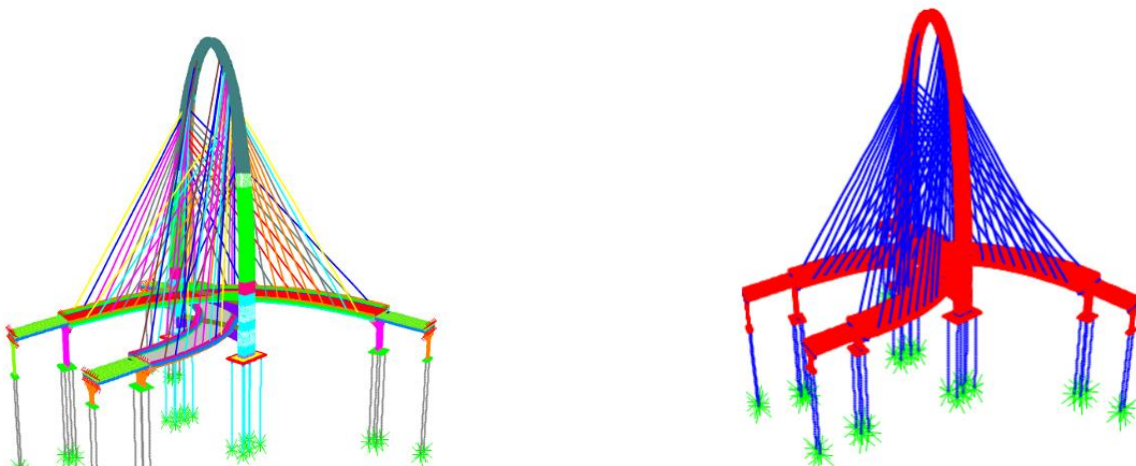


XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

O módulo de otimização é composto fundamentalmente pela sub-rotina HJALG, cujo algoritmo é desenvolvido com o auxílio das sub-rotinas VALUE, YVALUE e DECIDE. O primeiro passo consiste na montagem de um vetor com os valores iniciais das variáveis de decisão (função vetorial), movimentando os valores das variáveis ao redor da configuração inicial, e avaliando dentro da sub-rotina DECIDE se esse vetor modificado ao redor do inicial constitui uma melhora na solução do problema estrutural com base nos objetivos especificados. Internamente, dentro da sub-rotina DECIDE é feita uma chamada à sub-rotina VALUE, onde são calculados os desvios entre as metas (*goals*) e os valores obtidos em cada ciclo de busca, mediante a sub-rotina YVALUE, que permite a interação entre o algoritmo de otimização e o programa de análise estrutural.

Caso Exemplo de Ponte Estaiada

O caso exemplo apresentado neste artigo consiste num sistema estrutural de concreto armado composto por duas pontes curvas sobrepostas em dois níveis afastados de cerca de 7,0m e estaiadas num único mastro em arco de formato parabólico, tal como ilustram as Figuras 2. A concepção estrutural e projeto preliminar é da Enescil Engenharia de Projetos Ltda. o executivo e desenhos coube a Canhedo Beppu Engenheiros Associados Ltda. sendo a execução da Construtora Queiroz Galvão S/A. Coube a Controllato Projeto M. e C. de Estruturas Ltda a análise dinâmica e fadiga do sistema estrutural sob a ação do tráfego de veículos a avaliação da estabilidade aerodinâmica da ponte sob a ação do vento em escoamentos suave e turbulento.



Figuras 2 – Modelo 3D da ponte estaiada selecionada para a análise.

O tabuleiro estaiado inferior tem um comprimento aproximado de 97 m e o tabuleiro estaiado superior tem um comprimento aproximado de 106 m, enquanto o mastro tem uma altura de aproximadamente 100 m, medida a partir do topo dos blocos de fundação. Os acessos aos trechos estaiados são constituídos por tabuleiros simplesmente apoiados com vão de 16 m, aproximadamente. Os tabuleiros curvos estaiados de concreto armado têm seção transversal típica mostrada na Figura 3, cujas vigas de bordo de seção caixão têm dimensões externas 1,40 m x 1,40 m e a laje, protendida transversalmente, tem 35 cm de espessura. Nos pontos de ancoragem dos estais essas vigas tem seção maciça.

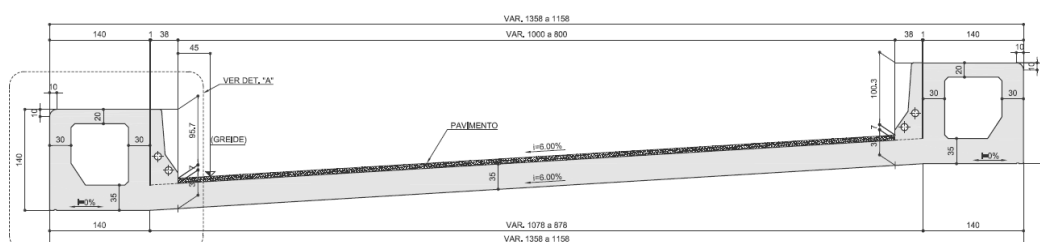


Figura 3 – Seção transversal típica dos tabuleiros estaiados.

Cada um dos tabuleiros da ponte tem dois planos de estais, cuja numeração e posição são indicados nas Figuras 4 e 5, as quais apresentam vistas em elevação dos tabuleiros inferior e superior.

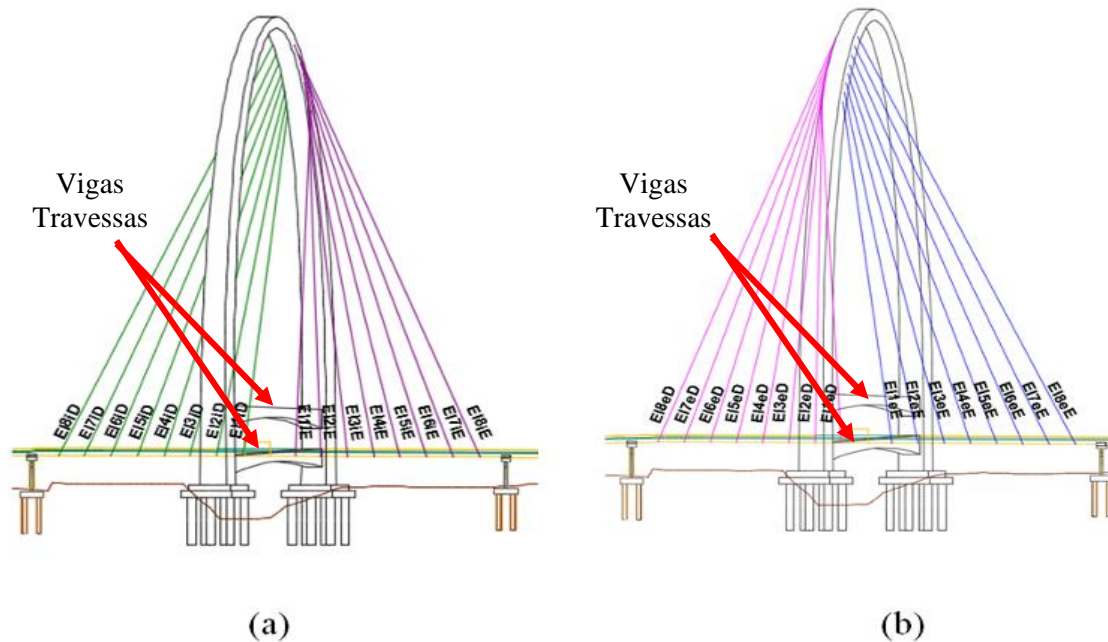


Figura 4- Distribuição dos estais no tabuleiro inferior nas vigas (a) interna e (b) externa.

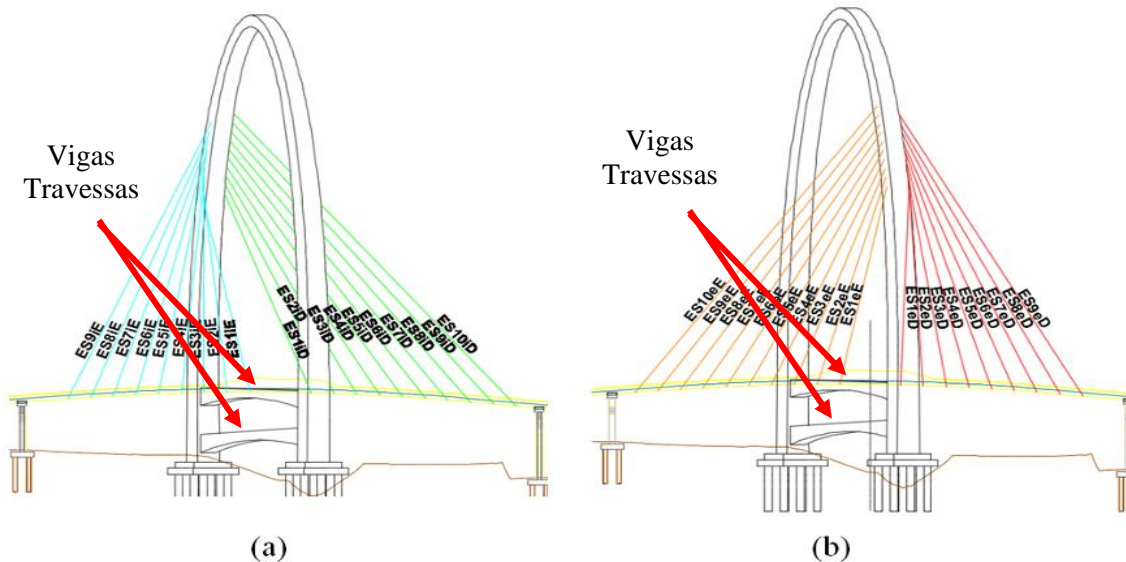


Figura 5- Distribuição dos estais no tabuleiro superior nas vigas (a) interna e (b) externa.

Resultados do processo de otimização

Apresentam-se a seguir os resultados do processo de otimização estrutural aplicado ao caso exemplo das pontes estaiadas num mastro único. Utiliza-se uma geometria de partida na qual as dimensões geométricas das vigas longarinas e o número de cordoalhas dos estais têm valores inferiores àqueles do projeto original, sendo estas as variáveis de decisão. Foram estabelecidas como restrições valores de deslocamentos verticais e de momentos fletores em certas seções dos tabuleiros estaiados, submetidos à ação de carregamentos permanentes e forças de protensão nos estais. As variáveis de decisão e objetivos são dados na Tabela 1.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Tabela 1 – Resumo de variáveis de decisão e funções objetivo do caso analisado.

VARIÁVEIS DE DECISÃO E LIMITES	
Variáveis	Faixa de variação
Áreas dos cabos (A_i)	$300\text{mm}^2 \leq A_i \leq 3.000\text{mm}^2$
Tensões nos cabos (T_i)	$521\text{N/mm}^2 (0,30 F_R) \leq T_i \leq 781,5\text{N/mm}^2 (0,45 F_R)^{(+)}$
Área da seção transversal das vigas (A_v)	$0,4\text{m}^2 \leq A_v \leq 2,0\text{m}^2$
Momento de inércia da seção transversal das vigas ⁽⁺⁺⁾ (I_v)	$0,04\text{m}^4 \leq I_v \leq 1,5\text{m}^4$
FUNÇÕES OBJETIVO	
Descrição	Restrição [valores absolutos]
Momentos fletores positivos em seções dos tabuleiros entre apoios (M^+)	$M^+ \leq [1.200] \text{ kN}\times\text{m}$
Momentos fletores negativos em seções próximas dos apoios (M^-)	$M^- \leq [3.000] \text{ kN}\times\text{m}$
Deslocamentos verticais em pontos selecionados ao longo do tabuleiro (δ)	$\delta \leq [2,0] \text{ cm}$

Notas:⁽⁺⁾ F_R = a força de ruptura de uma cordoalha para estais (260,5kN).

⁽⁺⁺⁾ O momento de inércia da seção transversal das vigas é referente ao eixo de flexão vertical.

As Tabelas 2 e 3 mostram, para um conjunto de estais selecionados nos tabuleiros inferior e superior, uma comparação entre o número de cordoalhas da estrutura do projeto original, da estrutura de partida para o processo de otimização e da estrutura final otimizada.

Tabela 2 – Comparação do número de cordoalhas em estais ancorados no tabuleiro inferior.

Estai	Comprimento (m)	Estrutura Original		Estrutura de partida		Estrutura Otimizada	
		#Cordoalhas	F_P/F_R	#Cordoalhas	F_P/F_R	#Cordoalhas	F_P/F_R
EI1eD	70,2	4	0,36	3	0,35	5	0,33
EI4eD	80,2	7	0,31	4	0,35	2	0,32
EI8eD	93,9	3	0,29	3	0,35	3	0,33
EI2iD	76,9	5	0,33	3	0,35	5	0,34
EI5iD	85,3	7	0,32	4	0,35	2	0,34
EI8iD	94,3	3	0,29	3	0,35	3	0,35
EI1eE	73,9	5	0,28	3	0,35	6	0,36
EI5eE	89,1	10	0,31	5	0,35	7	0,33
EI7eE	97,3	8	0,29	4	0,35	6	0,33
EI2iE	71,6	8	0,35	4	0,35	6	0,34
EI6iE	86,0	8	0,32	4	0,35	6	0,34
EI8iE	93,3	3	0,34	3	0,35	5	0,35



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Tabela 3 – Comparação do número de cordoalhas em estais ancorados no tabuleiro superior.

Estai	Comprimento (m)	Estrutura Original		Estrutura de partida		Estrutura Otimizada	
		#Cordoalhas	F_P/F_R	#Cordoalhas	F_P/F_R	#Cordoalhas	F_P/F_R
ES2eD	48,2	7	0,34	4	0,35	4	0,36
ES6eD	63,1	7	0,34	4	0,35	4	0,35
ES9eD	75,1	4	0,25	3	0,35	3	0,37
ES1iD	46,1	3	0,26	3	0,35	4	0,32
ES4iD	56,5	8	0,32	4	0,35	3	0,34
ES10iD	79,9	4	0,28	3	0,35	3	0,34
ES3eE	53,1	8	0,40	4	0,35	6	0,35
ES6eE	67,6	11	0,43	5	0,35	7	0,35
ES10eE	88,0	5	0,39	3	0,35	3	0,35
ES2iE	46,9	9	0,37	4	0,35	4	0,34
ES5iE	57,6	9	0,40	5	0,35	5	0,34
ES9iE	73,4	4	0,30	3	0,35	6	0,33

Notas: O valor da área nominal de uma cordoalha é tomado como 150mm².
A carga de ruptura (F_R) de uma cordoalha é tomada como 260,5kN.

As Figuras 6 a 9 mostram comparações entre a estrutura do projeto original e a estrutura otimizada em termos de deslocamentos verticais e diagramas de momento fletor produzidos pelas ações permanentes e forças de protensão nos estais. Nessas figuras a linha vermelha vertical indica a localização das vigas travessas que servem de apoio aos tabuleiros no plano do mastro parabólico. Pode-se notar nessas figuras que os momentos fletores obtidos com o processo de otimização têm, ao longo dos tabuleiros, uma distribuição equilibrada e valores dentro da faixa de restrição imposta (Tabela 1). Entretanto, os deslocamentos verticais não satisfazem a restrição imposta, particularmente na longarina superior (Fig.9).

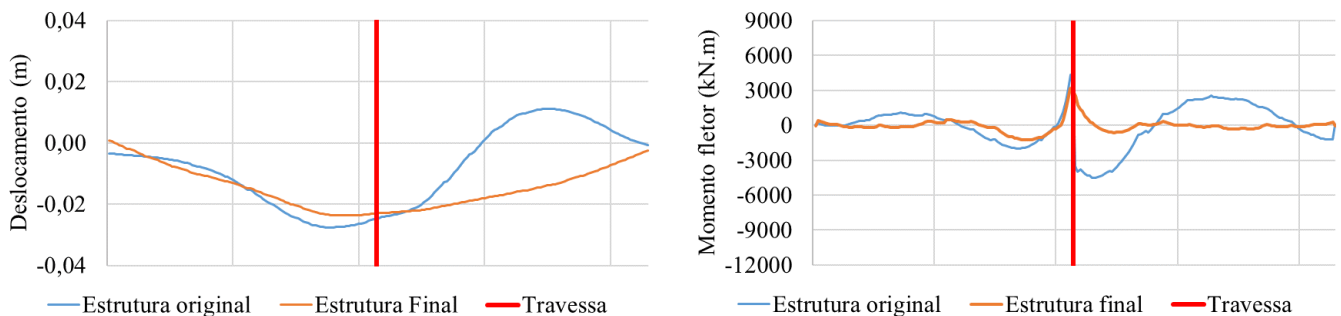


Figura 6 – Comparação de resultados na longarina do tabuleiro inferior interna à curva.

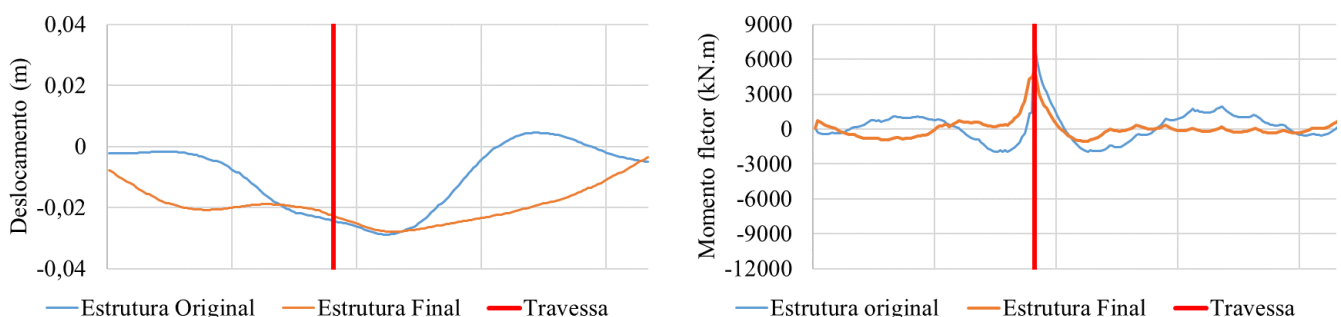


Figura 7 – Comparação de resultados na longarina do tabuleiro inferior externa à curva.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

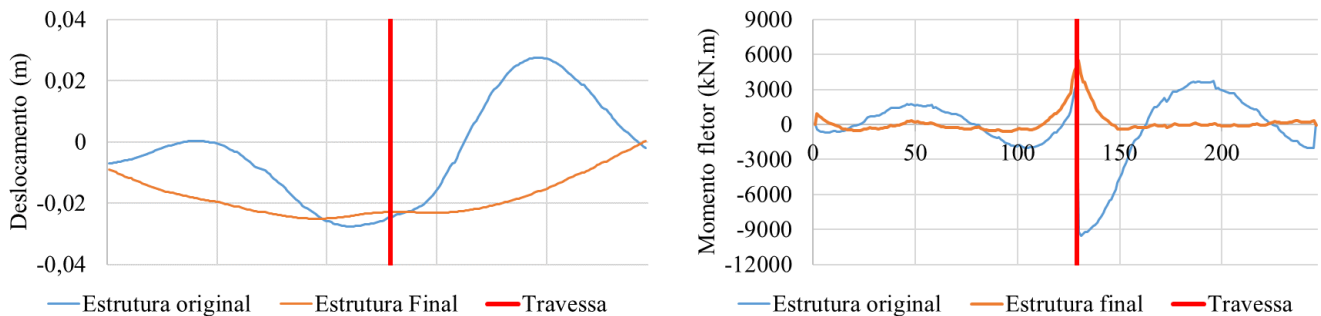


Figura 8 – Comparação de resultados na longarina do tabuleiro superior interna à curva.

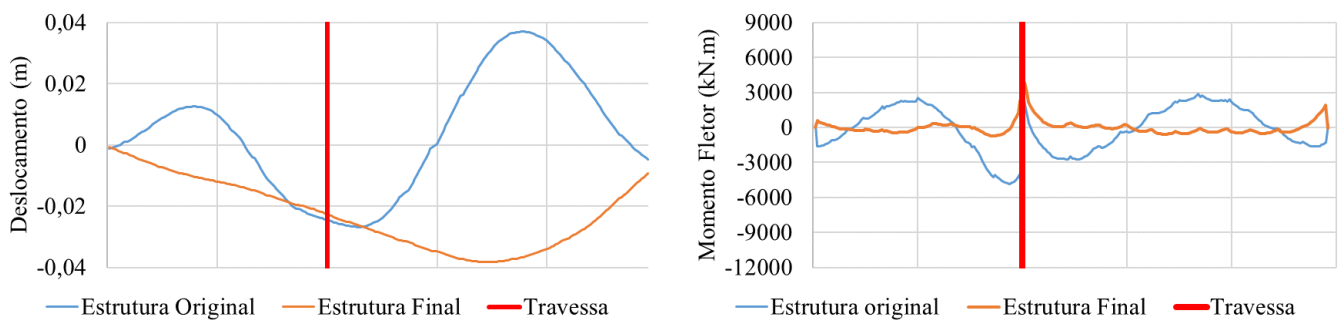


Figura 9 – Comparação de resultados na longarina do tabuleiro superior externa à curva.

Para avaliar o efeito do processo de otimização sobre alguns itens que compõem o custo da construção, a Tabela 4 apresenta a comparação das quantidades dos materiais requeridas nos projetos original e otimizado, onde pode-se notar a redução das quantidades dos materiais. A Tabela 5 mostra, complementarmente, a redução das dimensões da seção transversal das vigas celulares. Mas para avaliar plenamente os benefícios da otimização neste caso exemplo, deve-se fazer ainda a verificação final com a inclusão do carregamento devido ao tráfego de veículos e das forças do vento.

Tabela 4 – Parâmetros comparativos entre a estrutura do projeto original e a estrutura otimizada

Parâmetro	Estrutura original	Estrutura otimizada
Nº total de cordoalhas	483	330
Comprimento total das cordoalhas (m)	34.216	23.524
Massa total das cordoalhas (t)	43,5	29,9

Tabela 5 - Dimensões das vigas de concreto armado dos tabuleiros

B(m)	1,40	1,00	
H(m)	1,40	1,30	
e1 (m)	0,30	0,15	
e2 (m)	0,35	0,35	
e3 (m)	0,20	0,15	



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Conclusões

Com base nos resultados obtidos a técnica de otimização proposta pode-se concluir que esta ferramenta se mostra potencialmente eficiente para ser aplicada ao projeto de pontes estaiadas, reduzindo bastante o tempo gasto para a obtenção de uma solução viável para o problema e com a vantagem do algoritmo de busca permitir a satisfação simultânea de um conjunto de objetivos, mesmo que conflitantes entre si. Observa-se que objetivos conflitantes acrescentam grande dificuldade para a aplicação da metodologia tradicional da espiral de projeto, requerendo um tempo maior para encontrar uma solução capaz de atender aproximadamente a todos os objetivos preestabelecidos.

Os resultados obtidos para o caso exemplo demonstram a eficiência da metodologia na redução das quantidades dos materiais requeridas no projeto otimizado quando comparadas com as requeridas no projeto original. Demonstram também a capacidade de ajuste da técnica de otimização, buscando atender, com desvios mínimos, os objetivos pretendidos.

É importante enfatizar que no caso exemplo a avaliação foi feita considerando apenas os carregamentos permanentes e as forças de protensão dos estais. Mas para avaliar plenamente os benefícios da técnica de otimização, deve-se fazer ainda a verificação final com a inclusão do carregamento devido ao tráfego de veículos e das forças do vento.

Referências

- Análise Dinâmica de duas pontes estaiadas num mastro único. Relatório Técnico CL-1314A/18. Controllato Ltda, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2018.
- CARVALHO, S.M., Sistema Computacional para projeto otimizado de pontes estaiadas. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2002.
- CHEN, D. W., AU, F. T. K., THAM, L. G., LEE, P. K. K. Determination of Initial Cable Forces in Prestressed Concrete Cable-stayed Bridges for Given Deck Profiles Using the Force Equilibrium Method. *Computers & Structures*, 2000, 74, p.1-9.
- IGNIZIO, J. P. Linear programming in single & multiple objective systems. Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1982.
- LEE, T.Y., KIM, Y.H., KANG, S.W. Optimization of tensioning strategy for asymmetric cable-stayed bridge and its effect on construction process. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2008, 35 (6), p.623-629.
- NAKAYAMA, H., KANESHIGE, K., TAKEMOTO, S., WATADA, Y. An application of a multi-objective programming technique to construction accuracy control of cable-stayed bridges. *European Journal of operational research*, 1995, 87, p. 731-738.
- NEVES, F. A., Programação Multi-objetivos aplicada à otimização do projeto de pontes estaiadas. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1997.
- SANTOS, C.A.N., EL DAMATTY, A.A., PFEIL, M.S., BATTISTA, R.C. Structural Optimization of Two-girder Composite Cable-Stayed Bridges under Dead and Live Loads. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2020, 47(8), p. 939-953.
- SIMÕES, L.M.C., NEGRÃO, J.H.O. Sizing and geometry optimization of cable-stayed bridges. *Computers & Structures*, 1994, 52(2), p. 309-321.
- WANG, P. H., TSENG, T. C., YANG, C. G. Initial Shape of Cable-Stayed Bridges. *Computers & Structures*, 1993, 46, p. 1095-1106.