

08 a 11 de Outubro de 2018
Instituto Federal Fluminense
Búzios - RJ

OTIMIZAÇÃO DIMENSIONAL E GEOMÉTRICA DE ESTRUTURAS TRELIÇADAS PARA DIVERSAS CONCEPÇÕES ARQUITETÔNICAS E ESTRUTURAIS

Sergio Rafael Cortes de Oliveira¹ – sergio.oliveira@iff.edu.br

Catarini Ressiguer Soares Crespo¹ – catariniressiguer@hotmail.com

Gabriel Barcelos e Silva¹ – gbarcelosesilva587@gmail.com

Ana Carolina Siqueira de Azevedo¹ – anacsazevedoo@gmail.com

¹Instituto Federal Fluminense *campus* Campos-Centro (IFF) – Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil

Resumo. Na concepção de projetos estruturais, os profissionais modernos buscam minimizar o consumo de material, diminuindo custos, sem comprometer a eficiência do sistema. Este trabalho visa simular as otimizações dimensional, geométrica e simultânea para identificação de soluções ótimas de treliças metálicas de pontes objetivando minimizar seu peso. Na otimização dimensional, mudam-se as áreas das seções das barras, a fim de trabalhar com perfis mais esbeltos. Na otimização geométrica, muda-se apenas a geometria da estrutura, considerando-se, como variáveis de projeto as coordenadas horizontais e verticais de alguns nós da estrutura. E, na otimização simultânea, acoplam-se ambas as otimizações no mesmo problema, tendo como variáveis de projeto as áreas das barras e as coordenadas de alguns nós da estrutura. Admite-se a flambagem das barras como restrição de projeto, além das restrições mecânicas e geométricas usualmente consideradas. As otimizações obtiveram satisfatórias reduções sobre o peso inicial da estrutura, atingindo até 93,7% (na dimensional), 15,4% (na geométrica) e até 93,9% (na simultânea), minimizando gastos com material constituinte, sem comprometer a integridade e o comportamento estrutural, além de despertar a consciência da necessidade de projetar sistemas mais eficientes.

Palavras-chave: Otimização dimensional; Otimização geométrica; Estruturas treliçadas; Redução do peso.

1. INTRODUÇÃO

O conceito de otimização é intrínseco aos seres humanos e está em todo lugar. Na concepção de qualquer projeto de construção, todas as decisões tomadas pelos profissionais têm como um dos objetivos principais a minimização do consumo de material, o que reflete significativamente nos custos. Portanto, dentre as inúmeras opções de soluções que atendam às necessidades do projeto, escolhe-se aquela que é ótima. Para isso, dispõe-se de técnicas de otimização que utilizam ferramentas matemáticas de modo a obter essa solução de uma forma prática. A solução encontrada não compromete a funcionalidade nem a segurança da estrutura, que continua atendendo aos fins e as necessidades pela qual foi projetada.

Obviamente, o sucesso da otimização está condicionado a uma boa formulação do problema que se pretende estudar, isto é, à correta definição do modelo matemático representativo do problema.

O modelo matemático que passa pelo processo de otimização compreende a função objetivo, as variáveis de projeto e as restrições de projeto (ARORA, 2012), sendo definidos como:

Função objetivo: (O que deve ser melhorado?) É o parâmetro indicativo da qualidade do projeto, afinal de contas, é o que, quantitativamente, se pretende maximizar ou minimizar.

Variáveis de projeto: (Quem ou o que pode influenciar na obtenção da melhor solução?) São os parâmetros escolhidos de forma arbitrária que sofrerão variações e responderão pelo desempenho do projeto. A função objetivo depende dessas variáveis. Na otimização de estruturas treliçadas têm-se como exemplos de variáveis de projeto as dimensões das seções transversais das barras, as coordenadas dos pontos nodais, os elementos do sistema que podem ser eliminados ou adicionados, etc. (AZEVEDO, 1994).

Restrições de projeto: (Quais as limitações na busca da solução?) São as condições limitantes impostas ao projeto. As restrições podem ser definidas através de critérios mecânicos, tecnológicos, econômicos, normas de segurança, etc. Como exemplos de restrições de projeto têm-se as tensões e os deslocamentos de uma barra, que estão diretamente associadas à resposta mecânica ou ao comportamento da estrutura.

No processo de otimização, o espaço solução compreende o conjunto das soluções viáveis do problema a ser otimizado. A configuração ótima ou o ponto ótimo é o vetor de variáveis de projeto que maximizam ou minimizam a função objetivo, satisfazendo as restrições impostas ao modelo. O valor assumido pela função objetivo no ponto ótimo é o valor ótimo do problema (ARORA, 2012; RAO, 2009; HAFTKA E GÜRDAL, 1992).

A treliça consiste em um modelo estrutural em que há associação de barras que concorrem em “nós”, onde as extremidades dos elementos estão rotuladas, transmitindo apenas esforços normais. São muito utilizadas por engenheiros e arquitetos, por serem capazes de superar grandes vãos diante de sua relativa leveza e por suportarem elevadas solicitações de carga. São estruturas bastante estudadas nos processos de otimização em virtude de sua simplicidade e suas infinitas configurações.

Existem alguns tipos de otimização estrutural (principalmente de treliças), associados às variáveis que são consideradas no processo. Dentre os principais tipos de otimização destacam-se: dimensional, geométrica e topológica (CHRISTENSEN E KLARBRING, 2009), descritos adiante.

Otimização dimensional: é o tipo em que são tomadas como variáveis de projeto as dimensões de um elemento estrutural como, por exemplo, a modificação nas características da seção transversal.

Otimização geométrica: é o tipo em que há modificação do desenho (forma, geometria) da estrutura sem a retirada de elementos que a compõem. É muito eficiente, apesar dos

projetistas trabalhem com estruturas com configurações pré-definidas (questões arquitetônicas).

Otimização topológica: é o tipo em que as variáveis de projeto são os parâmetros numéricos que podem alterar a distribuição de material ao longo da estrutura com o objetivo de minimizar gastos com material em regiões com pouca solicitação de carregamento.

Dentre os métodos de otimização estrutural destacam-se as técnicas de Programação Matemática (PM) e as técnicas heurísticas (ou evolucionistas).

Os métodos clássicos de otimização baseados em PM melhoram iterativamente a configuração inicial, convergindo rapidamente para a solução ótima. Esses métodos não garantem uma solução ótima global. Em contrapartida, os métodos heurísticos de otimização, como os Algoritmos Genéticos (AG), apresentam-se como alternativa para a solução de diversos problemas práticos, principalmente, no que diz respeito a problemas de grande complexidade e que envolvem um grande número de variáveis, realizando buscas simultâneas em várias regiões do espaço de possíveis soluções, aumentando a probabilidade de encontrar a solução global (LINDEN, 2012).

Na literatura podem ser encontrados diversos trabalhos de otimização, com variadas metodologias, objetivando a minimização de peso (volume) e custo, sendo eles: Rangel (2018) e Rangel *et al.* (2017), que fizeram um dimensionamento ótimo de pórticos de aço com ligações semirrígidas considerando não-linearidade geométrica da estrutura, empregando AG; Hortêncio (2017), que estudou a otimização de ligações vigas-colunas de pórticos de aço utilizando AG; Roman (2016), que estudou a otimização de estruturas de coberturas metálicas, utilizando o *AG Search Group Algorithm*, realizando simultaneamente as otimizações dimensional, geométrica e topológica; Ribeiro (2014), que fez a otimização simultânea (de seção e de geometria) de treliças utilizando o algoritmo metaheurístico *Firefly*, baseado na intensidade da luz dos vaga-lumes; Martins (2011), que fez otimização dimensional de treliças utilizando programação linear a partir do Método dos Elementos Finitos, no MATLAB, com restrições de flambagem e de tensões, separadas e simultaneamente; Hultman (2010) e Soh e Yang (1998), que fizeram otimização simultânea (de seção e de geometria) objetivando a redução de peso de uma treliça metálica de ponte, utilizando AG e; Moura *et al.* (2010), que fizeram a otimização simultânea (de seção e de geometria) de treliças utilizando algoritmos evolutivos híbridos, baseados em AG.

Oliveira e Falcón (2013) implementaram um programa de otimização geométrica utilizando a técnica dos Pontos Interiores (PM), para identificação da solução ótima de uma treliça em alumínio, cujo objetivo era a minimização de peso, sem a consideração da restrição de flambagem. Os resultados da pesquisa mostraram o potencial da otimização diante da considerável redução de peso obtida. Foram feitas avaliações complementares para verificar a influência das áreas e da eliminação de restrições na geometria final do problema.

Conforme apontado nos estudos de Kripka e Drehmer (2005), quando as coordenadas dos nós, além das seções transversais, são incluídas no conjunto das variáveis de projeto, o ganho obtido a partir do emprego da otimização (neste caso, simultânea) é mais significativo. Observação semelhante foi feita no trabalho de Medeiros *et al.* (2010), em que os autores concluíram que à medida que o projetista leva em conta um maior número de detalhes na concepção de seu projeto, não procurando apenas ser mais econômico na escolha dos perfis, mas também propondo um melhor desenho de sua estrutura, maior é a economia obtida.

Este trabalho tem por objetivo encontrar soluções ótimas a partir de configurações iniciais de treliças planas metálicas de pontes, através da utilização de algoritmos baseados em um método de PM, que minimizam o peso e o custo de fabricação da estrutura. As soluções são provenientes da realização de três tipos de otimização (dimensional, geométrica e simultânea: dimensional com geométrica), a fim de verificar a eficiência de cada um deles,

levando em consideração a restrição de flambagem para as barras comprimidas além das restrições de equilíbrio estático, de deslocamentos e tensões, complementando o trabalho de Oliveira e Falcón (2013), que simularam apenas a otimização geométrica de treliça de alumínio, sem a consideração da restrição de flambagem.

Com isto, o presente estudo ressalta a necessidade de pensar sistemas eficientes, distintos, mais racionais, que tenham uma boa relação custo-benefício.

2. METODOLOGIA

Para comprovar a efetiva economia obtida pela aplicação de técnicas de otimização à análise estrutural, decidiu-se por uma adaptação nos algoritmos extensos desenvolvidos na interface do MATLAB por Oliveira e Falcón (2013), baseados na técnica dos Pontos Interiores (PM), elaborados apenas para otimização geométrica de treliças planas, de modo a possibilitar as simulações das otimizações dimensional, geométrica e simultânea (dimensional com geométrica). Para tal, foram realizados ajustes nos algoritmos no que diz respeito às variáveis de projeto de acordo com o tipo de otimização, além da implementação da restrição de flambagem das barras comprimidas.

Para cada tipo de otimização (dimensional, geométrica e simultânea) têm-se três algoritmos que trabalham interligados. O primeiro deles é o principal, o de otimização propriamente dita, que apresenta o resultado da simulação. Ele utiliza um módulo otimizador do próprio MATLAB, fazendo a leitura das áreas iniciais das seções das barras (para o caso de otimização dimensional) e das coordenadas iniciais dos nós da estrutura para esboçar a geometria inicial do problema (para o caso de otimização geométrica). Além disso, o algoritmo principal acessa outras sub-rotinas para calcular os valores da função objetivo (minimização do peso) para cada uma das possíveis soluções do vetor de coordenadas de projeto e para avaliar as restrições de tensões e deslocamentos permissíveis para a estrutura.

No algoritmo da função objetivo, são atualizados - ou apresentados, dependendo do tipo de otimização - os valores das áreas das seções e dos comprimentos das barras, de acordo com as variáveis de projeto e, por fim, o valor da função que representa o peso da estrutura.

No algoritmo das restrições faz-se a montagem das matrizes topológica e de rigidez, a consideração das condições de contorno, o cálculo dos deslocamentos e tensões e a verificação das restrições. Esse algoritmo recorre ao CALFEM (*Computer Aided Learning of the Finite Element Method*) para fazer a análise estrutural do problema pelo Método dos Elementos Finitos.

O programa apresenta o peso final com as áreas modificadas para o caso da otimização dimensional e o peso final e o traçado da geometria ótima para o caso da otimização geométrica. Para a otimização simultânea, os algoritmos de otimização dimensional e geométrica foram acoplados. Como restrições de projeto laterais, passou-se a ter, simultaneamente, as áreas das barras e as coordenadas dos nós.

Na Figura 1 está apresentado um esquema geral de otimização estrutural. Na etapa da análise estrutural são calculados os valores das funções envolvidas (função objetivo $f(X)$ e restrições de desigualdade $g(X)$ e de igualdade $h(X)$) para a solução atual e na análise de sensibilidade são avaliadas as derivadas dessas funções.

A partir de uma solução inicial X^0 constrói-se uma sequência de soluções aproximadas X^K que convergem monotonicamente para uma solução ótima X^* . As variáveis de projeto são atualizadas através da regra de recorrência dada por:

$$X^{K+1} = X^K + t.d^K \quad (1)$$

Na regra de recorrência, d é uma direção de busca e t é um escalar positivo que representa o passo a ser dado nessa direção. Esses parâmetros são calculados convenientemente pelo

algoritmo de otimização utilizado, visando a um decréscimo da função objetivo e à viabilidade das restrições de desigualdade (HERSKOVITS, 1995).

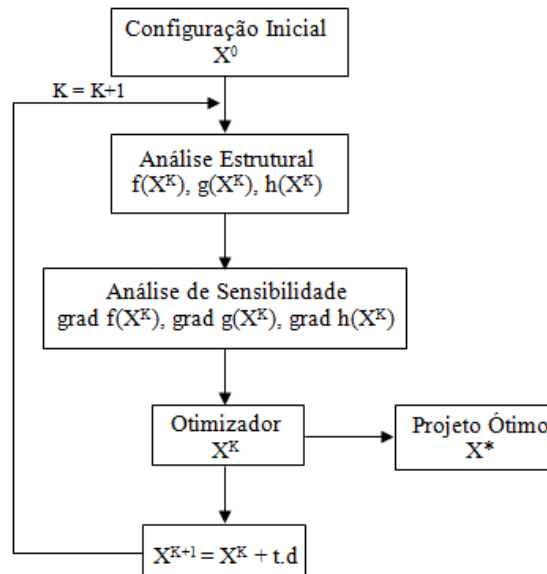


Figura 1 – Esquema geral de otimização estrutural.

O problema de minimização do peso de treliças foi formulado da seguinte maneira:

Minimizar:

$$f(x_i) = W = \sum_{j=1}^m \gamma \cdot A_j \cdot L_j \text{ sendo } m \text{ o número de barras da treliça} \quad (2)$$

Sujeito a:

$$\sigma_j \leq \sigma_{adm} \quad j=1, \dots, m \text{ elementos} \quad (3)$$

$$\sigma_j \leq \sigma_{fl_adm} \quad j=1, \dots, r \text{ elementos comprimidos} \quad (4)$$

$$u_k \leq u_{adm} \quad k=1, \dots, p \text{ graus de liberdade não restritos} \quad (5)$$

Para a otimização dimensional:

$$A_i^l \leq A_i \quad i=1, \dots, n \text{ variáveis de projeto (barras)} \quad A_j = s(A_i) \quad (6)$$

Para a otimização geométrica:

$$x_i^l \leq x_i \leq x_i^u \quad i=1, \dots, n \text{ variáveis de projeto (graus de liberdade)} \quad L_j = s(x_i) \quad (7)$$

A função objetivo W dada em (2) representa o peso da estrutura, em função da área A e das coordenadas dos nós da treliça. Na expressão, γ designa o peso específico do material e L é o comprimento dos elementos que, além de ser função das coordenadas fixas, depende das coordenadas de projeto, nos casos de otimização geométrica e simultânea.

No problema têm-se como restrição mecânica que a tensão σ_j em cada barra deve ser menor ou igual à tensão admissível do material σ_{adm} (3) e, para as barras comprimidas, σ_j deve ser menor que a tensão de flambagem admissível σ_{fl_adm} (4), sendo consideradas ainda, como restrições mecânicas, os deslocamentos u_k permissíveis para cada um dos nós associados aos graus de liberdade não restritos estando limitados ao valor admissível u_{adm} , conforme expresso em (5). A restrição (6) é dimensional e impõe valor limite mínimo A^l para a área A da seção das barras e a restrição (7) é geométrica e impõe limites mínimo x^l e máximo x^u para a variação das coordenadas dos nós admitidas como variáveis de projeto.

3. APLICAÇÃO

Para a realização das simulações, o material escolhido apresenta as características resumidas na Tabela 1, obtidas a partir do trabalho de Martins (2011).

Tabela 1 – Características do aço estrutural empregado nas simulações.

Características	Valores
Módulo de elasticidade longitudinal (E)	210 GPa
Peso específico (γ)	$78,5 \frac{kN}{m^3}$
Tensão admissível para tração e compressão (σ_{adm})	140 MPa

A tensão atuante nas barras comprimidas foi comparada à tensão de flambagem admissível, obtida a partir da carga crítica de Euler, considerando coeficiente de segurança igual a 2, conforme:

$$\sigma_{fl_adm} = \frac{\pi^2 EI}{2AL^2} \quad (8)$$

Nesta expressão, E é o módulo de elasticidade longitudinal do material da barra; I é o momento de inércia da área A da seção da barra, que são alterados quando a otimização dimensional (e simultânea) é realizada e L é o comprimento da barra sem apoios, que varia no caso da otimização da geometria (e simultânea).

A fim de obter os momentos de inércia correspondentes às áreas calculadas nas otimizações dimensional e simultânea, foi utilizada a mesma função de Martins (2011), admitindo seção circular cheia, dada por:

$$I = \frac{A^2}{4\pi} \quad (9)$$

O modelo de elementos finitos da treliça de ponte consiste em 23 barras com um total de 28 graus de liberdade, sendo os graus de liberdade 1, 2, 3, 4, 25, 26, 27 e 28 fixos, como se pode observar na Figura 2.

A estrutura de referência consiste em um modelo plano da estrutura de uma ponte, com 24 m de vão (L) e 6 m de altura máxima (H), sujeito a carregamentos concentrados de 200 kN (P) aplicados em quase todos os nós do banzo superior, para baixo. Os quatro nós extremos estão simplesmente apoiados. Este mesmo exemplo foi simulado por Martins (2011), Hultman (2010) e Soh e Yang (1998).

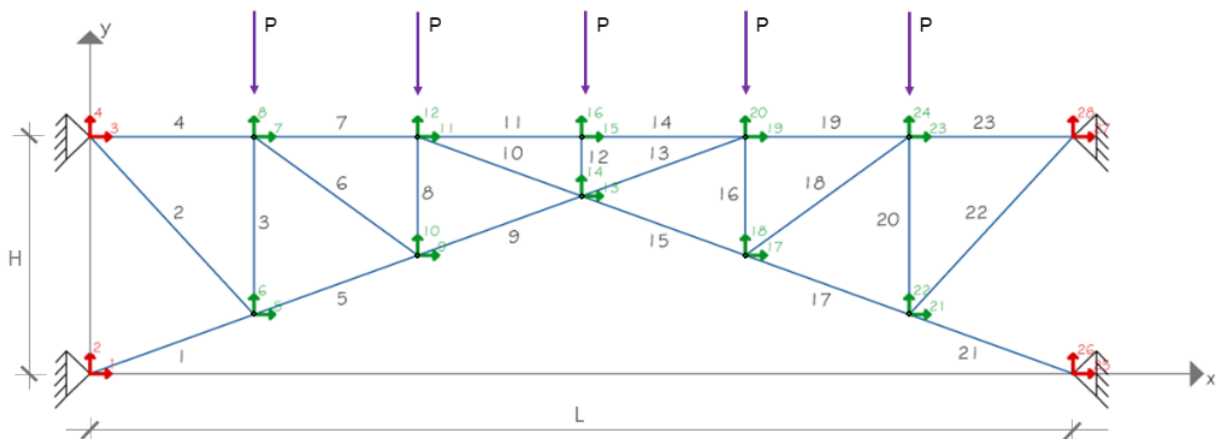


Figura 2 – Estrutura de referência.

Como variáveis de projeto na otimização dimensional (e simultânea) tomaram-se as áreas das seções de todas das barras.

Limitou-se o deslocamento dos nós em $u_{adm_h} = 1$ cm e $u_{adm_v} = 5$ cm e todas as barras têm área inicial (x_0) de $0,03 \text{ m}^2$, conforme dados extraídos de Martins (2011). Para a área mínima (l_b) foi adotado o valor $0,0003 \text{ m}^2$.

Já na otimização geométrica (e simultânea), como variáveis de projeto tomaram-se as coordenadas dos nós de grau de liberdade 5, 6, 9, 10, 14, 17, 18, 21 e 22, praticamente todos os graus inferiores, excluindo os graus referentes aos apoios e o grau 13.

Como coordenadas iniciais (x_0) dos nós que são variáveis de projeto e os valores mínimos (l_b) e máximos (u_b) assumidos por essas variáveis têm-se os valores apresentados na Tabela 2. Os limites das variáveis de projeto apresentados, que constituem restrições laterais geométricas, foram adotados prezando-se, convenientemente, aspectos estéticos (arquitetônicos) da estrutura metálica.

Tabela 2 – Coordenadas iniciais e limites das variáveis de projeto x^* (em m).

Variáveis de projeto	5	6	9	10	14	17	18	21	22
Coordenadas iniciais (x_0)	4	1,5	8	3	4,5	16	3	20	1,5
Valores mínimos (l_b)	<u>4</u>	1	<u>7,5</u>	2,5	4,5	15,5	2,5	19,5	1
Valores máximos (u_b)	4,5	<u>4,5</u>	8,5	<u>5</u>	<u>5,5</u>	<u>16,5</u>	<u>5</u>	<u>20</u>	<u>4,5</u>

A partir das informações apresentadas nesta seção, estima-se que o peso da estrutura de referência é de aproximadamente 228,0 kN.

4. RESULTADOS

Os resultados aproximados para as áreas estão apresentados na Tabela 3, para as otimizações dimensional e simultânea, nos casos sem e com restrição de flambagem (s/ F e c/ F, respectivamente), compreendendo apenas as barras 1 a 12, tendo em vista a simetria da estrutura.

Tabela 3 – Resultados das áreas ótimas x^* (10^{-3} m^2).

Tipos de otim.	Rest.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Dimens.	s/ F	5,07	2,40	2,39	1,15	3,37	1,60	<u>0,30</u>	1,44	2,00	<u>0,30</u>	<u>0,30</u>	1,43
	c/ F	8,88	2,39	6,40	12,8	7,25	1,80	1,15	3,30	5,62	0,44	1,16	1,65
Simult.	s/ F	4,36	2,02	1,86	1,96	2,84	1,56	4,58	2,36	<u>0,30</u>	1,94	2,42	1,43
	c/ F	8,62	1,36	4,77	2,18	6,41	2,00	<u>0,30</u>	3,46	<u>0,30</u>	1,83	5,91	1,43

s/ F – Sem flambagem e c/ F – Com flambagem

Nota-se que houve uma redução nas seções das barras, com poucas restrições ativas para as áreas (sublinhadas na Tabela 3). Nos casos com flambagem, observa-se o alcance de algumas áreas com valores mais afastados da restrição lateral mínima de área. Destaca-se que, para as otimizações dimensional e simultânea, as restrições de tensões, incluindo as de flambagem (nas simulações em que foram consideradas), apresentaram-se ativas em quase todas as barras, ou seja, determinantes na solução ótima, definindo a parada do algoritmo de otimização. As restrições de deslocamentos apresentaram folgas (não ativas) em todas as simulações.

Dizer que as restrições foram ativas significa que, na solução ótima, apesar dessas restrições poderem variar dentro de um intervalo definido no projeto, elas atingiram os valores limites (extremos) desse intervalo.

Na Tabela 4 têm-se os resultados das coordenadas ótimas (x^*) para as otimizações geométrica e simultânea, sem e com restrição de flambagem. Na Figura 3 apresentam-se as soluções gráficas para a treliça obtidas após as otimizações geométrica e simultânea considerando a restrição de flambagem, escolhida para fins de ilustração.

Tabela 4 – Coordenadas ótimas x^* das variáveis de projeto geométricas (em m).

Tipos de otimização	Restrição	5	6	9	10	14	17	18	21	22
Geométrica	s/ F	<u>4</u>	<u>4,5</u>	<u>7,5</u>	<u>5</u>	<u>5,5</u>	<u>16,5</u>	<u>5</u>	<u>20</u>	<u>4,5</u>
	c/ F									
Simultânea	s/ F	<u>4</u>	2,35	<u>7,5</u>	<u>5</u>	<u>4,5</u>	<u>16,5</u>	<u>5</u>	<u>20</u>	2,35
	c/ F	<u>4</u>	2,45	<u>7,5</u>	4,06	<u>5,5</u>	<u>16,5</u>	4,06	<u>20</u>	2,45

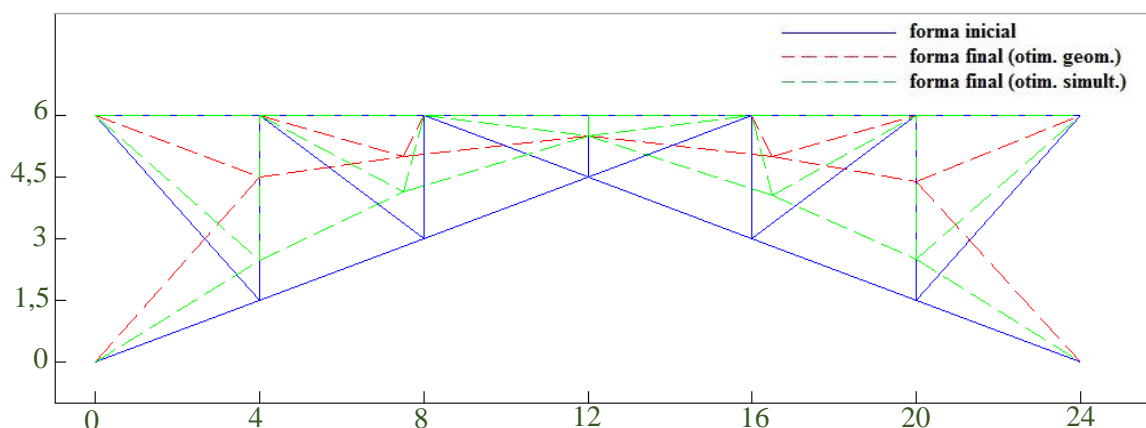


Figura 3 – Formas para as otimizações geométrica e simultânea, com restrição de flambagem.

De modo geral, as restrições laterais para as coordenadas foram ativas nos dois tipos de simulação (geométrica e simultânea), com e sem restrição de flambagem, principalmente na otimização geométrica, com todas as coordenadas ótimas (x^*) assumindo os valores estabelecidos como mínimos (l_b) ou máximos (u_b) nas restrições laterais, ou próximos deles, representados com os sublinhados indicados na tabelas 2 e 4, definindo a forma final da geometria. As restrições de tensões (para a otimização geométrica) e deslocamentos apresentaram folgas (não ativas) na solução ótima, com seus valores afastados dos valores admissíveis, portanto, não sendo determinantes para a solução final do problema.

Observa-se que, após os processos de otimização geométrica e simultânea, as barras do banzo inferior da treliça se aproximam do banzo superior em ambas simulações, causando a redução do comprimento das diagonais e dos montantes.

A Tabela 5 apresenta os principais parâmetros obtidos para cada simulação realizada incluindo o peso inicial, o peso final (ótimo), a redução percentual de peso e o número de cálculos da função objetivo; este último resultante das “perturbações” dadas às diversas variáveis de projeto para a obtenção do gradiente dentro de uma mesma iteração.

Tabela 5 – Principais parâmetros obtidos nas simulações.

Tipos de otimização	Rest.	Peso inicial (kN)	Peso ótimo (kN)	Redução de peso (%)	N.º de cálculos da função objetivo
Dimensional	s/ F	228,0	14,4	93,7	504
	c/ F		32,1	85,9	3003
Geométrica	s/ F		192,9	15,4	110
	c/ F		192,9	15,4	110
Simultânea	s/ F		13,9	93,9	2049
	c/ F		23,2	89,8	3029

Em todos os casos de otimização foram alcançadas reduções percentuais de peso consideráveis em relação às configurações iniciais da estrutura estudada. Além disso, verificou-se que o número de cálculos da função objetivo no processo de otimização simultânea cresceu bruscamente em relação aos outros dois processos, requerendo bastante esforço computacional, o que pode ser um inconveniente do uso da técnica dos Pontos Interiores. Números elevados de cálculos também podem ser observados nas simulações com a consideração da flambagem, exceto na geométrica, em que as restrições laterais foram ativas na solução.

O resultado da redução percentual de peso para a simulação dimensional, sem e com flambagem, estão próximos dos obtidos por Martins (2011), que utilizou AG também para a simulação da otimização dimensional. Na simulação em que considerou apenas restrição de tensão (sem flambagem), alcançou uma redução de 94% e na simulação com a restrição de tensão de flambagem, obteve uma redução de 82%. Os valores das áreas ótimas encontrados na otimização dimensional sem flambagem também se aproximaram dos valores encontrados por Martins (2011).

A consideração da restrição de flambagem conduz, em geral, a pesos ótimos maiores que aqueles obtidos sem a consideração da flambagem, o que mostra a importância de admitir esta restrição na obtenção de resultados mais conservadores (e ainda mais confiáveis) nos dimensionamentos estruturais, fato também observado por Martins (2011).

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram realizadas simulações das otimizações dimensional, geométrica e simultânea de treliças planas de pontes metálicas, visando à minimização do peso da estrutura (consequentemente de seu custo de fabricação), sujeita a restrições de equilíbrio estático, de deslocamentos e tensões (incluindo flambagem) nas barras.

Evidencia-se que as reduções percentuais de peso obtidas pelos processos de otimização dimensional (93,7% e 85,9%) e simultânea (93,9% e 89,8%) são bem significativas em relação à otimização geométrica (15,4%), entretanto, a otimização dimensional se apresenta como um potencial processo de otimização a ser utilizado pelos projetistas em detrimento dos outros dois tipos, por ser o que menos infringe as concepções arquitetônicas de forma (estética) previamente definidas em um projeto.

Nos problemas de otimização geométrica e simultânea, em geral, a maior parte das restrições laterais geométricas (de coordenadas) foi ativa na solução, definindo a forma final da geometria. Isso pode estar associado à atuação de um carregamento com magnitude menor e/ou a um superdimensionamento inicial das barras, conduzindo a pouco aproveitamento da máxima capacidade da estrutura. As restrições de tensão (incluindo as de flambagem) foram ativas nas otimizações dimensional e simultânea. Nestas simulações, verificou-se que poucas variáveis de projeto de áreas foram ativas. Em todas as simulações, as restrições de deslocamentos não foram ativas.

O número de cálculos na otimização simultânea é muito grande quando comparados aos tipos isolados, bem como as simulações com a consideração da flambagem, representando um custo computacional maior, o que pode estar relacionado à técnica de PM utilizada no algoritmo.

A consideração da flambagem como restrição de projeto conduz a resultados mais conservadores no que diz respeito à obtenção de maiores pesos finais e, consequentemente, menores reduções de peso, quando comparados às simulações sem a consideração da flambagem, bastante evidente na otimização dimensional.

De forma geral, pode-se dizer que as técnicas de otimização proporcionam grande economia no projeto de estruturas e, mais do que isso, os resultados deste trabalho mostram a

utilidade e o potencial das técnicas de otimização na elaboração de projetos. Através das simulações computacionais feitas, valida-se a relação custo-benefício obtida com as soluções otimizadas sem o comprometimento da eficiência da estrutura.

REFERÊNCIAS

- Arora, J. S. (2012), “*Introduction to Optimum Design*”, 3ª ed., Oxford: Elsevier.
- Azevedo, A. F. M. (1994), “*Otimização de Estruturas com Comportamento Linear e Não-linear*”, Tese de Doutorado, Universidade do Porto, Portugal.
- CALFEM (Computer Aided Learning of the Finite Element Method). Division of Structural Mechanics, Lund University, Suécia, 1978. Disponível em: <<http://www.byggmek.lth.se/Calfem>>. Acesso em 26 jan. 2014.
- Christensen, P. W.; Klarbring, A. (2009), “*An Introduction to Structural Optimization*”, 1ª ed., Springer Netherlands.
- Haftka, R. T.; Gürdal, Z. (1992), “*Elements of Structural Optimization*”, 3ª ed., Kluwer Academic Publishers.
- Herskovits, J. (1995), “*A View on Nonlinear Optimization*”. In: “*Advances in Structural Optimization*, London: Kluwer Academic Publishers”, 71-116.
- Hortêncio, R. S. (2017), “*Dimensionamento Ótimo de Ligações Viga-Coluna de Pórticos Planos Utilizando o Método das Componentes*”, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes – RJ.
- Hultman, M. (2010), “*Weight Optimization of Steel Trusses by a Genetic Algorithm - Size, Shape and Topology Optimization According to Eurocode*”, Department of Structural Engineering, Lund Institute of Technology, Lund – Suécia.
- Kripka, M.; Drehmer, G. A. (2005), “*Determinação da Geometria e Configuração Ótimas em Treliças Metálicas de Banzos Paralelos*”, In: PRAVIA, Zacarias M. Chamberlain; KRIPKA, Moacir, “*Construção Metálica: Estudos e Pesquisas Recentes*”, UPF Editora, Passo Fundo – RS, 100-119.
- Linden, R. (2012), “*Algoritmos Genéticos*”, 3ª ed., Ciência Moderna, Rio de Janeiro – RJ.
- Martins, T. F. A. (2011), “*Otimização de Estruturas de Treliça Utilizando Técnicas de Programação Linear*”, Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru – PE.
- Medeiros, G. F.; Tisot, G. D.; Kripka, M. (2010), “*Obtenção de Configurações Econômicas para o Projeto de Tesouros em Aço*”. Congresso Latino-Americano da Construção Metálica, São Paulo – SP.
- Moura, J; Moita, G. F.; Souza, S. R.; Temponi, E. C. C. (2010), “*Otimização Estrutural de Treliças Utilizando Algoritmos Evolutivos Híbridos*”, VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Campina Grande – PB.
- Oliveira, S. R. C.; Falcón, G. A. S. (2013), “*Otimização Geométrica de Treliças Planas Utilizadas em Coberturas Metálicas*”, Vértices, 15(n.2), 101-115.
- Pfeil, W.; Pfeil, M. (2011), “*Estruturas de Aço: Dimensionamento Prático*”, 8ª ed, LTC, Rio de Janeiro – RJ.
- Rangel, J. V. S. (2018), “*Dimensionamento Ótimo de Pórticos de Aço com Ligações Semirrígidas Considerando Análise Não-Linear Geométrica*”, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes – RJ.
- Rangel, J. V. S.; Falcón, G. A. S.; Medeiros, C. A. (2017), “*Optimum Design of Steel Frames Considering Semi-Rigid Joints*”, In: XXXVIII IberianLatin American Congress on Computational Methods in Engineering, Florianópolis – SC.
- Rao, S. S. (2009), “*Engineering Optimization: Theory and Practice*”, 4ª ed, New Jersey: John Wiley & Sons.
- Ribeiro, A. D. (2014), “*Otimização Estrutural de Treliças Utilizando o Algoritmo Firefly*”, Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC.
- Roman, R. R (2016), “*Otimização de Coberturas Metálicas de Edifícios Industriais*”, Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC.
- Soh, C. K.; Yang, J. (1998), “*Optimal Layout of Bridge Trusses by Genetic Algorithms*”, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 13(n.4), 247-254.

DIMENSIONAL AND GEOMETRIC OPTIMIZATION OF LATTICED STRUCTURES FOR DIFFERENT ARCHITECTURAL AND STRUCTURAL CONCEPTIONS

Abstract. *In the design of structural projects, modern professionals seek to minimize the consumption of material, reducing costs, but without compromising the efficiency of the system. This paper aims to simulate dimensional, geometric and simultaneous optimizations to identify optimal solutions of bridges metal trusses in order to minimize their weight. In dimensional optimization, the areas of the sections of the bars are changed, to work with slimmer bars. In geometric optimization, only the geometry of the structure is changed, considering, as project variants, the horizontal and vertical coordinates of some of the structure. In the simultaneous optimization, both optimizations are coupled in the same problem, having as project variants the areas of bars and the coordinates of some nodes of the structure. Buckling of the truss bars is also allowed as a project limitation, in addition to the mechanical and geometric limitations usually considered. The optimizations obtained satisfactory reductions in the initial weight of the structure, reaching up to 93,7% (in the dimensional optimization), 15,4% (in geometric optimization) and up to 93,9% (in the simultaneous optimization), minimizing expenditures on constituent material, without compromising integrity and structural behavior, as well as raising awareness of the need to design more efficient systems.*

Keywords: *Dimensional optimization; Geometric optimization; Lattice structures; Weight reduction.*