

Projeto Ótimo de Seções I Soldadas de Aço Conforme a NBR 8800: 2008

Salmo de Souza Fraga^{1*}, Renato Dourado Maia^{2*}, Álvaro Carvalho Barbosa
Júnior^{3*}, João Batista Mendes^{4*}

*UNIMONTES / Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas / ¹salmo.fraga@hotmail.com

²renato.dourado@unimontes.br ³alvarobcjr@yahoo.com.br ⁴joao.mendes@unimontes.br

Resumo

A elaboração do projeto estrutural é composta de etapas iterativas baseadas em tentativa e erro e guiadas pela experiência do engenheiro. Este trabalho apresenta os resultados parciais do desenvolvimento de um *software* que auxilia na elaboração do projeto por meio da minimização do peso de uma seção transversal de galpão empregando perfis I soldados de aço conforme as normas técnicas nacionais. A otimização do projeto estrutural é realizada utilizando o algoritmo de Recozimento Simulado (SA) e é motivada pela incessante busca pelo aumento da produtividade nos escritórios de projeto. Os resultados parciais apresentados estão relacionados à otimização de seções isoladas submetidas a determinados esforços. A literatura é carente de trabalhos sobre a otimização de estruturas de aço que utilizem as normas técnicas brasileiras. Devido a essa limitação, para validar os resultados obtidos pelo *software* proposto, foi implementado um algoritmo de Busca Exaustiva (BE) em todas as combinações possíveis das dimensões da seção transversal. As variáveis de projeto são: a altura e espessura da alma e a largura e espessura das mesas. As restrições estão relacionadas às verificações quanto à resistência aos esforços solicitantes conforme ABNT NBR 8800: 2008 e as limitações de fabricação prescritas na ABNT NBR 5884: 2013. Também foram contempladas restrições de largura e espessuras de chapas. Os resultados foram significativos para os esforços de flexão e flexo-compressão, alcançando redução da massa linear da ordem de 25% e 28%, respectivamente, quando comparado a seções de referência. Não houve redução para o esforço de compressão. A quantidade de avaliações da função objetivo realizadas pelo SA foi 0,3% da quantidade de avaliações realizadas pela BE, o que demonstra melhor desempenho (quantidade de avaliações da função objetivo) do algoritmo de Recozimento Simulado.

Palavras-chave

Otimização estrutural; perfis I soldados; algoritmo de recozimento simulado.

Introdução

A Engenharia de Estruturas, ramo da engenharia responsável pela elaboração do projeto estrutural, tem como objetivo a determinação dos materiais, quantitativos e sua disposição de forma a garantir às edificações segurança, qualidade e economia. O projeto estrutural é composto pelas fases de concepção estrutural, análise estrutural, dimensionamento, detalhamento e emissão dos documentos. A concepção estrutural é responsável, em suma, pela definição dos materiais, das ações atuantes na estrutura e pela disposição e pré-dimensionamento dos elementos que compõem a estrutura. A análise estrutural compreende a determinação dos esforços a que os elementos estruturais ficarão submetidos. No dimensionamento, o que se realiza, na verdade, é uma verificação das dimensões previamente estabelecidas: se suficientes para resistir aos esforços obtidos na fase

anterior, pode-se buscar reduzi-las com vistas à economia; se não, buscam-se novas dimensões até que o critério de resistência seja atendido (BELLEI, PINHO e PINHO, 2008).

Observa-se tratar todo esse processo de etapas iterativas baseadas em tentativa e erro e guiadas, predominantemente, pela experiência do engenheiro (SAKIYAMA, *et al.*, 2016). Este trabalho apresenta os resultados parciais do desenvolvimento de um *software* que busque a minimização do peso de uma seção transversal de galpão em pórtico empregando perfis I soldados de aço. Este trabalho é justificado pela incessante busca pelo aumento da produtividade nos escritórios de projeto, que trabalham com prazos cada vez mais reduzidos. A indústria da construção, por sua vez, busca aumentar sua competitividade frente aos concorrentes. Ademais, contribui, também, com a construção sustentável, dado o caráter racional de utilização dos materiais proporcionado pelo dimensionamento ótimo da estrutura. Os resultados parciais apresentados dizem respeito à otimização de seções isoladas (uma viga ou um pilar) de aço submetido a esforços pré-estabelecidos. O *software* desenvolvido contempla as prescrições das normas técnicas vigentes no Brasil e utiliza o algoritmo de Recozimento Simulado (SA) para otimização.

Galpões industriais de aço

As estruturas de aço podem ser empregadas nos mais diversos tipos de construções civis e industriais, entre os principais tipos de edificações, destacam-se: edifícios residenciais e comerciais, galpões para usos logístico e industrial, edificações de uso institucional, escolas, edifícios garagem, etc.

Com relação ao emprego de estruturas de aço, observa-se que seu uso é cada vez mais frequente no Brasil, sobretudo para construção de galpões industriais. Os galpões são caracterizados por serem, geralmente, construções com apenas um pavimento, grande área em planta e por possuírem diversos pórticos regularmente espaçados. Além disso, são, comumente, fechados superior e lateralmente por telhas metálicas (CHAVES, 2007).

As seções transversais das vigas e pilares são diversas e podem ter formato I, U, T, tubo circular, caixa, etc. As seções transversais em formato de I são uma boa escolha por apresentarem propriedades geométricas interessantes ao se comparar com as demais. Os elementos de seção transversal em formato I podem ser obtidos de duas formas: por meio da laminação ou do processo de soldagem. Os perfis I laminados possuem sua fabricação e comercialização restritas a apenas algumas combinações de dimensões. Os perfis I soldados podem ser fabricados com dimensões personalizadas por meio da realização de solda entre os três segmentos de chapa que formam as duas mesas e a alma.

O dimensionamento dos elementos estruturais é feito por meio de procedimentos descritos nas normas técnicas. No Brasil, a norma que apresenta o procedimento de cálculo de estruturas de aço composta por perfis I laminados ou soldados é a ABNT NBR 8800: 2008 Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios. O processo de determinar os esforços solicitantes de cálculo, S_d , e os esforços resistentes de cálculo, R_d , é iterativo e baseado em uma série de tentativas e erros até que uma solução satisfatória seja encontrada pelo engenheiro (MEDEIROS e KRIPKA, 2012) (SILVA, 2011).

Otimização estrutural

Os principais métodos heurísticos utilizados em otimização estrutural são apresentados por Medeiros e Kripka (2012) e concluem que o Recozimento Simulado e os Algorit-

mos Genéticos são os mais utilizados, apesar dos demais métodos também apresentarem soluções apropriadas.

Nos problemas de otimização estrutural, a função objetivo geralmente representa o volume ou peso da estrutura e as restrições estão relacionadas a critérios normativos de resistência e/ou fabricação (MAIA, 2009).

Em sua pesquisa, Drehmer (2005) realizou a minimização da área da seção transversal de perfis I soldados de aço e isolados submetidos a esforços previamente determinados. Para isso, foi utilizada a versão de 1986 da ABNT NBR 8800 e o algoritmo de Reconhecimento Simulado. Reduções significativas da área foram obtidas ao analisar isoladamente o esforço de momento fletor.

Mais recentemente, Nascimento, Côrrea e Gouveia (2015) apresentaram um trabalho sobre a otimização de seções I soldadas de aço, submetidas a esforços axiais, tração ou compressão, com implementação da ABNT NBR 8800: 2008. Os autores observam que a redução da área da seção transversal é mais significativa em alguns casos.

Os trabalhos de Yamamoto (2015) e Carraro (2015) trataram da otimização estrutural de pórticos de aço utilizando o *Search Group Algorithm* (SGA). Apesar dos bons resultados encontrados pelos autores, ressalta-se que foram utilizadas as normas técnicas americanas.

O trabalho de Flôr (2015) abordou a otimização de coberturas em aço para edifícios industriais. A autora contemplou a ABNT NBR 8800: 2008 e utilizou o SGA para minimização do peso da estrutura. Foram considerados os dimensionamentos da treliça de cobertura, telhas, terças, tirantes e contraventamento do banzo inferior e o espaçamento entre pórticos. Destaca-se que foi considerada a massa das telhas em sua otimização, o que não parece fazer sentido em termos práticos, dada a grande diferenciação de custo por massa (R\$/kg) da estrutura e das telhas.

Em trabalho semelhante, Roman (2016) contemplou a diferença de custos das telhas em relação ao restante da estrutura e concluiu sobre a importância dessa consideração. Assim como concluído por Flôr (2015), o espaçamento ótimo entre pórticos ficou em torno de 4,0 m. Esse fato parece ser um contrassenso, haja vista a prática de vãos maiores que esses. Outra observação que se faz é quanto à desconsideração dos pilares para dimensionamento das estruturas, sobretudo no modelo I discutido em seu trabalho. A consideração feita para as vigas de cobertura em alma cheia é de apoios indeslocáveis ou pilares de rigidez a flexão infinita, o que não se verifica nos pilares.

Formulação do problema

Apresenta-se a seguir a formulação desse problema de otimização.

Encontrar o vetor das variáveis de projeto:

$$X = [b_f, t_f, h, t_w] \quad (1)$$

Para minimizar a função objetivo massa linear, f :

$$f(b_f, t_f, h, t_w) = 7850 \frac{2b_f \cdot t_f + h \cdot t_w}{1000000} \quad (2)$$

Sujeita às restrições de desigualdade:

$$g_1 = \frac{|N_{Sd}|}{N_{Rd}} - 1 \leq 0 \quad (3)$$

$$g_2 = \frac{|V_{Sd}|}{V_{Rd}} - 1 \leq 0 \quad (4)$$

$$g_3 = \frac{|M_{Sd}|}{M_{Rd}} - 1 \leq 0 \quad (5)$$

$$g_4 = \text{interação } (N_{Sd} \text{ e } M_{Sd}) - 1 \leq 0 \quad (6)$$

$$g_5 = \frac{b_f}{d} - 1 \leq 0 \quad (7)$$

$$g_6 = \frac{d}{4b_f} - 1 \leq 0 \quad (8)$$

$$g_7 = \frac{t_w}{t_f} - 1 \leq 0 \quad (9)$$

Sujeita, ainda, as restrições laterais:

$$b_f \in [100, 101, 102, \dots, 2000] \quad (10)$$

$$d \in [150, 151, 152, \dots, 2000] \quad (11)$$

$$t_w \in [4,75; 6,35; 7,94; 9,52; 12,7; 15,88; 19,05; 22,22; 25,4; 31,75; 38,1; 44,45; 50,8] \quad (12)$$

$$t_f \in [4,75; 6,35; 7,94; 9,52; 12,7; 15,88; 19,05; 22,22; 25,4; 31,75; 38,1; 44,45; 50,8] \quad (13)$$

Representação das soluções

As variáveis de projeto são: a altura da alma, h , a largura da mesa, b_f , e as espessuras da alma, t_w , e da mesa, t_f . A altura total da seção transversal, d , assume o valor da altura da alma mais duas vezes a espessura das mesas.

O vetor solução, representado na equação (1), é composto por quatro valores inteiros. Os índices 0, 1, 2 e 3 desse vetor representam, respectivamente, a largura da mesa, a espessura da mesa, a altura da alma e a espessura da alma. Os índices 0 e 2 representam valores de medidas usuais para seções transversais de perfis I, em milímetros, e devem pertencer aos intervalos apresentados em (10) e (11). Os índices 1 e 3 representam índices que apontam para a posição de um vetor que contém as espessuras comerciais das chapas para composição do perfil, em milímetros, e devem pertencer aos intervalos apresentados em (12) e (13). Para exemplificar, seja uma solução para uma seção transversal e a sua representação em termos do vetor apresentado na Figura 1. Essa seção é denominada PS659x175,5. O termo PS é a indicação de perfil soldado e que ele não é padronizado por ABNT (2013). A segunda informação diz respeito à altura total da seção, em mm, e a terceira, à massa linear dessa seção, em kg/m.

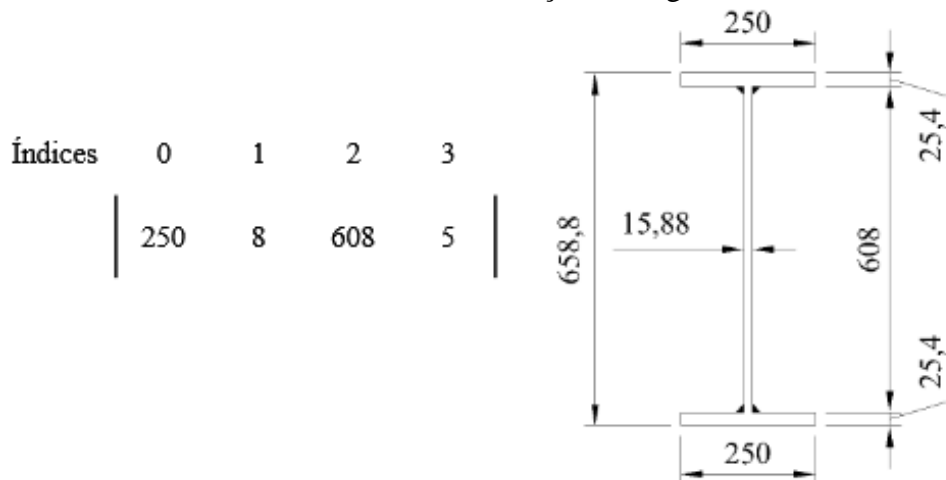


Figura 1 – exemplo de uma solução: vetor e seção transversal

Espaço de busca

Dado o caráter combinatório do problema, foi determinada a quantidade de combinações possíveis que caracterizam o espaço de busca. Para a otimização de um elemento isolado, tem-se 594.668.919 combinações resultantes da multiplicação de 1901x13x1851x13 possíveis valores para as variáveis de projeto. Apesar de custoso

computacionalmente, é possível a utilização de um algoritmo que verifique todas essas combinações e retorne a de menor peso.

Função objetivo

A função objetivo apresentada em (2) calcula a massa linear de uma seção I, em kg/m. Nessa função, o valor 7.850 é a massa específica do aço, em kg/m³, e a divisão realiza uma conversão da área da seção de mm² para m². Observa-se ser este um problema de otimização monobjetivo com não linearidade na função objetivo e nas restrições.

Tratamento das restrições

As restrições de desigualdade apresentadas pelas equações (3-6) estão relacionadas às verificações normativas prescritas em ABNT (2008) e Pfeil e Pfeil (2013) quanto à resistência aos esforços solicitantes. Nestas equações, N_{Sd} , N_{Rd} , V_{Sd} , V_{Rd} , M_{Sd} e M_{Rd} representam, respectivamente, os esforços solicitantes e resistentes de cálculo para o esforço axial, os esforços solicitantes e resistentes de cálculo para a cortante e os esforços solicitantes e resistentes de cálculo para o momento fletor. A equação (6) representa a interação de esforços axiais e de flexão, flexo-compressão ou flexo-tração. As equações (7-9), prescritas em ABNT (2013), estão relacionadas a limitações de fabricação e traduzem a necessidade de a largura da mesa não poder ser maior que a altura da alma, a altura da alma não poder ser maior que quatro vezes a largura da mesa e a espessura da alma não poder ser maior que a espessura da mesa.

A violação de uma ou mais dessas restrições leva à penalização da solução sem o seu descarte. Essa penalização consiste no aumento da massa linear da seção proporcional ao grau de violação. A avaliação da solução passa a ser reescrita da seguinte forma:

$$F(X) = f(X) + P \sum_{i=1}^7 g_i(X) \quad (14)$$

Em que P é uma constante, aqui assumida com valor 1.000, e g_i o grau de violação da restrição aplicável apenas em caso de violação da restrição. Caso haja o atendimento da restrição, assume o valor zero.

As restrições laterais impõem limites praticáveis a solução. O tratamento é feito com a reparação da solução, de modo, que, ao ultrapassar as fronteiras, o valor seja trazido para esta fronteira.

Recozimento Simulado

O algoritmo do Recozimento Simulado é caracterizado pela geração de soluções vizinhas a solução atual (CUNHA, TAKAHASHI e ANTUNES, 2012). A Figura 2 apresenta quatro vizinhos gerados com a utilização do algoritmo proposto.

Índices	0	1	2	3
Solução	250	8	608	5
Vizinho 1	250	7	608	5
Vizinho 2	250	8	608	6
Vizinho 3	203	8	608	5
Vizinho 4	250	8	633	5

Figura 2 – geração de soluções vizinhas

O vizinho 1 é gerado a partir da solução dada com a alteração do índice 1 do vetor. Os possíveis valores são 7 ou 9. De maneira semelhante, o vizinho 2 é gerado pela alteração do índice 3. Para este, os valores possíveis são 4 ou 6. O vizinho 3 é gerado pela alteração do índice 0. Os valores possíveis estão no intervalo de 150 a 350 (mais ou menos 100) e é obtido com uma probabilidade uniforme de ocorrência. O último vizinho apresentado é gerado pela alteração do índice 3. Os possíveis valores estão no intervalo de 508 a 708 (mais ou menos 100) com igual probabilidade de ocorrência.

Configuração do algoritmo

Para a implementação computacional, foi utilizada a linguagem de programação Java por meio do *Java Development Kit* versão 1.8.0 update 112. O ambiente de programação utilizado foi o NetBeans 8.2.

Resultados e discussão

Esta seção apresenta os resultados parciais desta pesquisa. Estes resultados são compostos pela otimização de elementos isolados de aço submetidos a solicitações de cálculo previamente determinadas. Foram realizadas otimizações para os esforços de compressão, flexão e flexo-compressão.

A literatura especializada no Brasil é carente em trabalhos sobre a otimização de estruturas de aço que utilizem as normas técnicas brasileiras. Devido essa limitação, foi implementado um algoritmo que realize busca exaustiva em todas as combinações possíveis das dimensões da seção transversal com o intuito de validar os resultados obtidos pelo algoritmo de Recozimento Simulado.

Os três primeiros testes foram elaborados com intuito de validar a busca pelo ótimo global. O último teste foi elaborado para compreender o comportamento do algoritmo. Assim como realizado em Drehmer (2005), propôs-se uma seção de referência descrita em ABNT (2013). Obteve-se o maior esforço que esta seção resiste e este esforço foi utilizado pelo algoritmo para a otimização.

A redução da massa linear, indicada nas tabelas a seguir, é feita em relação a seção de referência. Os resultados obtidos com o Recozimento Simulado foram anotados como SA, os resultados obtidos via Busca Exaustiva em todas as combinações foram anotados como BE e a seção de referência foi anotada como REF.

Dado o caráter estocástico do algoritmo, foram realizadas 100 execuções independentes a fim de analisar sua acurácia.

Em todos os testes, utilizou-se o aço ASTM A36.

A) Otimização de barra sob compressão

Este teste adotou como referência a seção CS300x76 que possui resistência a compressão, C_{Rd} , de 2.030,47 kN. Os comprimentos de flambagem adotados foram todos 300 cm com ambas as extremidades articuladas, $K = 1,00$. O resultado da melhor execução obtida é apresentado na Tabela 1. Não se observou redução de peso.

Tabela 1 – comparativo dos resultados para compressão

Seção	Massa linear (kg/m)	d (mm)	bf (mm)	Tw (mm)	tf (mm)	Área (cm ²)	Redução (%)
CS300x76 (REF)	76,1	300	300	8,00	12,5	97,00	-
PS321x76,7 (BE)	76,7	321	292	7,94	12,7	97,67	-0,79
PS322x76,7 (SA)	76,7	322	292	7,94	12,7	97,75	-0,79

A seção de referência possui altura da alma igual a largura da mesa. Observa-se que os algoritmos utilizados para otimização encontraram seções muito semelhantes. A redu-

ção da largura da mesa foi compensada pelo aumento da altura da alma e as espessuras de alma e mesa foram mantidas. A pequena diferença de massa linear, área e redução está relacionada ao arredondamento e/ou precisão das espessuras das chapas.

A Tabela 2 apresenta as estatísticas das 100 execuções. O pequeno desvio padrão, inferior a 1,0 kg/m, indica acurácia e precisão do algoritmo. Os valores apresentados estão relacionados a massa linear, dada em kg/m.

Tabela 2 – estatísticas da otimização para compressão

Estatísticas	Massa linear (kg/m)
Média	77,79
Desvio padrão	0,94
1º. quartil	77,10
Mediana	77,70
2º. quartil	78,23
Moda	76,70

O ótimo obtido é global e foi validado e encontrado pelo algoritmo de busca exaustiva.

B) Otimização de barra sob momento fletor

Este teste adotou como referência a seção VS300x46 que possui resistência a flexão, M_{Rd} , de 16.764 kNcm. O comprimento destravado foi de 200 cm. O resultado da melhor execução obtida é apresentado na Tabela 3. Observa-se redução em torno de 25% quando comparado à seção de referência.

Tabela 3 – comparativo dos resultados para flexão

Seção	Massa linear (kg/m)	d (mm)	bf (mm)	tw (mm)	tf (mm)	Área (cm ²)	Redução (%)
VS300x46 (REF)	45,6	300	180	4,75	12,5	58,06	-
PS519x34,1 (BE)	34,1	519	153	4,75	6,35	43,47	25,22
PS514x34,1 (SA)	34,1	514	155	4,75	6,35	43,48	25,22

Os algoritmos de otimização encontraram seções de altura significativamente maior e pequena redução na largura da mesa quando comparadas à seção de referência. Esse resultado era esperado, uma vez que seções mais altas tendem a possuir melhores propriedades geométricas relacionadas a flexão. Como consequência, foi possível redução da espessura das mesas pela metade e a redução da massa linear

A Tabela 4 apresenta as estatísticas das 100 execuções. O pequeno desvio padrão, inferior a 0,5 kg/m, indica acurácia e precisão do algoritmo. Os valores apresentados estão relacionados a massa linear, dada em kg/m.

Tabela 4 – estatísticas da otimização para flexão

Estatísticas	Massa linear (kg/m)
Média	34,30
Desvio padrão	0,46
1º quartil	34,10
Mediana	34,10
3º quartil	34,23
Moda	34,10

O ótimo obtido é global e foi validado e encontrado pelo algoritmo de busca exaustiva.

C) Otimização de barra sob flexo-compressão

Este teste adotou como referência a seção CVS300x47. O intuito do teste é a otimização considerando a interação entre os esforços de flexão e compressão. Utilizou-se uma compressão de 71,1 kN e uma flexão de 15.600 kNcm de modo a obter 100% de apro-

veitamento da seção. Os comprimentos de flambagem foram todos 200 cm com ambas as extremidades articuladas, $K=1,00$. O resultado da melhor execução obtida é apresentado na Tabela 5. Observa-se redução em torno de 28% quando comparado à seção de referência.

Tabela 5 – comparativo dos resultados para flexo-compressão

Seção	Massa linear (kg/m)	d (mm)	bf (mm)	tw (mm)	tf (mm)	Área (cm ²)	Redução (%)
CVS300x47 (REF)	47,5	300	200	8,00	9,50	60,48	-
PS515x33,8 (BE)	33,8	515	151	4,75	6,35	43,02	28,84
PS507x33,8 (SA)	33,8	507	154	4,75	6,35	43,02	28,84

As seções obtidas pelos algoritmos de busca para a flexo-compressão foram semelhantes as obtidas para a flexão, tendo em vista o pequeno valor da compressão ao ser comparada com o momento fletor utilizado. Para esses valores, o esforço de flexão é preponderante e a barra se aproxima de uma flexão simples. Devido a isso, as seções obtidas possuem altura maior, menor largura e espessura de mesa.

A Tabela 6 apresenta as estatísticas das 100 execuções. O pequeno desvio padrão, inferior a 0,5 kg/m, indica acurácia e precisão do algoritmo. Os valores apresentados estão relacionados a massa linear, dada em kg/m.

Tabela 6 – estatísticas da otimização para flexo-compressão

Estatísticas	Massa linear (kg/m)
Média	33,94
Desvio padrão	0,41
1º quartil	33,80
Mediana	33,80
3º quartil	33,83
Moda	33,80

De um modo geral, em todos os três testes realizados, observa-se que o algoritmo alcança o ótimo global. Esse fato foi confirmado pelo algoritmo de busca exaustiva. Observa-se maior dificuldade do algoritmo na otimização de seções submetidas à compressão. Resultados semelhantes foram encontrados em Drehmer (2005), apesar de ter utilizado a ABNT NBR 8800: 1986.

O desempenho do algoritmo de Recozimento Simulado é bastante superior a do algoritmo de Busca Exaustiva ao se analisar a quantidade de avaliações da função objetivo. Nos testes de compressão, flexão e flexo-compressão, a função objetivo foi avaliada 1.924.500 vezes pelo algoritmo de Recozimento Simulado. O algoritmo de Busca Exaustiva, por sua vez, analisou todas as 594.668.919 possíveis combinações de seção, tendo realizado essa mesma quantidade de avaliações da função objetivo. Para encontrar a seção de menor peso que resista aos esforços impostos, o Recozimento Simulado precisou explorar apenas 0,3% de todo o espaço de busca.

D) Otimização de barra sob flexão para diversos momentos solicitantes

Neste teste, foi comparado os resultados obtidos considerando diversos casos de momento fletor, variando de 5.000 kNcm a 200.000 kNcm em incrementos de 5.000. O comprimento destravado foi de 350 cm. O objetivo é entender o comportamento e as soluções apresentadas pelo algoritmo proposto.

Um algoritmo de busca exaustiva foi implementado afim de obter dentre todas as 453 seções listadas em ABNT (2013) a seção com menor massa linear e que resista ao momento solicitante. Esse algoritmo também foi utilizado para buscar uma seção laminada

do tipo W dentre as 105 seções listadas em Gerdau (2017). O algoritmo Recozimento Simulado também foi utilizado nesse teste.

Em alguns casos de momentos, nenhuma das seções laminadas do tipo W foi capaz de resistir aos esforços.

Em todos os casos de momento, o algoritmo SA obteve menores massas lineares ao custo de obter seções de maior altura.

A redução de massa linear entre o algoritmo SA e o algoritmo de busca de seções laminadas variou de 13% a 41%. A redução média foi de 33,1%. Para os momentos superiores a 155.000 kNcm não há seção laminada do tipo W listada em Gerdau (2017) que resista. A redução de massa linear entre o algoritmo SA e o algoritmo de busca de seções soldadas variou de 6% a 25%. A redução média foi de 14,8%.

A Figura 3 apresenta os resultados relacionados às massas lineares. É possível observar que as seções obtidas pelo SA possuem menor massa linear.

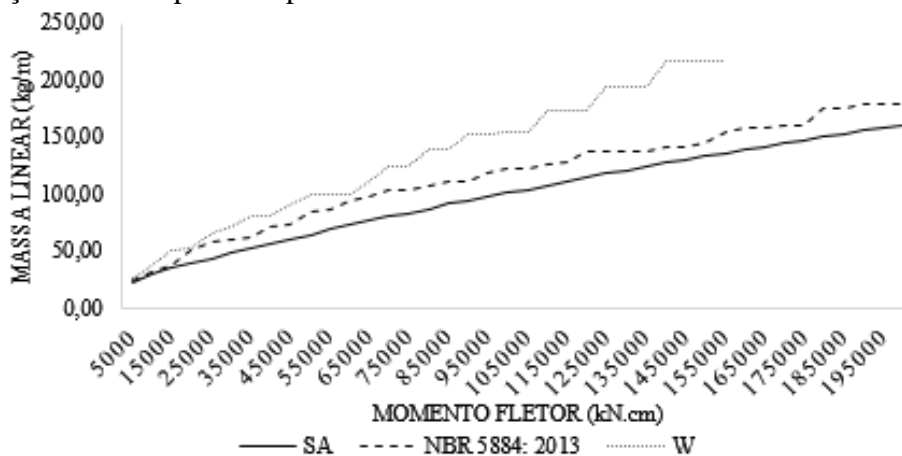


Figura 3 – comparativo das massas lineares obtidas pelos processos de otimização

A Figura 4 apresenta os resultados relacionados às alturas. Observa-se que as seções obtidas pelo SA possuem maior altura.

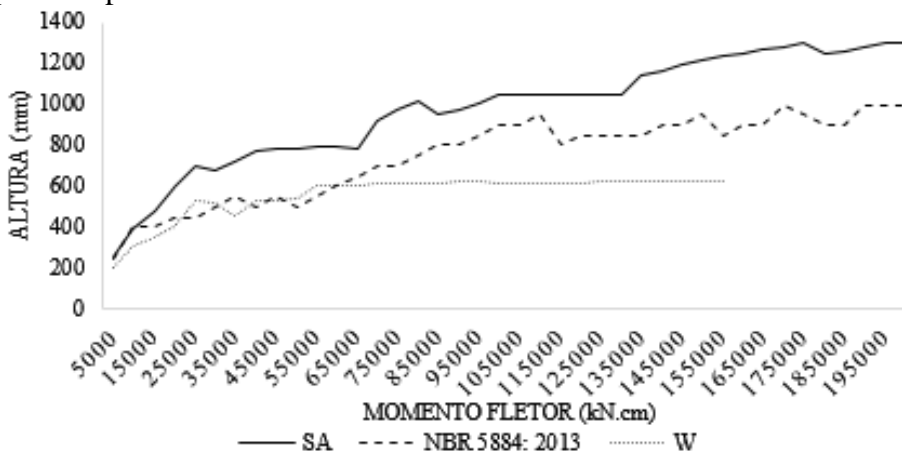


Figura 4 – comparativo das alturas das seções obtidas pelos processos de otimização

Considerações finais

A otimização de perfis I soldados de aço foi o tema dessa pesquisa. A função objetivo é dada pela massa linear da seção e o algoritmo de Recozimento Simulado foi utilizado na busca de sua minimização. As restrições contemplam o cálculo do esforço resistente,

prescrito na ABNT NBR 8800: 2008 e as limitações de fabricação, prescritas na ABNT NBR 5884: 2013.

Os resultados obtidos pelo algoritmo de Recozimento Simulado são validados pelo algoritmo de Busca Exaustiva. Resultados semelhantes foram encontrados na literatura, apesar da diferença entre versões da norma adotada. Os resultados foram mais significativos para os esforços de flexão e flexo-compressão, com redução da massa linear de 25% e 28%, respectivamente. Para o esforço de compressão, não houve melhora com a utilização do algoritmo proposto.

Para pesquisas futuras, sugere-se a utilização deste algoritmo para otimização de pórticos como os que compõem as seções transversais de galpões.

Referências

- ABNT. NBR 8800 - Projeto de Estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- ABNT. NBR 5884 - Perfil I estrutural de aço soldado por arco elétrico: requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- BELLEI, I. H.; PINHO, F. O.; PINHO, M. O. Edifícios de múltiplos andares em aço. 2ª. ed. São Paulo: Pini, 2008.
- CARRARO, F. Otimização estrutural de pórticos planos utilizando o algoritmo SGA. Trabalho Final de Graduação. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.
- CHAVES, M. R. Avaliação do Desempenho de Soluções Estruturas para Galpões Leves. Dissertação de Mestrado. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2007.
- CUNHA, A. G.; TAKAHASHI, R.; ANTUNES, C. H. Manual de computação evolutiva e metaheurísticas. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra, 2012.
- DREHMER, G. A. Otimização de estruturas metálicas formadas por perfis "I" soldados. Dissertação de Mestrado. Passo Fundo: Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, 2005.
- FLÔR, M. I. Otimização de cobertura em aço de edifício industriais. Trabalho Final de Graduação. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.
- GERDAU. Produtos/Perfil estrutural, Setembro 2017. Disponível em: <<https://www.gerdau.com/br/pt/productservices/products/Document%20Gallery/perfil-estrutural-tabela-de-bitolas.pdf>>. Acesso em: 8 Janeiro 2018.
- MAIA, J. P. R. Otimização estrutural: estudo e aplicação em problemas clássicos de vigas utilizando a ferramenta Solver. Dissertação de Mestrado. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2009.
- MEDEIROS, G. F.; KRIPKA, M. Algumas aplicações de métodos heurísticos na otimização de estruturas. Ciatic, v. 4, p. 19-32, 2012.
- NASCIMENTO, M. S.; CÔRREA, A. F.; GOUVEIA, P. S. D. S. Otimização de perfis "I" soldado submetido a carga axial. Proceeding Series of the Brazilian Society of Applied and Computational Mathematics, Vitória, v. 3, n. 2, 2015.
- PFEIL, W.; PFEIL, M. Estruturas de aço: dimensionamento prático de acordo com a NBR 8800: 2008. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- ROMAN, R. R. Otimização de coberturas metálicas de edifícios industriais. Trabalho Final de Graduação. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.
- SAKIYAMA, F. I. H. et al. Análise e dimensionamento otimizados de estruturas planas de aço. Congresso Latino-Americano da Construção Metálica. São Paulo: [s.n.]. 2016.
- SILVA, M. M. Otimização de Estruturas Reticuladas Incluindo Não-Linearidade Geométrica. Dissertação de Mestrado. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2011.
- YAMAMOTO, K. A. R. Otimização estrutural de pórticos planos com o uso do algoritmo SGA e análise não linear. Trabalho Final de Graduação. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.