

OTIMIZAÇÃO DE VIGAS CASTELADAS DE AÇO

Mateus P. Pauletto¹, Moacir Kripka²

¹*Programa de Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Passo Fundo
Campus Bairro São José, 99001-970, Passo Fundo, RS – Brasil
142663@upf.br*

²*Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade de Passo Fundo
Campus Bairro São José, 99001-970, Passo Fundo, RS - Brasil
mkripka@upf.br*

Abstract. Due to the increasing competition, associated to growing concerns about the environmental impacts caused by construction, it is important the rational use of structural materials. In this sense, optimization techniques can be seen as valuable tools to improve the design efficiency. This work presents the application of optimization to design of castellated steel beams, aiming the weight minimization. To achieve this goal, both the dimensions of the profile and of the holes were taken as the design variables. The constraints, related to ultimate and limit states, were considered according to Brazilian standards. The optimization was performed through the usage of Simulated Annealing Method, a meta-heuristic developed upon the analogy of the annealing of metals. Based on the formulation implementation, some structures were analyzed in order to verify the efficiency of the proposed procedure. In addition, welded and laminated optimized steel beams were compared, aiming to identify the relative economy obtained.

Keywords: Optimization; Castellated Beams; Simulated Annealing; Web Openings.

1 Introdução

Um bom dimensionamento de vigas casteladas, isto é, obter um resultado com o menor peso possível para dadas condições ambientais e de carregamentos, demanda muito da experiência do engenheiro calculista, sendo este processo realizado na maioria das vezes por processos iterativos, até chegar-se em um resultado aceitável. Entretanto, mesmo contando com um profissional qualificado, um dimensionamento ótimo dificilmente será obtido através desta metodologia de trabalho. Isso faz com que processos de otimização sejam empregados para a obtenção de resultados que propiciem menor consumo de material para as estruturas.

Vigas alveolares começaram a ser utilizadas na década de 30. Um dos primeiros empreendimentos, uma fábrica em Doudlevec, foi produzido pela fábrica Skoda, em Pilsner, e possuía vigas projetadas para vãos de doze metros. Já no Brasil, vigas alveolares, tiveram ampla utilização na década de 70, em função da pouca disponibilidade de peças que oferecessem uma maior inércia ao conjunto [1]. Com o passar do tempo, a utilização de perfis soldados foi tomando espaço no mercado e lentamente, vigas casteladas caíram de produção até os dias atuais, onde seu uso se dá, na maioria dos casos, especificamente para quando há a necessidade de aberturas nas almas das vigas.

Vigas alveolares podem ser produzidas a partir de perfis laminados comerciais e perfis soldados. O primeiro modelo, apresenta uma redução considerável – aproximadamente 30% - na sua massa por metro de vão em comparação à perfis de alma cheia dimensionados sob as mesmas condições. Caso se opte pela utilização de perfis laminados, os padrões de dimensões geométricas mais consolidados são Litzka, Peiner e Anglo-Saxão, pelo fato dos mesmos proporcionarem um melhor aproveitamento no procedimento de corte para a confecção dos alvéolos.

No entanto, caso se escolha perfis soldados os padrões geométricos tradicionais podem ser desconsiderados, a fim de obter-se a maior área de alvéolo utilizando a menor seção de viga possível. Isso só se torna viável em

função do processo produtivo diferente para as duas tipologias de vigas.

No processo produtivo de vigas casteladas soldadas, os alvéolos são feitos ainda na etapa do corte da alma. Posteriormente, a mesma já com os alvéolos, é posicionada entre as mesas e fixada em sua geometria final através de pontos de solda. Por fim, o perfil é composto, sendo soldado em definitivo através de arco de solda submerso ou processo de solda manual.

Nota-se então, que a liberdade de escolha de formatos de alvéolos em perfis soldados é maior que em perfis laminados comerciais. As sobras do processo produtivo podem ser reduzidas através de metodologias, como o uso de *Kanbans* (sistema de gestão de estoque para produção enxuta) para os restos de chapas das aberturas feitas nas almas das vigas. Por consequência, alvéolos com formato mais próximos ao retangular, possibilitam a posterior utilização da sobra de chapa em outros fins, como talas de emenda, suportes, enrijecedores, reforços e chapas Gusset, tendo assim o aproveitamento maximizado e perdas – que perfis soldados seriam maiores que em perfis laminados – minimizadas [2].

Assim, o objetivo deste trabalho é apresentar a aplicação da otimização em vigas casteladas de aço, buscando a minimização de peso. Para atingir este objetivo, tanto as dimensões do perfil quanto dos alvéolos foram consideradas como variáveis do problema. As restrições, relacionadas ao estado limite e último, seguiram conforme normas Brasileiras. A otimização foi realizada através do uso do Método Simulated Annealing, uma meta-heurística desenvolvida com base no recozimento dos metais.

Este trabalho encontra-se organizado da seguinte forma: no próximo item, será descrita a formulação do problema, variáveis utilizadas na otimização, função objetivo, restrições geométricas e de resistência. Posteriormente serão apresentados resultados obtidos através de análises preliminares e ao final, conclusões pertinentes.

2 Formulação e implementação do problema de otimização

2.1 Definição do problema e variáveis de otimização

Este trabalho trata da otimização tanto de seções transversais quanto de geometria de alvéolos de vigas casteladas submetidas à flexo-compressão simples, buscando-se soluções ótimas para os esforços atuantes, tendo por referência trabalhos desenvolvidos por Lubke [1], Silveira [3] e Veríssimo *et al.* [4], visto que a norma ABNT NBR8800:2008 [5] não possui em seu texto algo específico relacionado ao dimensionamento de vigas casteladas de aço. A formulação do problema é uma adaptação de Drehmer [6], sendo as variáveis separadas por três categorias distintas: perfis soldados de geometria livre, laminados comerciais de geometria livre, e laminados comerciais de geometria padrão (aqui utilizados os modelos Litzka, Peiner e Anglo-Saxão), conforme ilustra a Fig. 1.

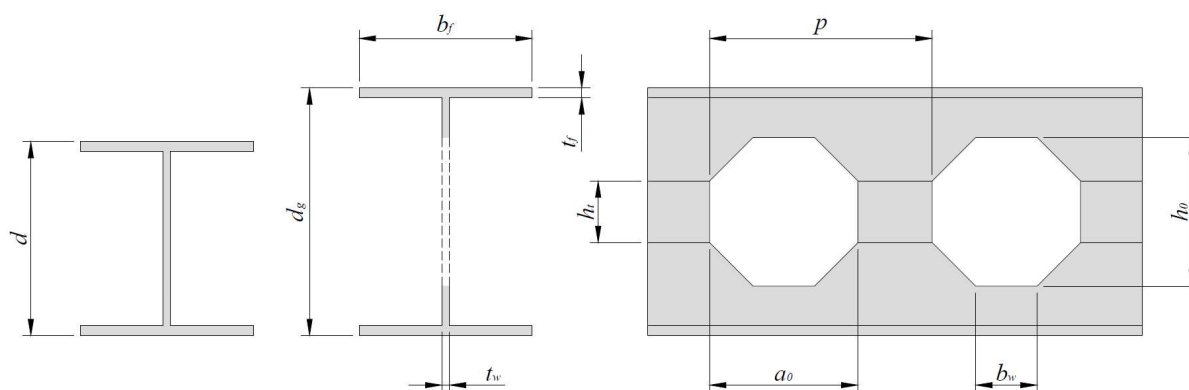


Figura 1. Variáveis do problema

Padrão soldado:

d = Altura da seção antes da abertura dos alvéolos (mm);

b_f = largura das mesas (mm);

t_f = espessura das mesas (mm);

t_w = espessura da alma (mm);

h_p = altura da chapa expansora (mm);

p = passo (mm);

h_0 = altura do alvéolo (mm);

a_0 = largura do alvéolo (mm);

b_w = largura do segmento do alvéolo (mm);

Padrão laminado comercial de geometria livre:

mpl = matriz com dados de perfis laminados comerciais (d , b_f , t_f e t_w);

h_p = altura da chapa expansora (mm);

p = passo (mm);

h_0 = altura do alvéolo (mm);

a_0 = largura do alvéolo (mm);

bw = largura do segmento do alvéolo (mm);

Padrão laminado comercial de geometria padrão:

$tpotmconv$ = otimização apenas em padrão definido ou otimização alternando entre padrões;

mpl = matriz com dados de perfis laminados comerciais (d , b_f , t_f e t_w);

hp = altura da chapa expansora (mm);

Como o presente trabalho aborda a otimização tanto de perfis laminados comerciais, quanto de perfis soldados, os limites impostos pela siderurgia nacional tornam-se os valores extremos no que se refere a restrições geométricas. Drehmer [6] traz em seu trabalho as limitações quanto às espessuras de chapas para a composição de perfis com valores variando entre 4,75 mm a 50 mm e dimensões de chapas de valores máximos 2000 mm. Quanto a composição das vigas soldadas, restrições fabris se tornam o principal delimitador. Drehmer [6] fixa esses limites mínimos em 100 mm para a largura das mesas e 150 mm para altura da seção do perfil. Quanto a perfis laminados comerciais, foram considerados os valores apresentados no Folder Perfis Estruturais Gerdau [7], principal siderúrgica nacional.

Também foram implementadas restrições geométricas de proporcionalidade para se conceber perfis mais próximos à modelos consolidados tradicionalmente. As restrições de resistência seguem conforme os trabalhos desenvolvidos por Lubke [1] e Oliveira [2], sendo elas: formação de mecanismo Vierendeel, escoamento do montante da alma por cisalhamento, escoamento do montante da alma por flexão, flambagem lateral do montante da alma, flambagem lateral com torção e deslocamento excessivo. Todos eles são descritos nas equações abaixo de forma normalizada.

$$g_1 = 1 - (d_g / b_f) \leq 0 \quad (1)$$

$$g_2 = 1 - (4b_f / d_g) \leq 0 \quad (2)$$

$$g_3 = 1 - ((2d - 2t_f) / k) \leq 0 \quad (3)$$

$$g_4 = 1 - ((d_g - 2t_f) / h_0) \leq 0 \quad (4)$$

$$g_5 = 1 - (FMV_{adm} / FMV_{atu}) \leq 0 \quad (5)$$

$$g_6 = 1 - (EMAC_{adm} / EMAC_{atu}) \leq 0 \quad (6)$$

$$g_7 = 1 - (EMAC2_{adm} / EMAC2_{atu}) \leq 0 \quad (7)$$

$$g_8 = 1 - (EMAF_{adm} / EMAF_{atu}) \leq 0 \quad (8)$$

$$g_9 = 1 - (FLMA_{adm} / FLMA_{atu}) \leq 0 \quad (9)$$

$$g_{10} = 1 - (FLT_{adm} / FLT_{atu}) \leq 0 \quad (10)$$

$$g_{11} = 1 - (ELSDE_{adm} / ELSDE_{atu}) \leq 0 \quad (11)$$

A função objetivo é dada pela relação entre a menor seção de perfil com a maior área de alvéolo possível que atende as solicitações de restrições geométricas e de resistência. A da mesma é representada na equação abaixo.

$$fo = [(d_g - 2t_f)t_w + 2b_f t_f] - \{[a_0 h_t + 2((a_0 + b_w)/2) \times ((h_0 - h_t)/2)]t_w\} \times (1/p) \times pa \quad (12)$$

Onde pa = peso específico do aço.

2.2 Simulated Annealing

O algoritmo implementado foi desenvolvido na linguagem C++ e utilizou o método meta-heurístico Simulated Annealing (SA), desenvolvido por Kirkpatrick [8], tendo-se por base também os trabalhos de Kripka [9] e Drehmer [6].

Em um processo de busca de vizinhança, obtém-se uma solução, que através de um movimento migra para outros espaços de busca, baseando-se em sistemas termodinâmicos. Esse método também é conhecido como método do recozimento simulado, pois o algoritmo simula a produção de metais, onde, após ser esquentado até determinada temperatura, o mesmo é cuidadosamente e lentamente resfriado até que o material se organize e encontrar sua melhor condição de resistência. Caso o resfriamento seja feito de forma abrupta, o metal fica quebradiço, não chegando assim em seu melhor desempenho.

A principal característica do algoritmo é que em seus estados iniciais, aceita soluções com piora, escapando de ótimos locais. Uma nova solução será aceita em caso de redução imediata da função objetivo (redução da massa por metro de viga), ou em caso de piora (aumento da massa por metro de viga), através do critério probabilístico apresentado na eq.13, conhecido como critério de Metropolis.

$$p = \exp(-\Delta f / T) \quad (13)$$

A solução encontrada com piora será aceita se p for maior que um número gerado aleatoriamente entre zero e um, sendo assim, em temperaturas altas (início da busca), soluções com piora serão facilmente aceitas, até dado momento onde T será mais próximo a zero e então, resultados com piora, deixarão de serem aceitos. Optou-se no presente trabalho por um modelo de penalização semelhante ao utilizado por Drehmer [6] para soluções que não atendam os critérios de restrições geométricas e de resistência. Uma pequena modificação foi proposta, ponderando o aceite de resultados com pouca piora. As equações abaixo, representam o critério adotado.

$$penal = 1 \times 10^6 \quad (14)$$

$$fo = fo + (g_n * penal) \quad (15)$$

Após todo o algoritmo estruturado, a aferição do mesmo foi realizada, tendo como parâmetros iniciais para temperatura inicial, resfriamento e número de interações por decréscimo de temperatura, respectivamente: $T = 800^\circ\text{C}$, $\alpha = 0,98$ e $n_i = 1000$.

3 Resultados e análises

Para obtenção de resultados preliminares, foi estabelecido um número de 3 amostras de resultados para cada cenário, adotando-se o melhor dos três como solução otimizada. Estabeleceu-se como critério de aferição de resultados modelos baseados nos empregados por Lubke [1] para a otimização com perfis laminados comerciais com aberturas convencionais. Os dados de carregamento utilizados foram: $g_k = 15\text{kN/m}$, $q_{k1} = 7,5\text{kN/m}$, $q_{k2} = 1.25\text{kN/m}$ e como propriedades do aço, empregou-se: $pa = 7850\text{kg/m}^3$, $E = 200\text{GPa}$, $f_y = 345\text{MPa}$ e $G = 75\text{GPa}$.

Notam-se pequenas diferenças no que se refere a geometria dos alvéolos (Litzka), alvéolos e perfil (Peiner) e apenas perfil (Anglo-Saxão). Estas diferenças de peso foram, percentualmente: + 0,85% para o modelo Litzka, -0,38% para o modelo Peiner e -13,98% para o modelo Anglo-Saxão. Estas diferenças se dão pelo fato do uso de diferentes métodos de otimização empregados nos trabalhos. Neste, empregou-se o método Simulated Annealing, que aceita resultados com piora em temperaturas iniciais, assim fugindo de ótimos locais a concepção tende a alterar-se mais que em modelos convencionais. Todavia, em função de uma grande verossimilhança do presente trabalho com o referencial e tendo em vista que todos os critérios estabelecidos pelos modelos consolidados de vigas casteladas foram respeitados, validou-se o algoritmo.

O comparativo pode ser observado através da Fig. 2, onde em linha tracejada se tem a geometria de vigas otimizadas por Lubke em comparação às vigas otimizadas no presente trabalho.

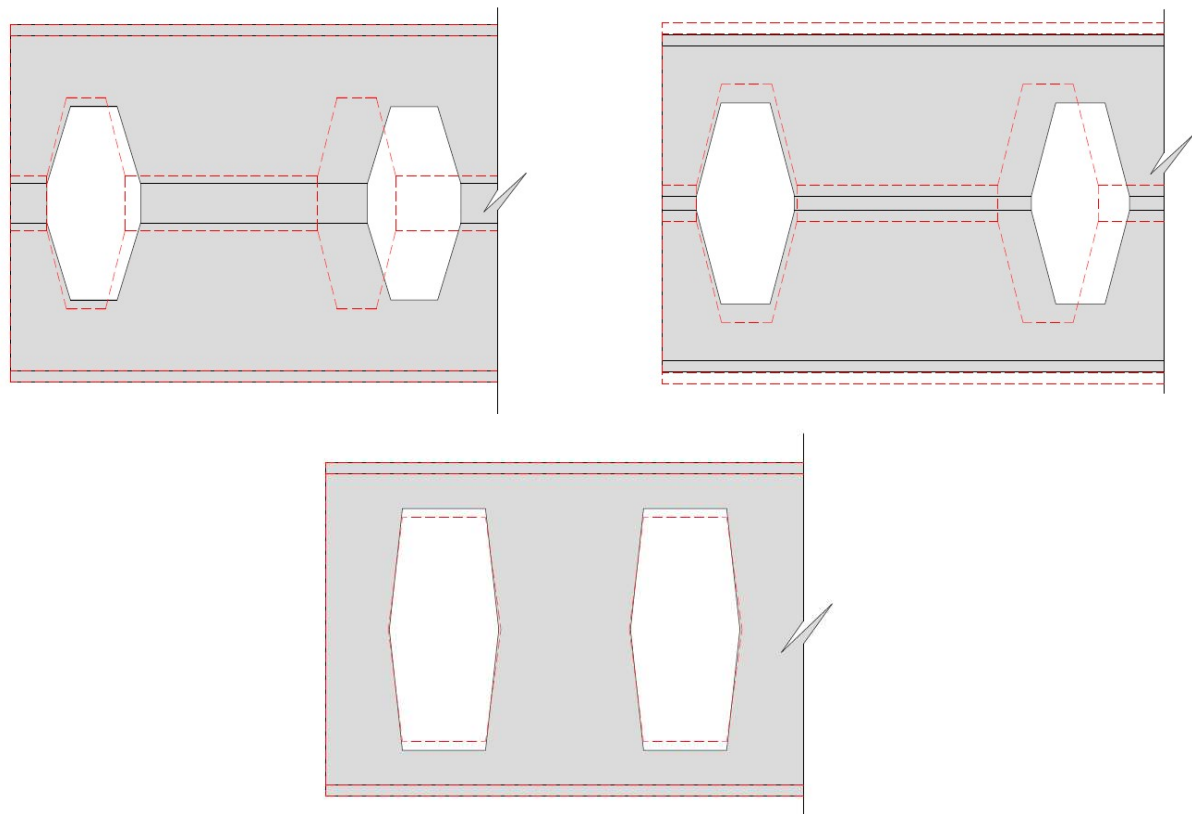


Figura 2. Comparativo entre vigas casteladas estilo Litzka (esquerda), Peiner (direita) e Anglo-Saxão (inferior)

Após a validação, outros modelos comparativos foram analisados. Conforme pode ser visto na Tab 1, foram criados doze cenários distintos entre vigas para sistemas de piso ($g_k = 9\text{kN/m}$, $q_k = 18\text{kN/m}$) e vigas para sistemas de cobertura ($g_k = 9\text{kN/m}$, $q_k = 6\text{kN/m}$), variando vãos de três até oito metros para sistemas de piso e de nove até catorze metros para sistemas de cobertura. Manteve-se para cada cenário uma amostragem de três modelos consecutivos para a validação de resultados.

Tabela 1. Comparativo entre vigas alveolares otimizadas

Viga	Sistema	Vão (m)	Litzka (kg/m)	Peiner (kg/m)	Anglo-Saxão (kg/m)	Otim. Mista (kg/m)	Laminado Geometria Livre (kg/m)
Viga 1	Piso	3,00	18,34	18,43	17,97	15,95	17,57
Viga 2	Piso	4,00	26,99	27,25	27,04	27,00	28,79
Viga 3	Piso	5,00	35,88	35,66	34,37	35,87	33,12
Viga 4	Piso	6,00	46,44	46,45	44,35	44,47	46,30
Viga 5	Piso	7,00	63,22	62,17	58,51	58,74	55,55
Viga 6	Piso	8,00	72,22	73,03	70,71	70,63	64,77
Viga 7	Cob	9,00	63,17	63,46	62,10	62,21	54,22
Viga 8	Cob	10,00	72,92	73,16	72,38	72,52	72,34
Viga 9	Cob	11,00	79,39	78,80	77,20	77,10	83,66
Viga 10	Cob	12,00	97,79	97,21	92,08	89,20	92,05
Viga 11	Cob	13,00	105,75	107,56	99,33	99,49	101,86
Viga 12	Cob	14,00	123,98	122,84	117,33	117,31	122,78

Em uma primeira análise, referente a adição da variável de otimização mista para perfis laminados de geometria de alvéolos padrão, notou-se que a diferença entre a otimização com esta variável e a otimização apenas

no padrão pré-definido inicialmente não é significativa e na maioria dos casos apresenta leve piora. Isso se dá ao fato das restrições dos padrões geométricos aliado as limitações que perfis laminados impõem também à sua geometria.

Também foi possível observar, através de resultados obtidos em otimizações de vigas laminadas de geometria de alvéolos padrão, que a viga raramente chega a seu limite de otimização em função de restrições geométricas do próprio corte e não de resistência, isso faz com que não se atinja o máximo aproveitamento da capacidade resistente das mesmas, caracterizando um superdimensionamento, indo contra a principal causa motivadora de escolha destas geometrias, o melhor aproveitamento de matéria prima.

Após estes dois primeiros cenários serem analisados, um terceiro foi incluso no trabalho, otimizando perfis laminados, porém agora, com alvéolos de geometria livre. Apesar da maior liberdade para atingir os limites de resistência adotados e mesmo tendo obtido mais vezes melhores resultados (cinco cenários) que em outros modelos, esbarrou-se novamente nas restrições geométricas de perfis laminados.

Então, por fim, os modelos referentes a vigas casteladas soldadas com aberturas de geometria livre foram gerados. Grandes diferenças entre este modelo e os modelos anteriores foram encontrados no que se refere a massa por metro linear de viga. Análises de resistência mostraram que, neste cenário, as vigas atingem valores muito próximos aos limites de resistências definidos para o algoritmo, sendo o mais recorrente, falha por flambagem lateral do montante da alma. Notou-se também, que o algoritmo buscou aberturas mais altas e quase retangulares, o que abre margem para a utilização dos restos de chapas em outros elementos (talas, chapas de topo, suportes dobrados) como anteriormente mencionado. Os resultados podem ser analisados na Fig. 3, onde os melhores resultados de vigas laminadas apresentados em destaque na Tab. 1, são comparados com os resultados obtidos em vigas soldadas sob mesmas condições.

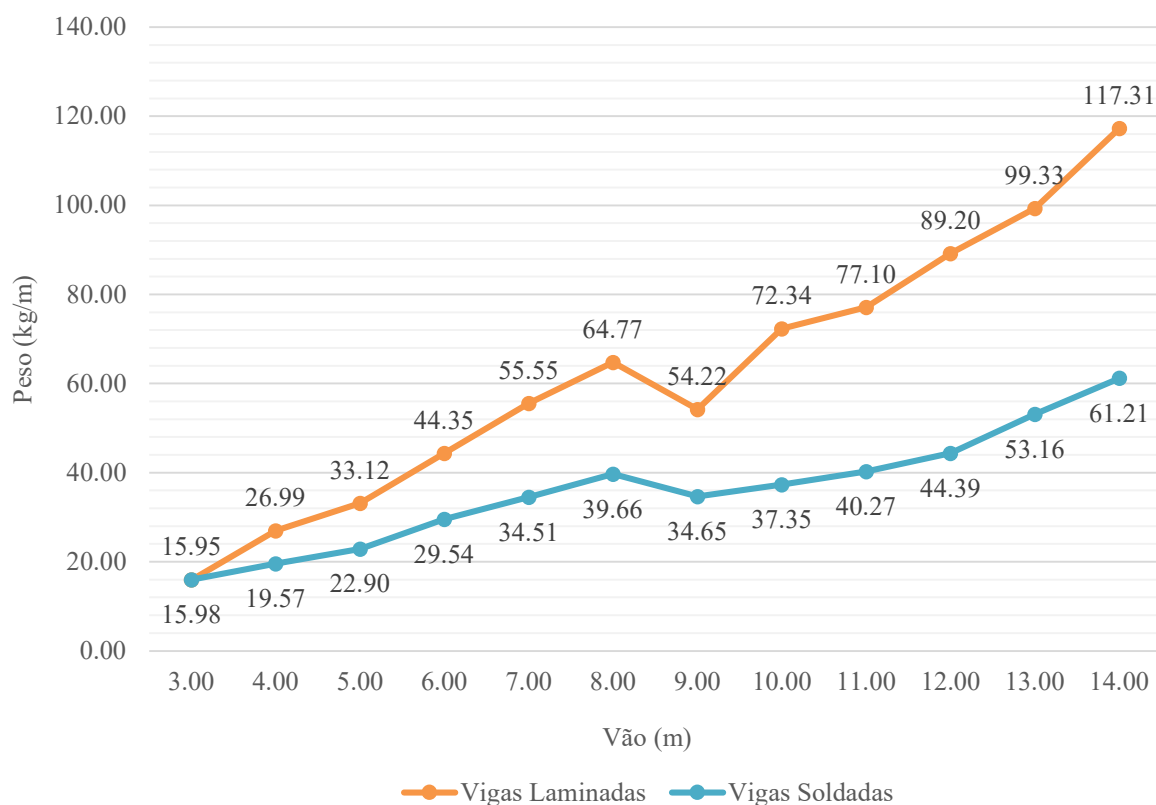


Figura 3. Comparativo entre melhores resultados obtidos de vigas laminadas e vigas soldadas

4 Conclusões

Vigas casteladas são uma solução não só viável como muito útil no que se refere a redução do peso do aço utilizado em um projeto, ponto crítico e determinante para obras em aço. Com a utilização de processos de otimização, uso de perfis soldados e liberdades geométricas de concepção dos alvéolos, o ganho de peso pode ser maximizado, fazendo com que estas vigas encontrem resultados ótimos de dimensionamento. Ainda é possível

reduzir as sobras de materiais, definindo limites mínimos de aberturas de alvéolos em vigas soldadas, criando *Kanbans* (sistema de gestão de estoque para produção enxuta) e utilizando este resto de material para outros fins. No presente trabalho, são apresentados resultados preliminares de estudos comparativos entre os modelos já consolidados em vigas laminadas com uma proposta de vigas com alvéolos de geometria livre, tanto em perfis laminados comerciais como em perfis soldados. Exemplificando resultados, observou-se uma redução significativa na massa por metro no que se refere a comparação de perfis com geometrias de alvéolos tradicionais e perfis soldados com geometria de alvéolos livres. Mais estudos estão sendo realizados a fim de refinar resultados, obter melhor aproveitamento com restos de chapas de aberturas de perfis soldados e comparativos com vigas I de alma cheia.

Referências

- [1] Lubke, G. P. Dimensionamento Otimizado de vigas Alveolares de Aço. 2017. 203 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória, ES.
- [2] Oliveira, L. B. Procedimento para Definição das Características Geométricas de Vigas Alveolares de Aço para Sistemas de Piso e de Cobertura. 2012. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, MG.
- [3] Silveira, E. G. Avaliação do Comportamento de Vigas Alveolares de Aço com Ênfase nos Modos de Colapso por Plastificação. 2011. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, MG.
- [4] Veríssimo, G. de S. et al. Dimensionamento de Vigas Alveolares de Aço. In: Congresso Latino-americano da Construção Metálica, 5, 2012, São Paulo. Anais eletrônicos. Disponível em: <http://www.abcem.org.br/construmetal>. Acesso em: 26 jul. 2020.
- [5] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8800: Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e de Concreto de Edifícios. Rio de Janeiro, 2008.
- [6] Drehmer, G. A., 2005. Otimização de estruturas metálicas formadas por perfis “I” soldados. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo.
- [7] Folder Perfis Estruturais Gerdau - Segmento Industrial. Disponível em: <https://www2.gerdau.com.br/catalogos-e-manuais>. Acesso em 26 jul. 2020.
- [8] Kirkpatrick, S., Gellat, C. D., Vecchi, M. P., 1983. Optimization by simulated annealing. *Science*, vol. 220, n. 4598, pp. 671-680.
- [9] Kripka, M., 2004. Discrete optimization of trusses by simulated annealing. *J. Braz. Soc. Mech. Sci & Eng.*, vol. 26, n. 2, pp. 170-173.