

XXXVII IBERIAN LATIN AMERICAN CONGRESS
ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING
BRASÍLIA - DF - BRAZIL

AÇO

Gabriela Pereira Lubke

Élcio Cassimiro Alves

Macksuel Soares de Azevedo

gabrielalubk@gmail.com

elcio.calves1@gmail.com

macksuel.azevedo@gmail.com

Universidade Federal do Espírito Santo

Av. Fernando Ferrari, 514, CEP 29075-910, Goiabeiras - Vitória - ES , Brasil

Resumo. *As vigas celulares são elementos estruturais, obtidos por meio do corte em ziguezague de perfis de aço laminados. As partes obtidas são deslocadas e soldadas novamente de forma a obter perfis com maior altura, com uma pequena redução de peso. As aberturas, acompanhadas do acréscimo da altura útil do perfil, tornam esse tipo de viga suscetível a novos modos de colapso, bem como potencializa os modos de colapso já existentes. Objetiva-se neste trabalho apresentar a formulação para o dimensionamento de vigas celulares de aço baseada em estudos teóricos, numéricos e experimentais, e a partir desta formulação será proposta a formulação do problema de otimização. A solução do problema de otimização será obtida por meio de métodos de programação matemática através do desenvolvimento de um programa de computador com o auxílio da plataforma MatLab. Exemplos de aplicação são apresentados para validar a formulação do problema de otimização através dos Métodos dos Pontos Interiores, Programação Quadrática Sequencial e Algoritmos Genéticos.*

Palavras-chave: *Vigas, Celulares, Otimização*

1 INTRODUÇÃO

As vigas com aberturas sequenciais na alma são pouco utilizadas no Brasil, entretanto são bastante empregadas em outros países. As vigas são denominadas vigas celulares quando as aberturas possuem formato circular e vigas casteladas quando as aberturas têm a forma de hexágonos.

Os perfis celulares de aço geralmente são originados de perfis laminados tipo “I” ou “H”, nos quais são efetuados dois cortes em ziguezague ao longo da alma. As duas metades obtidas são então defasadas e soldadas entre si, como mostra a Figura 1. Como resultado obtém-se uma viga cerca de 50% mais alta, sem acréscimo de peso ao perfil, que possui maior capacidade resistente à flexão decorrente do aumento do momento de inércia e da rigidez a flexão da seção transversal. Além da eficiência e da economia de aço, as vigas alveolares também oferecem vantagens arquitetônicas e de interatividade com as instalações.

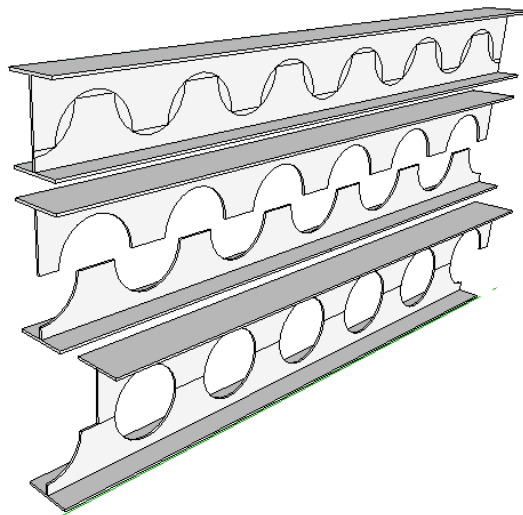


Figura 1. Esquema do procedimento utilizado na fabricação de vigas celulares

O dimensionamento de estruturas em geral, se dá usualmente por meio de processos iterativos, com base em uma geometria inicial estabelecida pelo projetista. Em seguida a resistência é calculada e comparada com as solicitações atuantes para decidir se a solução adotada é satisfatória, ou se uma nova geometria deverá ser verificada. Com isso, o tempo de projeto torna-se longo e não há garantias de que a solução encontrada é a melhor solução do problema.

Dessa forma faz-se necessário o emprego de técnicas de otimização, juntamente com a programação computacional, para sistematizar e encontrar a melhor solução para os problemas de dimensionamento estrutural. Essa técnica utiliza uma função objetivo em que se pretende encontrar a solução ótima (como o custo, o peso, a área da seção transversal ou qualquer outro parâmetro desejado), podendo as variáveis relacionadas a esta função terem restrições ou não. A otimização pode ser aplicada em diversas situações ou problemas que se deseja obter o desempenho máximo. Por isso, esses métodos aplicados no dimensionamento de estruturas também são válidos e trazem benefício comprovado na busca de melhores resultados.

Desta forma, o presente trabalho poderá contribuir para que o dimensionamento de vigas alveolares de aço seja realizado de forma automatizada, visando à redução do peso próprio da estrutura e a melhor combinação de perfil e linha de corte, para cada situação de projeto.

2 SIMBOLOGIA E DEFINIÇÕES

A determinação das características geométricas das seções alveolares de aço é um fator determinante no dimensionamento de vigas celulares. Na Figura 2 são apresentados os elementos associados à seção transversal das vigas alveolares e na Figura 3 está representada a simbologia relacionada às dimensões dos elementos das vigas celulares.

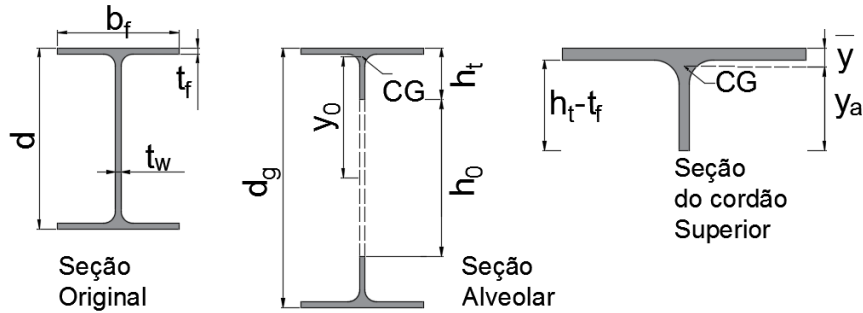


Figura 2. Simbologia dos elementos da seção transversal de vigas alveolares.

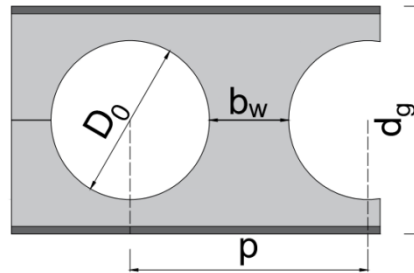


Figura 3. Simbologia relacionada às dimensões dos elementos das vigas celulares.

Também é importante definir as correlações $\mu = D_0/d$ e $\eta = p/D_0$. Essas correlações permitem calcular as dimensões b_w e d_g , dadas pelas Equações (1) e (2) e estabelecer a razão de expansão (k), dada pela Equação (3), ideal para aquela combinação de μ e η , isto é, uma razão de expansão que seja possível para a situação, e que minimize as perdas de material.

$$b_w = D_0(\eta - 1). \quad (1)$$

$$d_g = d + \sqrt{\left(\frac{D_0}{2}\right)^2 - \left(\frac{b_w}{2}\right)^2}. \quad (2)$$

$$k = \frac{d_g}{d}. \quad (3)$$

3 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

O dimensionamento otimizado das vigas celulares de aço envolve uma série de variáveis e restrições para respeitar os critérios de dimensionamento estabelecidos pelas pesquisas realizadas até o momento. Para a minimização do peso do perfil, também devem ser levadas em consideração as recomendações do fabricante e as seções de aço disponíveis. O algoritmo de otimização será implementado utilizando o programa de computador MatLab e seus pacotes de otimização, tendo sido escolhidos métodos de programação matemática, sendo eles a programação quadrática sequencial, o método dos pontos interiores e o método dos algoritmos genéticos.

3.1 Variáveis do problema

Foram estabelecidas as variáveis que definem todos os parâmetros de resistência e peso relacionados ao dimensionamento de vigas alveolares de aço. A partir dessas variáveis serão definidas as funções objetivo e restrições que definirão de fato o problema.

- x_1 = Altura (d) do perfil de aço;
- x_2 = Largura da mesa (b_f) do perfil de aço;
- x_3 = Espessura da mesa (t_f) do perfil de aço;
- x_4 = Espessura da alma (t_w) do perfil de aço;
- x_5 = Razão entre o diâmetro dos alvéolos e a altura do perfil ($\mu = D_0/d$);
- x_6 = Razão entre o passo e o diâmetro dos alvéolos ($\eta = p/D_0$).

3.2 Função Objetivo

A função objetivo para este problema é o peso por metro linear do perfil alveolar de aço (P_a). O peso do perfil alveolar de aço, dado pela Equação (4) varia de acordo com as características geométricas da seção transversal, o diâmetro das aberturas (D_0) e o número de aberturas por metro (n).

$$P_a = \left(2b_f t_f + (d_g - 2t_f)t_w - n \frac{\pi D_0^2}{4} \right) \cdot \rho_a. \quad (4)$$

Onde ρ_a é a massa específica do aço, equivalente a 7850 kg/m³.

É possível reescrever a função objetivo P_a em função das seis variáveis do problema, da forma exposta na Equação (5).

$$P_a = \left(2x_2 x_3 + \left(x_1 + \sqrt{\left(\frac{x_1 x_5}{2} \right)^2 - \left(\frac{x_1 x_5 (x_6 - 1)}{2} \right)^2} - 2x_3 \right) \cdot x_4 - \frac{1}{x_6 x_5 x_1} \cdot \frac{\pi (x_5 \cdot x_1)^2}{4} \right) \cdot \rho_a. \quad (5)$$

3.3 Funções de Restrição

Para que o problema de otimização esteja bem definido, é necessário estabelecer funções que representem as restrições que as vigas alveolares apresentam na prática. Os perfis de aço disponíveis no mercado são tabelados, portanto, configuram como variáveis discretas, no entanto optou-se por utilizar variáveis contínuas. Para estabelecer as dimensões da seção dos perfis foram impostas como restrições do problema, o menor e o maior valor para cada uma das dimensões (d , b_f , t_f , e t_w) encontrados na tabela de perfis I da Gerdau Açominas, escolhida por contemplar perfis fabricados no Brasil, indicados nas Inequações (6), (7), (8) e (9).

$$148 \leq d \leq 617. \quad (6)$$

$$100 \leq b_f \leq 325. \quad (7)$$

$$4,9 \leq t_f \leq 22,2 \quad (8)$$

$$4,3 \leq t_w \leq 14,0 \quad (9)$$

Para definir seções mais condizentes com a realidade, evitando perfis demasiadamente esbeltos ou robustos, também foram limitadas relações entre características dos perfis de acordo com as relações existentes nos perfis da tabela utilizada, indicada pelo conjunto de Inequações (10), (11), (12) e (13).

$$1,00 \leq \frac{t_f}{t_w} \leq 1,79 \quad (10)$$

$$0,96 \leq \frac{d}{b_f} \leq 3,22 \quad (11)$$

$$17,08 \leq \frac{d}{t_w} \leq 62,34 \quad (12)$$

$$9,42 \leq \frac{b_f}{t_f} \leq 27,82 \quad (13)$$

O catálogo de vigas de aço celulares da Arcelor Mittal estabelece restrições diferentes para sistemas de piso, indicadas pelas Inequações (14), (15) e (16), e de cobertura indicadas pelas Inequações (17), (18) e (19), em relação às razões entre o passo e o diâmetro das aberturas (η) e entre o diâmetro das aberturas e a altura do perfil original (μ), e também para a razão de expansão do perfil (k).

Sistemas de Piso:

$$0,8 \leq \mu \leq 1,1 \quad (14)$$

$$1,2 \leq \eta \leq 1,7 \quad (15)$$

$$1,3 \leq k \leq 1,4 \quad (16)$$

Sistemas de Cobertura:

$$1,0 \leq \mu \leq 1,3 \quad (17)$$

$$1,1 \leq \eta \leq 1,3 \quad (18)$$

$$1,4 \leq k \leq 1,6 \quad (19)$$

Também são estabelecidas dimensões mínimas e máximas para a largura do montante da alma (b_w), indicadas pelas Equações (20) e (21).

$$b_{w,min} \geq \frac{d\mu}{12} \geq 50mm \quad (20)$$

$$b_{w,max} \leq 0,75d\mu \quad (21)$$

A verificação dos critérios de resistência é o mais importante no dimensionamento de estruturas. Por meio de um conjunto de critérios é garantida a capacidade resistente do elemento. O esforço solicitante aplicado à estrutura deve ser menor que o esforço que esta é capaz de resistir. Para a avaliação dos critérios de resistência, foram levados em consideração os estudos teóricos, numéricos e experimentais desenvolvidos por Abreu (2011), Bezerra (2011), Silveira (2011), Vieira (2011), Oliveira (2012), Verissimo (2012), Mendonça (2014) e Badke Neto (2015).

Formação de mecanismo plástico. Devido à complexidade associada ao estudo rigoroso de vigas celulares, são admitidas algumas simplificações para o estudo do comportamento das vigas celulares de aço. Dentre elas destaca-se a analogia do seu comportamento com o de uma viga Vierendeel com nós rotulados nos pontos médios dos montantes e dos segmentos de banzo entre montantes (Figura 4) e com as ações aplicadas nos nós. A partir disso, a análise pode ser feita de modo análogo à de uma treliça isostática, em que os nós coincidem com as seções para as quais se considera o momento nulo.

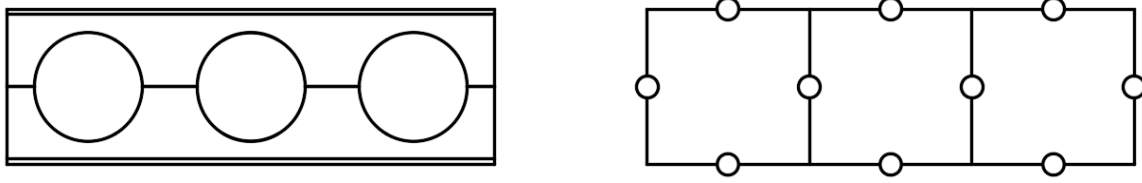


Figura 4. Analogia de viga Vierendeel para vigas celulares.

A expressão que define o estado limite último de plastificação da seção crítica, seguindo o que recomenda a ABNT NBR 8800:2008, e as recomendações de Cimadevila (2000), é dada pela Equação (22).

$$M + cV \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (22)$$

Onde:

$$M_{pl} = Z_{x0} f_y = 2 y_o A_t f_y \quad (23)$$

$$M = \frac{qL}{2}x - \frac{qx^2}{2} \quad (24)$$

$$V = \frac{qL}{2} - qx \quad (25)$$

$$x = \frac{L}{2} - c \quad (26)$$

$$c = \frac{b_w y_o y_a A_t}{2I_t}, \text{ quando } 3 \frac{y_a^2}{b_w^2} \leq 1 \quad (27)$$

$$c = \frac{\sqrt{3} y_o y_a^2 A_t}{2I_t}, \text{ quando } 3 \frac{y_a^2}{b_w^2} > 1 \quad (28)$$

$$A_t = t_w(h_t - t_f) + b_f t_f \quad (29)$$

$$I_t = \frac{b_f t_f^3}{12} + b_f t_f \left(\bar{y} - \frac{t_f}{2} \right)^2 + \frac{t_w (h_t - t_f)^3}{12} + t_w (h_t - t_f) \left(\bar{y} - \frac{h_t + t_f}{2} \right)^2 \quad (30)$$

$$\bar{y} = \frac{b_f t_f^2 + h_t^2 t_w - t_f^2 t_w}{2(b_f t_f + h_t t_w - t_f t_w)} \quad (31)$$

$$h_t = \frac{d_g - h_0}{2} \quad (32)$$

$$y_0 = \frac{h_0}{2} + h_t - \bar{y} \quad (33)$$

Onde:

γ_{a1} é o coeficiente de resistência;

L é o comprimento da viga e q o carregamento aplicado;

b_f, t_f, t_w, h_0 e y_a foram mostrados na Figura 2;

b_w foi mostrado na Figura 3;

Z_{x0} é o módulo resistente plástico da viga expandida na seção do alvéolo;

f_y é a tensão de escoamento do aço.

Escoamento do montante de alma por cisalhamento. Outro critério de resistência a ser considerado é o escoamento do montante da alma devido ao cisalhamento. Para avaliar a capacidade resistente do montante de alma ao cisalhamento em sua menor seção, pode-se partir do equilíbrio de forças em relação ao ponto O apresentado na Figura 5. Elementos para o estudo dos esforços no montante de alma em vigas celulares (Silveira 2011).

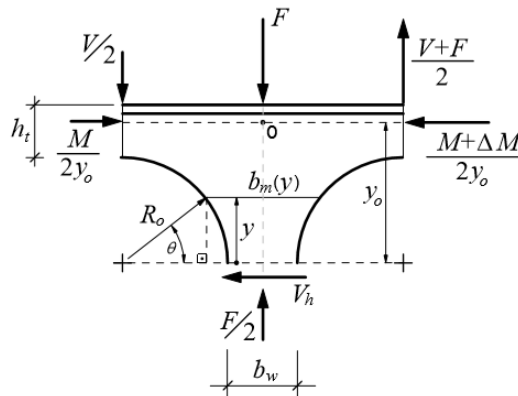


Figura 5. Elementos para o estudo dos esforços no montante de alma em vigas celulares (Silveira 2011).

Esta verificação deve ser feita na seção sujeita ao cortante máximo e, uma vez que na maioria dos casos considera-se o carregamento uniformemente distribuído, a parcela $F/2$ é pequena se comparada à força cortante V , pelo que se pôde desprezá-la. Com isso, a resistência ao escoamento do montante de alma por cisalhamento é dada pela Equação (34).

$$V_{Sd} \leq \frac{V_{RK1}}{\gamma_{a1}} \quad (34)$$

Onde:

$$V_{Rk1} \leq \frac{4}{3\sqrt{3}} \frac{b_w t_w y_0}{p} f_y \quad (35)$$

V_{sd} é o esforço solicitante máximo de cálculo no montante da alma;
 p é mostrados na Figura 3.

Escoamento do montante de alma por flexão. A mesma força cortante V_h , indicada na Figura 5, produz a uma distância y , um momento fletor, causando tensões normais por todo o trecho. No entanto, como há uma variação da largura do montante em função da altura y , a tensão normal será dada pela Equação (36).

$$\sigma = \frac{6V_h}{t_w} \frac{R_0 \sin(\theta)}{(p - 2R_0 \cos(\theta))^2} \quad (36)$$

A tensão máxima ocorrerá na seção onde ($d\sigma/d\theta = 0$). Portanto, derivando a função, igualando à zero, tomando $\eta = p/D_0$ e rearrumando, chega-se à Equação (37).

$$V_{Rk2} = \frac{y_0 t_w f_y}{3\eta} \frac{(3\eta - \sqrt{\eta^2 + 8})^2}{\sqrt{4 - (\eta - \sqrt{\eta^2 + 8})^2}} \quad (37)$$

E, com isso, o critério de resistência de escoamento do montante de alma por cisalhamento é dado pela Equação (38).

$$V_{sd} \leq \frac{V_{Rk2}}{\gamma_{a1}} \quad (38)$$

Flambagem lateral do montante de alma. Resultados experimentais demonstram que a partir de certos valores de carregamentos o montante da alma pode apresentar problemas de instabilidade causando flambagem local. Em um estudo realizado por Delesques (1968), foi deduzida uma expressão geral com a qual esse esforço pode ser calculado (Equação (39)).

$$V_{cr} = \frac{Et_w^3}{1,18y_0} \left[1 + \left(1 - \frac{2b_w}{p} \right) \cdot \left(\frac{y_0 - 0,8a - 2b}{y_0} \right) \right] \quad (39)$$

Onde:

E é o módulo de elasticidade do aço;

a é metade do diâmetro das aberturas para vigas celulares;

b é a metade da altura de uma chapa expansora, para o caso de vigas de aço casteladas.

O estado limite último de instabilidade dos montantes da alma pode ser verificado pelas Equações (40), (41) e (42).

$$V_{sd} \leq \frac{2}{3}V_{cr}, \quad \text{se } \frac{V_{cr}}{V_{Rk2}} < 1 \quad (40)$$

$$V_{sd} \leq \frac{V_{Rk2} + V_{cr}}{3}, \quad \text{se } 1 \leq \frac{V_{cr}}{V_{Rk2}} < 2 \quad (41)$$

$$V_{sd} \leq V_{Rk2}, \quad \text{se } \frac{V_{cr}}{V_{Rk2}} \geq 2 \quad (42)$$

Flambagem lateral com torção. Para a determinação do estado limite último de flambagem lateral com torção, foram adotadas as prescrições contidas na ABNT NBR 8800:2008 para as vigas de alma cheia, substituindo os parâmetros de esbeltez λ_p e λ_r , relacionados respectivamente à plastificação e ao início do escoamento pelos valores correspondentes de comprimentos destravados, quais sejam L_p e L_r e, ainda:

- abordar a seção líquida no centro das aberturas como zona crítica de flambagem, adotando suas propriedades geométricas para o cálculo da constante de empenamento determinada por Kohnehpooshi e Showkati (2009) por meio da Equação (43).

$$C_w = \frac{h^2 I_y}{4} \quad (43)$$

- substituir o valor de L_r por um valor corrigido $L_{r,cor} = 1,2L_r$;

- assumir o valor do momento fletor resistente como 90% do momento de plastificação.

Onde:

$$L_p = 1,76r_y \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (44)$$

$$L_{r,cor} = \frac{1,66\sqrt{I_y J}}{J\beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27C_w\beta_1^2}{I_y}}} \quad (45)$$

$$\beta_1 = \frac{0,7f_y W_x}{EJ} \quad (46)$$

Onde:

J é a constante de torção;

C_w é a constante de empenamento da seção transversal;

Desta forma o momento resistente em função do comprimento destravado L_b é dado pelas Equações (47), (48) e (49).

- Se $L_b > L_{r,cor}$:

$$M_{Rk} = M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E I_y}{L_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \left(1 + 0,039 \frac{J L_b^2}{C_w}\right)} \quad (47)$$

- Se $L_p < L_b \leq L_{r,cor}$:

$$M_{Rk} = M_{cr} = C_b \left[0,90 M_{pl} - (0,90 M_{pl} - M_{r,cor}) \frac{L_b - L_p}{L_{r,cor} - L_p} \right] \leq 0,90 M_{pl} \quad (48)$$

- Se $L_b \leq L_p$,

$$M_{Rk} = 0,90 M_{pl} \quad (49)$$

Onde:

C_b é o coeficiente que leva em conta o efeito favorável de o momento não ser uniforme no segmento L_b , conforme indicado na ABNT NBR 8800:2008;

M_{pl} é o momento de plastificação da seção transversal;

$M_{r,cor}$ é o momento fletor correspondente ao início do escoamento, ajustado em função do valor de $L_{r,cor}$ dado por:

$$M_{r,cor} = \frac{0,31E}{L_{r,cor}^2} \sqrt{I_y (1000 C_w + 39 J L_b^2)} \quad (50)$$

Desta forma, seguindo o que recomenda a ABNT NBR 8800:2008, o critério de resistência para a flambagem lateral com torção é dado pela Equação (51).

$$M_{Sd} \leq \frac{M_{Rk}}{\gamma_{a1}} \quad (51)$$

Estado-limite de serviço de deslocamento excessivo. Para o cálculo das flechas em vigas de alma cheia, normalmente a influência do esforço cortante é desprezada, no entanto, no caso de vigas alveolares, a flecha devida ao esforço cortante pode apresentar valores significativos e, portanto deve ser considerada. Portanto a flecha total será dada pela Equação (52).

$$f = f_M + f_V \quad (52)$$

Onde:

$$f_M = \frac{5}{384} \frac{qL^4}{EI_e} \quad (53)$$

$$f_V = \frac{qL^2}{8GA_e} \quad (54)$$

Uma vez que as vigas alveolares não possuem um valor de momento de inércia constante ao longo de seu vão, é necessário admitir uma interpolação, denominada inércia equivalente I_e , dada pela Equação (55) para que seja possível determinar a flecha utilizando a equação da linha elástica.

$$I_e = 2(A_t y_0^2 + I_t) + \frac{t_w D_0^3}{48} \left(2,5 - \frac{1}{\eta}\right) \quad (55)$$

A expressão para o cálculo da área equivalente foi desenvolvida por Cimadevila (2000) para vigas alveolares com relação p/b_w igual a 3, válida para vigas casteladas dos padrões Peiner e Litzka. Também foi determinado que a parcela dos deslocamentos devidos à força cortante em vigas alveolares varia de 5 a 20% da flecha total. Assim, a equação da área equivalente fornece uma boa aproximação para as vigas celulares.

$$\frac{1}{A_e} = \frac{4,2a^3}{y_0^2 t_w p^2} + \frac{1,3a}{t_w y_0^2} + \frac{p^2}{1684,8I_t} + \frac{t_w y_a^5}{22,5I_t^2} \quad (56)$$

A ABNT NBR 8800:2008 considera para efeito de dimensionamento a flecha admissível (f_{adm}) para vigas de cobertura equivalente a $L/250$ e para vigas de piso $L/350$. Ficando o critério de resistência é dado pela Equação (57).

$$f \leq f_{adm} \quad (57)$$

4 EXEMPLOS

Para avaliar a eficiência e importância do software de dimensionamento otimizado de vigas alveolares de aço, foram definidos exemplos de aplicação, e os resultados obtidos através do programa desenvolvido são validados e comparados a resultados fornecidos por um programa de dimensionamento comercial. Também foi efetuado o dimensionamento convencional, a partir da tabela de perfis da Gerdau Açominas, usando a formulação de dimensionamento proposta por Verissimo (2012) e foi efetuada uma comparação dos resultados.

Na Figura 6 é apresentada a tela do Programa desenvolvido para o primeiro exemplo proposto.

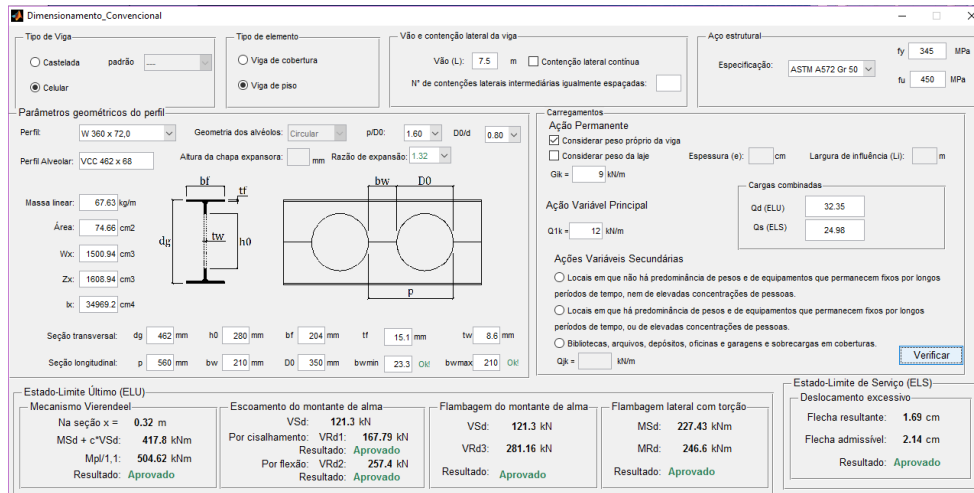


Figura 6 – Tela do programa de dimensionamento desenvolvido.

A Figura 7, apresenta a tela do programa de otimização desenvolvido para o primeiro exemplo, utilizando o método dos pontos interiores.

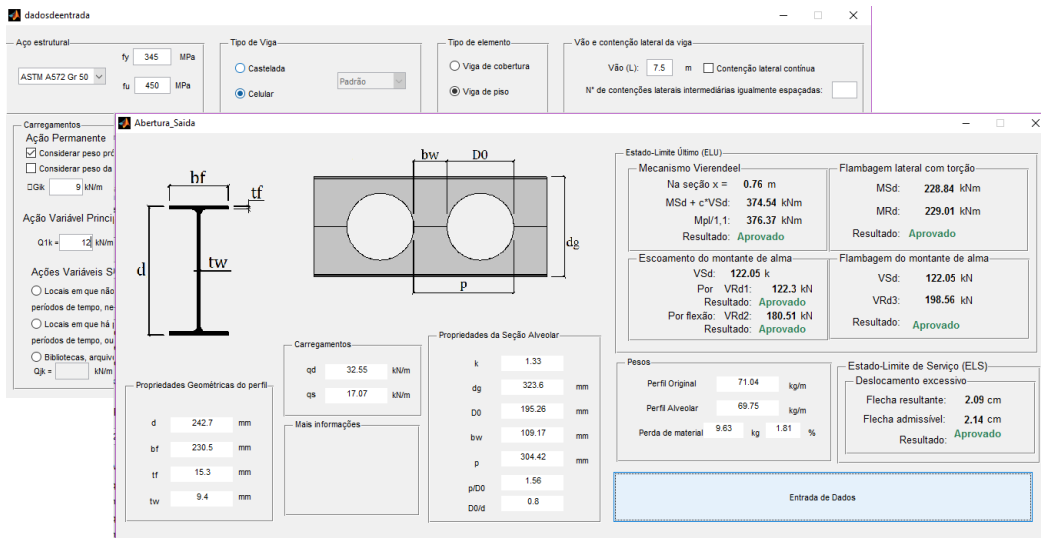


Figura 7 – Telas do programa de otimização desenvolvido.

Na Tabela 1 estão definidos os exemplos, totalizando 16 vigas variando entre 7,5 e 15 metros de comprimento, sendo nove vigas dimensionadas para sistemas de piso, sujeitas ao peso próprio, cargas permanentes (Q_{cp}) de 9 kN/m e sobrecarga (Q_{sc}) igual a 12 kN/m e seis vigas dimensionadas para sistemas de cobertura, sujeitas ao peso próprio, cargas permanentes (Q_{cp}) de 3 kN/m e sobrecarga (Q_{sc}) igual a 6 kN/m, nesta tabela foram incluídos os resultados obtidos com programa comercial e programa de dimensionamento desenvolvido.

Tabela 1 – Vigas utilizadas como exemplos,

	Comp. (m)	Tipo	Q_{cp}	Q_{sc}	Resultados Programa comercial	Resultados programa de dimensionamento
V1	7,50	PISO	9kN/m	12 kN/m	W 360 X 79	W 360 X 72
V2	8,00	PISO	9kN/m	12 kN/m	W 530 X 92	HP 310 X 79
V3	8,50	PISO	9kN/m	12 kN/m	W 610 X 101	W 530 X 92
V4	9,00	PISO	9kN/m	12 kN/m	W 610 X 113	W 610 X 101
V5	9,50	PISO	9kN/m	12 kN/m	W 610 X 155	W 610 X 113
V6	10,00	PISO	9kN/m	12 kN/m	W 610 X 155	W 360 X 122
V7	10,50	PISO	9kN/m	12 kN/m	W 610 X 155	W 360 X 122
V8	11,00	PISO	9kN/m	12 kN/m	W 610 X 155	W 610 X 155
V9	11,50	PISO	9kN/m	12 kN/m	W 610 X 155	W 610 X 155
V10	12,00	COBERTURA	3kN/m	6kN/m	W 610 X 155	HP 310 X 93
V11	12,50	COBERTURA	3kN/m	6kN/m	W 610 X 155	W 250 X 101
V12	13,00	COBERTURA	3kN/m	6kN/m	W 610 X 155	W 310 X 107
V13	13,50	COBERTURA	3kN/m	6kN/m	W 610 X 155	W 250 X 115
V14	14,00	COBERTURA	3kN/m	6kN/m	W 610 X 155	W 310 X 117
V15	14,50	COBERTURA	3kN/m	6kN/m	W 610 X 155	W 610 X 155
V16	15,00	COBERTURA	3kN/m	6kN/m	W 610 X 174	W 610 X 155

Cada uma dessas Vigas foi dimensionada através de um programa comercial, através do programa de dimensionamento desenvolvido e através do programa de otimização, sendo esse último realizado por meio de três processos de otimização distintos, sendo eles o Método dos Pontos Interiores, a Programação Quadrática Sequencial e o Método dos Algoritmos Genéticos. Na Tabela 2 estão listados os pesos por metro linear de perfil encontrado para cada método.

Tabela 2 - Pesos por metro linear encontrados.

	PESOS ENCONTRADOS OTIMIZAÇÃO (kg/m)			PESOS ENCONTRADOS DIMENSIONAMENTO (kg/m)	
	PONTOS INTERIORES	PQS	ALGORITMOS GENÉTICOS	CYPECAD	DIMENS. CONVENCIONAL
V1	71,04	72,22	71,70	79,00	72,00
V2	77,75	77,74	79,42	92,00	79,00
V3	84,81	84,81	85,84	101,00	92,00
V4	92,07	92,20	93,39	113,00	101,00
V5	99,54	99,54	100,57	155,00	113,00
V6	107,21	107,21	108,53	155,00	122,00
V7	115,12	115,12	116,04	155,00	122,00
V8	124,17	124,17	130,66	155,00	155,00

V9	133,55	133,55	132,77	155,00	155,00
V10	92,59	92,59	92,89	155,00	93,00
V11	98,84	98,84	98,43	155,00	101,00
V12	105,41	105,41	104,50	155,00	107,00
V13	112,14	112,14	110,54	155,00	115,00
V14	119,24	119,05	115,84	155,00	117,00
V15	126,13	126,13	122,78	155,00	155,00
V16	133,37	133,37	129,52	174,00	155,00

Na Tabela 3 está indicada a redução percentual do peso dos perfis. Nas quatro primeiras colunas é indicada a redução percentual dos três métodos de otimização e do programa de dimensionamento desenvolvido em relação ao peso do perfil indicado pelo programa de dimensionamento comercial. Nas três últimas colunas estão indicadas as reduções percentuais de peso perfis encontrados através dos métodos de otimização em relação ao programa desenvolvido.

Tabela 3 – Reduções percentuais de peso por metro linear

	Redução percentual em relação ao peso obtido através do software comercial				Redução percentual em relação ao peso obtido através do software desenvolvido		
	Pontos Interiores	PQS	Algoritmos Genéticos	Programa de Dimensionamento	Pontos Interiores	PQS	Algoritmos Genéticos
V1	10,08%	8,58%	9,24%	8,86%	1,33%	-0,31%	0,42%
V2	15,49%	15,50%	13,67%	14,13%	1,58%	1,60%	-0,53%
V3	16,03%	16,03%	15,01%	8,91%	7,82%	7,82%	6,69%
V4	18,52%	18,40%	17,35%	10,62%	8,84%	8,71%	7,53%
V5	35,78%	35,78%	35,12%	27,10%	11,91%	11,91%	11,00%
V6	30,83%	30,83%	29,98%	21,29%	12,12%	12,12%	11,04%
V7	25,73%	25,73%	25,14%	21,29%	5,64%	5,64%	4,88%
V8	19,89%	19,89%	15,70%	0,00%	19,89%	19,89%	15,70%
V9	13,84%	13,84%	14,34%	0,00%	13,84%	13,84%	14,34%
V10	40,26%	40,26%	40,07%	40,00%	0,44%	0,44%	0,12%
V11	36,23%	36,23%	36,50%	34,84%	2,14%	2,14%	2,55%
V12	32,00%	32,00%	32,58%	30,97%	1,49%	1,49%	2,34%
V13	27,65%	27,65%	28,68%	25,81%	2,48%	2,48%	3,88%
V14	23,07%	23,19%	25,27%	24,52%	-1,91%	-1,75%	0,99%
V15	18,63%	18,63%	20,79%	0,00%	18,63%	18,63%	20,79%
V16	23,35%	23,35%	25,56%	10,92%	13,96%	13,96%	16,44%

Nota-se uma redução significativa para algumas situações, de até 40% para o caso da viga V10, quando comparamos o método de dimensionamento proposto neste trabalho com o

resultado encontrado com o programa comercial. Quando se compara apenas a redução de peso dos perfis otimizados em relação aos pesos encontrados pelo dimensionamento proposto, encontram-se reduções de até 20%, no caso da viga V8. Na Figura 8 é possível visualizar melhor a diferença de peso entre as seções de aço encontradas.

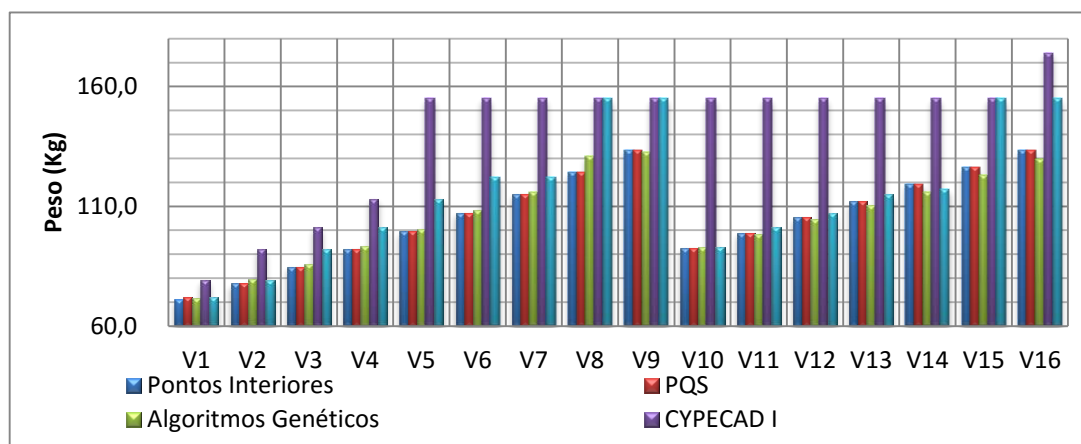


Figura 8 – Pesos dos perfis

Na Tabela 4, são apresentadas as dimensões otimizadas encontradas para o perfil por meio do Método dos Pontos Interiores. A partir dos resultados encontrados é possível notar uma tendência de soluções de perfis com dimensões de altura e de largura da mesa próximas. No entanto a utilização de perfis do tipo H para a confecção destas vigas está limitada pela menor disponibilidade de perfis deste tipo quando comparado aos perfis do tipo I.

Tabela 4 – Dimensões encontradas para os perfis por meio do Método dos Pontos Interiores.

DIMENSÕES PONTOS INTERIORES						
L	$X_1(d)$	$X_2(b_f)$	$X_3(t_f)$	$X_4(t_w)$	$(X_5)D_0/d$	$(X_6)p/D_0$
7,50	242,66	230,47	15,31	9,39	0,80	1,56
8,00	253,83	228,54	17,08	9,54	0,80	1,57
8,50	266,06	247,42	17,31	9,67	0,80	1,57
9,00	277,30	288,85	16,14	9,80	0,80	1,57
9,50	289,59	301,66	16,81	9,92	0,80	1,57
10,00	301,79	314,36	17,46	10,04	0,80	1,57
10,50	313,78	325,00	18,22	10,18	0,80	1,57
11,00	322,24	325,00	19,57	10,93	0,80	1,53
11,50	331,21	325,00	20,96	11,71	0,80	1,49
12,00	214,28	223,21	21,77	12,16	1,00	1,30
12,50	224,05	233,39	22,20	12,40	1,00	1,30
13,00	238,32	248,25	22,20	12,40	1,00	1,30
13,50	252,96	263,50	22,20	12,40	1,00	1,30
14,00	268,37	279,55	22,20	12,40	1,23	1,23
14,50	283,32	295,13	22,20	12,40	1,00	1,30
15,00	299,05	311,52	22,20	12,40	1,00	1,30

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Uma análise detalhada dos resultados encontrados, demonstra que o desenvolvimento de técnicas de otimização de vigas alveolares de aço é de fundamental importância para o desenvolvimento do tema no país. Os resultados encontrados comprovam que existe a possibilidade de reduzir substancialmente o peso das estruturas de aço a partir da utilização de perfis alveolares, sendo que nos exemplos apresentados, houve uma redução de até 20% do peso em um dos perfis analisados ao comparar com as proposições de dimensionamento mais atuais acerca do tema, e de até 40% ao comparar com um programa de dimensionamento comercial, indicando a possibilidade de gerar economia e minimizar desperdícios de recursos.

Para o conjunto de exemplos avaliados o método dos Pontos Interiores apresentou um número médio de 43 iterações, enquanto o método da Programação Quadrática Sequencial este número foi de 24 iterações. Para o Método dos Algoritmos Genéticos foi encontrado um número médio de 6 gerações para a convergência, porém foram necessárias varias tentativas de taxa de mutação e crossover para encontrar uma solução, tornando este método mais trabalhoso.

Os três métodos utilizados para o problema de otimização demonstram uma redução do peso em todos os elementos, e apresentaram resultados próximos. No entanto, ainda é necessário avaliar a viabilidade técnica e econômica da utilização destes perfis, uma vez que eles fogem das bitolas fornecidas no mercado, e apresentam soluções únicas para cada situação de cálculo apresentada.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho são propostos procedimentos para a otimização do dimensionamento das vigas celulares de aço. Uma proposição para o processo de otimização consistente é apresentada, com uma função objetivo e restrições bem definidas segundo as normas vigentes e estudos atuais acerca do tema.

Os três métodos de otimização utilizados praticamente convergiram para a mesma solução. Isto aponta que a solução encontrada em torno dessas dimensões é a solução otimizada do problema.

A formulação tanto para o dimensionamento quanto para o problema de otimização foi comparada com os resultados de um programa comercial, apresentando significativas reduções de peso. O programa comercial não revela as formulações que utiliza para o dimensionamento de vigas alveolares, porém os resultados se mostram consistentes.

7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES e ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo pelo apoio para a realização deste trabalho.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, Laura Maria Paes de. *Determinação do momento fletor resistente à flambagem lateral com torção de vigas de aço celulares*. Dissertação de Mestrado, Belo Horizonte: UFMG, 90 p. 2011.

ARCELORMITTAL. Catálogo: *ACB® Vigas alveolares*. Long Products Sections and Merchant Bars. Disponível em: <<http://sections.arcelormittal.com/library/product-catalogues.html>>. Acesso em: 03mar. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios*. Rio de Janeiro, 2008.

BADKE NETO, Augusto. *Estudo de Metodologias para o Dimensionamento de Vigas de Aço e Vigas Mistas de Aço e Concreto com Perfis Celulares*. Dissertação de Mestrado, Vitória: UFES, 180 p. 2015.

BEZERRA, Eduardo Matos. *Determinação do momento fletor resistente à flambagem lateral com torção de vigas de aço casteladas*. Dissertação de Mestrado, Belo Horizonte: UFMG, 2011.

CIMADEVILA, Francisco Javier Estévez; GUTIÉRREZ, Emilio Martín; RODRÍGUEZ, José Antonio Vázquez. *Vigas alveoladas*. Vol 3. Madri: A Coruña: Biblioteca Técnica Universitária; 2000.

CYPECAD. Versão 2014.p.CYPE Ingenieros, S.A. 2014.

DELESQUES, R. *Stabilité des montants des poutres ajourées*. *Construction Métallique*, 3:26-33, 1968.

GERDAU. Catálogo: *Perfis estruturais Gerdau: Tabela de Bitolas*. Disponível em: <<https://www.gerdau.com/br/pt/produtos/catalogos-e-manuais>>. Acesso em 03 mar. 2016

KOHNEPOOSHI, Omid; SHOWKATI, Hossein H. *Numerical modeling and structural behavior of elastic castellated section*. *European Journal of Scientific Research*, v. 31, n. 2, 306-318, 2009.

MATLAB. Versão R2013a(8.1.0.604).The MathWorks, Inc, 2013.

MENDONÇA, Marcus Vinícius Siqueira de, *Dimensionamento de Vigas Alveolares Biapoiadas*. Projeto de Graduação, Vitória: UFES, 115 p. 2014.

OLIVEIRA, Luiza Baptista. *Procedimentos para definição das características geométricas de vigas alveolares de aço para sistemas de piso e de cobertura*. Dissertação de Mestrado, Viçosa: UFV, 2012.

SILVEIRA, Eliane Gomes da. *Avaliação do comportamento estrutural de vigas alveolares de aço com ênfase nos modos de colapso por plastificação*. Dissertação de Mestrado, Viçosa: UFV, 2011.

VERÍSSIMO, Gustavo de Souza; et al. *Dimensionamento de Vigas Alveolares de Aço*. CONGRESSO LATINOAMERICANO DA CONSTRUÇÃO METÁLICA, São Paulo, 17 p. 2012

VIEIRA, Washington Batista. *Simulação numérica do comportamento estrutural de vigas casteladas de aço com ênfase na flambagem do montante de alma*. Dissertação de Mestrado, Viçosa: UFV, 2011.