



OTIMIZAÇÃO DE VIGAS CASTELADAS DE AÇO

Élcio Cassimiro Alves

Gabriela Pereira Lubke

elcio.calves1@gmail.com

gabrielalubk@gmail.com

Universidade Federal do Espírito Santo

Av. Fernando Ferrari 575, Goiabeiras

Vitória – ES – Brasil

Cep: 29075-410

Macksuel Soares de Azevedo

macksuel.azevedo@gmail.com

Universidade Federal do Espírito Santo

Av. Fernando Ferrari 575, Goiabeiras

Vitória – ES – Brasil

Cep: 29075-410

Abstract. *Open web-expanded steel beams are structural elements achieved by cutting the web of the root beam in a certain pattern and then welding two parts each other. As a result of these processes the overall beam depth increases which in return causes increase in the capacity of the original section. The openings, together with the addition of useful profile height, make this type of beam susceptible to new ways of collapse, and increases existing failure modes. This paper proposes a formulation for the design of cellular beams steel optimally using the formulations developed by Cimadevilla (2000), Abreu (2011), Silveira (2011) and Veríssimo et al. (2012), taking into account the geometry of restrictions set by Oliveira (2012). The validation of the computer program developed for the accomplishment of results with results obtained through manually solved examples as the basis of a descriptive formulation by Veríssimo et al. (2012), as the Brazilian standard does not define the design parameters for this type of profile. The program was developed in the Matlab platform, and for a solution of the optimization problems were used in internal Matlab algorithms, such as interior points, quadratic programming and genetic algorithms were used. Initial examples point out that the sizing can be improved and no case of profiling a new cut line can be defined.*

Keywords: *First keyword, Second keyword, Third keyword (up to 5 keywords)*

CILAMCE 2017

Proceedings of the XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering
P.O. Faria, R.H. Lopez, L.F.F. Miguel, W.J.S. Gomes, M. Noronha (Editores), ABMEC, Florianópolis, SC, Brazil,
November 5-8, 2017.

1. INTRODUÇÃO

As vigas com aberturas sequenciais na alma vem ganhando espaço no mercado. Os perfis castelados de aço são originados de perfis laminados tipo “I” ou “H”, nos quais são efetuados cortes em ziguezague ao longo da alma. As duas metades obtidas são então defasadas e soldadas entre si. Como resultado obtém-se uma viga cerca de 50% mais alta, sem acréscimo de peso ao perfil. Esse perfil 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.

O dimensionamento de estruturas em geral, se dá usualmente por meio de processos iterativos, com base em uma geometria inicial estabelecida pelo projetista, tornando o tempo de projeto 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.

O desenvolvimento das vigas alveolares de aço está ligado à evolução do processo de solda elétrica na construção de aço. Um dos primeiros empreendimentos a utilizar vigas de aço alveolares, foi realizado na década de 1930, pela fábrica Skoda, em Pilsner, na República Tcheca, a fim de servir como vigas de telhado para vãos de 12 metros em uma fábrica em Doudlevec (GRUNBAÜER, 2016). A primeira patente das vigas alveolares de aço foi solicitada por Geoffrey Murray Boyd, em 1937. O primeiro projeto desenvolvido por Boyd foi em 1935, para uma construção em Buenos Aires na Argentina. Apenas em 1939 a patente foi reconhecida, porém, devido aos altos custos de produção e à segunda guerra mundial, a comercialização de vigas casteladas tornou-se inviável. Assim, os direitos da patente foram cedidos para a United Steel Companies Limited. Essa patente expirou há muitos anos, o que permitiu a produção de vigas alveolares por qualquer fabricante de estruturas de aço (KNOWLES, 1991).

De acordo com Paiva (2009), durante a década de 1970, as vigas de aço casteladas eram bastante utilizadas no Brasil devido à pouca disponibilidade de peças com alturas maiores, uma vez que eram produzidos apenas perfis laminados de abas inclinadas. Com a inserção de perfis soldados

no mercado nacional, as vigas alveolares de aço ficaram esquecidas, e só voltaram ao mercado em 2002, quando a Gerdau Aço Minas passou a produzir perfis laminados com abas paralelas.

Cimadevilla (2000) aborda em sua obra um desenvolvimento teórico sobre os aspectos de cálculo, para esforços resistentes e para o cálculo de deformações. Estabelecendo equações consistentes para o dimensionamento das vigas alveolares de aço.

Erdal et al. (2011) realizaram um estudo sobre a capacidade última de carregamento de vigas de aço celulares otimamente dimensionadas. Foram feitos ensaios em protótipos de vigas celulares variando as dimensões dos perfis de aço. Para isso utilizou-se o método de dimensionamento da norma britânica BS 5920 (2000) e como procedimento de otimização foi realizada a procura harmônica. Bezerra (2011) propôs um procedimento para a determinação do momento fletor resistente nominal de vigas casteladas, de padrão Peiner e anglo saxônico, para o estado-limite último de flambagem lateral com torção, para os casos em que as vigas possuem vínculo de garfo (empenamento livre e torção impedida) nas extremidades e estejam submetidas a momento uniforme, a carga uniformemente distribuída e a carga concentrada na seção central.

Silveira (2011) realizou uma análise numérica para avaliar o comportamento de vigas alveolares de aço enfatizando os modos de colapso por plastificação. Em seu trabalho foram desenvolvidos modelos numéricos para vigas alveolares obtidas a partir de perfis brasileiros, para a observação dos modos de colapso e do carregamento último.

Veríssimo (2012) elabora um estudo analítico-numérico generalizado objetivando reavaliar o comportamento de vigas alveolares com variadas geometrias, incluindo as obtidas a partir dos perfis I laminados produzidos no Brasil a partir de 2002, propor um procedimento para dimensionamento dessas vigas.

Lubke, Alves e Azevedo (2017) apresentam a formulação do problema e o estudo sobre a otimização de vigas celulares de aço.

Com base nesses estudos objetiva-se neste trabalho apresentar um estudo comparativo sobre a otimização de vigas casteladas de aço.

2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O dimensionamento otimizado das vigas alveolares 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, devem ser levadas em conta as recomendações do fabricante, os critérios de dimensionamento, as seções de aço disponíveis, entre outros. Lubke, Alves e Azevedo (2017) apresentam a formulação e exemplos de aplicação para a otimização no dimensionamento de vigas alveolares.

2.1 Variáveis do problema

Inicialmente é necessário definir as principais variáveis relacionadas aos parâmetros de resistência e peso no dimensionamento de vigas alveolares de aço. A partir dessas variáveis são estabelecidas as funções objetivo e de restrições que definem de fato o problema. É importante ressaltar que se trata de tipos diferentes de vigas alveolares, as celulares e as casteladas, e as diferenças entre estes tipos de vigas refletem em diferentes variáveis e restrições para o problema de otimização.

As variáveis para as vigas celulares são:

x_1 = Altura (d) do perfil de aço;

x_2 = Largura da mesa (b_f) do perfil de aço;

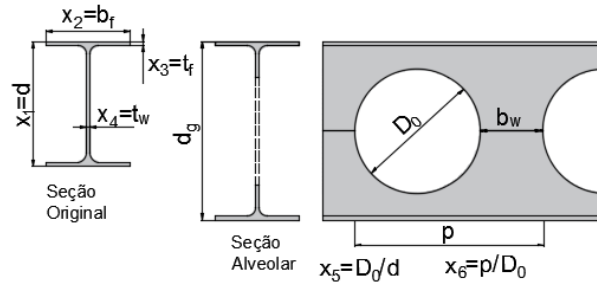
x_3 = Espessura da mesa (t_f) do perfil de aço;

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 ($\eta = p/D_0$).

Fig (1) Variáveis do problema vigas celulares



As variáveis para vigas casteladas são:

x_1 = Altura (d) do perfil de aço;

x_2 = Largura da mesa (b_f) do perfil de aço;

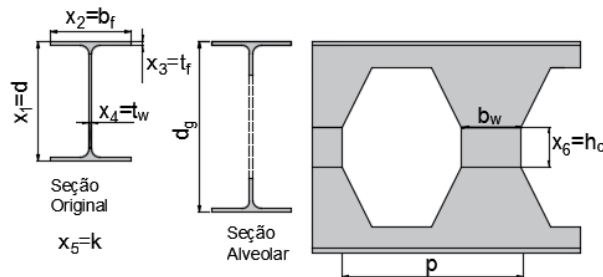
x_3 = Espessura da mesa (t_f) do perfil de aço;

x_4 = Espessura da alma (t_w) do perfil de aço;

x_5 = Razão de expansão (k);

x_6 = Altura da chapa expansora (h_c).

Fig (2) Variáveis do problema vigas celulares



2.2 Função Objetivo

2.2.1 Vigas Celulares de Aço

A formulação utiliza neste trabalho para as vigas celulares de Aço é apresentada por Lubke, Alves e Azevedo(2017).

2.2.2 – Vigas Casteladas

Para as vigas casteladas, em função da existência de uma única linha de corte, não há perdas de material, no entanto pode ser considerada a possibilidade de utilizar chapas expansoras, podendo então haver um acréscimo no peso final das vigas.

Analogamente às vigas celulares, o peso de aço (P_a) pode ser encontrado por meio do produto entre o volume de aço da seção alveolar (V_a) e o peso específico do aço (ρ_a).

O volume de aço unitário para um perfil castelado é encontrado pela soma entre o volume de aço do perfil original (V) e o volume de aço das chapas expansoras (V_{ch}) encontradas na viga. O número de chapas expansoras em um comprimento unitário da viga (n) é dado pela Eq.(12) onde p é o comprimento de um passo e o volume aço encontrado em uma chapa expansora é dado pela Eq.(13).

$$n = \frac{1}{p} \quad (12)$$

$$V_{ch} = b_w \cdot t_w \cdot h_c \quad (13)$$

O volume do perfil de alma cheia (V) é dado pelo produto entre a área da seção de aço e o comprimento, neste caso será calculado o volume para um comprimento unitário.

$$V = A_a \cdot 1 = 2b_f t_f + (d - 2t_f)t_w \quad (14)$$

Desta forma o volume total para um comprimento unitário da viga castelada é dado pela Eq.(15).

$$V_a = V + n \cdot V_{ch} \quad (15)$$

E, substituindo as Equações (12), (13) e (14) na Eq.(15), temos:

$$V_a = 2b_f t_f + (d - 2t_f)t_w + \frac{1}{p} \cdot b_w t_w h_c \quad (16)$$

E finalmente, chega-se ao peso de aço unitário da viga de aço castelada, dado por:

$$P_a = \left(2b_f t_f + (d - 2t_f) t_w + \frac{1}{p} \cdot b_w t_w h_c \right) \cdot \rho_a \quad (17)$$

2.3 Restrições do Problema

As restrições são determinadas para uma definição completa do problema, desta forma, ficam definidos os limites nos quais o algoritmo desenvolvido irá trabalhar para obter o ponto ótimo.

2.3.1 Critério dos limites geométricos:

Para a utilização da função de otimização “fmincon” do Matlab, trabalhou-se com a otimização de variáveis contínuas. No entanto, os perfis de aço disponíveis no mercado, são tabelados, portanto, configuram como variáveis discretas. Para estabelecer as dimensões da seção de aço, 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. Essa tabela foi escolhida por estar disponível no mercado nacional. As restrições das dimensões dos perfis são dadas pelas Inequações (18) a (21).

$$148 \leq d \leq 617 \quad (18)$$

$$100 \leq b_f \leq 325 \quad (19)$$

$$4,9 \leq t_f \leq 22,2 \quad (20)$$

$$4,3 \leq t_w \leq 14,0 \quad (21)$$

Para encontrar seções mais condizentes com a realidade também foram limitadas as relações entre estas características geométricas dos perfis de acordo com a tabela utilizadas, conforme as inequações (22) a (25).

$$1,00 \leq \frac{t_f}{t_w} \leq 1,79 \quad (22)$$

$$1,00 \leq \frac{t_f}{t_w} \leq 1,79 \quad (23)$$

$$17,08 \leq \frac{d}{t_w} \leq 62,34 \quad (24)$$

$$9,42 \leq \frac{b}{t_f} \leq 27,82 \quad (25)$$

As restrições apresentadas nas Eqs.(18) a (25) são válidas tanto para perfis celulares quanto para perfis castelados, entretanto, existem ainda restrições geométricas distintas para cada tipo de viga alveolar.

2.3.2 Vigas Celulares

O catálogo de perfis alveolares da Arcelor Mittal estabelece restrições diferentes para sistemas de piso e cobertura em relação às razões entre o passo e o diâmetro das aberturas e entre o diâmetro das aberturas e a altura do perfil original, e também para a razão de expansão do perfil.

A expressão para o cálculo da razão de expansão (k) dada pela razão entre a altura do perfil alveolar (d_g) e a altura do perfil original (d), é pode ser reescrita em função das variáveis de projeto.

$$k = \frac{d_g}{d} = \frac{d + \sqrt{\left(\frac{d\mu}{2}\right)^2 - \left(\frac{d\mu(\eta - 1)}{2}\right)^2}}{d} \quad (26)$$

Para sistemas de piso, são estabelecidas como restrições, as Inequações (27), (28) e (29).

$$0,8 \leq \mu \leq 1,1 \quad (27)$$

$$1,2 \leq \eta \leq 1,7 \quad (28)$$

$$1,3 \leq k \leq 1,4 \quad (29)$$

Para sistemas de cobertura, são estabelecidas como restrições as Inequações (30), (31) e (32)

$$1,0 \leq \mu \leq 1,3 \quad (30)$$

$$1,1 \leq \eta \leq 1,3 \quad (31)$$

$$1,4 \leq k \leq 1,6 \quad (32)$$

Também são estabelecidas dimensões mínimas e máximas para a largura do montante da alma (b_w).

$$b_{w,min} = \text{maior} \begin{cases} \frac{D_0}{12} = \frac{d\mu}{12} \\ 50mm \end{cases} \quad (33)$$

$$b_{w,min} \leq b_w \leq 0,75D_0 = 0,75d\mu \quad (34)$$

2.3.3 Vigas Casteladas

Para vigas casteladas, é necessário estabelecer como restrição a razão de expansão máxima possível para o perfil. Essa restrição foi estabelecida considerando que a maior expansão possível, sem o acréscimo de chapas expansoras, ocorrerá quando a altura livre da alma do perfil expandido for o dobro da altura livre da alma do perfil original.

$$d_g - 2t_f - 2r \leq 2(d - 2t_f - 2r) \quad (35)$$

Desenvolvendo:

$$d_g \leq 2d - 2t_f - 2r \quad (36)$$

Uma vez que $k = d_g/d$, podemos escrever como restrição a equação (37).

$$k \leq \frac{2d - 2t_f - 2r}{d} \quad (37)$$

2.4 Critérios de resistência

A verificação dos critérios de resistência é o mais importante no dimensionamento de estruturas. A estabilidade do elemento é garantida por meio de um conjunto de critérios, implicando que o esforço solicitante aplicado à estrutura seja menor que o esforço que a mesma é capaz de resistir. Foram utilizados os critérios de dimensionamento, a 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, desenvolvidos em Lubke (2017). Sendo os mesmos critérios tanto para vigas celulares quanto para as vigas casteladas.

$$\frac{M_{pl}/\gamma_{a1}}{M_{Sdx}} - 1 \geq 0 \quad (38)$$

$$\frac{V_{Rd1}}{V_{Sd}} - 1 \geq 0 \quad (39)$$

$$\frac{V_{Rd2}}{V_{Sd}} - 1 \geq 0 \quad (40)$$

$$\frac{V_{ad}}{V_{Sd}} - 1 \geq 0 \quad (41)$$

$$\frac{M_{Rd}}{M_{Sd}} - 1 \geq 0 \quad (42)$$

$$\frac{f_{adm}}{f} - 1 \geq 0 \quad (43)$$

2.4.1 Vigas casteladas

Deseja Minimizar:

$$P_a = \left(2b_f t_f + (d - 2t_f) t_w + \frac{1}{p} \cdot b_w t_w h_c \right) \cdot \rho_a \quad (17)$$

Sujeito a:

$$148 \leq x_1 \leq 617 \quad (18)$$

$$100 \leq x_2 \leq 325 \quad (19)$$

$$4,9 \leq x_3 \leq 22,2 \quad (20)$$

$$4,3 \leq x_4 \leq 17,40 \quad (21)$$

$$1,00 \leq \frac{x_3}{x_4} \leq 1,79 \quad (22)$$

$$0,96 \leq \frac{x_1}{x_2} \leq 3,22 \quad (23)$$

$$17,08 \leq \frac{x_1}{x_4} \leq 62,34 \quad (24)$$

$$9,42 \leq \frac{x_4}{x_3} \leq 27,82 \quad (25)$$

$$k \leq \frac{2d - 2t_f - 2r}{d} \quad (37)$$

$$\frac{M_{pl}/\gamma_{a1}}{M_{Sdx}} - 1 \geq 0 \quad (38)$$

$$\frac{V_{Rd1}}{V_{Sd}} - 1 \geq 0 \quad (39)$$

$$\frac{V_{Rd2}}{V_{Sd}} - 1 \geq 0 \quad (40)$$

$$\frac{V_{ad}}{V_{Sd}} - 1 \geq 0 \quad (41)$$

$$\frac{M_{Rd}}{M_{Sd}} - 1 \geq 0 \quad (42)$$

$$\frac{f_{adm}}{f} - 1 \geq 0 \quad (43)$$

Para a escolha do algoritmo a ser utilizado foram testados alguns exemplos utilizando o *software* Matlab e seus pacotes de otimização. Foram utilizados os métodos de programação quadrática sequencial, o método dos pontos interiores e o método dos algoritmos genéticos (LUBKE, ALVES E AZEVEDO, 2016). A partir dos resultados obtidos, determinou-se que o método da Programação Quadrática Sequencial foi o que melhor se adequou à proposta deste trabalho.

3. Programa computacional desenvolvido

A formulação presente neste trabalho tanto para o dimensionamento convencional, quanto para o dimensionamento otimizado foi desenvolvida no Matlab 2013. O programa computacional desenvolvido tem como base formulações propostas por Cimadevilla (2000), Silveira (2011) e Veríssimo et al. (2012) uma vez que a ABNT NBR 8800:2008 não inclui dentro do seu texto o dimensionamento de vigas alveolares. Os programas computacionais de dimensionamento de vigas alveolares existentes no mercado têm como base estudos e normas internacionais, portanto uma comparação direta com tais programas seria ineficiente para avaliar o desempenho do programa desenvolvido neste trabalho. O programa computacional desenvolvido neste trabalho utilizou a plataforma do MatLab (2013). A Figura 3 apresenta a tela do programa desenvolvido.

Fig (3) Entrada de dados do programa de otimização

Fonte: Lubke (2017)

3.1 Comparação dos resultados encontrados pelos programas de dimensionamento e otimização desenvolvidos

Para analisar a eficácia do programa de otimização desenvolvido foram utilizadas seis vigas para sistemas de piso e seis vigas para sistemas de cobertura como mostra a **Erro! Fonte de referência não encontrada..** Os carregamentos utilizados foram proporcionais ao tamanho do vão, porém são maiores para vigas de sistemas de piso, e menores para sistemas de cobertura, já que estes sofrem solicitações menores. Os coeficientes de ponderação utilizados nesta seção foram de 1,35 para cargas permanentes e 1,50 para cargas variáveis.

Tabela 1 – Vigas e carregamentos

		L_b	Q_{cp}	Q_{sc}
Vigas de piso	Viga 1	3,00 m	4,50 kN/m	3,94 kN/m
	Viga 2	4,80 m	7,20 kN/m	6,30 kN/m
	Viga 3	6,60 m	9,90 kN/m	8,66 kN/m
	Viga 4	8,40 m	12,60 kN/m	11,03 kN/m
	Viga 5	10,20 m	15,30 kN/m	13,39 kN/m
	Viga 6	12,00 m	18,00 kN/m	15,75 kN/m
Vigas de cobertura	Viga 7	3,00 m	1,50 kN/m	0,75 kN/m
	Viga 8	5,60 m	2,80 kN/m	1,40 kN/m
	Viga 9	8,20 m	4,10 kN/m	2,05 kN/m
	Viga 10	10,80 m	5,40 kN/m	2,70 kN/m
	Viga 11	13,40 m	6,70 kN/m	3,35 kN/m
	Viga 12	16,00 m	8,00 kN/m	4,00 kN/m

3.1.1 Vigas Celulares

Na Tabela 2 são apresentados os pesos encontrados para os perfis originais e perfis alveolares encontrados ao utilizar os programas de otimização e de dimensionamento desenvolvidos. Na última coluna da tabela é mostrada a redução percentual de peso dos perfis de aço originais encontrados pelo programa de otimização em relação ao peso dos perfis encontrados pelo programa de dimensionamento desenvolvido. Neste caso a comparação foi realizada entre os perfis originais, uma vez que ao comparar os perfis alveolares os desperdícios de materiais que

acontecem neste tipo de viga poderiam interferir no resultado final, podendo apresentar reduções de peso distorcidas.

Tabela 2 – Pesos encontrados para vigas celulares

	Otimização		Dimensionamento		Redução percentual
	Peso Original (kg/m)	Peso Alveolar (kg/m)	Peso Original (kg/m)	Peso Alveolar (kg/m)	
Viga 1	12,36	11,90	13,00	12,46	4,92%
Viga 2	22,30	21,69	29,80	29,53	25,17%
Viga 3	41,11	39,97	53,00	50,97	22,43%
Viga 4	66,80	64,94	79,00	76,24	15,44%
Viga 5	98,77	96,01	155,00	148,47	36,28%
Viga 6	160,33	154,86	174,00	168,00	7,86%
Viga 7	12,36	11,51	13,00	11,73	4,92%
Viga 8	17,10	16,24	22,50	21,38	24,00%
Viga 9	34,45	32,37	41,70	39,69	17,39%
Viga 10	60,17	56,54	73,00	69,80	17,58%
Viga 11	93,24	87,64	107,00	102,49	12,86%
Viga 12	158,03	145,79	174,00	159,57	9,18%

A partir da análise dos resultados é possível notar que podem ocorrer diferenças significativas dos pesos encontrados para uma determinada geometria e carregamento. Para os exemplos analisados na Tabela 2 a redução de peso ao utilizar o perfil otimizado chegou a 36,28% no caso de sistemas de piso e 24% para sistemas de cobertura.

3.1.2 Vigas casteladas

Apresenta-se nas Tabela 3, 4 e 5 resultados para vigas casteladas sem a utilização de chapas expansoras, como neste caso não há desperdício de materiais devido ao tipo de linha de corte e

nem acréscimo de material é mostrado apenas um peso para perfil otimizado e um peso para perfil dimensionado.

Tabela 3 - Pesos encontrados para vigas padrão peiner sem chapa expansora

	Otimização	Dimensionamento	
	Peso Original (kg/m)	Peso Original (kg/m)	Redução percentual
Viga 1	12,36	13,00	4,92%
Viga 2	22,12	26,60	16,84%
Viga 3	41,41	52,00	20,37%
Viga 4	67,31	79,00	14,80%
Viga 5	99,55	155,00	35,77%
Viga 6	154,79	174,00	11,04%
Viga 7	12,36	13,00	4,92%
Viga 8	17,13	22,50	23,87%
Viga 9	34,63	44,50	22,18%
Viga 10	61,33	73,00	15,99%
Viga 11	93,58	107,00	12,54%
Viga 12	158,40	174,00	8,97%

Para as vigas do padrão Peiner o programa de otimização fornece uma redução de 35,77% para o caso mais extremo em sistemas de piso e 23,87 em sistemas de cobertura. Para a situação de menor redução obteve-se 4,92%.

Tabela 4 - Pesos encontrados para vigas padrão Litzka sem chapa expansora

	Otimização	Dimensionamento	
	Peso Original (kg/m)	Peso Original (kg/m)	Redução percentual
Viga 1	12,36	13,00	4,92%

Viga 2	22,68	26,60	14,74%
Viga 3	43,02	52,00	17,27%
Viga 4	69,94	79,00	11,47%
Viga 5	103,48	155,00	33,24%
Viga 6	161,68	174,00	7,08%
Viga 7	12,36	13,00	4,92%
Viga 8	17,18	22,50	23,64%
Viga 9	35,29	44,50	20,70%
Viga 10	61,54	73,00	15,70%
Viga 11	94,25	115,00	18,04%
Viga 12	159,23	174,00	8,49%

As vigas do padrão Litzka apresentaram uma redução de 33,24% para vigas de piso e 23,64% em vigas de cobertura nos casos mais extremos. Por sua vez, as vigas do padrão anglo-saxão apresentam uma redução máxima de 21,72% para sistemas de piso e 24,80 em sistemas de cobertura.

Tabela 5 - Pesos encontrados para vigas padrão anglo-saxão sem chapa expansora

	Otimização	Dimensionamento	
	Peso Original (kg/m)	Peso Original (kg/m)	Redução percentual
Viga 1	12,36	13,00	4,92%
Viga 2	21,78	26,60	18,12%
Viga 3	40,94	51,00	19,73%
Viga 4	66,54	85,00	21,72%
Viga 5	140,00	140,00	0,00%
Viga 6	150,40	174,00	13,56%
Viga 7	12,36	13,00	4,92%

Viga 8	16,92	22,50	24,80%
Viga 9	34,01	41,70	18,44%
Viga 10	60,12	73,00	17,64%
Viga 11	102,83	107,00	3,90%
Viga 12	154,63	174,00	11,13%

Nas Tabela 6, 7 e 8 mostram os resultados para vigas alveolares com a utilização de chapas expansoras. Para esses casos pode haver acréscimo de peso nos perfis devido à utilização das chapas. Na última coluna de cada tabela é indicada a redução percentual de peso dos perfis de aço alveolar encontrados pelo programa de otimização em relação ao peso dos perfis alveolares encontrados pelo programa de dimensionamento desenvolvido. Nesse caso a comparação é realizada entre os perfis alveolares, uma vez que o acréscimo de matéria representa custo adicional e é relevante no dimensionamento.

Tabela 6 - Pesos encontrados para vigas de piso padrão peiner com chapa expansora

	Otimização		Dimensionamento		Redução percentual
	Peso Original (kg/m)	Peso Alveolar (kg/m)	Peso Original (kg/m)	Peso Alveolar (kg/m)	
Viga 1	12,36	12,36	13,00	13,00	4,92%
Viga 2	20,33	21,27	22,50	23,90	11,00%
Viga 3	39,09	39,79	46,10	46,94	15,23%
Viga 4	63,50	64,64	79,00	79,00	18,18%
Viga 5	93,38	95,67	110,00	116,73	18,04%
Viga 6	140,57	146,10	155,00	160,00	8,69%
Viga 7	12,36	12,36	13,00	13,00	4,92%
Viga 8	15,73	16,87	22,50	22,50	25,02%
Viga 9	30,36	32,76	38,70	40,53	19,17%
Viga 10	70,03	70,03	71,00	72,77	3,77%

Viga 11	86,78	90,67	107,00	107,00	15,26%
Viga 12	148,34	154,72	174,00	174,00	11,08%

Tabela 7 - Pesos encontrados para vigas de piso padrão Litzka com chapa expansora

	Otimização		Dimensionamento		Redução percentual
	Peso Original (kg/m)	Peso Alveolar (kg/m)	Peso Original (kg/m)	Peso Alveolar (kg/m)	
Viga 1	12,36	12,36	13,00	13,00	4,92%
Viga 2	20,32	21,3	22,50	23,90	10,88%
Viga 3	38,78	39,73	46,10	46,94	15,36%
Viga 4	62,63	64,74	73,00	75,02	13,70%
Viga 5	92,88	95,52	107,00	110,64	13,67%
Viga 6	141,18	146,70	155,00	161,32	9,06%
Viga 7	12,36	12,36	13,00	13,00	4,92%
Viga 8	15,77	16,9	22,50	22,50	24,89%
Viga 9	30,44	32,85	38,70	40,91	19,70%
Viga 10	71,84	71,84	62,00	67,29	-6,76%
Viga 11	87,12	91,15	107,00	107,19	14,96%
Viga 12	148,78	155,27	174,00	174,00	10,76%

Tabela 8 - Pesos encontrados para vigas padrão anglo-saxão sem chapa expansora

	Otimização		Dimensionamento		Redução percentual
	Peso Original (kg/m)	Peso Alveolar (kg/m)	Peso Original (kg/m)	Peso Alveolar (kg/m)	
Viga 1	12,36	12,36	13,00	13,00	4,92%
Viga 2	20,83	21,22	26,60	26,60	20,23%

Viga 3	39,5	40,06	51,00	51,00	21,45%
Viga 4	64,19	65,11	79,00	79,00	17,58%
Viga 5	94,93	96,28	122,00	123,09	21,78%
Viga 6	141,24	143,48	155,00	157,24	8,75%
Viga 7	12,36	13,14	13,00	13,00	-1,08%
Viga 8	15,56	16,35	22,50	22,50	27,33%
Viga 9	31,59	32,54	38,70	39,80	18,24%
Viga 10	63,83	65,65	71,00	71,90	8,69%
Viga 11	98,48	101,35	107,00	107,00	5,28%
Viga 12	142,85	147,36	155,00	159,55	7,64%

A utilização das chapas expansoras pode possibilitar a utilização de um perfil mais leve, tornando as diferenças entre os perfis ótimos e os dimensionados um pouco menores. Para os exemplos resolvidos, agora a redução percentual máxima foi de 18,18% em sistemas de piso e 25,02% em sistemas de cobertura.

Para as vigas do padrão anglo-saxão, é possível notar que em alguns dos perfis dimensionados não há acréscimo de peso do perfil alveolar em relação ao perfil original, isso porque nestes casos a solução ideal é dada por um perfil que não necessita de chapa expansora. Sendo assim, a redução percentual máxima entre os perfis dimensionados e otimizados foi de 21,78% em sistemas de piso e de 27,33% em sistemas de cobertura. O acréscimo de peso encontrado na Viga 7, deve-se a utilização de um mínimo local como solução otimizada do problema.

3.2 Comparação entre os tipos de viga alveolares.

A Tabela 9 mostra o peso encontrado pelo programa de otimização para cada um dos tipos de viga disponíveis no programa desenvolvido.

Tabela 9 – Pesos encontrados pelo programa de otimização em kg/m.

Sem Chapa Expansora	Com Chapa Expansora
---------------------	---------------------

	Celular	Peiner	Litzka	Anglo-saxão	Peiner	Litzka	Anglo-saxão
Viga 1	12,36	12,36	12,36	12,36	12,36	12,36	12,36
Viga 2	22,30	22,12	22,68	21,78	21,27	22,68	21,22
Viga 3	41,11	41,41	43,02	40,94	39,79	43,02	40,06
Viga 4	66,80	67,31	69,94	66,54	64,64	69,94	65,11
Viga 5	98,77	99,55	103,48	140,00	95,67	103,48	96,28
Viga 6	160,33	154,79	161,68	150,40	146,10	161,68	143,48
Viga 7	12,36	12,36	12,36	12,36	12,36	12,36	13,14
Viga 8	17,10	17,13	17,18	16,92	16,87	17,18	16,35
Viga 9	34,45	34,63	35,29	34,01	32,76	35,29	32,54
Viga 10	60,17	61,33	61,54	60,12	70,03	61,54	65,65
Viga 11	93,24	93,58	94,25	102,83	90,67	94,25	101,35
Viga 12	158,03	158,40	159,23	154,63	154,72	159,23	147,36

A análise dos dados permite inferir que para o conjunto de exemplos utilizados neste trabalho, excetuando-se os pontos onde o programa de otimização apresentou como solução mínimos locais da função, as vigas de padrão Peiner e Anglo-saxão, ambas com utilização de chapas expansoras ofereceram os melhores resultados, e as vigas do padrão Litzka, com e sem chapa expansora fornece os piores resultados.

4 Conclusões

É possível perceber que há uma infinidade de problemas na área de dimensionamento de estruturas em que o estudo de otimização é utilizável, pois o objetivo de todo dimensionamento é obter sempre uma estrutura com menor custo, peso e outros fatores que podem ser maximizados ou minimizados. A sofisticação do tema estará no processo de modelagem mais adequada à realidade possível, buscando gerar resultados mais satisfatórios e maior abrangência da sua aplicabilidade.

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 mais de 30% do peso em um dos perfis analisados, gerando economia e minimizando desperdícios de recursos.

Referências

ABREU, L. M. P.. **Determinação do Momento Fletor Resistente à Flambagem Lateral com Torção de Vigas de Aço Celulares**. 2011. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte

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 de Concreto de Edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

BEZERRA, Eduardo Matos. **Determinação do Momento Fletor Resistente à Flambagem Lateral com Torção de Vigas de Aço Casteladas**. 2011. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte.

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

ERDAL, F.; DOAN, E.; SAKA, M. P. **Optimum design of cellular beams using harmony search and particle swarm optimizers**. Journal of Constructional Steel Research, v. 67, p. 237-247, 2011.

GRÜNBAUER, J.. Disponível em: <www.grunbauer.nl> Acesso em: 3mar. 2016.

KNOWLES, P. R. **Castellated Beams – Structural and Building Board**. Structural and Building Board. Proc. Instn. Civ. Engrs. Part 1, 1991, 90, June. p. 521-536.

LUBKE, G. P.; ALVES, E. C., AZEVEDO, M. S.. **Dimensionamento Otimizado de Vigas Celulares de Aço**. In: Iberian Latin American on Computational Methods in Engineering, 2016, Brasília. CILAMCE 2016, 2016.

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.

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.

PAIVA, C. Vigas casteladas e celulares. **Finestra**, São Paulo, ano 14, ed. 59, dez. 2009. Disponível em: <<http://arcoweb.com.br/finestra/tecnologia/vigas-casteladas-e-celulares-01-12-2009>>. Acesso em: 10 jun. 2014.

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.

VERÍSSIMO, G. de S. et al. Dimensionamento de Vigas Alveolares de Aço. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DA CONSTRUÇÃO METÁLICA, 5., 2012, São Paulo. **Anais eletrônicos...** Disponível em: <<http://www.abcem.org.br/construmetal>>. Acesso em: 6 set. 2013.

a.