

Dimensionamento ótimo e análise dos modos de colapso de vigas alveolares de aço

*Élcio Cassimiro Alves¹ Gabriela Pereira Lubke²

Resumo

As vigas de aço com aberturas na alma são elementos estruturais obtidos a partir do corte de um determinado perfil e soldando as partes na sequência. Como resultado deste processo, obtém-se um novo elemento com a sua capacidade de resistência aumentada em relação a original. Essas aberturas, juntamente com o aumento da altura útil do perfil, tornam esse tipo de viga suscetível a novas formas de colapso. O objetivo deste trabalho é apresentar a formulação, bem como o sistema desenvolvido para o dimensionamento otimizado de vigas alveolares de aço. O sistema foi desenvolvido na plataforma do Matlab. Exemplos numéricos são apresentados para validar a formulação. Uma análise comparativa é feita para mostrar a diferentes soluções para os diferentes padrões de vigas alveolares bem como apontar a melhor solução e uma análise nos modos de colapso preponderante para os problemas analisados é apresentado. Os resultados apontam que uma solução melhor pode ser obtida quando as técnicas de otimização são aplicadas para o problema

Palavras-chave: Vigas, Alveolares, Aço, Otimização

1 Introdução

As vigas com aberturas sequenciais na alma vêm 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

¹ Professor do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, elcio.calves1@gmail.com

² Mestre em Engenharia, Universidade Federal do Espírito Santo, gabrielalubk@gmail.com

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.

No final da década de 1970 existiam tecnologias que permitiram a automatização total do processo de fabricação das vigas alveolares de aço. A utilização de computadores no meio de produção permitiu, com qualidade e rapidez, que as vigas casteladas fossem cada vez mais difundidas em projetos estruturais em aço, possibilitando também o desenvolvimento das vigas celulares, que possuem aberturas circulares, (GRUNBAUER, 2016).

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 Açominas 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 busca 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.

Abreu (2011) obtêm em seu estudo o momento fletor resistente à flambagem lateral com torção de vigas celulares, duplamente simétricas, biapoiadas, através do método dos elementos finitos; nesse estudo, os resultados são comparados com os obtidos por um método de cálculo em que se usa o procedimento da ABNT NBR 8800:2008 para vigas de alma cheia em conjunto com a recomendação da British Standard BS 5950-1:2000.

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.

Sonck e Belis (2015) estudaram o comportamento das vigas celulares de aço em relação à flambagem lateral com torção, utilizando um modelo numérico validado com base em resultados experimentais. Neste modelo, o efeito da tensão residual foi levado em consideração. Utilizando os resultados do estudo paramétrico, propôs-se uma abordagem de projeto preliminar.

Lubke, Alves e Azevedo (2017) apresentam a formulação e exemplos de aplicação do problema de otimização para vigas celulares de aço. Neste trabalho é realizada uma análise comparativa entre os métodos de otimização programação quadrática sequencial, algoritmo genético e um programa comercial.

Com base nesses estudos o objetivo deste trabalho é apresentar a formulação do problema de otimização de vigas alveolares de aço bem como o sistema desenvolvido para a solução do problema. Uma análise comparativa entre vigas celulares apresentados por Lubke, Alves e Azevedo (2017) e para os diferentes tipos de vigas casteladas com e sem chapa expansora é feita, bem como uma análise dos modos de colapso para os problemas estudados. O sistema foi implementado usando a ferramenta do guide do Matlab e a solução do problema de otimização é obtida através do método de programação quadrática sequencial.

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 celulares.

Deste modo, serão definidas as variáveis, a função objetivo, as restrições e as recomendações que serão utilizadas no programa computacional de dimensionamento ótimo de vigas alveolares de aço.

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;

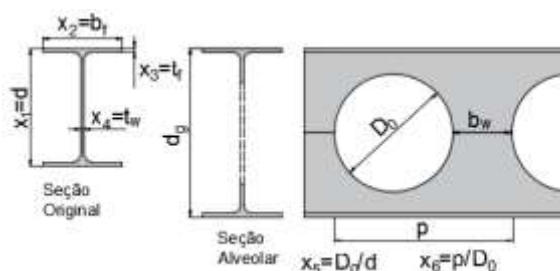
x_3 = Espessura da mesa (t_f) do perfil de aço;

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 ($\eta = p/D_0$).

Figura 1 - Variáveis do problema vigas celulares

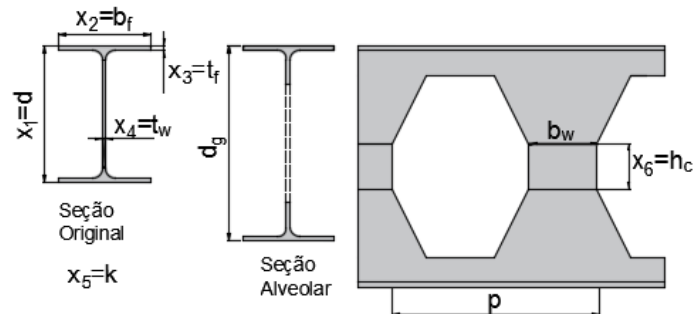


As variáveis para vigas casteladas são:

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).

Figura 2 - Variáveis do problema vigas celulares



2.2 Função objetivo

2.2.1 Vigas Celulares

O peso do perfil celular de aço varia de acordo com a seção transversal (A_a), o diâmetro das aberturas (D_0) e o número de aberturas por metro (n). Uma viga alveolar apresenta variações de seção ao longo do comprimento, dificultando o estabelecimento de uma equação para o cálculo de seu volume. Com essa mudança constante de seção é conveniente calcular o volume de aço da viga celular (V_a) como o volume de uma viga de alma cheia (V_t) e descontar o volume das aberturas (nV_v) como mostra a Eq.(1).

$$V_a = V_t - nV_v \quad (1)$$

O volume de aço de uma viga de alma cheia, com altura do perfil expandido será dado pelo produto entre a área da seção de aço (A_a) e seu comprimento, Eq.(2). As expressões serão desenvolvidas para comprimento unitário.

$$V_t = A_a \cdot 1 = 2b_f t_f + (d_g - 2t_f)t_w \quad (2)$$

O volume de uma abertura circular é dado por

$$V_v = \frac{\pi D_0^2}{4} \cdot 1 \quad (3)$$

Em uma unidade de comprimento teremos um número (n) de aberturas dado em função do tamanho de um passo (p), que é a distância entre o centro de duas aberturas consecutivas.

$$n = \frac{1}{p} \quad (4)$$

Substituindo as Equações (2), (3) e (4) na Equação (1) temos:

$$V_a = 2b_f t_f + (d_g - 2t_f)t_w - n \frac{\pi D_0^2}{4} \quad (5)$$

Assim, o peso (P_a) de uma unidade de comprimento é expresso por.

$$P_a = \left(2b_f t_f + (d_g - 2t_f)t_w - n \frac{\pi D_0^2}{4} \right) \cdot \rho_a \quad (6)$$

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

O diâmetro das aberturas pode ser expresso por

$$\mu = \frac{D_0}{d} \Rightarrow D_0 = \mu \cdot d \quad (7)$$

Onde μ é a uma das variáveis de projeto que representa a razão entre o diâmetro dos alvéolos e a altura do perfil. O tamanho de um passo pode ser definido por:

$$\eta = \frac{p}{D_0} \Rightarrow p = \eta D_0 = \eta \mu d \quad (8)$$

Com isso, o número de aberturas em uma unidade de comprimento, será expresso

$$n = \frac{1}{\eta \mu d} \quad (9)$$

A altura de um perfil de aço expandido, pode ser escrita através das variáveis de projeto da seguinte forma:

$$d_g = d + \sqrt{\left(\frac{d\mu}{2}\right)^2 - \left(\frac{d\mu(\eta - 1)}{2}\right)^2} \quad (10)$$

Substituindo as Equações (7), (9) e (10) na Eq.(6), encontra-se o peso de aço em função das variáveis do problema:

$$P_a = \left(2b_f t_f + \left(d + \sqrt{\left(\frac{d\mu}{2} \right)^2 - \left(\frac{d\mu(\eta - 1)}{2} \right)^2} - 2t_f \right) t_w - \frac{1}{\eta \mu d} \cdot \frac{\pi(\mu \cdot d)^2}{4} \right) \cdot \rho_a \quad (11)$$

Que será a função objetivo que este trabalho irá utilizar nos problemas de otimização do peso da viga alveolar para minimizá-la de acordo com cada situação de solicitações.

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.

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 Funções de restrição

2.3.1 Critério dos limites geométricos:

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 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 empregados em Lubke (2017), os mesmos critérios são utilizados tanto para vigas celulares quanto para as vigas casteladas.

A formação de mecanismo Vierendeel, Equação (38), compara o momento fletor de plastificação da seção (M_{pl}), ponderado com o respectivo coeficiente de resistência (γ_{a1}) com o momento solicitante nos cordões (M_{Sdx}).

Para escoamento do montante da alma por cisalhamento, Equação (39), é realizada uma comparação entre o esforço cortante resistente devido ao escoamento do montante de alma por cisalhamento (V_{Rd1}) e o valor do esforço cortante solicitante (V_{Sd}). Para o escoamento do montante da alma por flexão, Equação (40), são comparados o esforço cortante resistente devido ao escoamento do montante de alma por flexão (V_{Rd2}) e o valor do esforço cortante solicitante (V_{Sd}). Para a flambagem lateral do montante da alma, Equação (41), são comparados os valores do esforço cortante admissível (V_{ad}) e o valor do esforço cortante solicitante (V_{Sd}).

Para a flambagem lateral com torção, Equação (42) são comparados o momento fletor resistente (M_{Rd}), com o Momento fletor solicitante para a seção (M_{Sd}) e para o deslocamento excessivo, Equação (43), são comparadas a flecha existente (f) e a flecha admissível (f_{adm}).

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

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

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

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

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

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

2.5 Definição do problema de otimização

2.5.1 Vigas celulares

Deseja minimizar:

$$P_a = \left(2b_f t_f + \left(d + \sqrt{\left(\frac{d\mu}{2} \right)^2 - \left(\frac{d\mu(\eta - 1)}{2} \right)^2} - 2t_f \right) t_w - \frac{1}{\eta \mu d} \cdot \frac{\pi(\mu \cdot d)^2}{4} \right) \cdot \rho_a$$

**Erro!
Fonte
de
referê
ncia
não
encon
trada.**

Sujeito a:

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

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

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

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

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

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

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

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

$$b_{w,min} \leq b_w \leq 0,75x_1x_5 \quad (34)$$

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

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

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

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

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

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

Para sistemas de piso: $0,8 \leq x_5 \leq 1,1$ (27)

$$1,2 \leq x_6 \leq 1,7 \quad (28)$$

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

Para sistemas de cobertura: $1,0 \leq x_5 \leq 1,3$ (30)

$$1,1 \leq x_6 \leq 1,3 \quad (31)$$

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

2.5.2 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, 2017). A partir dos resultados obtidos, determinou-se que o método da Programação Quadrática Sequencial foi o que melhor se adequou à proposta deste trabalho apresentando convergência mais rápida para o problema estudado, reduzindo assim o esforço computacional necessário para a resolução do mesmo.

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.

Para o programa de otimização desenvolvido, buscando simplificar o algoritmo e encontrar uma solução independente do resultado obtido pelo dimensionamento convencional de optou-se por utilizar como solução inicial para todos os casos o menor perfil da tabela de perfis.

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. A Figura 3 apresenta a tela do programa desenvolvido.

Figura 3 - Entrada de dados do programa de otimização

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 Tabelas 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	Redução percentual
	Peso Original (kg/m)	Peso Original (kg/m)	
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	Redução percentual
	Peso Original (kg/m)	Peso Original (kg/m)	
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%

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 Litzka, Tabela 7, a utilização das chapas expansoras tornou a redução percentual ainda menor, dentre os exemplos desenvolvidos a redução percentual máxima foi de 15,36% para sistemas de piso e 24,89% em sistemas de cobertura.

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%

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. A

utilização de outros pontos de partida como solução inicial do problema, poderia gerar resultados diferentes, tratando o problema de mínimos locais.

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.

A Tabela 10 mostra os pesos encontrados pelo programa de dimensionamento para cada um dos exemplos. Neste caso a variação dos pesos não obedece diretamente ao padrão de vigas

estabelecido, entretanto há uma tendência de pesos menores para os perfis onde ocorreu a utilização de chapas expansoras e pesos maiores para aqueles onde este tipo de chapa não foi utilizada.

Tabela 10 – Pesos encontrados pelo programa de dimensionamento em kg/m.

		Sem Chapa Expansora			Com Chapa Expansora		
	Celular	Peiner	Litzka	Anglo-saxão	Peiner	Litzka	Anglo-saxão
Viga 1	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00
Viga 2	29,80	26,60	26,60	26,60	23,90	23,90	26,60
Viga 3	53,00	52,00	52,00	51,00	46,94	46,94	51,00
Viga 4	79,00	79,00	79,00	85,00	79,00	75,02	85,00
Viga 5	155,00	155,00	155,00	140,00	116,73	110,64	123,09
Viga 6	174,00	174,00	174,00	174,00	160,00	161,32	157,24
Viga 7	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00
Viga 8	22,50	22,50	22,50	22,50	22,50	22,50	22,50
Viga 9	41,70	44,50	44,50	41,70	40,53	40,91	39,80
Viga 10	73,00	73,00	73,00	73,00	72,77	67,29	71,90
Viga 11	107,00	107,00	115,00	107,00	107,00	107,19	107,00
Viga 12	174,00	174,00	174,00	174,00	174,00	174,00	159,55

De forma geral pode-se dizer que a utilização das chapas expansoras permite a redução de peso dos perfis utilizados. Essas chapas promovem um acréscimo na capacidade resistente do perfil e tornando-os mais leves e aptos a resistir às solicitações que não seriam capazes de suportar sem a utilização das mesmas.

3.3 Análise dos modos de colapso como restrições ativas no processo de otimização

A definição das restrições é de fundamental importância para a resolução do problema proposto em todo processo de otimização. No desenvolvimento do programa descrito neste trabalho, os modos de colapso de vigas alveolares foram utilizados como restrições, no entanto é comum que apenas alguma destas restrições figure como restrição ativa e governe o dimensionamento

deste perfil. Neste sentido buscou-se estabelecer, para os exemplos desenvolvidos, quais as restrições ficaram ativas para conhecer melhor o comportamento das vigas estudadas.

A menor viga dimensionada para cada um dos tipos disponíveis apresentou como solução o menor perfil possível de acordo com as restrições geométricas estabelecidas, e nenhum dos modos de colapso figurou como restrição ativa. Uma vez que a menor viga apresenta como restrição as limitações geométricas, a eliminação destas restrições permite encontrar como solução perfis ainda mais leves, entretanto seria necessário um tratamento dos dados afim de evitar perfis com dimensões que impossibilitariam a fabricação, ou sujeitos a novos modos de colapso em função da alteração da geometria.

Excetuando-se essa menor viga, serão discutidos os modos de colapso que governaram o dimensionamento de cada um dos tipos de viga otimizados.

Figura 8 - Gráfico percentual de vigas de piso versus modos de colapso

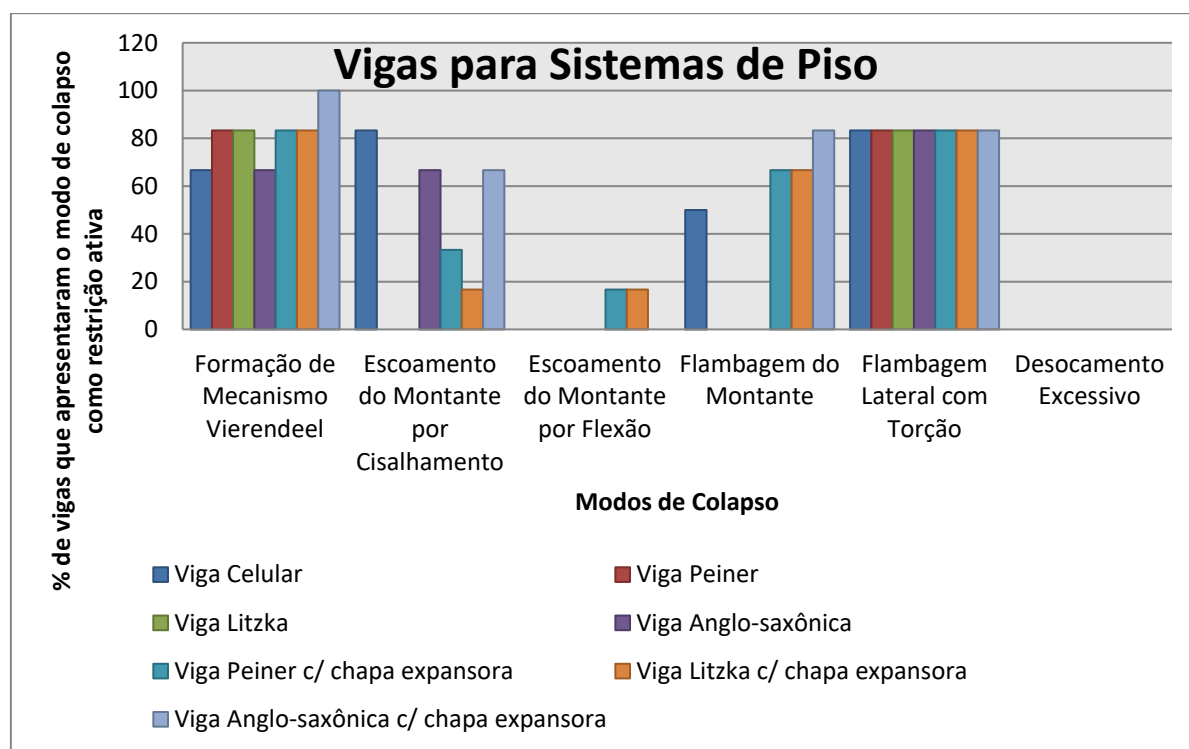
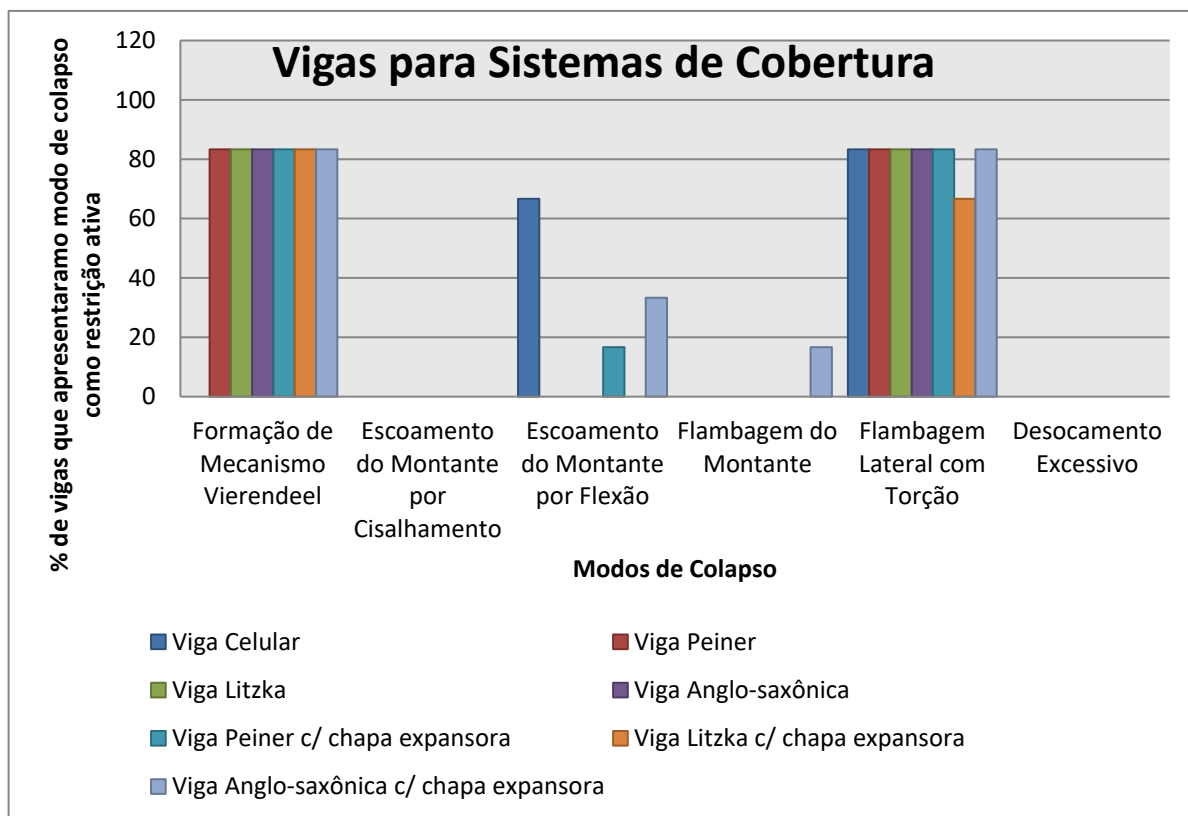


Figura 9 – Gráfico percentual de vigas de cobertura versus modos de colapso



Para todos os tipos de viga otimizados nos exemplos, os modos de colapso de formação de mecanismo Vierendeel e a flambagem lateral com torção figuraram como restrições ativas na grande maioria dos casos, o que indica que estes modos de colapso requerem mais estudo e atenção do projetista quando optar pela utilização de seções otimizadas. Adicionalmente em vigas projetadas para sistemas de piso, o escoamento do montante por cisalhamento e a flambagem do montante também aparecem frequentemente como restrição ativa no processo de otimização das vigas alveolares. Já em sistemas de cobertura o escoamento do montante da alma por flexão apareceu como restrição ativa em uma grande parcela dos casos otimizados. Desta forma é possível concluir que os modos de colapso por formação de mecanismo Vierendeel e por flambagem lateral com torção são aqueles que mais requerem atenção dos projetistas, já que na maioria dos casos estes modos de colapso governam o dimensionamento das vigas alveolares otimizadas.

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 Merchan 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**. Revista da Estrutura de Aço – REA, Vol. 6, No. 1, pag. 01-20, 2017

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.

Optimum Design and Failure Modes Analysis of Steel Alveolar Beams

Open web-expanded steel beams are structural members obtained from the cutting of a given profile and welding the parts in sequence. As result of this process, a new element is obtained with its increased resistance capacity compared to the original. These openings, together with the increase in useful height of the profile, become this type of beam susceptible to new forms of collapse. The objective of this work is to present the formulation as well as the system developed for the optimized design of alveolar steel beams. The system was developed on the Matlab platform using the guide tool and the optimization problem solution is obtained by sequential quadratic programming. In this paper, the Cimadevila formulation (2000) is applied for the optimization problem formulation. Lubke, Alves e Azevedo (2017) presents the optimization formulation problem to steel celular beams using differents methods to analyse the problem solution. The software was developed in the Matlab program and it's based on formulations proposed by Cimadevilla (2000), Silveira (2011) and Veríssimo et al. (2012) since ABNT NBR 8800: 2008 does not include within its text the dimensioning of alveolar beams. Numerical examples are presented to validate the formulation. A comparative analysis is made to show the different solutions for the different patterns of alveolar beams as well as to point out the best solution and an analysis in the modes of preponderant collapse for the problems analyzed is presented. For beams with small spans, no collapse mode was shown to be active, but when the problems is analyzed to larges beams, it can be observed that the formation of the Vierendel mechanism and lateral buckling with torsion were the active modes. The results show that a better solution can be obtained when optimization techniques are applied to the problem.

Keywords: *Steel structure; Design; Alveolar; Beams; Optimization.*

CONCLUSIONS

It is possible to perceive that there is a great number of problems in the area of structure design in which the optimization technique can be applied, since the goal of all design is always to obtain a structure with lower cost, weight and other factors that can be maximized or minimized. The sophistication of the theme will be in the modeling process more adequate to the possible

reality, seeking to generate more satisfactory results and greater comprehensiveness of its applicability.

A detailed analysis of the results found, demonstrates that the development of techniques for optimization of alveolar steel beams is of fundamental importance for the development of the theme in the country. The results show that there is a possibility of substantially reducing the weight of the steel structures from the use of alveolar profiles, and in the examples presented, there was a reduction of more than 30% of the weight in one of the analyzed profiles, generating savings and minimizing waste of resources.