

Análise dos modos de colapso no dimensionamento ótimo de vigas alveolares via algoritmos genéticos

Analysis of collapse modes in the optimum design of alveolar steel beams by genetic algorithm

Elcio Cassimiro Alves
Tiago Cetto Pietralonga

Resumo

A aplicação de estruturas de aço no Brasil cresceu bastante nos últimos anos, não apenas em setores industriais, tal como galpões e grandes depósitos, mas também em edifícios com um elevado número de pavimentos. Com isto, novas soluções na área passaram a ser mais estudadas, tal como as vigas de aberturas sequenciais na alma (alveolares) que são formadas por perfis laminados tipo "I" ou "H" previamente cortados na alma para o padrão estabelecido e posteriormente deslocados na longitudinal para soldá-los, aumentando assim a capacidade resistente à flexão sem que haja acréscimo de peso ao perfil. Além disto, estes perfis apresentam uma grande vantagem para as instalações tais como elétricas e hidrossanitárias, pois a passagem pela alma dos perfis não fica restringida. O objetivo deste trabalho é realizar uma análise e comparação do dimensionamento otimizado de vigas de aço casteladas e celulares por meio de algoritmo genético (AG) em um sistema implementado no MATLAB. O processo de otimização é de grande relevância na elaboração de projetos menos onerosos, visto que é encontrada uma solução com menor consumo de aço para atender todos os requisitos estabelecidos em normas e resistir aos esforços atuantes. Para validar e mostrar a aplicabilidade do problema proposto foi analisado o dimensionamento de 12 vigas alveolares (cobertura e piso) para cada tipo de corte, celular e castelado (Peiner, Litzka, Anglo-Saxão), observando-se o peso linear dos perfis otimizados e os modos de colapso que governam o seu dimensionamento.

Abstract

The application of steel structures in Brazil has grown considerably in recent years, not only in industrial sectors, such as large warehouses, but also in buildings with a high number of floors. With this, new solutions in the field have become more studied, such as beams of sequential openings in the web (alveolar) that are formed by "I" or "H" laminated profiles previously cut in the web to the established standard and later displaced in the longitudinal to weld them, thus increasing the capacity resistant to bending stress without adding weight to the profile. Moreover, these profiles have a great advantage to the installations, such as electrical and plumbing systems, because the journey by web is not restricted. The objective of this work is to perform an analysis and comparison of the optimized sizing of castellated and cellular steel beams by means of genetic algorithm (AG) in a system implemented in the MATLAB. The optimization process is of great relevance in the elaboration of less expensive projects, whereas is found a solution with smaller steel consumption to comply with all requirements established in standards and resist to the active loads. To validate and show the applicability of the proposed problem, was analyzed the design of 12 alveolar beams (roof and floor) for each type of cut, cellular and castellated (Peiner, Litzka, Anglo-Saxon), observing the linear weight of optimized profiles and the collapse modes that govern their design.

Palavras-chave: Casteladas / Celulares / Dimensionamento / Otimização / Algoritmo genético

Keywords: Castellated / Cellular / Optimization / Sizing / Genetic algorithm

Elcio Cassimiro Alves

Doutor Engenharia e Tecnologias Espaciais
Universidade Federal do Espírito Santo
Vitória – ES – Brasil
elcio.calves1@gmail.com

Tiago Cetto Pietralonga

Graduando em Engenharia Civil
Universidade Federal do Espírito Santo
Vitória – ES – Brasil
tiagocettopietralonga@gmail.com

1 Introdução

A aplicação de estruturas de aço cresceu bastante nos últimos anos, não apenas em setores industriais, tal como galpões e grandes depósitos, mas também em edifícios com um elevado número de pavimentos, detendo diversas vantagens.

Uma característica muito marcante das estruturas metálicas é que as mesmas são prefabricadas, e posteriormente levadas e montadas no devido local, o que de fato agiliza o processo construtivo assim como reduz a utilização de recursos com mão de obra. Ademais, tem-se uma excelente qualidade, os elementos seguem rigorosamente o projeto e possuem imperfeições mínimas. O que gera uma obra com pouquíssimos desperdícios, podendo ser até nulos quando a estrutura é totalmente em aço.

Desta forma, com o agravante crescimento na utilização de aço, soluções com vigas de aberturas sequenciais na alma têm sido utilizadas a fim de melhorar a eficiência, sendo conhecidas por vigas alveolares, classificadas em celulares e casteladas.

Os perfis castelados de aço são formados por perfis laminados tipo "I" ou "H", por meio de cortes em ziguezague ao longo da alma e sem perda de material, já no caso das celulares os cortes são circulares e há pouca perda. Com as duas metades obtidas faz-se o deslocamento e então são soldadas entre si. Com isto, obtém-se uma viga cerca de 50% mais alta, sem acréscimo de peso ao perfil, aumentando a capacidade resistente à flexão, visto que tem-se o aumento do momento de inércia e da rigidez à flexão da seção transversal. Todos esses processos, tanto para a viga castelada quanto para a alveolar, podem ser melhor compreendidos na Figura 1. Além disto, estes perfis apresentam uma grande vantagem para as instalações complementares, tais como elétrica e hidrossanitária, visto que a passagem pela alma dos perfis é facilitada.

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

ALVES, E.C. [et al.] – Análise dos modos de colapso no dimensionamento ótimo de vigas alveolares via algoritmos genéticos. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 12. ISSN 2183-8488. (março 2020) 17-32.

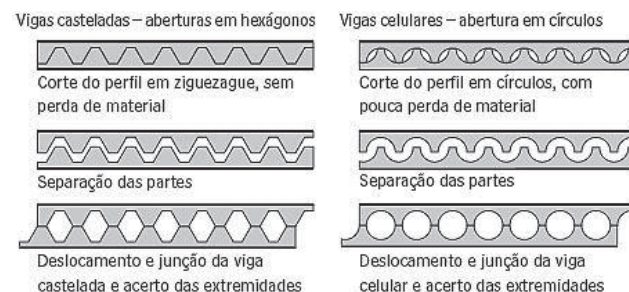


Figura 1 Fabricação de vigas casteladas e alveolares. Fonte: Tamaki (2010)

Um desenvolvimento teórico sobre os aspectos de cálculo, tanto para esforços resistentes quanto para o cálculo de deformações foi descrito em 2000 por [1] em sua obra. Estabelecendo assim equações consistentes para o dimensionamento das vigas alveolares de aço.

Um estudo sobre a capacidade última de carregamento de vigas de aço celulares otimamente dimensionadas foi elaborado em 2011 por [2], tendo realizado ensaios em protótipos de vigas celulares variando as dimensões dos perfis de aço. Para tal utilizou-se o método de dimensionamento da norma britânica de projeto de aço [3] e para o procedimento de otimização foi realizada a busca harmônica.

Um método para a determinação do momento fletor resistente nominal de vigas casteladas, de padrão Peiner e anglo-saxônico foi proposto em 2011 por [4], para o estado-limite último de flambagem lateral com torção, para as situações 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.

Um estudo sobre o momento fletor resistente à flambagem lateral com torção de vigas celulares, duplamente simétricas, biapoiadas, por intermédio do método dos elementos finitos foi realizado em 2011 por [5]. Nesse estudo, os resultados são comparados com os obtidos por um método de cálculo em que se usa o procedimento da norma brasileira de projeto de estruturas de aço [6] para vigas de alma cheia em conjunto com a recomendação da norma britânica de projeto de aço [3].

Uma análise numérica para avaliar o comportamento de vigas alveolares de aço ressaltando os modos de colapso por plastificação foi feita por [7]. No seu estudo foram desenvolvidos modelos numéricos para vigas alveolares obtidas por meio de perfis brasileiros, para a observação dos modos de colapso e do carregamento último.

Um estudo analítico-numérico generalizado e com o objetivo de reavaliar o comportamento de vigas alveolares com variadas geometrias, incluindo as obtidas a partir dos perfis laminados produzidos no Brasil a partir de 2002 foi realizado por [8], propondo um procedimento para dimensionamento dessas vigas.

O comportamento das vigas celulares de aço em relação à flambagem lateral com torção foi estudado por [9], 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, foi feita uma abordagem de projeto preliminar.

O modelo algoritmo genético foi utilizado na otimização do peso dos pórticos formados por estruturas de aço com ligações semirrígidas por meio de uma implementação feita por [10] no MATLAB. Aqui conclui-se que em uma análise não linear obteve-se menos consumo de aço do que na linear, quando analisados pequenos pórticos, já para maiores foi o contrário.

Formulação e exemplos de aplicação do problema de otimização para vigas celulares de aço foram apresentados no estudo de [11]. Neste foi feita uma análise comparativa entre os métodos de otimização com programação quadrática sequencial, algoritmo genético e um programa comercial.

Um estudo sobre falhas por formação de mecanismo Vierendeel em vigas casteladas de aço utilizando o método de elementos finitos foi desenvolvido por [12], que analisaram os impactos das dimensões e os formatos dos cortes diante da formação deste modo de colapso. Além dos padrões de corte analisados: circular, hexagonal, retangular e angelina, propuseram um formato de corte diferente destes tradicionais. Os estudos indicaram que a viga alveolar circular detém a mais alta capacidade de carga tratando-se de falhas por formação do mecanismo Vierendeel.

Um estudo de otimização do custo de pavimento formado por vigas de aço casteladas utilizando como método o algoritmo genético foi apresentado por [13] em 2018. A função do custo foi definida usando

lista de preço para os diferentes componentes do sistema, sendo que utilizou-se como parâmetro de otimização no dimensionamento o número de divisões no piso, a dimensão da abertura hexagonal na alma da viga, assim como o seu número de aberturas. Os resultados demonstraram que não houve efeito significativo na composição de custos devido às mudanças no número de divisões do piso e de aberturas na alma da viga, ressaltando-se que este último fator não é recomendado para otimização visto que não afetaria no custo com o material.

Foi desenvolvido um trabalho de otimização de vigas celulares de aço utilizando busca harmônica e enxame de partículas por [14]. A função objetivo tinha como busca minimizar o peso dos perfis por meio de variáveis discretas. A otimização considerou a variação do diâmetro e quantidade dos furos, respeitando sempre as limitações impostas no dimensionamento. Os resultados demonstraram que os dois obtiveram soluções aproximadas.

Análises por meio de otimizações do custo de vigas casteladas, efeito nos parâmetros de soldagem e corte da alma para o processo de fabricação foram feitos por [15]. Diversos parâmetros foram utilizados na otimização, tais como a definição do perfil original, altura do corte, ângulo de corte, distância entre furos. Foram utilizados como métodos de otimização o enxame de partículas e o algoritmo genético, concluindo-se que o primeiro apresentou melhores resultados, ainda que com pouca discrepância.

O método de otimização "Grey Wolf" foi utilizado em um estudo por [16] para analisar e minimizar o custo das vigas casteladas e celulares de aço. Para tal, aplicaram exemplos da literatura para demonstrar a eficiência do algoritmo, demonstrando que o mesmo é um potencial algoritmo para aplicação real e geração de consideráveis resultados. Ademais, foi possível concluir que a utilização de aberturas hexagonais tende a gerar uma redução do consumo de aço quando comparada com aberturas circulares.

As vigas celulares de aço foram estudadas para otimizar-se o peso dos perfis, para tal [17] utilizaram o método de evolução diferencial. Os parâmetros definidos para o processo de otimização eram o diâmetro da abertura circular na alma do perfil e espaçamento entre os mesmos, restringindo-se também aos estados limites últimos, estados de serviços e limitações geométricas. Todo o dimensionamento foi baseado no Eurocódigo 4 (EN 1994-1-1). Além disto, analisou-se a influência dos espaçamentos entre as vigas no sistema de piso, tendo-se como melhor resultado uma distância entre 2 m e 2,5 m.

O objetivo deste trabalho é apresentar a formulação do problema de otimização para vigas alveolares de aço bem como suas aplicações. Para a solução do problema foi utilizado o Método dos Algoritmos Genéticos, por se tratar de um problema discreto. Os resultados são baseados nos estudos de [18], que contava apenas com modelos de otimização para variáveis de domínio contínuo, com isto não utilizando perfis comerciais.

A fim de validar os resultados e demonstrar a eficácia deste estudo, foram utilizadas na otimização 12 vigas alveolares (cobertura e piso) para cada tipo de corte, celular e castelado (Peiner, Litzka, Anglo-Saxônico), observando-se o peso linear dos perfis otimizados e os modos de colapso que tendem a governar o dimensionamento dos mesmos.

2 Dimensionamento de vigas alveolares de aço diante normativas brasileiras

Devido ao fato de as vigas alveolares ainda serem pouco utilizadas no Brasil, o dimensionamento das mesmas ainda não está detalhadamente estabelecido em norma. No entanto, no Anexo I da norma brasileira de projeto de estruturas de aço [6] encontram-se alguns critérios a atender a este caso, tais como:

- Devem ser levados em conta no dimensionamento de vigas de aço e de vigas mistas de aço e concreto os efeitos das aberturas na alma dos perfis.
- No dimensionamento, devem ser verificados os estados-limites últimos e de serviço aplicáveis, considerando a influência das aberturas nas almas das vigas e de eventuais reforços dessas aberturas. Deve ser usado um método que se baseie em princípios reconhecidos da engenharia de estruturas.

Ademais, como supracitado, a inexistência de processos que definam o dimensionamento em norma levou este trabalho a basear os cálculos nos estudos publicados por [19], o qual adota algumas simplificações, avaliadas primordialmente por estudos experimentais.

3 Formulação do problema

O dimensionamento otimizado por meio de algoritmo genético das vigas alveolares de aço envolve diversas variáveis contínuas e discretas, estabelecidas pelos perfis comerciais, assim como restrições para se obedecer aos critérios de dimensionamento originados nas pesquisas feitas até então.

Com o objetivo de reduzir o peso do perfil dimensionado adotou-se todo o catálogo de perfis da Gerdau e os critérios de dimensionamentos de [19], buscando-se encontrar soluções que atendem aos esforços solicitantes (permanentes e variáveis). Desta forma, tem-se a seguir a definição das variáveis utilizadas, a função objetivo, as restrições e os principais destaques no dimensionamento otimizado por meio do programa computacional de vigas alveolares de aço.

3.1 Variáveis do problema

A priori é fundamental definir-se as principais variáveis relacionadas ao peso e resistência no dimensionamento de vigas alveolares de aço, visto que o primeiro é o objetivo da otimização. A Figura 2 apresenta as variáveis de otimização para o problema envolvendo vigas celulares.

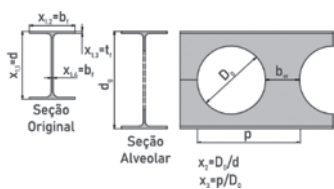


Figura 2 Variáveis do problema vigas celulares

Onde:

- x_1 = Dimensões do perfil (variável discreta);
- $x_{1,1}$ = Altura do perfil de aço (d);
- $x_{1,2}$ = Largura da mesa do perfil de aço (b_f);
- $x_{1,3}$ = Espessura da mesa do perfil de aço (t_f);
- $x_{1,4}$ = Espessura da alma do perfil de aço (t_w);
- x_2 = Razão entre o diâmetro dos alvéolos e a altura do perfil ($\mu = D_o/d$);
- x_3 = Razão entre o passo e o diâmetro dos alvéolos ($\eta = p/D_o$).

Por outro lado, a Figura 3 apresenta as variáveis do problema de otimização para vigas casteladas.

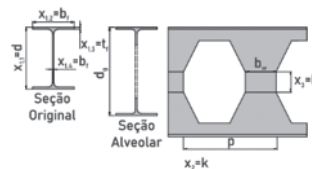


Figura 3 Variáveis do problema vigas casteladas

Onde:

- x_1 = Dimensões do perfil (Variável discreta);
- $x_{1,1}$ = Altura do perfil de aço (d);
- $x_{1,2}$ = Largura da mesa do perfil de aço (b_f);
- $x_{1,3}$ = Espessura da mesa do perfil de aço (t_f);
- $x_{1,4}$ = Espessura da alma do perfil de aço (t_w);
- x_2 = Razão de expansão (k);
- x_3 = Altura da chapa expansora (h_c).

3.2 Função objetivo

3.2.1 Vigas Celulares

Devido às aberturas sequenciais na alma do perfil é difícil estabelecer uma equação para o cálculo de seu volume de aço. Sendo assim, o peso do mesmo irá variar de acordo com a seção transversal (A_a), o diâmetro das aberturas (D_o) e o número de aberturas por metro (n).

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

Desta forma, um método a ser utilizado para o cálculo do volume de aço da viga celular (V_a) é obter o volume de uma viga de alma cheia (V_t) e subtrair o volume das aberturas (nV_v), como mostra a Equação (1).

Com a altura do perfil expandido (quando constituído por chapa expansora), espessuras de alma e mesa, assim como largura de mesa é possível definir o volume de aço por determinada unidade de medida, podendo ser definido então por um comprimento unitário vezes a área da seção transversal (A_a), tal como a Equação (2).

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

O volume de uma abertura de viga celular (abertura circular) é dado por:

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

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

Ainda em relação às aberturas, pode-se definir o tamanho de um passo (p), que é a distância entre o centro de duas aberturas consecutivas, formando então a seguinte razão, que define um número (n) de aberturas por unidade de comprimento.

Substituindo as Equações (2), (3) e (4) na Equação (1) tem-se:

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

Desta forma, 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, que para este estudo se utilizou 7850 kg/m^3 .

O diâmetro das aberturas pode ser expresso por:

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

sendo que μ é uma variável de projeto definida pela razão entre o diâmetro dos alvéolos e a altura do perfil.

Pode-se assim definir o tamanho de um passo por:

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

Substituindo (8) em (4), tem-se o número de aberturas em uma unidade de comprimento expresso por:

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

Com isto, a altura de um perfil de aço expandido pode ser equacionada por meio de variáveis de projeto da seguinte forma:

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

Fazendo-se a substituição das Equações (7), (9) e (10) na Equação (6), encontra-se o peso de aço em função das variáveis do problema:

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

equação utilizada na otimização do peso da viga alveolar, junto ao seu dimensionamento, buscando-se reduzir ao máximo o consumo de aço, mas sempre atendendo aos esforços solicitantes vigentes.

3.2.2 Vigas casteladas

Devido ao método de fabricação das vigas casteladas, tal como na Figura 1, os cortes não geram perdas de material, já que há apenas uma linha de corte na alma do perfil. No entanto, pode-se empregar chapas expansoras para aumentar a altura da viga, assim como a inércia, o que ocasionaria um determinado acréscimo de peso.

Sendo assim, o volume de aço unitário para um perfil castelado é definido pelo somatório do volume de aço do perfil original (V) e do volume de aço das chapas expansoras (V_{ch}) utilizadas na viga.

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

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

O número de chapas expansoras em um comprimento unitário da viga (n) é dado pela Equação (12). Sendo p o comprimento de um passo e o volume de aço da mesma é definido pela Equação (13).

De forma similar à viga celular, na castelada o volume do perfil de alma cheia (V) é dado pelo produto entre a área da seção de aço e o comprimento, adotando-se na Equação a seguir um comprimento unitário.

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

Com isto, tem-se o volume total para um comprimento unitário da viga castelada, o qual é dado pela Equação (15).

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

Fazendo-se a substituição das Equações (12), (13) e (14) na Equação (15), tem-se:

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

Por conseguinte, com o produto de V_a com a massa específica do aço, tem-se P_a , formando a função objetivo das vigas casteladas, a qual é utilizada para minimizar o peso de aço dos perfis no dimensionamento ótimo.

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

3.3 Funções de restrição

3.3.1 Critério dos limites geométricos

Como supracitado, no processo de otimização pelo método algoritmo genético foram utilizados os perfis comerciais da tabela de perfis I da Gerda Aço Minas, desprezando a utilização de variáveis contínuas para obter as dimensões do perfil, exceto para tamanho das chapas expansoras. Sendo assim, não há restrição do problema para as dimensões (d , b_f , t_f e t_w).

3.3.2 Vigas celulares

Por meio do catálogo de perfis alveolares foi possível estabelecer restrições para os sistemas de piso e cobertura, tratando-se das

seguintes razões: o passo e o diâmetro das aberturas, diâmetro das aberturas e a altura do perfil original, e a relação da expansão do perfil.

A formulação que define o cálculo da razão de expansão (k) é dada pela razão entre a altura do perfil alveolar (d_g) e a altura do perfil original (d). Podendo, assim, ser reformulada em função das variáveis de projeto.

$$k = \frac{d_g}{d} = \frac{d + \sqrt{\left(\frac{d\mu}{2}\right)^2 - \left(\frac{d\mu(\eta-1)}{2}\right)^2}}{d} \quad (18)$$

Para sistemas de piso tem-se como restrições as inequações (19), (20) e (21).

$$0,8 \leq \mu \leq 1,1 \quad (19)$$

$$1,2 \leq \eta \leq 1,7 \quad (20)$$

$$1,3 \leq k \leq 1,4 \quad (21)$$

Para sistemas de cobertura tem-se como restrições as inequações (22), (23) e (24)

$$1,0 \leq \mu \leq 1,3 \quad (22)$$

$$1,1 \leq \eta \leq 1,3 \quad (23)$$

$$1,4 \leq k \leq 1,6 \quad (24)$$

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

$$b_{w,\min} = \text{maior} \begin{cases} \frac{D_0}{12} = \frac{d\mu}{12} \\ 50 \text{ mm} \end{cases} \quad (25)$$

$$b_{w,\min} \leq b_w \leq 0,75 D_0 = 0,75 d\mu \quad (26)$$

3.3.3 Vigas casteladas

Em relação às vigas casteladas, é preciso definir como restrição a razão de expansão máxima possível para o perfil. Essa restrição foi estabelecida considerando que a maior expansão possível, sem a adição de chapas expansoras, será quando a altura livre da alma do perfil expandido for o dobro da altura livre da alma do perfil original.

$$d_g - 2t_f - 2r \leq 2(d - 2t_f - 2r) \quad (27)$$

Reformulando:

$$d_g \leq 2d - 2t_f - 2r \quad (28)$$

Como $k = d_g/d$, pode ser substituído e formada a seguinte restrição:

$$k \leq \frac{2d - 2t_f - 2r}{d} \quad (29)$$

3.4 Critério da resistência

A fim de que a estrutura seja dimensionada com segurança é fundamental que sejam respeitados os critérios de estado limite

último, possibilitando assim que a estrutura resista aos esforços solicitantes previamente analisados e majorados. Para este estudo de vigas alveolares foram utilizados os critérios de dimensionamento empregados por [18], tanto nos dimensionamentos ótimos das vigas celulares quanto das casteladas.

A formação de mecanismo Vierendeel, Equação (30), compara o momento fletor de plastificação da seção (M_{pl}), aplicando o coeficiente de resistência (γ_{a1}) ao momento solicitante nos cordões (M_{sdx}).

$$\frac{M_{pl} / \gamma_{a1}}{M_{sdx}} - 1 \geq 0 \quad (30)$$

Já para o escoamento do montante da alma por cisalhamento, Equação (31), tem-se 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}).

$$\frac{V_{Rd1}}{V_{sd}} - 1 \geq 0 \quad (31)$$

Para o escoamento do montante da alma por flexão, Equação (32), é verificado o esforço cortante resistente devido ao escoamento do montante de alma por flexão (V_{Rd2}), sujeito ao esforço cortante solicitante (V_{sd}).

$$\frac{V_{Rd2}}{V_{sd}} - 1 \geq 0 \quad (32)$$

Tratando-se da flambagem lateral do montante da alma, Equação (33), tem-se a comparação dos valores do esforço cortante admissível (V_{ad}) e o valor do esforço cortante solicitante (V_{sd}).

$$\frac{V_{ad}}{V_{sd}} - 1 \geq 0 \quad (33)$$

Para a flambagem lateral com torção, Equação (34), são comparados o momento fletor resistente (M_{Rd}) com o momento fletor solicitante para a seção (M_{sd}).

$$\frac{M_{Rd}}{M_{sd}} - 1 \geq 0 \quad (34)$$

Em relação ao estado limite de serviço, tem-se a verificação do deslocamento excessivo, Equação (35), onde há a comparação da flecha existente (f) e a flecha admissível (f_{adm}).

$$\frac{f_{adm}}{f} - 1 \geq 0 \quad (35)$$

3.5 Definição do problema de otimização

A fim de analisar a aplicabilidade da otimização pelo método de algoritmo genético no dimensionamento de vigas alveolares, aplicou-se alguns exemplos no software Matlab R2018a, o qual já possui os pacotes de otimização disponível para uso. Diante dos problemas propostos, foi possível observar que o AG foi computacional eficaz, gerando convergências em um curto tempo.

3.5.1 Vigas celulares

A otimização das vigas celulares pelo método Algoritmo Genético foi realizada com o objetivo de minimizar a seguinte função:

$$P_a = \left(2b_f t_f + \left(d + \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - \left(\frac{d\mu(\eta-)}{2}\right)} - 2t_f \right) t_w - \frac{\pi(\mu \cdot d)}{4} \right) \cdot \rho_a \quad (36)$$

Estando a função sujeita a estas restrições:

$$\frac{M_{pl} / \gamma_{a1}}{M_{sdk}} - 1 \geq 0 \quad (37)$$

$$\frac{V_{Rd1}}{V_{sd}} - 1 \geq 0 \quad (38)$$

$$\frac{V_{Rd2}}{V_{sd}} - 1 \geq 0 \quad (39)$$

$$\frac{V_{ad}}{V_{sd}} - 1 \geq 0 \quad (40)$$

$$\frac{M_{Rd}}{M_{Sd}} - 1 \geq 0 \quad (41)$$

$$\frac{f_{adm}}{f} - 1 \geq 0 \quad (42)$$

Para sistemas de piso:

$$0,8 \leq x_5 \leq 1,1 \quad (43)$$

$$1,2 \leq x_6 \leq 1,7 \quad (44)$$

$$1,3 \leq k \leq 1,4 \quad (45)$$

Para sistemas de cobertura:

$$1,0 \leq x_5 \leq 1,3 \quad (46)$$

$$1,1 \leq x_6 \leq 1,3 \quad (47)$$

$$1,4 \leq k \leq 1,6 \quad (48)$$

3.5.2 Vigas casteladas

Em relação às vigas casteladas, o algoritmo genético otimizou o peso do perfil dimensionado por meio da Equação (49):

$$P_a = \left(2b_f t_f + (d - 2t_f) t_w + \frac{1}{\rho} \cdot b_w t_w h_c \right) \cdot \rho_a \quad (49)$$

Contando com as seguintes restrições:

$$k \leq \frac{2d - 2t_f - 2r}{d} \quad (50)$$

$$\frac{M_{pl} / \gamma_{a1}}{M_{sdk}} - 1 \geq 0 \quad (51)$$

$$\frac{V_{Rd1}}{V_{sd}} - 1 \geq 0 \quad (52)$$

$$\frac{V_{Rd2}}{V_{sd}} - 1 \geq 0 \quad (53)$$

$$\frac{V_{ad}}{V_{sd}} - 1 \geq 0 \quad (54)$$

$$\frac{M_{Rd}}{M_{Sd}} - 1 \geq 0 \quad (55)$$

$$\frac{f_{adm}}{f} - 1 \geq 0 \quad (56)$$

4 Programa computacional

O desenvolvimento do programa para o dimensionamento ótimo das vigas por meio do algoritmo genético foi implementado no Matlab R2018a, adicionando este método ao programa de dimensionamento desenvolvido e apresentado por [18] e [20], o qual foi formulado no Matlab 2013, no entanto apresentava apenas otimizações com variáveis contínuas para as dimensões dos perfis, por meio dos métodos de otimização Programação Quadrática Sequencial (PQS) e Pontos Interiores (PI), considerando-se assim diversas soluções que não são de perfis comerciais.

O programa computacional desenvolvido tem como base formulações propostas por [1], [7] e [8], visto que a norma brasileira de projeto de estruturas de aço [6] não possui critérios para o dimensionamento especificamente para as vigas alveolares.

Tal como supracitado, neste novo processo de otimização implementado utiliza-se apenas variáveis discretas para as dimensões dos perfis, adotando-se então apenas as dimensões comerciais. Com isto, buscando reduzir o tempo de execução e simplificar o algoritmo, adotou-se como solução inicial o perfil de menor peso, visto que a função objetivo a ser minimizada é referente ao peso do perfil.

A Figura 4 demonstra o painel inicial de entrada de dados do programa de otimização de vigas alveolares, onde o usuário deve definir a seu critério alguns parâmetros, de materiais, geométricos e considerações de projetos.

Na Figura 5 tem-se o painel apresentado após a conclusão do processo de otimização do programa com o perfil ótimo obtido para o problema.

Também na Figura 5, tem-se o quadro “Pesos” que demonstra o peso do perfil original e do perfil alveolar, considerando-se as perdas por corte do perfil na alma, para os casos de perfis celulares apenas, visto que para os perfis castelados não há este tipo de perda. Ademais, tem-se a opção plotar esquema que apresenta uma nova janela demonstrando o corte que seria feito no perfil original para a fabricação do perfil alveolar estabelecido na otimização, assim como as dimensões, quantidade e comprimento dos alvéolos e desperdício de aço referentes a cortes e chapas adicionais.

No painel do perfil otimizado encontra-se duas opções denominadas “Verificações”, que ao serem executadas abrem uma nova janela com as verificações do modo de colapso para os perfis, de estados limites últimos e de serviço, demonstrando para cada situação se

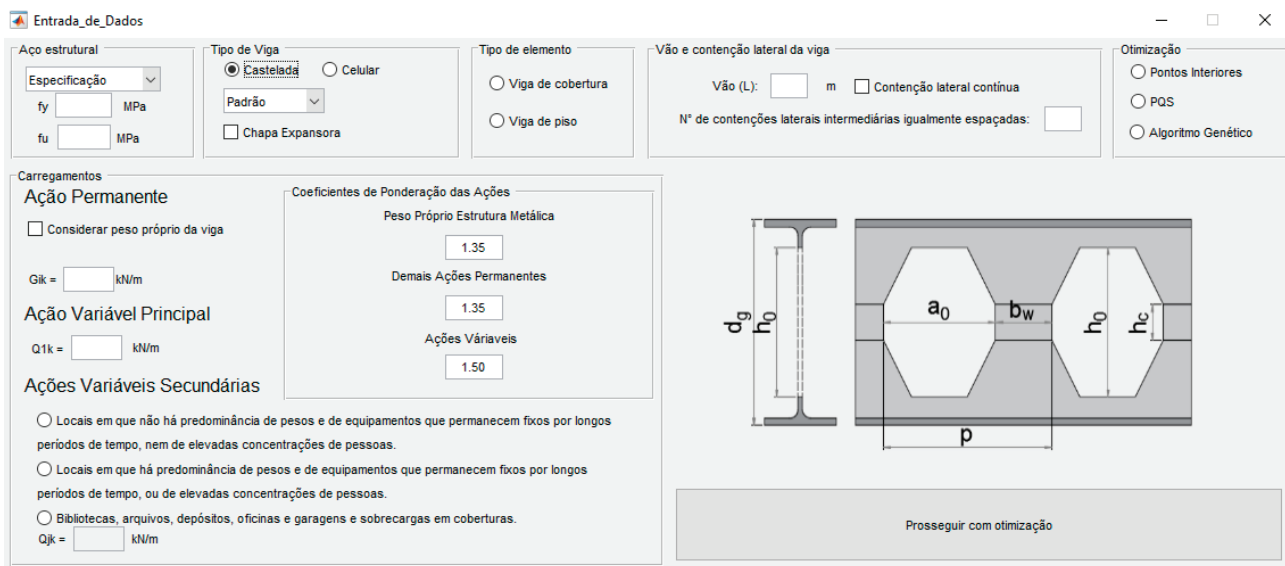


Figura 4 Interface do programa para entrada de dados e escolha da otimização

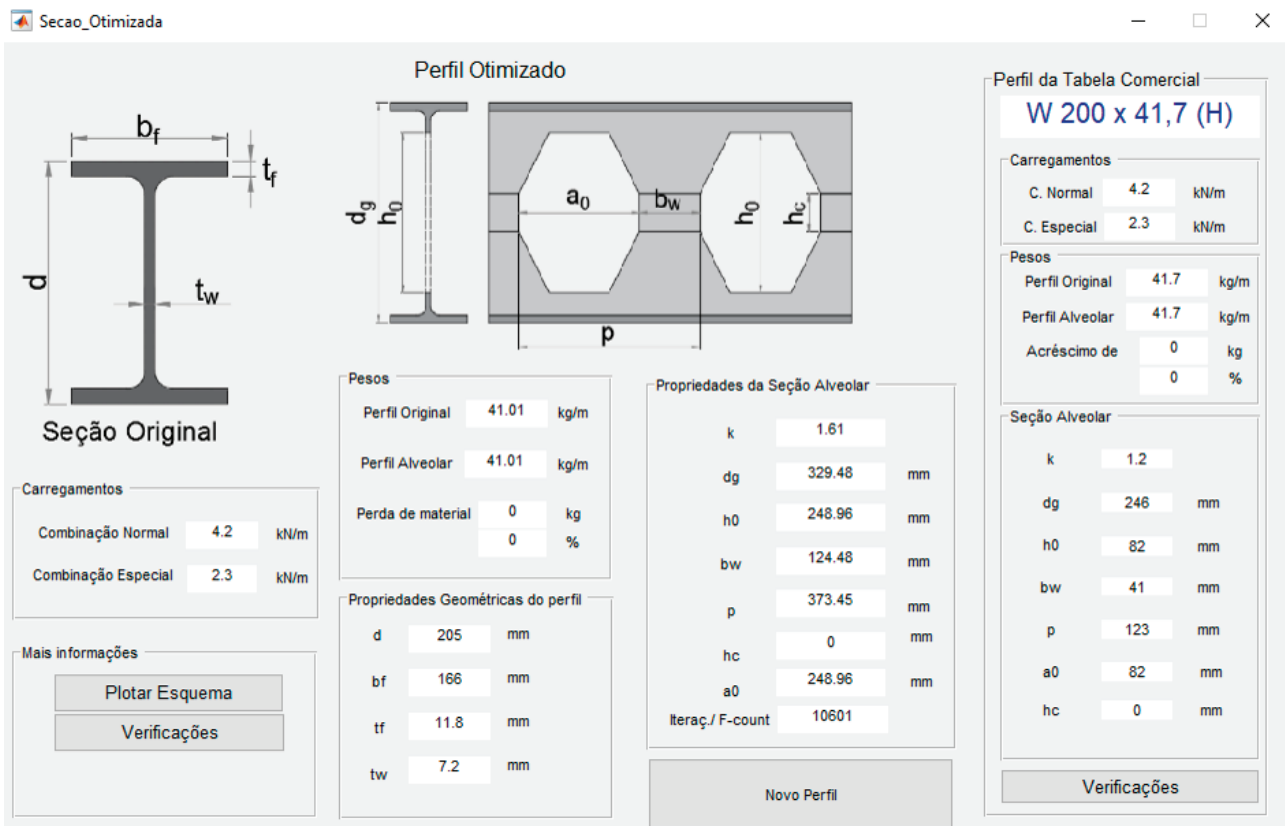


Figura 5 Interface do programa para apresentação dos resultados da otimização



Figura 6 Interface do programa para apresentação dos resultados das verificações aos modos de colapso

Tabela 1 Validação dos resultados por Algoritmo Genético com cálculos manuais de Lubke (2017)

Validação		Celular	Castelada		
			Peiner	Litzka	Anglo-saxônica
	L [m]	12	10	10	10
	g_k [kN/m]	18	15	15	15
	q_{k1} [kN/m]	9	7,5	7,5	7,5
	q_{k2} [kN/m]	1,5	1,2	1,2	1,2
Lubke (2017)	Perfil	W610 × 174	W310 × 97(H)	W310 × 97(H)	HP310 × 110 (H)
	Peso [kN/m]	168	98,31	98,95	110,65
	C.E. [mm]	–	50	75	0
Autor	Perfil	W610 × 174	HP310 × 93(H)	HP310 × 93(H)	W360 × 110(H)
	Peso [kN/m]	165,86	95	95,17	108,64
	C.E. [mm]	–	93,12	97,85	0
Diferença de Peso (%)		– 1,3 %	– 3,5 %	– 4,0 %	– 1,9%

L = comprimento da viga
 g_k = carregamento permanente
 q_{k1} = carregamento variável principal
 q_{k2} = carregamento variável secundário
 C.E. = chapa expansora

há uma restrição ativa e o seu índice de aproveitamento, tal como na Figura 6.

Devido ao fato de os programas computacionais de dimensionamento de vigas alveolares atualmente existentes no mercado serem fundamentados em estudos e normas internacionais, optou-se por não realizar uma comparação de resultados com os mesmos, pois haveria discrepância na comparação dos resultados. No entanto, na Tabela 1 tem-se os resultados da validação do programa, a qual foi realizada por intermédio de 4 exemplos calculados manualmente

(Celular, Peiner, Litzka e Anglo-saxônica) e demonstrada por [18], corroborando-se com os resultados do método algoritmo genético implementado pelo autor, ambos utilizando as formulações elaboradas por [8]. Observa-se ainda uma pequena discrepância e redução no peso do perfil alveolar, tal fato ocorreu, pois, o algoritmo genético além de escolher o melhor perfil comercial também foi implementado para otimizar dentro de um intervalo contínuo as razões de expansão, número de alvéolos por metro e dimensões de chapas expansoras.

5 Comparação dos resultados das otimizações dos diferentes padrões de viga alveolares

A fim de analisar os resultados das otimizações por algoritmo genético, foram utilizadas seis vigas para sistemas de piso e seis vigas para sistemas de cobertura, como mostra a Tabela 2. Os carregamentos utilizados foram diretamente proporcionais ao tamanho do vão, no entanto, para as vigas de sistemas de piso houve uma majoração mais elevada do que para o sistema de cobertura, o que é comum na elaboração de projetos. Ademais, utilizou-se um coeficiente de majoração de 1,35 para as cargas permanentes e 1,50 para cargas variáveis.

Tabela 2 Definição dos carregamentos para cada viga otimizada

Aplicação	Viga	Lb [m]	Qcp [kN/m]	Qsc [kN/m]
Viga de Piso	1	3	4,5	3,94
	2	4,8	7,2	6,3
	3	6,6	9,9	8,66
	4	8,4	12,6	11,03
	5	10,2	15,3	13,39
	6	12	18	15,75
Viga de Cobertura	7	3	1,5	0,75
	8	5,6	2,8	1,4
	9	8,2	4,1	2,05
	10	10,8	5,4	2,7
	11	13,4	6,7	3,35
	12	16	8	4

Os resultados abaixo são referentes às restrições que mais se aproximaram dos 100%, ou seja, de uma restrição ativa, e serão indicadas pelas seguintes siglas:

- FMV = Formação de Mecanismo Vierendeel
- EMAV = Escoamento do montante da alma por flexão
- FLT = Flambagem lateral com torção
- EMC = Escoamento do montante por cisalhamento
- DE = Deslocamento excessivo
- FM = Flambagem do montante

5.1 Vigas celulares

Na Tabela 3 tem-se os resultados das vigas celulares otimizadas por algoritmo genético, descrevendo tanto o peso original (kg/m) do perfil escolhido quanto o peso da viga celular formada, visto que existe uma redução de massa linear por conta do corte. Ademais, é possível observar que grande parte dos perfis chegou ao limite de restrição, ou aproximou-se, obtendo-se um ótimo aproveitamento no consumo de aço, não apenas por uma boa escolha de perfil comercial, mas também do diâmetro alveolar e da distância sequencial do mesmo.

Tabela 3 Resultados da otimização das vigas celulares

Viga Celular			
N.º	Peso do Perfil [kg/m]	Peso com Corte [kg/m]	Maior Restrição
1	12,36	11,9	FMV (100%)
2	32,06	29,97	EMAF (98%)
3	64,62	59,76	EMAF (86%) / FLT (86%)
4	91,37	85,97	EMAF (100%)
5	129,78	125,12	EMC (99%)
6	173,16	165,46	EMC (100%) / EMAF (100%)
7	20,71	17,83	EMAF (20%)
8	27,97	24,54	FLT (71%)
9	51,33	44,36	EMAF (100%)
10	81,03	71,15	EMAF (100%)
11	137,82	121,78	EMAF (100%)
12	173,16	157,09	EMAF (100%)

5.2 Vigas casteladas

5.2.1 Vigas casteladas sem chapa expansora

As Tabelas 4, 5 e 6 apresentam os resultados das otimizações por algoritmo genético das vigas casteladas sem chapa expansora, para os padrões Peiner, Litzka e Anglo-Saxão, sequencialmente. Os resultados obtidos apresentam em grande parte soluções de aproveitamento em torno de 95% a 100% do perfil diante

ao modo de colapso, validando novamente a aplicabilidade do algoritmo genético na otimização. Ressalta-se que para as vigas 1 e 7 o aproveitamento ficou relativamente pequeno, ainda que o programa tenha definido o perfil comercial de menor massa linear, sendo assim, não invalidando a aplicação do algoritmo genético.

Além disso, conclui-se também ao comparar os diversos padrões de corte que o Anglo-Saxão demonstrou de forma geral soluções mais eficientes em algumas situações, apresentando um perfil de menor consumo de aço, assim como também foi o padrão que obteve o menor peso ao somar-se as 12 vigas otimizadas.

Tabela 4 Resultados da otimização das vigas casteladas padrão Peiner, sem chapa expansora

Viga Castelada sem Chapa Expansora		
Padrão Peiner		
N.º	Peso do Perfil [kg/m]	Maior Restrição
1	12,36	FMV (65%)
2	26,2	FLT (96%)
3	49,9	FLT (98%)
4	84,24	FMV (99%)
5	123,09	FMV (99%) / FLT(99%)
6	173,16	FMV (96%)
7	12,36	FMV (17%)
8	22,07	FMV (80%)
9	41,01	FLT (95%)
10	70,78	FLT (93%)
11	105,37	FLT (91%)
12	155,84	FMV (100%)

Tabela 5 Resultados da otimização das vigas casteladas padrão Litzka, sem chapa expansora

Viga Castelada sem Chapa Expansora		
Padrão Litzka		
N.º	Peso do Perfil [kg/m]	Maior Restrição
1	12,36	FMV (75%)
2	30,98	FMV (98%)
3	49,9	FLT (99%)
4	91,37	FMV (92%)
5	139,05	FMV (99%)
6	173,16	FMV (99%)
7	12,36	FMV (20%)
8	22,07	FMV (65%)
9	41,01	FLT (94%)
10	70,78	FMV (96%)
11	105,37	FMV (93%)
12	155,84	FLT (100%)

Tabela 6 Resultados da otimização das vigas casteladas padrão Anglo-Saxão, sem chapa expansora

Viga Castelada sem Chapa Expansora		
Padrão Anglo-Saxão		
N.º	Peso do Perfil [kg/m]	Maior Restrição
1	12,36	EMC (72%)
2	26,2	FLT (95%)
3	49,9	FLT (94%)
4	91,37	FMV (98%)
5	123,09	FMV (97%)
6	153,77	FLT (100%)
7	12,36	EMC (19%)
8	22,06	FLT (99%)
9	41,01	FLT (93%)
10	70,78	FLT (93%)
11	105,37	FLT (88%)
12	153,77	FLT (98%)

5.2.2 Vigas casteladas com chapa expansora

As Tabelas 7, 8 e 9 apresentam os resultados das otimizações por algoritmo genético das vigas casteladas, para este caso aplicando-se chapas expansoras, também para os padrões Peiner, Litzka e Anglo-Saxônico. Os resultados foram muito satisfatórios, visto que as soluções se aproximaram majoritariamente para um aproveitamento de 100% de restrição de colapso, principalmente devido a obtenção de chapas expansoras, as quais foram otimizadas em um domínio contínuo. Ocorreu novamente um pequeno percentual de aproveitamento para as vigas 1 e 7 apesar de utilizar o perfil mais leve, descartando-se assim nesta situação a análise de eficiência do algoritmo genético.

Tabela 7 Resultados da otimização das vigas casteladas padrão Peiner, com chapa expansora

Viga Castelada com Chapa Expansora			
Padrão Peiner			
N.º	Peso do Perfil [kg/m]	Peso com Chapa Expansora [kg/m]	Maior Restrição
1	12,36	12,36	FLT (71%)
2	22,07	22,96	FLT (100%)
3	45,29	45,87	FMV (99%) / FLT (99%)
4	71,79	73,47	FMV (100%)
5	105,37	107,56	FLT (100%)
6	153,77	155,55	FMV (100%) / FLT (100%)
7	12,36	12,36	FMV (17%)
8	22,07	22,07	FLT (65%)
9	38,6	38,99	FLT (99%)
10	61,52	64,88	FLT (100%)
11	95,29	97,07	FLT (100%)
12	153,77	153,9	FMV (100%) / FLT (100%)

Tabela 8 Resultados da otimização das vigas casteladas padrão Litzka, com chapa expansora

Viga Castelada com Chapa Expansora			
Padrão Litzka			
N.º	Peso do Perfil [kg/m]	Peso com Chapa Expansora [kg/m]	Maior Restrição
1	12,36	12,36	EMC (86%)
2	22,07	23,03	FLT (100%)
3	49,9	49,99	FLT (100%)
4	71,79	73,49	EMC (100%)
5	105,37	107,84	FLT (100%)
6	153,77	156,01	FLT (100%)
7	12,36	12,36	EMC (18%) / FLT (18%)
8	22,07	22,07	FLT (76%) / DE (76%)
9	38,36	39,05	FLT (100%)
10	61,52	65,08	FLT (100%)
11	95,29	97,21	FMV (100%) / FLT (100%)
12	153,77	154,24	FLT (100%)

Tabela 9 Resultados da otimização das vigas casteladas padrão Anglo-Saxão, com chapa expansora

Viga Castelada com Chapa Expansora			
Padrão Anglo-Saxão			
N.º	Peso do Perfil [kg/m]	Peso com Chapa Expansora [kg/m]	Maior Restrição
1	12,36	12,36	EMC (89%)
2	26,2	26,2	FLT (94%)
3	44,31	45,77	FLT (100%)
4	76,77	76,77	FMV (99%) / FMC (99%)
5	120,17	120,68	EMC (99%)
6	153,77	153,77	FLT (100%)
7	12,36	12,36	EMC (24%)
8	22,07	22,07	EMC (71%)
9	38,36	38,63	FLT(99%)
10	61,52	63,49	FMV (100%) / FLT (100%)
11	95,29	95,93	FMV(100%) / FLT (100%)
12	153,77	153,77	FLT (98%)

Tabela 10 Resultados do peso (kg/m) da otimização das vigas alveolares

N.º	Celular	Castelada sem Chapa Expansora			Castelada com Chapa Expansora		
		Peiner	Litzka	Anglo-Saxão	Peiner	Litzka	Anglo-Saxão
1	12,36	12,36	12,36	12,36	12,36	12,36	12,36
2	32,06	26,20	30,98	26,20	22,96	23,03	26,20
3	64,62	49,90	49,90	49,90	45,87	49,99	45,77
4	91,37	84,24	91,37	91,37	73,47	73,49	76,77
5	129,78	123,09	139,05	123,09	107,56	107,84	120,68
6	173,16	173,16	173,16	153,77	155,55	156,01	153,77
7	20,71	12,36	12,36	12,36	12,36	12,36	12,36
8	27,97	22,07	22,07	22,07	22,07	22,07	22,07
9	51,33	41,01	41,01	41,01	38,99	39,05	38,63
10	81,03	70,78	70,78	70,78	64,88	65,08	63,49
11	137,82	105,37	105,37	105,37	97,07	97,21	95,93
12	173,16	155,84	155,84	153,77	153,90	154,24	153,77

5.3 Comparação entre os tipos de vigas alveolares

A Tabela 10 descreve o peso mínimo (kg/m) encontrado na otimização das vigas com o algoritmo genético para todas as vigas envolvidas neste estudo. Além disto, na linha de cada uma das 12 vigas, tem-se em negrito os melhores resultados, onde fica notório que as vigas casteladas com chapa expansora possuem um melhor aproveitamento do aço. Ademais, tratando-se dos 3 padrões em questão, observa-se também que o Anglo-Saxão possui o formato de corte com melhor eficiência no consumo de aço no dimensionamento.

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

As restrições mencionadas neste artigo são fundamentais durante o processo de otimização, visto que são requisitos cruciais no dimensionamento. Tendo em vista que os perfis utilizados pelo algoritmo genético são comerciais, as variações de dimensões não são contínuas na otimização, o que dificulta se obter sempre um resultado com restrição ativa ao modo de colapso.

Para todas as vigas alveolares otimizadas pelo algoritmo genético observa-se que os modos de colapso que possuem maiores restrições são: formação de mecanismo Vierendeel e Flambagem lateral com torção, primordialmente tratando-se de vigas casteladas, tanto nas vigas de cobertura quanto nas de piso. Ou seja, são modos de colapso que requerem maior atenção e rigor no dimensionamento dos projetistas, principalmente se utilizarem métodos de otimização.

Ademais, é evidente que para os casos de vigas alveolares celulares o modo de colapso predominantemente com maior restrição foi o de escoamento do montante da alma por flexão, onde atuou como maior deles em até 83 % das vigas de cobertura otimizadas e 67 % das de piso. As Figura 7 e 8 apresentam a análise dos modos de colapso preponderantes apresentados nas Tabelas 3 a 9.

Desta forma, diante dos resultados, observa-se a preponderância dos modos de colapsos Formação de Mecanismo Vierendeel (FMV), Escoamento do montante da alma por flexão (EMAF) e Flambagem lateral com torção (FLT), os quais serão abordados adiante.

O FMV, ou mecanismo plástico, é definido como a formação de rótulas plásticas nos cantos da abertura por meio de altos valores de esforço cortante nesta região. Na presença deste mecanismo, há uma distorção das aberturas deformando-se em forma de um paralelogramo na zona crítica do vão. Este mecanismo ocorre primordialmente em combinações de vãos curtos e que tenham aberturas mais alongadas e nas vigas em que os cordões possuem pequena altura, tal como abordado por [18].

O EMAF é ocasionado pela força cortante que ocorre longitudinalmente no montante do perfil, entre os alvéolos, a qual produz um momento fletor considerável no trecho e que deve ser analisado.

Ademais, testes experimentais foram feitos por [5] onde foi possível concluir que as vigas alveolares diante à FLT detêm comportamentos muito similares aos das vigas metálicas de alma cheia, podendo ser considerados da mesma forma. Além disto, aborda-se a seção líquida no centro das aberturas como a zona crítica de flambagem, adotando suas propriedades geométricas para o cálculo da constante de empenamento, tal como demonstrados no estudo de [21].

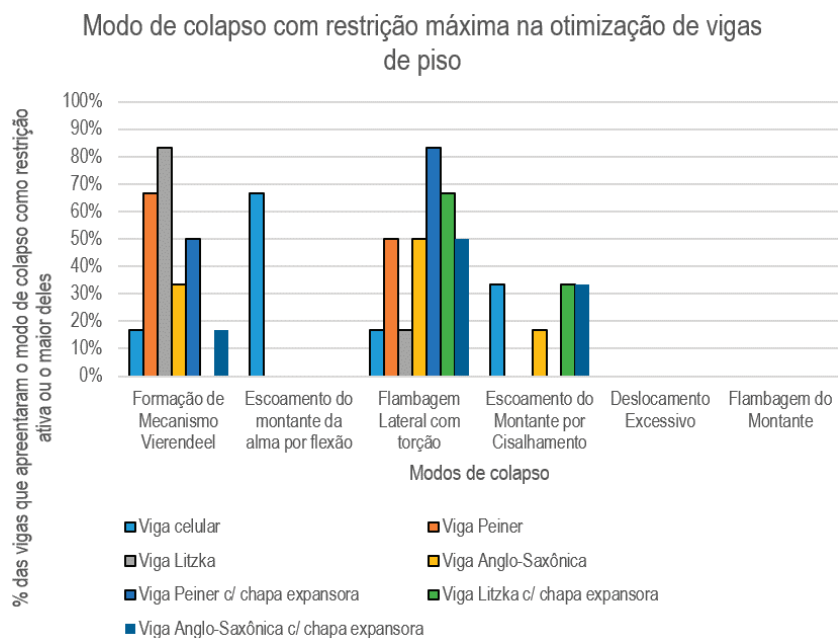


Figura 7 Análise dos Modos de Colapso preponderantes em vigas de piso

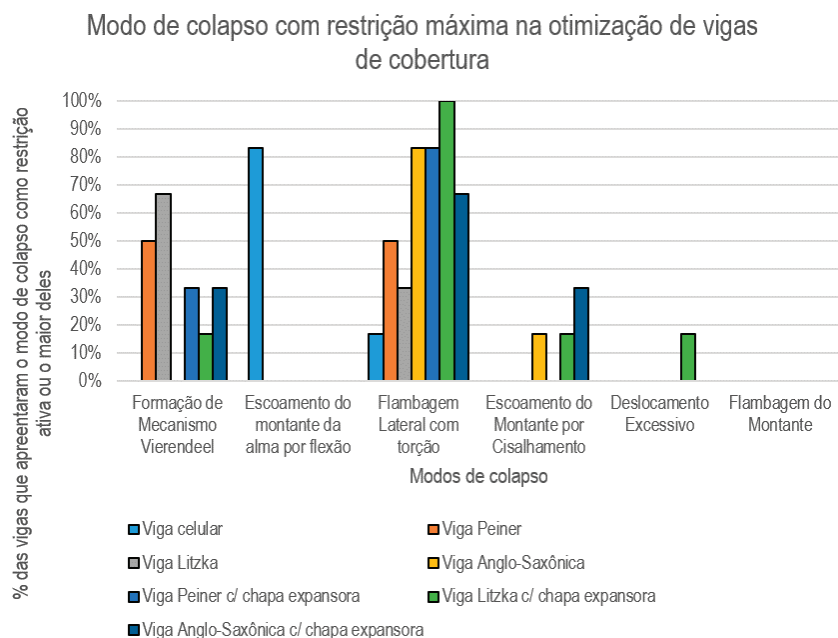


Figura 8 Análise dos Modos de Colapso preponderantes em vigas de cobertura

6 Conclusão

É de suma importância a aplicabilidade de sistemas de otimizações para soluções inteligentes dos problemas de dimensionamento na engenharia, observando-se assim a relevância deste trabalho no qual analisou a aplicabilidade da otimização pelo método algoritmo genético. Ressalta-se aqui a possibilidade de aplicar neste modelo de otimização variáveis discretas, tal como as dimensões dos perfis

comerciais, junto a variáveis contínuas, tais como passos entre aberturas sequenciais e altura de chapas expansoras, demonstrando a simplicidade em utilizar os resultados estabelecidos diretamente nos projetos estruturais.

Conclui-se também a necessidade de se atentar os modos de colapsos de formação de mecanismo Vierendeel e flambagem lateral com torção, tratando-se de vigas casteladas, pois foram as restrições que mais se aproximaram dos 100 % da resistência limite.

Já em relação às vigas celulares o escoamento do montante da alma por flexão foi a restrição que predominou.

Foi notório também por meio dos resultados das vigas alveolares que as casteladas possuem um melhor aproveitamento do aço para resistir aos esforços, se destacando o padrão de corte Anglo-Saxão. Ademais, tendo em vista que a disponibilidade de dimensões dos perfis comerciais não é muito ampla, a utilização de chapas expansoras demonstrou ser a solução ideal, já que pode-se definir o tamanho ideal em um intervalo contínuo, inferior e superior, e assim a utilização destas fez com que as restrições dos modos de colapsos se aproximassem de uma restrição ativa, aproveitando-se de forma mais eficiente o consumo do aço.

Com isso, pode-se concluir que o modelo de dimensionamento otimizado por algoritmo genético gerou excelentes resultados, pois grande parte deles apresentou resultados próximos às restrições ativas, ainda que tenham sido utilizados apenas perfis comerciais. Então o modelo pode ser utilizado em aplicações reais e proporcionar soluções com menor oneração no consumo de aço e consequentemente nos custos com os mesmos, o que de fato é de grande relevância para ser aplicado na construção civil.

Referências

- [1] Cimadevila, Francisco Javier Estévez; Gutiérrez, Emilio Martín; Rodríguez, José Antonio Vázquez – *Vigas alveoladas*. Vol 3. Madri: A Coruña: Biblioteca Técnica Universitária; 2000.
- [2] 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, pp. 237-247, 2011.
- [3] SCI (Steel Construction Institute) e BCSA (British Constructional Steelwork Association Limited) – *Steelwork Design Guide to BS 5950-1*. Londres, 2000.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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: 8 jul. 2019.
- [9] Sonck, D.; Belis J. – "Lateral-torsional buckling resistance of cellular beams". *Journal of Constructional Steel Research*. V.105, pp. 119-128, 2015.
- [10] Oskouei, A.V.; Fard, S.S.; Aksogan, O. – *Using genetic algorithm for the optimization of seismic behavior of steel planar frames with semi-rigid connections*. Springer-Verlag, Industrial Application, pp. 287-302, 2011.
- [11] 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, pp. 1-20, 2017.
- [12] Wang, P.; Ma, Q.; Wang, X. – "Investigation on Vierendeel mechanism failure of castellated steel beams with fillet corner web openings". *Engineering Structures*. Ed 74. pp. 44-51. 2014.
- [13] Yossef, N. M.; Taher, S. – *Cost Optimization of Composite Floor Systems with Castellated Steel Beams*. American Society of Civil Engineers. 2018.
- [14] Erdal, F.; Dogan, E.; Saka, M. P. – "Optimum design of cellular beams using harmony search and particle swarm optimizers". *Journal of Constructional Steel Research*. v67. pp. 237-247. 2011.
- [15] Sorkhabi, R.V.; Naseri, A.; Naseri, M. – "Optimization of the Castellated Beams by Particle Swarm Algorithms Method". *APCBEE Procedia*. v9. pp. 381-387. 2014.
- [16] Kaven, A.; Shokohi, F. – "Application of grey wolf optimizer in design of castellated beams". *Asian Journal of Civil Engineering*. v17. pp. 683-700. 2016.
- [17] Hieu, N.T.; Tuan, V.A. – "Weight optimization of composite cellular beam based on the differential evolution algorithm". *Journal of Science and Technology in Civil Engineering*. v12. pp. 28-38. 2018.
- [18] 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.
- [19] Delesques, R. – "Le Calcul des Poutres Ajourées". *Construction Métallique*. n. 4, 1969, pp. 41-51.
- [20] Alves, E.C.; Lubke, G.P. – "Dimensionamento ótimo e análise dos modos de colapso de vigas alveolares de aço". *Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural*, Passo Fundo, v. 16, n. 1, pp. 38-64, jan. /abr. 2019.
- [21] Kohnehpooshi, O.; Showkati, H.H. – "Numerical modeling and structural behavior of elastic castellated section". *European Journal of Scientific Research*, v. 31, n. 2, pp. 306-318, 2009.

