**DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO DE VIGAS MISTAS CELULARES UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS**

**Optimized design of cellular composite beams using genetic algorithms**

José Ronaldo Soares Ramos (1); Élcio Cassimiro Alves (2)

(1) Engenheira Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória - ES, Brasil.

(2) Dr. Prof., Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória - ES, Brasil.

Email para Correspondência: elcio.calves1@gmail.com; (P) zeronaldoramos@gmail.com

**Resumo:** Objetiva-se neste trabalho apresentar a formulação do problema de otimização para o problema envolvendo vigas mistas celulares de aço. Para tal problema será considerada a iteração completa entre a viga celular e a mesa de concreto. A formulação para a verificação dos esforços resistentes é a proposta por Lawson e Hicks (2011) e a solução do problema de otimização será dada pelo Método dos Algoritmos Genéticos. Exemplos numéricos serão apresentados para a validação do problema e para apresentar o potencial de aplicação deste trabalho.

*Palabras-clave: Celulares, Mistas, Otimização, Algoritmos Genéticos.*

**Abstract:** The objective of this work is to present the formulation of the optimization problem for the problem involving steel composite beams. For this problem will be considered the complete iteration between the cellular beam and the concrete table. The formulation for the verification of the resistant efforts is proposed by Lawson and Hicks (2011) and the solution of the optimization problem will be given by the Genetic Algorithm Method. Numerical examples will be presented for the validation of the problem and to present the application potential this work.

***Keywords: Cellular, Composite, Optimization, Genetic Algorithm***

1. INTRODUçÃO

As vigas celulares possuem diversas vantagens construtivas, por exemplo: peso menor em comparação com uma viga de alma cheia de mesma altura. Aliás, o aumento da altura é um dos principais ganhos que se tem com a transformação de uma viga comum em celular. Com a adição da camada de concreto sobre a viga celular de aço, obtêm-se uma viga mista de aço e concreto. Assim é possível aproveitar a contribuição de cada material na resistência da viga, no caso do concreto a resistência à compressão e no caso do aço à tração.

Vigas celulares de aço foram citadas em estudos como os de Cimadevilla (2000), Sweedan (2010), Silveira (2011), Badke (2015), entre outros. Entretanto, os mesmos não apresentaram estudos de otimização daquelas vigas. Por outro lado Lubke, Alves e Azevedo (2017) apresentaram um estudo sobre a otimização de vigas celulares fazendo um estudo comparativo entre diferentes métodos de otimização e Alves, Lubke e Azevedo (2017) apresenta um estudo sobre otimização de vigas casteladas de aço.

Este artigo objetiva apresentar a formulação e os critérios para o dimensionamento otimizado, com o uso de algoritmos genéticos, de vigas mistas celulares de aço de acordo com os estudos de Lawson e Hicks (2011), descritos no guia de projeto europeu SCI Publication P355. Para tal, será desenvolvido um programa computacional no *software Matlab* que, após definidos os dados dos materiais, interação aço concreto, vão da viga e os esforços solicitantes de cálculo, dimensionará a viga de forma otimizada, utilizando para a otimização probabilística, o algoritmo genético (AG), existentes na biblioteca do *Matlab*.

1. dimesionamento de vigas mistas celulares de aço
	1. Critérios de dimensionamento

Todas as equações e critérios de dimensionamento apresentados neste artigo baseiam-se no guia de projeto de vigas alveolares mistas de aço e concreto SCI:P355, desenvolvido por Lawson e Hicks (2011).

* 1. Resistência ao cisalhamento dos conectores

Os conectores de cisalhamento, que fazem a solidarização do aço com o concreto, tem força resistente de cálculo determinada como o menor entre os dois valores, conforme Eq. (1) e Eq. (2).

|  |  |
| --- | --- |
| $$P\_{Rd}=\frac{0,8f\_{u}(\frac{πd^{2}}{4})}{γ\_{v}}$$ | (1) |
| $$P\_{Rd}=\frac{0,29αd^{2}\sqrt{f\_{ck}E\_{cm}}}{γ\_{v}}$$ | (2) |

onde:

|  |  |
| --- | --- |
| $$f\_{u}$$ | limite de resistência do aço do conector; |
| $$d$$ | diâmetro do conector; |
| $$γ\_{v}$$ | Coeficiente de ponderação de acordo com BS EN 1992-1-1; 1993-1-1 e 1994-1-1; |
| $$f\_{ck}$$ | resistência característica à compressão do concreto; |
| $$E\_{cm}$$ | módulo de elasticidade secante do concreto; |
| $$α$$ | dado de acordo com as Eq. (3) e Eq. (4): |
| $$α=0,2\left(\frac{h\_{sc}}{d}+1\right), para 3\leq h\_{sc}/d\leq 4$$ | (3) |
| $$α=1, para h\_{sc}/d>4 $$ | (4) |

onde:

|  |  |
| --- | --- |
| $$h\_{sc}$$ | comprimento nominal do conector. |

* 1. Resistência do concreto à compressão devido à flexão no meio do vão

A resistência é determinada de acordo com o item 5.4.1.2 da BS EM 1994-1-1, conforme mostra a Eq. (5).

|  |  |
| --- | --- |
| $$N\_{cs,Rd}=\frac{0,8f\_{ck}b\_{eff}h\_{c}}{γ\_{c}}$$ | (5) |

onde:

|  |  |
| --- | --- |
| $$h\_{c}$$ | altura da camada de concreto; |
| $$γ\_{c}$$ | coeficiente de ponderação igual a 1,5; |
| $$b\_{eff}$$ | dado de acordo com a Eq. (6): |
| $$b\_{eff}=b\_{0}+\sum\_{}^{}b\_{ei}$$ | (6) |

onde:

|  |  |
| --- | --- |
| $$b\_{0}$$ | distância entre os centros dos conectores; |
| $$b\_{ei}$$ | largura efetiva da laje. |

* 1. Resistência à tração da mesa inferior da viga, na flexão no meio do vão

A resistência do tê de aço é determinada de acordo com BS EM 1944-1-1, de acordo com a Eq. (7).

|  |  |
| --- | --- |
| $$N\_{cs,Rd}=\frac{Af\_{y}}{γ\_{M0}}$$ | (7) |

onde:

|  |  |
| --- | --- |
| $$A$$ | área do tê de aço; |
| $$f\_{y}$$ | limite de escoamento do aço; |
| $$γ\_{M0}$$ | coeficiente de ponderação. |

* 1. Momento resistente na seção da abertura

De acordo com o item 3.2 do SCI:P355 o momento resistente no trecho da abertura na viga mista celular, é dado de acordo com as Eq. (8) e Eq. (9).

|  |  |
| --- | --- |
| $$Se N\_{c,Rd}>N\_{bT,Rd}$$ |  |
| $$M\_{0,Rd}=N\_{bT,Rd}(h\_{eff}+z\_{t}+h\_{s}-0,5z\_{c})$$ | (8) |

|  |  |
| --- | --- |
| $$Se N\_{c,Rd}<N\_{bT,Rd}$$ |  |
| $$M\_{0,Rd}=N\_{bT,Rd}h\_{eff}+N\_{c,Rd}(z\_{t}+h\_{s}-0,5h\_{c})$$ | (9) |

onde:

|  |  |
| --- | --- |
| $N\_{c,Rd}$  | esforço resistente à compressão no concreto; |
| $$N\_{bT,Rd}$$ | esforço resistente à tração no tê de aço;  |
| $$h\_{eff}$$ | altura efetiva entre os centros dos tês$;$ |
| $$z\_{t} $$ | distância do centroide do tê até a borda superior do flange de aço;  |
| $$z\_{c} $$ | profundidade do concreto comprimido;  |
| $$h\_{s} $$ | profundidade total da laje. |

* 1. Momento plástico resistente na ausência de força axial

O momento plástico resistente, de acordo com o item 3.4.4 do SCI:P355, é dado conforme Eq. (10).

|  |  |
| --- | --- |
| $$M\_{pl,Rd}=\frac{A\_{wT}f\_{y}(0,5h\_{w,T}+tf-z\_{pl})}{γ\_{M0}}+\frac{A\_{f}f\_{y}\left(0,5h\_{f}-z\_{pl}+\frac{z\_{pl}^{2}}{t\_{f}}\right)}{γ\_{Mo}}$$ | (10) |

onde:

|  |  |
| --- | --- |
| $A\_{wT}$  | área da alma no tê; |
| $h\_{wT}$  | altura da alma do tê; |
| $t\_{f}$  | espessura da mesa do perfil; |
| $z\_{pl}$  | distância entre a linha neutra plástica e o topo do perfil de aço |
| $A\_{f}$  | área da mesa do perfil de aço; |

* 1. Momento plástico resistente na presença de força axial

O momento plástico resistente, de acordo com o item 3.4.4 do SCI:P355, é dado conforme Eq. (11).

|  |  |
| --- | --- |
| $$M\_{pl,N,Rd}=M\_{pl,Rd}\left(1-\left(\frac{N\_{Ed}}{N\_{pl,Rd}}\right)\right)$$ | (11) |

onde:

|  |  |
| --- | --- |
| $N\_{Ed}$  | força axial atuante no tê devido à flexão. |
| $N\_{pl,Rd}$  | esforço resistente plástico de compressão. |

* 1. Momento resistente no montante da alma entre as aberturas

O momento resistente, de acordo com o item 3.5.6 do SCI:P355, é dado conforme Eq. (12).

|  |  |
| --- | --- |
| $$M\_{wp,Rd}=\frac{s\_{0}^{2}t\_{w}f\_{y}}{6γ\_{M0}}$$ | (12) |

onde:

|  |  |
| --- | --- |
| $s\_{0}$  | distância entre as extremidades de duas aberturas; |
| $t\_{w}$  | espessura da alma |

* 1. Esforço cortante longitudinal resistente no montante da alma entre as aberturas

De acordo com o item 3.5.4 do SCI:P355, o esforço cortante resistente é dado conforme Eq. (13).

|  |  |
| --- | --- |
| $$V\_{wp,Rd}=\frac{\left(s\_{0}t\_{w}\right)\frac{f\_{y}}{\sqrt{3}}}{γ\_{M0}}$$ | (13) |

* 1. Deformações

A flecha atuante, para um carregamento distribuído, é determinada de acordo com a Eq. (14).

|  |  |
| --- | --- |
| $$δ\_{s}=\frac{5ql^{4}}{348EI}$$ | (14) |

onde:

|  |  |
| --- | --- |
| $E$  | módulo de elasticidade transversal do aço; |
| $I$  | momento de inércia da viga transformada |

1. formulação do problema

O problema apresentado neste trabalho consiste em apresentar o dimensionamento ótimo de uma viga mista celular com base em dados de entrada alimentados pelo usuário, tais como: carga aplicada, vão da viga, condições de apoio, etc.

Para a solução do problema de otimização será usado o Método dos Algoritmos Genéticos que se encontra na plataforma do software Matlab, que será utilizado como base para a implementação deste problema.

Este modelo de otimização consiste em escolher uma viga, de uma família de vigas, com base em uma função objetivo que será minimizada, no caso deste trabalho a função peso da viga.

As vigas disponíveis para escolha são os perfis metálicos do catálogo da Gerdau.

* 1. Função objetivo

A Figura 1 mostra as variáveis do problema para a função objetivo mostrada na Eq. (15).

|  |
| --- |
|  |

**Figura 1 – Variáveis do problema**

|  |  |
| --- | --- |
| $$P\_{a}=\left(2x\_{2}x\_{3}+\left(x\_{1}+\sqrt{\left(\frac{x\_{1}x\_{5}}{2}\right)^{2}-\left(\frac{x\_{1}x\_{5}\left(x\_{6}-1\right)}{2}\right)}-2x\_{3}\right)x\_{4}-\frac{1}{x\_{6}x\_{5}x\_{1}}.\frac{π\left(x\_{5}x\_{1}\right)^{2}}{4}\right)ρ\_{a}$$ | (15) |

onde:

|  |  |
| --- | --- |
| $x\_{1}$  | altura do perfil; |
| $x\_{2}$  | altura da mesa do perfil; |
| $x\_{3}$  | espessura da mesa do perfil; |
| $x\_{4}$  | espessura da alma do perfil; |
| $x\_{5}$  | razão entre o diâmetro do furo e a altura do perfil; |
| $x\_{6}$  | razão entre o passo e o diâmetro do furo; |

* 1. Funções de restrição

Estas funções representam as condições que as vigas devem atender no processo de verificação do programa. As mesmas são mostradas nas Eq. (16) a Eq. (24).

|  |  |
| --- | --- |
| $$1-\frac{P\_{Rd}}{P\_{Sd}}\leq 0$$ | (16) |
| $$1-\frac{N\_{cs,Rd}}{N\_{Sd}}\leq 0$$ | (17) |
| $$1-\frac{M\_{0,Rd}}{M\_{0,Sd}}\leq 0$$ | (18) |
| $$1-\frac{M\_{pl,Rd}}{M\_{pl,Sd}}\leq 0$$ | (19) |
| $$1-\frac{M\_{pl,N,Rd}}{M\_{pl,N,Sd}}\leq 0$$ | (20) |
| $$1-\frac{M\_{wp,Rd}}{M\_{wp,Sd}}\leq 0$$ | (21) |
| $$1-\frac{V\_{wp,Rd}}{V\_{wp,Sd}}\leq 0$$ | (22) |
| $$1-\frac{δ\_{R}}{δ\_{S}}\leq 0$$ | (23) |
| $$\left[148;100;10;4,3;4,9\right]\leq x\leq [617;,325;16;17,4;22,2]$$ | (24) |

A solução do problema de otimização será obtida via método dos algoritmos genéticos, utilizado dentro da plataforma do Matlab e neste estudo não está sendo otimizado a mesa de concreto armado.

1. exemplo

Para a implementação do problema de otimização, foi desenvolvida a interface gráfica com o auxílio do GUIDE (Graphical User Interface Development Environment) conforme pode ser observado na Figura 2. Nessa interface é possível fazer o dimensionamento do perfil de acordo com os parâmetros de entrada, previamente definidos pelo usuário. Também, depois de escolhido o perfil otimizado, é possível visualizar o resumo das verificações feitas pela software, esforços resistentes e esforços atuantes. Todo o processo de escolha do perfil é baseado no método dos Algoritmos Genéticos (AG).

**Figura 2 – Interface gráfica do software**

* 1. Exemplo 1 - Viga biapoaida

O primeiro exemplo traz uma viga biapoiada submetida a uma carga gravitacional distribuída ao longo do comprimento da viga de forma uniforme. Para verificação dos resultados, será utilizado o software *ACB+3.08* (Centro Técnico Industrial da Construção Metálica – ArcelorMittal, 2015), baseado no Eurocódigo 3 e 4. Os dados do problema são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Dados do problema

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Item | Parâmetros | Valores |
| Viga | comprimento do vão | 5 m |
| Laje | altura da laje | 150 mm |
| Conector | diâmetro | 6 mm |
| Materiais | limite escoamento aço | 345 MPa |
| fck do concreto | 20 MPa |
| Ações permanentes | Peso da forma de aço | 0,2 kN/m |
| Peso da armadura | 0,1 kN/m |
| Ações variáveis | Sobrecarga na construção | 0,5 kN/m |

Após realização da otimização pelo software apresentado neste artigo, obteve-se como solução do problema o perfil “W250 x 44,8”. A fim de validar os resultados, os mesmos são comparados com o software de referência, ACB+3.08, conforme Tabela 2.

Tabela 2. Comparação dos resultados

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | MSd | MRd | VSd | VRd | Flecha atuante | Flecha limite |
| Programa | 20,9, kNm | 375,3 kNm | 16,7 kN | 100,9 kN | 6,3 mm | 16,7 mm |
| ACB+3.08 | 20,9 kNm | 398,7 kNm | 16,7 kN | 117,2 kN | 7,8 mm | 16,7 mm |

Conforme mostrado na Tabela 2, os resultados apresentados pelo programa deste artigo estão bem próximos dos valores do programa de referência ACB+3.08. O software de otimização escolheu o perfil mais eficiente possível, tendo como base o peso do mesmo, levando em consideração a necessidade de que o perfil escolhido atendesse todas as verificações, como mostrado na Tabela 2. Os esforços resistentes como podem ser observados, são diferentes, pois não sabe-se qual a formulação usado no ACB+3.08.

* 1. Exemplo 2 - Oliveira (2012)

O exemplo 2 fará uma comparação de resultados do software de otimização com o exemplo numérico apresentado por Oliveira(2012). Este exemplo consiste em verificar um perfil celular, obtido de um perfil “I” de abas paralelas padrão europeu comercializado pela ArcellorMittal, de nome “IPE 550”. O perfil apresentado na solução de Oliveira (2012) tem um peso de 92.1kg/m. Para validar o programa, serão introduzidos os mesmos parâmetros de entrada, a fim de obter um perfil de forma otimizada. Este será comparado com o perfil do exemplo.

Os parâmetros de entrada do problema são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros de entrada do exemplo

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Item | Parâmetros | Valores |
| Viga | comprimento do vão | 10 m |
| Laje | altura da laje | 120 mm |
| Conector | diâmetro | 19 mm |
| comprimento do conector | 100 mm |
| Materiais | limite escoamento aço | 345 MPa |
| fck do concreto | 30 MPa |
| Ações permanentes | Peso da forma de aço | 0,2 kN/m |
| Peso da armadura | 0,1 kN/m |
| Acabamentos | 3 kN/m |
| Ações variáveis | Sobrecarga na construção |  1,5 kN/m |
| Sobrecarga | 15 kN/m |

Após realização da otimização pelo software apresentado neste artigo, o resultado é comparado com os resultados do exemplo numérico de Oliveira (2012), conforme Tabelas 4 e 5.

Tabela 4. Comparação dos resultados – dados geométricos

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Altura viga original | Diâmetro do alvéolo | Espaçamento do alvéolo | Perfil |
| Oliveira (2012) | 550 mm | 400 mm | 550 mm | IPE 550 |
| Programa | 525 mm | 364,8 mm | 394 mm | W 530 x 66 |

Tabela 5. Comparação dos resultados – esforços e deformações

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | NRd | MSd | MRd | VSd | VRd | Flecha |
| Oliveira (2012) | 1104,97 kN | 451,8 kNm | 691,51 kNm | 131,8 kN | 390,74 kN | 22,3 mm |
| Programa | 1164 kN | 451,8 kNm | 735,6 kNm | 131,8 kN | 394 kN | 19,4 mm |

O perfil escolhido pelo método de otimização foi o “W530 x 66”, o mesmo pesa 66 kg/m enquanto que o o perfil IPE 550 pesa 92,1 kg/m. Logo, o programa de otimização escolheu um perfil 28,3 % mais leve que o apresentado pelo exemplo, sendo o perfil escolhido aprovado em todas as verificações de cálculo.

1. conclusões

O programa apresentado neste artigo se mostra uma boa ferramenta para dimensionamento de perfis celulares, uma vez que na prática de projeto usual o processo de escolha de uma viga celular consiste basicamente em um chute inicial do projetista, através de catálogos e softwares fornecidos por fabricantes destes perfis; este processo é lento e a solução encontrada pelo mesmo nem sempre é a mais econômica e eficiente.

Nos exemplos aqui apresentados, ao usuário coube determinar poucos dados de entrada, tendo o algoritmo gastado pouco mais de 14 segundos para encontrar a solução ótima dos problemas, ou seja, escolher o perfil que atende todas as verificações normativas com o menor peso possível.

Referências

LUBKE, G. P.; ALVES, E. C.; AZEVEDO, M. S.. *Dimensionamento Otimizado de Vigas Celulares de Aço. Revista Da Estrutura De Aço*, v. 6, p. 1-20, 2017.

ALVES, E. C.; LUBKE, G. P.; AZEVEDO, M. S. 2017. *Otimização de Vigas Casteladas de Aço.* Em Iberain Latin American on Computational Methods in Engeneering, Santa Catarina, CILAMCE.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 8800. 2008. *Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de aço e de Concreto de Edifícios.* Rio de Janeiro.

BADKE, A. Neto; CALENZANI, A. F. G.; FERREIRA, W. G. 2015. *Estudo de metodologia para dimensionamento de vigas de aço e concreto com perfil celular.* Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, v.8, p. 827-859.

BANERJEE, S.; BHASKAR, A. 2009. *The applicability of the effective médium theory to the dynamics of cellular beams.* International Journal of Mechanical Sciences, v.51, p. 598-608.

CIMADEVILA, F. J. E.; Gutiérrez, E. M.; Rodriguez, J. A. V. 2000. *Vigas alveoladas.* Vol . Madri: La Coruña: Biblioteca Técnica Universitária.

GERDAU. *Perfis Estruturais Gerdau.* Tabela de bitolas.

OLIVEIRA, T. C. P. 2012. *Vigas alveoladas: Metodologias de dimensionamento.* Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro.

SILVEIRA, E. G. 2011. *Avaliação do Comportamento de Vigas Alveolares de Aço com Ênfase nos Modos de Colapso por Plastificação.* Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

Sweedan, A. M. I. 2011. *Elastic lateral stability of I-shaped cellular steel beams.* Journal of Construction Steel Research, v. 67, p. 151-163.