

Otimização estrutural de vigas de concreto armado submetidas à flexão simples

Christiano Michel Fernandes
Freitas¹

Pedro Henrique Pedrosa de Melo²
Ruvier Rodrigues Pereira³

Resumo: O presente trabalho aborda a importância do processo de otimização dentro da Engenharia Civil com reflexos diretos nos custos da construção civil. Para a otimização foi utilizada uma viga submetida a flexão simples na busca de se minimizar os valores da área de aço e concreto de acordo com seus custos. Para tal, é abordado conceitos básicos referentes aos valores dos domínios de concreto, bem como o aproveitamento das propriedades do material em cada um. Em relação à otimização são abordados o Método de Powell com aplicação dos Multiplicadores de Lagrange Aumentado e Algoritmo de Colônia de Vagalumes, fazendo uma comparação com o procedimento analítico padrão adotados por engenheiros civis. Os valores obtidos seguiram as recomendações de autores da área, além de se obter valores próximos que garantem a funcionalidade dos métodos.

Palavras-chave: Otimização. Vigas de concreto armado. Custo.

Introdução

Dentre as diversas atividades ligadas à engenharia, pode-se destacar a complexidade do desenvolvimento de projetos estruturais. Tal complexidade está relacionada ao fato de envolver projeto de arquitetura, concepção da estrutura,

-
- 1 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização. Contato: christiano.michel@hotmail.com.
 - 2 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização. Contato: eng.pedromelo@hotmail.com. Bolsista FAPEG.
 - 3 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização. Contato: ruvierrodrigues@hotmail.com. Bolsista FAPEG.

arranjo estrutural a ser adotado e dimensionamento de cada elemento que irá compor o projeto. Vianna (2003) destaca que o objetivo principal e também maior dificuldade do projeto de estruturas é a busca pelo ponto de equilíbrio entre maximizar a segurança e reduzir custos.

A busca referida anteriormente é tratada dentro do estudo de otimização estrutural, que segundo Lopez e Miguel (2013) pode ser definida como um processo numérico/matemático que busca obter uma configuração estrutural que proporcione uma performance ótima de acordo com uma medida de desempenho preestabelecido (podendo ser dimensões ou massa mínimas, máxima rigidez, entre outros). Silva (2015) também esclarece que adoção de métodos convencionais para elaboração do projeto não garante que a solução obtida seja a melhor tanto do ponto vista estrutural quanto econômico, recomendado, para um projeto ótimo, processos iterativos e a adoção da otimização estrutural.

O uso das técnicas de otimização na elaboração de projetos estruturais tem ganhado cada vez mais destaque no ramo da Engenharia Civil, beneficiando, além do mercado em si, os novos profissionais da área, já que o emprego de tal conhecimento diminui a dependência em relação a experiência do projetista, proporcionando maior poder de competitividade aos ingressantes no mercado (LOPEZ; MIGUEL, 2013). Assim, as técnicas se tornam um diferencial em momentos de crise econômica como a vivida atualmente na construção civil brasileira.

O mercado da construção civil tem sofrido fortemente com o cenário de crise estabelecido nos anos de 2015 e 2016, sendo campeão disparado no fechamento de postos de trabalho (JCONLINE, 2016). Aliado a isso a construção civil também tem sofrido com a inflação, registrando um aumento notório no custo da construção, o valor registrado pelo INCC – Índice Nacional de Custo da Construção do Mercado foi de 1,52% para o mês de junho (PORTAL BRASIL, 2016). Assim, o mercado da construção civil se vê numa situação de obrigatoriedade de busca por alternativas do jeito de construir, o que arremete ainda mais para a importância do aproveitamento de todo material empregado.

Visto toda situação e a crescente importância da otimização estrutural na Engenharia Civil, o presente trabalho busca apresentar o emprego de técnicas de otimização para o caso de elementos estruturais. O foco será a redução do custo de vigas submetidas à flexão simples por meio de algoritmos de otimização clássica e evolutivo, fazendo uma comparação entre estes valores com os obtidos por meio do método clássico de dimensionamento de vigas.

1 Dimensionamento viga – estado limite último

Um elemento estrutural deve ser capaz de suportar os esforços ao qual é submetido sem atingir um estado limite. De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014) uma

estrutura deve atender os estados limites últimos, que está relacionado ao colapso ou ruína da estrutura, de forma que paralise seu uso e os estados-limites de serviço, que são aqueles relacionados à durabilidade, conforto dos usuários e estética.

Tem-se então, para uma viga de concreto armado, no estado limite último as situações em que pelo menos um dos materiais, concreto ou aço, atingiram o seu limite de deformação. Assim, há domínios que regem as características dessa deformação em uma dada seção transversal, podendo se enquadrar nos domínios: reta a, 1, 2, 3, 4, 4a, 5 e reta b. Pinheiro (2007), destacou que para o caso de flexão, os domínios possíveis são os domínios 2, 3 e 4, pois são nesses domínios que há necessidade de utilização dos dois materiais: concreto para resistir compressão e aço para tração.

Tem-se, então, para os domínios 2, 3 e 4 algumas características: Domínio 2: a ruína da estrutura se dá pela deformação excessiva do aço, e o concreto não trabalha com sua capacidade máxima; Domínio 3: a ruína se dá pela deformação máxima do concreto à compressão e com escoamento do aço e; Domínio 4: semelhante ao domínio 3, porém o aço não está em escoamento (ABNT, 2014).

O domínio 3 pode ser considerado, então, conforme Pinheiro (2007), a situação ideal de projeto, pois há o aproveitamento das características do aço e concreto. Além do que, a ruína é dúctil, ou seja, há uma fissuração aparente e flechas significativas antes da ruptura.

Em se tratando do dimensionamento da viga para o estado limite último, tem-se as equações de equilíbrio da seção transversal, conforme Equações 1 e 2:

$$0,68 \, b d \beta_x f_{cd} + A'_s \sigma'_s - A_s \sigma_s = 0 \quad (1)$$

$$M_d = 0,68 \, b d^2 \beta_x f_{cd} (1 - 0,4 \beta_x) + A'_s \sigma'_s (d - d') \quad (2)$$

Onde: b é a largura da viga; d a altura útil da viga; d' a distância do centro da armadura até a face da viga; f_{cd} a resistência à compressão de cálculo do concreto; β_x a profundidade da linha neutra; A'_s e A_s a área da armadura comprimida e tracionada na seção respectivamente e; σ'_s e σ_s a tensão normal do aço na compressão e tração respectivamente.

A profundidade da linha neutra (β_x) é calculada através da Equação 3:

$$\beta_x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_s} \quad (3)$$

Sendo: ε_c a deformação específica do concreto e ε_s , a deformação específica do aço.

A viga, no entanto, pode ser concebida utilizando armadura simples ou dupla. A armadura simples se diz aquela em que apenas a armadura tracionada é levada

em consideração nos cálculos, sendo o A'_s considerado igual a 0. Já a armadura dupla considera que a armadura situada na zona comprimida auxilia o concreto a resistir aos esforços solicitantes. Logo, a armadura dupla deve ser utilizada apenas quando há impossibilidade de alteração da seção transversal e não sendo possível o dimensionamento nos domínios 2 ou 3 (PINHEIRO, 2007).

A respeito da armadura da viga, é definido pela NBR 6118 (ABNT, 2014) alguns limites. Tem-se que a soma das armaduras de tração e compressão não podem ser maiores do que 4% da área do concreto. De maneira a limitar também o uso de armadura de pele, a norma permite dispensar o uso das mesmas em vigas com altura inferior ou igual a 60 cm. A respeito da armadura à compressão, Vianna (2003) a limita em 50% da armadura de tração.

Vale ressaltar que para o dimensionamento efetivo de um elemento estrutural devem ser realizadas outras verificações além das do estado limite último. Logo, por se tratar de um levantamento apenas de custo, será considerado apenas as verificações supracitadas.

2 Método de Otimização Clássica

Se tratando de métodos clássicos para resolução de problemas de otimização estão as Técnicas de Minimização Sequencial Irrestrita (TMSI) que, segundo Vanderplaats (1999), minimizam uma função objetiva incorporando uma penalidade em relação às restrições, a fim de evitar uma violação da mesma. De uma maneira mais específica, Silva e Brandão (2015), apontam que a ideia geral é penalizar pontos não pertencentes à região viável por meio do aumento do valor da função, de forma que estes pontos sejam descartados na execução do algoritmo.

Segundo Vanderplaats (1999), para se diminuir a dependência da função a ser otimizada em relação aos parâmetros de penalidade, podem ser utilizados os multiplicadores de Lagrange, constituindo, assim, o Método dos Multiplicadores de Lagrange Aumentado (MMLA).

A função pseudo-objetiva fazendo uso dos multiplicadores de Lagrange é apresentada na Equação 4.

$$A(x, \lambda, r_p) = F(x) + \sum_{j=1}^m [\lambda_j \psi_j + r_p (\psi_j)^2] + \sum_{k=1}^m [\lambda_k h_k(X) + r_p (h_k(X))^2] \quad (4)$$

Sendo: $F(x)$ a função obtida original e r_p o escalar que determina o grau ou tamanho da penalidade. Para ψ_j tem-se a Equação 5:

$$\psi_j = \max \left[g_j(x), \frac{-\lambda_j}{2r_p} \right] \quad (5)$$

Já os multiplicadores de Lagrange λ_j e λ_k são atualizados a cada iteração pelas seguintes Equações 6 e 7.

$$\lambda_j^{p+1} = \lambda_j^p + 2r_p \left\{ \max \left[g_j(x), \frac{-\lambda_j}{2r_p} \right] \right\} \quad (6)$$

$$\lambda_k^{p+1} = \lambda_k^p + 2r_p h_j(x) \quad (7)$$

Os métodos citados até aqui são utilizados para possibilitar a inserção de restrições dentro dos métodos que trabalham com minimização de função irrestrita. Um dos métodos muito utilizado é o de Powell, sendo o mesmo um método de ordem zero capaz de realizar, inicialmente, buscas unidirecionais na direção de cada variável e depois, de forma iterativa, uma combinação linear das buscas anteriores (VANDERPLAATS, 1999).

3 Métodos bio-inspirados

As técnicas clássicas de otimização estão difundidas a bem mais de um século, as mesmas propiciam grande aplicabilidade e confiabilidade na otimização de sistemas distintos. Entretanto, tais técnicas mostram-se ineficientes para determinadas situações, tais como: funções e/ou restrições descontínuas, multimodalidade, vários mínimos e máximos locais, variáveis discretas, funções não convexas, etc. Por este motivo as técnicas relacionadas aos métodos bio-inspirados ganharam espaço nos últimos anos (PRADO; SARAMAGO, 2005).

Os métodos bio-inspirados integram uma gama de algoritmos de otimização estocástica, sendo eles baseados no comportamento das espécies na natureza. Esse comportamento é fundamentado pela teoria evolutiva de Darwin. Tal teoria diz que a evolução da espécie é o efeito da variação genética de uma determinada população e da seleção natural, que opta por indivíduos melhores adaptados ao ambiente. Sendo assim, as melhores características são preservadas ao longo das gerações (FRANCISCO, 2013; PURCINA, 2010).

Os algoritmos com componentes estocásticas baseados na natureza por muito tempo foram tratados como heurísticas, porém, atualmente os mesmos são categorizados como meta-heurísticas. Comumente, heurística significa encontrar soluções por tentativa e erro, já a meta-heurística sugere a um nível maior de sofisticação no processo de otimização, possibilitando soluções de qualidade a um tempo moderado. Todavia, vale ressaltar que nem sempre o ótimo global será obtido (SISNANDO, 2014).

Geralmente, os métodos bio-inspirados possuem algumas características em comum, uma delas é o fato de possuírem populações iniciais geradas aleatoriamente, sendo que, a partir delas o método inicia o processo de cruzamento e

consequentemente, a obtenção das próximas gerações. No entanto, para que haja convergência, os métodos cumprem alguns quesitos, a saber: 1) novas combinações dos indivíduos da população, 2) mutação (em alguns casos), 3) avaliação de todas as possíveis soluções e, 4) seleção das melhores soluções para comporem a próxima geração (SISNANDO, 2014).

Diversos são os algoritmos baseados no comportamento coletivo das espécies, tem-se por exemplo: colônias de vagalumes, formigas, enxame de abelhas, cupins, morcegos, etc. Ainda que simples o comportamento de tais espécies, as mesmas apresentam um comportamento coordenado no que diz respeito à busca pelos seus objetivos. Citando casos análogos, cupins podem construir ninhos rebuscados e formigas e abelhas, através da coletividade, exploram diferentes locais em busca de alimento (FISTER *et al.*, 2013).

Os algoritmos meta-heurísticos esforçam-se para gerar novas soluções em um determinado espaço de busca, sendo assim, apuram a melhor solução para a sobrevivência, já o quesito de aleatoriedade permite que os métodos não se limitem a ótimos locais. Os processos de busca fundamentam-se na harmonia entre prospecção e exploração. A prospecção está relacionada à descoberta de melhores soluções, ao passo que a exploração foca na busca de novos locais descobertos no momento da prospecção (FISTER *et al.*, 2013).

3.1 Algoritmo Colônia de Vagalumes

O Algoritmo Colônia de Vagalumes (ACV), proposto por Yang (2008, *apud* LOBATO, 2016), é inspirado no comportamento social dos vagalumes. Essa espécie é caracterizada pela sua bioluminescência, sendo a mesma responsável por desempenhar algumas funções, a saber: comunicação e atração para potenciais parceiros, isca para atrair suas presas e mecanismo de alerta contra predadores (FISTER *et al.*, 2013).

A comunicação através da bioluminescência está vinculada ao fato de que os vagalumes conseguem emitir flashes luminosos em diferentes intensidades, sendo assim, tal fato possibilita os rituais de acasalamento (GANDOMI *et al.*, 2013). Antes de discutir o método do algoritmo é necessário fazer algumas ponderações, sendo elas: 1) todos os vagalumes são considerados assexuados, 2) a atratividade é proporcional à intensidade da luminosidade e 3) a luminosidade está relacionada com a função custo (GANDOMI *et al.*, 2013; FISTER *et al.*, 2013).

No ACV é importante ressaltar duas importantes situações: a variação da intensidade da luz e a formulação da atratividade (GANDOMI *et al.*, 2013). No que diz respeito a intensidade emitida, Rastgou e Moshtagh (2016) descreve-a conforme a Equação 8:

$$I(r) = I_0 e^{-\gamma r^2} \quad (8)$$

Já o fator de atratividade é formulado como a Equação 9:

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (9)$$

Sendo: I_0 a intensidade emitida; γ o parâmetro de absorção de luz pelo meio; r a distância entre os vagalumes i e j ; β_0 a atratividade para distância igual a zero.

A movimentação de um vagalume menos atraente para outro mais atraente é representada pela Equação 10.

$$x_i = x_i + \beta_0 e^{-\gamma r^2} ij (x_j + x_i) + \alpha (rand - \frac{1}{2}) \quad (10)$$

Sendo: x_i é o vagalume mais brilhante, x_j é o vagalume menos brilhante e α é a inserção de aleatoriedade.

No ACV, de acordo com Lobato (2016), o usuário deve informar alguns parâmetros iniciais, sendo eles: número de vagalumes (NP); número de variáveis de projeto (D); fator de atratividade (β_0); parâmetro de aleatoriedade (α); número máximo de gerações (MG).

4 Metodologia

A análise de custos será feita para a seção transversal de uma viga de concreto armado, tendo como variáveis a serem otimizadas a altura útil (d), a área da armadura tracionada (A_s) e a área da armadura comprimida (A'_s) da seção transversal da viga. Será adotado então, como variáveis: $d = x_1$, $A_s = x_2$ e $A'_s = x_3$.

Como função objetivo tem-se a Equação 11, que visa obter menor custo por comprimento unitário de viga. A equação leva em conta o volume do concreto, o peso do aço e a área de forma, multiplicados por seus respectivos custos.

$$F(x) = b(x_1 + d')c_1 + (x_2 + x_3)\rho_s c_2 + (b + 2(x_1 + d'))c_3 \quad (11)$$

Na Equação 11, ρ_s é a massa específica do aço e c_1 , c_2 e c_3 são os valores referentes aos custos para produção da viga, englobando mão-de-obra e materiais. Tais valores foram obtidos através da tabela de preços da Saneago (SANEAGO, 2015), conforme indicados a seguir: c_1 - Concreto: R\$ 377,66 / m³; c_2 - Aço: R\$ 6,10 / kg e; c_3 - Forma: R\$ 84,96 / m².

Assim, a questão se resume em um problema de minimização com restrições de igualdade e desigualdade, conforme Tabela 21.1. As restrições são aquelas

apresentadas no item de Dimensionamento Viga - Estado Limite Último, adaptadas para as novas variáveis de projeto: x_1 , x_2 e x_3 .

Tabela 21.1 Função objetivo e restrições para a otimização da seção transversal.

Função Objetivo	$F(x) = b(x_1 + d')c_1 + (x_2 + x_3)\rho_s c_2 + (b + 2(x_1 + d'))c_3$
Restrição H₁	$0,68 \, b x_1 \beta_x f_{cd} + x_3 \sigma'_s - x_2 \sigma_s = 0$
Restrição H₂	$0,68 \, b x_1^2 \beta_x f_{cd} (1 - 0,4 \beta_x) + x_3 \sigma'_s (x_1 - d') - M_d = 0$
Restrição G₁	$x_2 + x_3 - 0,04 b (x_1 + d') \leq 0$
Restrição G₂	$x_3 - 0,5 x_2 \leq 0$
Restrição G₃	$x_1 - 0,6 \leq 0$

Considerando para análise, uma viga de 30 cm de largura e submetida a um momento fletor $M_d = 441 \text{ kN.m}$, e utilizando concreto C25 e aço CA-50, tem-se como dados de entrada, além dos custos: $\rho_s = 7800 \text{ kg/m}^3$; $d' = 0,03 \text{ m}$; $f_{cd} = 17,86 \text{ MPa}$ e; σ'_s e $\sigma_s = 434,78 \text{ MPa}$.

Com o intuito de se obter o menor custo, foram calculados os valores ótimos das variáveis de projeto e da função para os limites dos domínios 2 e 3, 3 e 4, 4 e 4a. Para tanto, os valores das deformações para cada domínio estão apresentados na Tabela 21.2.

Tabela 21.2 Relação do domínio e deformação do concreto e do aço.

Domínio	$\varepsilon_c (\text{‰})$	$\varepsilon_s (\text{‰})$
Limite 2-3	3,5	10
Limite 3-4	3,5	2,07
Limite 4-4a	3,5	0

Para melhor visualização dos pontos ótimos para o problema foram feitas as Figuras 21.1 a 21.3, para todos os domínios, contendo as curvas da função objetivo e todas as restrições.

Além disso, as variáveis de projeto foram obtidas analiticamente, através das Equações 1 e 2, e computacionalmente através do Método de Powell e do

Algoritmo Colônia de Vagalumes (ACV). A fim de diminuir as variáveis de projeto foi adotado o uso de armadura simples, ou seja x_3 igual a zero, para o cálculo analítico e para o Método de Powell, sendo para este limitado uma quantidade de 3000 iterações. Já para o ACV utilizou-se então todas as variáveis, pois ele faz uma varredura em todo ambiente de projeto, independente da quantidade das mesmas.

5 Discussão e Resultados

Visando obter o menor custo para produção de um comprimento unitário de uma viga biapoaiada de concreto armado e submetida a um momento fletor de 441 kN.m, realizou-se o dimensionamento para o estado limite último. Para tanto, são apresentados nas Figuras 21.1 a 21.3 o espaço de soluções viáveis para o problema, lembrando que, por questão de economia x_3 será igual a zero. Nas figuras esse espaço é representado pela área não hachurada.

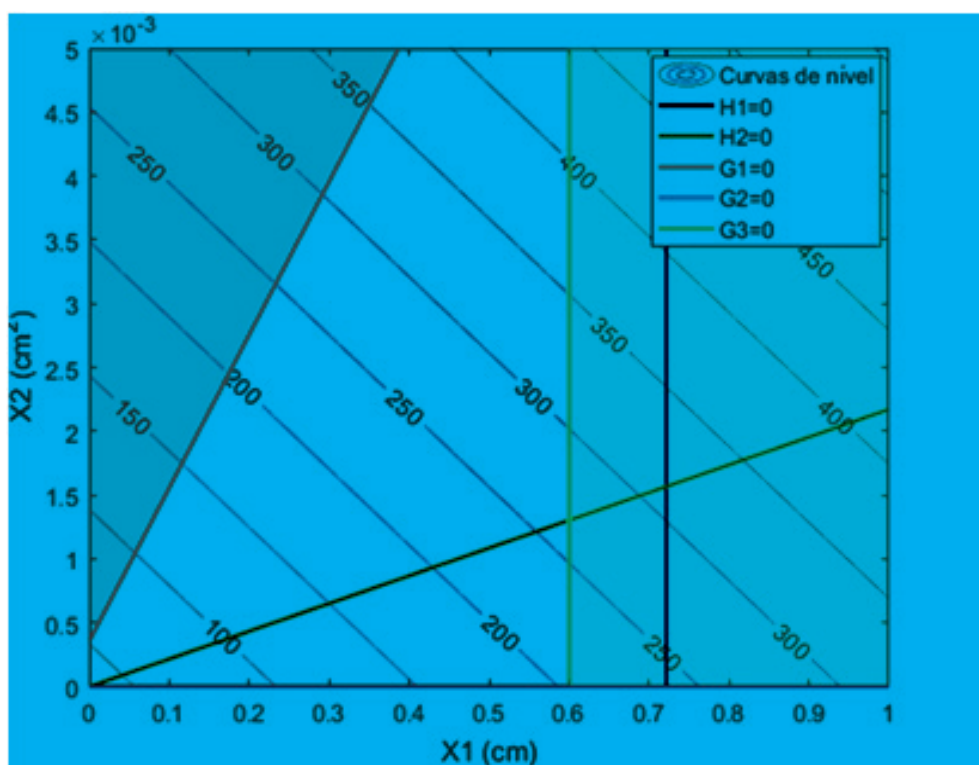


Figura 21.1 Restrições e área de soluções viáveis para o limite dos domínios 2-3.

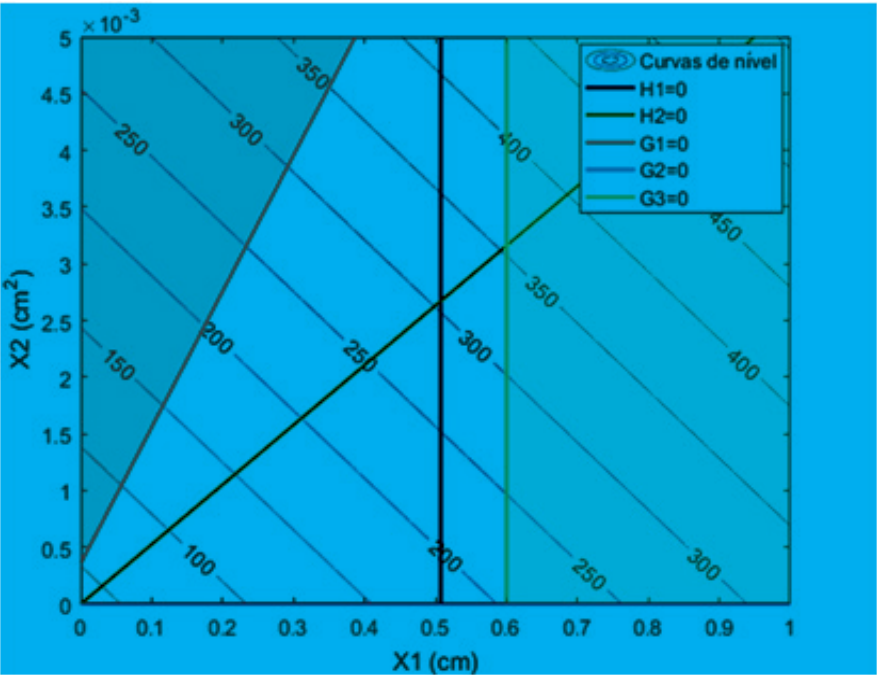


Figura 21.2 Restrições e área de soluções viáveis para o limite dos domínios 3-4.

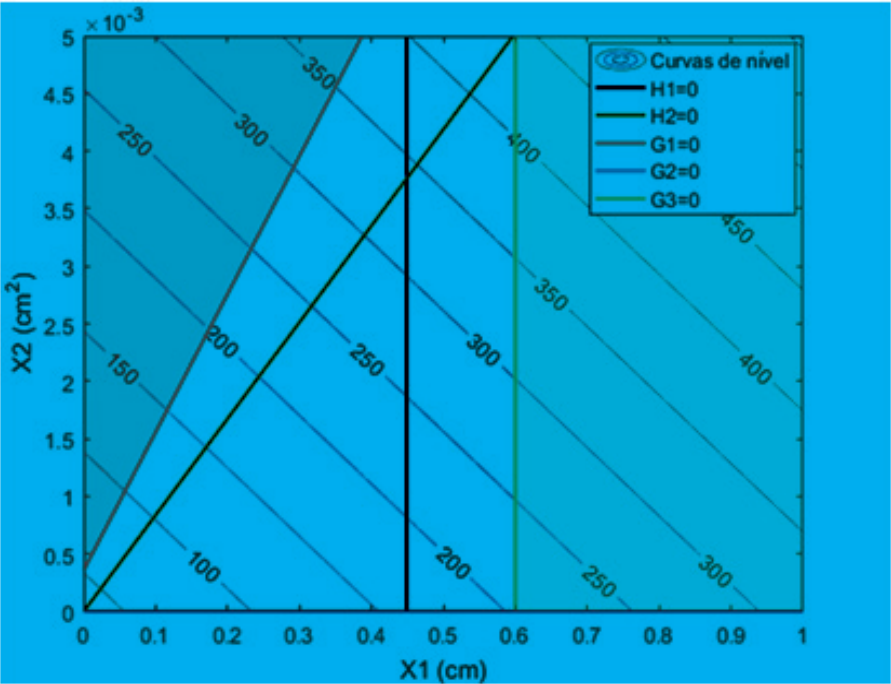


Figura 21.3 Restrições e área de soluções viáveis para o limite dos domínios 4-4a.

Na busca pelos pontos ótimos, primeiramente foi calculado os valores das variáveis de projeto e da função objetivo analiticamente, para os limites dos domínios 2 e 3, 3 e 4, 4 e 4a, conforme Tabela 21.3.

Tabela 21.3 Valores das variáveis de projeto e da função pseudo-objetivo calculados analiticamente.

Método	Domínio	x_1 (cm)	x_2 (cm ²)	x_3 (cm ²)	F
Analítico	Limite 2-3	72,18	15,68	0	R\$ 313,01
	Limite 3-4	50,73	26,71	0	R\$ 304,73
	Limite 4-4a	44,92	37,64	0	R\$ 340,27

Posteriormente, foi utilizado o Método de Powell para se obter os mesmos dados calculados analiticamente. Tais dados estão apresentados na Tabela 21.4, sendo, no entanto, exibidos os menores valores obtidos para o método durante o processo de otimização.

Tabela 21.4 Valores das variáveis de projeto e da função pseudo-objetivo calculados através do Método de Powell.

Método	Domínio	x_1 (cm)	x_2 (cm ²)	x_3 (cm ²)	F	Iterações
Powell	Limite 2-3	72,48	15,74	0	R\$ 314,16*	3000
	Limite 3-4	50,73	26,71	0	R\$ 304,73	97
	Limite 4-4a	44,92	37,64	0	R\$ 340,27	10

* Função não convergiu

Por fim, foi utilizado o Algoritmo Colônia de Vagalumes para se obter as variáveis de projeto e o valor da função objetivo. Nele foram utilizadas uma população inicial de 50 vagalumes com 10000 gerações e semente igual 8, além de, α igual a 0,2 e β_0 igual 0,5. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 21.5.

Tabela 21.5 Valores das variáveis de projeto e da função pseudo-objetivo calculados através do ACV.

Método	Domínio	x_1 (cm)	x_2 (cm ²)	x_3 (cm ²)	F
ACV	Limite 2-3	72,19	15,67	0	R\$ 315,03
	Limite 3-4	50,73	26,71	0	R\$ 304,93
	Limite 4-4a	44,91	37,63	0	R\$ 341,09

Após a obtenção dos dados foi possível verificar que para o limite dos domínios 2-3, tanto para Powell quanto ACV a função não convergiu. Isso ocorreu devido as restrições 1 e 2 de igualdade, que fazem com que a altura útil da viga (x_1) apresente valor superior a 60 cm, violando então a restrição de desigualdade 5. Esta situação pode ser verificada na Figura 21.1, onde a intersecção entre as restrições de igualdade ocorre no espaço não viável de solução. Os valores obtidos analiticamente também provam tal situação.

Já para o limite dos domínios 4-4a, no dimensionamento analítico, Powell e ACV, foi obtido o menor valor da altura útil da viga (x_1), porém um maior valor da área de aço (x_2), conforme também pode ser verificado na Figura 21.3. Com isso, o valor da função objetivo assumiu o maior custo entre os três casos analisados, confirmando a explanação feita por Pinheiro (2007), em que o dimensionamento no domínio 4 é uma solução antieconômica, podendo-se dizer que a seção está superarmada.

A partir dos dados apresentados nas Tabelas 21.3 a 21.5 a situação que apresenta menor custo é aquela situada no limite dos domínios 3-4, justificando o pressuposto apresentado novamente por Pinheiro (2007), de que no domínio 3 é a situação ideal de projeto. Tal resultado está, ainda, de acordo com o estudo de Vianna (2003), que destacou que a situação mais econômica é aquela situada na reta limite entre os domínios 3-4, pois é quando se diz que a seção está normalmente armada. Em comparação entre as Figuras 21.1, 21.2 e 21.3 também é possível notar que o ponto ótimo para esta situação é menor do que o apresentado nos limites de domínio.

Pode-se destacar, então, os dados referentes ao limite dos domínios 3-4, calculados pelos três métodos, conforme Tabela 21.6.

Tabela 21.6 Dados para o limite dos domínios 3-4.

Método	x_1 (cm)	x_2 (cm ²)	x_3 (cm)	F	Iterações
Analítico	50,73	26,71	0	R\$ 304,73	–
Powell	50,73	26,71	0	R\$ 304,73	97
ACV	50,73	26,71	0	R\$ 304,93	10000

Pelos valores é possível notar coerência entre os custos obtidos pelos três métodos abordados. O valor do custo obtido pelo ACV foi um pouco mais elevado que os demais, isto ocorre devido aos valores decimais para a altura útil e área de aço tracionada que não podem ser traduzidos para a realidade construtiva, assim não foram colocados como resultado deste trabalho. Ressalva-se que, o custo obtido pelo ACV pode ser melhorado, porém tem-se um aumento considerável no custo computacional empregado.

Considerações finais

Pelo processo desenvolvido para a situação da viga submetida à flexão simples e pelos resultados obtidos, foi possível notar relevância no método de dimensionamento tradicional e também no método clássico, já que sua implementação é simples e custo computacional pequeno. Se tratando do ACV foi possível concluir que o mesmo exige um custo computacional maior, além do fato de que o mesmo se tornou bastante sensível aos parâmetros, dificultando processos como análise de sensibilidade.

Em termos de otimização os procedimentos adotados chegaram a valores iguais, podendo ser explicado devido à simplicidade do caso adotado, ao qual métodos tradicionais são suficientes para solução. O destaque geral refere-se a análise feita pelo ACV para as barras comprimidas, as quais durante as iterações foram igualadas a zero, conforme adotado para as demais formas.

Em linhas gerais, o uso da otimização na Engenharia Civil é bastante relevante, podendo em casos de maior representatividade facilitar cálculos e obter valores realmente econômicos, fazendo uso de todas as propriedades dos materiais utilizados, fato que em muitas situações pode não ocorrer.

Referências

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.
- FISTER, I.; Jr. FISTER, I. YANG, X; BREST, J. **Swarm and Evolutionary Computation: A comprehensive review of firefly algorithms**. Elsevier, Londres, 34-36, 24 Jun 2013.
- FRANCISCO, D. O. **Aplicação de algoritmos bio-inspirados ao problema de geração automática de grades horárias**. 2013. Dissertação (Mestrado em Sistemas Dinâmicos) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.
- GANDOMI, A.H.; YANG, X; TALATAHARI, T.; ALAVI, A.H. **Commun Non-linear Sci Numer Simulat: Firefly algorithm with chaos**. Elsevier, Londres, 89-98, 21 Jun 2012.
- JCONLINE. **Construção Civil foi o setor que mais demitiu durante a crise**. Disponível em: <<http://jconline.ne10.uol.com.br/canal/economia/nacional/noti>

cia/2016/05/12/construcao-civil-foi-o-setor-que-mais-demitiu-durante-cri-se-235488.php> Acesso em: 01 ago. 2016.

LOBATO, F. S. **Guia de Estudos: Algoritmo de Colônia de Vagalumes**. Catalão: UFG/PPGMO, 2016. 8 p. Apostila.

LOPEZ, R. H.; MIGUEL, L. F. **Introdução a otimização estrutural**. Florianópolis: UFSC/PPGEC, 2013. 7 p. Apostila. Disponível em:< http://ppgec.posgrad.ufsc.br/files/2013/05/Topicos_Pesquisa_UFSC-timiza%C3%A7%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 01 ago. 2016.

PINHEIRO, L. M. **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios**. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, 2007.

PORTAL BRASIL. **Índice Nacional de Custo da Construção do Mercado – INC-C-M**. Disponível em:< <http://www.portalbrasil.net/incc.htm>>. Acesso em: 02 ago. 2016.

PRADO, J.; SARAMAGO, S. **Otimização por Colônia de Partículas**. [FAMAT]. Revista Científica Eletrônica da Faculdade de Matemática, n 4, 2005.

PURCINA, L. **Técnicas de Otimização Evolutiva Aplica às Solução de Grandes Sistemas Lineares**. 2010. 146 f. Tese – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2010.

RASTGOU, A.; MOSHTAGH, J. **Applied Soft Computing: Application of firefly algorithm for multi-stage transmission expansion planning with adequacy-security considerations in deregulated environments**. Elsevier, Londres, 373-389, 22 JAN 2016.

SANEAGO. **Preço base Saneago: relatório sintético de composições unitárias (construção civil) - adaptado ao SINAPI**. 2015. Disponível em: <https://www.saneago.com.br/supre/TABELADEPRECOS_ConstrucaoCivil.pdf>. Acesso em: 06 ago. 2016.

SILVA, F. E. C. **Otimização dimensional, de forma e topológica de estruturas treliçadas utilizando um algoritmo híbrido**. 2015. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

- SILVA, P. H. R.; BRANDÃO, M. A. L. Alguns métodos clássicos de otimização. In: **Anais do Congresso Nacional de Matemática Aplicada à Indústria**, n. 1, v. 1, Caldas Novas, 2014. São Paulo: Blucher, 2015, p. 384-392. Disponível em:< <http://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/alguns-mtdos-clssicos-de-otimizao-11922>>. Acesso em: 04 ago. 2016.
- SISNANDO, A. **Otimização de Dispositivos Fotônicos Utilizando Algoritmos Bio-Inspirados**. 2014. 171 f. Tese – Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2015.
- VANDERPLAATS, G. N. **Numerical Optimization Techniques for Engineering Design**. 3 ed. Colorado: Colorada Springs, 1999. 441 p.
- VIANNA, L. C. C. **Otimização de seções transversais de concreto armado: aplicação a pórticos**. 2003, 143 f. Dissertação – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 2003.

