

PROJETO ÓTIMO DE PÓRTICOS ESPACIAIS DE AÇO SEGUNDO A ABNT NBR 8800:2008

OPTIMUM DESIGN OF SPATIAL STEEL FRAMES ACOORDING TO ABNT NBR 8800:2008

João Alfredo de Lazzari (1) (P)
Élcio Cassimiro Alves (2)
Adenílcia Fernanda Grobério Calenzani (3)

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

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

(3) Dra. Profa., Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória - ES, Brasil

E-mail para Correspondência: joaoadelazzari@outlook.com.br; (P) Apresentador

Resumo: O uso de técnicas de otimização em estruturas de aço é amplamente aplicado em sistemas estruturais treliçados, porém ainda há poucas aplicações em estruturas de pórticos. O presente trabalho pretende apresentar a formulação do problema de otimização bem como sua aplicação para estruturas de pórticos tridimensionais de aço, com o objetivo de se obter o menor custo para a estrutura. Duas formulações são apresentadas e aplicadas, a primeira utiliza uma formulação com variáveis contínuas e solução obtida via Programação Quadrática Sequencial e a segunda utiliza variáveis discretas e solução obtida via Algoritmos Genéticos. Exemplos de validação do programa, intitulado Structure3D e desenvolvido na plataforma do MATLAB, são apresentados juntamente com exemplos de comparação com um software comercial. Os resultados apontam que uma solução melhor e mais eficiente pode ser encontrada quando essas técnicas de otimização são aplicadas ao problema proposto.

Palavras chaves: Pórticos Tridimensionais em Aço, Otimização, Programação Quadrática Sequencial, Algoritmos Genéticos.

Abstract: The use of optimization techniques in steel structures are widely applied in truss systems, however, still have few applications in frames structures. The present work aims to present the formulation of an optimization problem as well as its application to spatial steel frames, with the objective of obtain the lowest cost for the global structure. Two formulations are presented and applied, the first using a formulation with continuous variables and solution obtained by Sequential Quadratic Programming and the second using discrete variables and solution obtained by Genetic Algorithm. Examples of validation of the program entitled Structure3D, which was developed in the platform of MATLAB are presented, as well as other examples of comparison with a commercial software. The results indicate that a better and more efficient solution can be found when these optimization techniques are applied to the proposed problem.

Keywords: Spatial Steel Frames, Optimization, Sequential Quadratic Programming, Genetic Algorithm.

1 INTRODUÇÃO

Como o avanço nos softwares de cálculo estrutural, se faz necessário obter projetos confiáveis e com o menor custo possível. Para isso, técnicas de otimização podem ser aplicadas, como destacado nos trabalhos de Novelli *et al.* (2015), Lubke *et al.* (2017), Unde (2016), Akbari *et al.* (2016), De Lazzari *et al.* (2017) entre outros. Porém, trabalhos envolvendo técnicas de otimização para estruturas espaciais só recentemente começaram a explorar diferentes sistemas estruturais e técnicas de otimização.

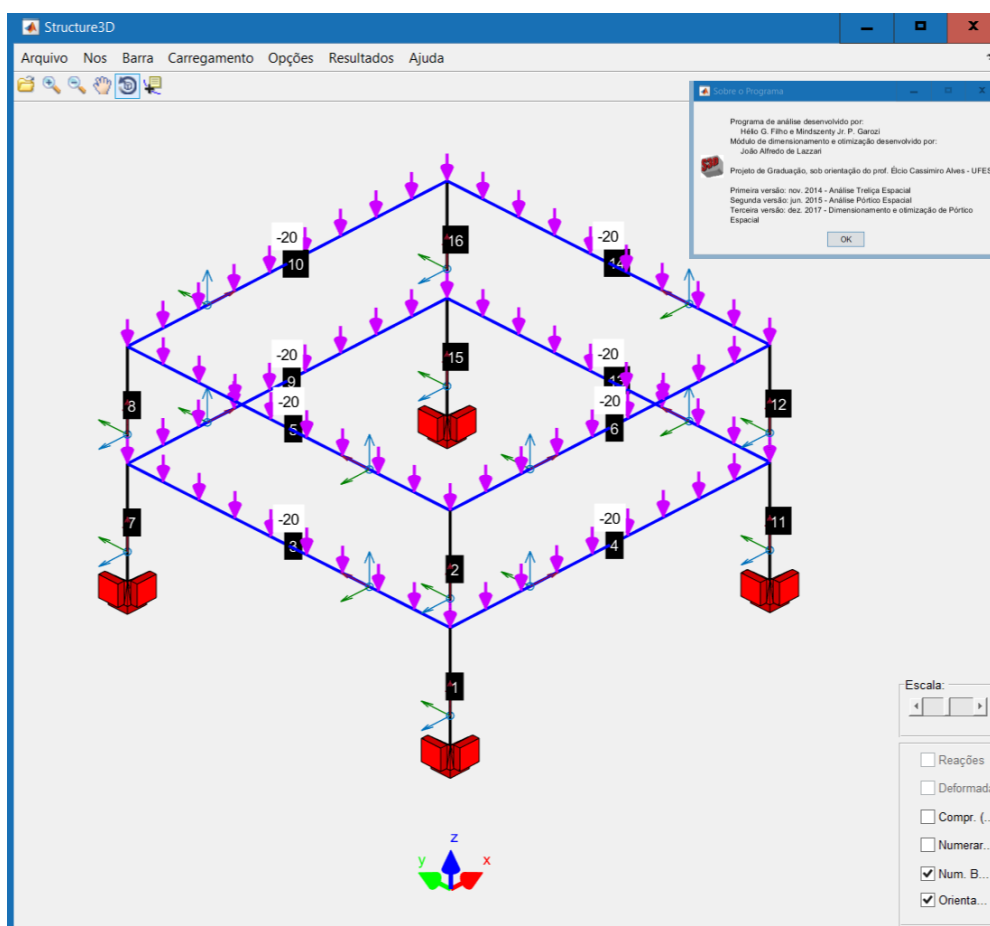


Figura 1 - Interface principal do programa desenvolvido, intitulado Structure3D, com o pórtico tridimensional do exemplo 02 de aplicação, com 16 barras.

O trabalho de Teles *et al.* (2010), que fez uma comparação de algoritmos genéticos com programação quadrática sequencial para otimização de problemas em engenharia mostrou uma melhora na solução para estruturas treliçadas.

Erdal, Dorgan e Saka (2011) fizeram dois estudos de projeto ótimo de vigas celulares utilizando metodologia evolutiva; o primeiro baseado em pesquisa harmônica, já o segundo em otimizadores de enxame. Os pesquisadores fazem uma análise comparativa dos dois métodos verificando qual se adapta melhor ao problema.

Em Carbas (2015) foi proposto o dimensionamento ótimo de pórticos tridimensionais, utilizando uma técnica baseada na *Biogeography Optimization*.

Alves, Lubke e Azevedo (2017) apresentaram trabalho de otimização de vigas celulares. Foram usadas três técnicas de otimização computacional, todas tendo como objetivo minimizar o peso da viga, a saber: Método dos Pontos Interiores, Programação Quadrática Sequencial e Algoritmos Genéticos.

O presente trabalho tem o objetivo de apresentar a formulação do problema de otimização e a sua aplicação em estruturas de pórticos de aço, com a finalidade de se obter uma estrutura com o menor custo. A formulação do problema inclui as prescrições da ABNT NBR 8800:2008 em relação aos esforços resistentes e deformações limites. O programa foi desenvolvido utilizando a ferramenta do GUIDE do MATLAB 2016 (figura 1). A solução do problema com variável discreta foi obtida via método dos Algoritmos Genéticos (AG), e para o problema com variável contínua foi utilizado a Programação Quadrática Sequencial (PQS). Uma comparação entre o programa comercial CYPE 3D e o método determinístico de otimização (PQS) é feita para mostrar a eficiência da formulação proposta.

1.1 Dimensionamento de Elementos em Aço

No que se refere ao dimensionamento de elementos estruturais em aço, foi abordada a verificação aos esforços combinados com flexão assimétrica e força axial em uma estrutura formada por pórticos tridimensionais. Segundo os critérios da ABNT NBR 8800:2008, para a atuação simultânea de esforços de momento fletor e axial, deve-se atender a limitação fornecida pelas expressões de interação das Equações (1) e (2).

$$\text{Caso } \frac{N_{sd}}{N_{Rd}} \geq 0,2$$
$$\frac{N_{sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{Sd,z}}{M_{Rd,z}} + \frac{M_{Sd,y}}{M_{Rd,y}} \right) \leq 1,0 \quad (1)$$

$$\text{Caso } \frac{N_{sd}}{N_{Rd}} < 0,2$$
$$\frac{N_{sd}}{2 N_{Rd}} + \left(\frac{M_{Sd,z}}{M_{Rd,z}} + \frac{M_{Sd,y}}{M_{Rd,y}} \right) \leq 1,0 \quad (2)$$

onde N_{sd} e N_{Rd} são as forças axiais solicitante e resistente de projeto, $M_{Rd,z}$ e $M_{Rd,y}$ são os momentos resistentes de projeto em z e y e $M_{Sd,z}$ e $M_{Sd,y}$ são os momentos solicitantes de projeto em z e y , sendo o eixo x o eixo longitudinal da barra.

A força axial resistente de cálculo à tração é determinada pela menor capacidade resistente entre os dois estados-limites aplicáveis: escoamento da seção bruta e ruptura da seção líquida. Na determinação da força axial resistente de cálculo à compressão considera-se os modos de colapso por instabilidade global da barra dotada de curvatura inicial, flambagem local da mesa e da alma e plastificação da seção transversal por compressão.

Para flexão, os estados limites últimos a serem verificados em vigas de seção I e H em relação ao eixo de maior momento de inércia são: flambagem local da alma, flambagem lateral

com torção e plastificação total da seção transversal. Já para as vigas solicitadas à flexão em relação ao eixo de menor momento de inércia o estado limite de flambagem local da mesa deve ser verificado.

2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O presente trabalho utiliza duas técnicas de otimização. O problema com variável contínua utiliza um modelo matemático determinístico, a Programação Quadrática Sequencial (PQS). Já o problema com variável discreta, utiliza o modelo probabilístico Algoritmo Genético (AG). Na figura 2, estão as variáveis de projeto a serem otimizadas.

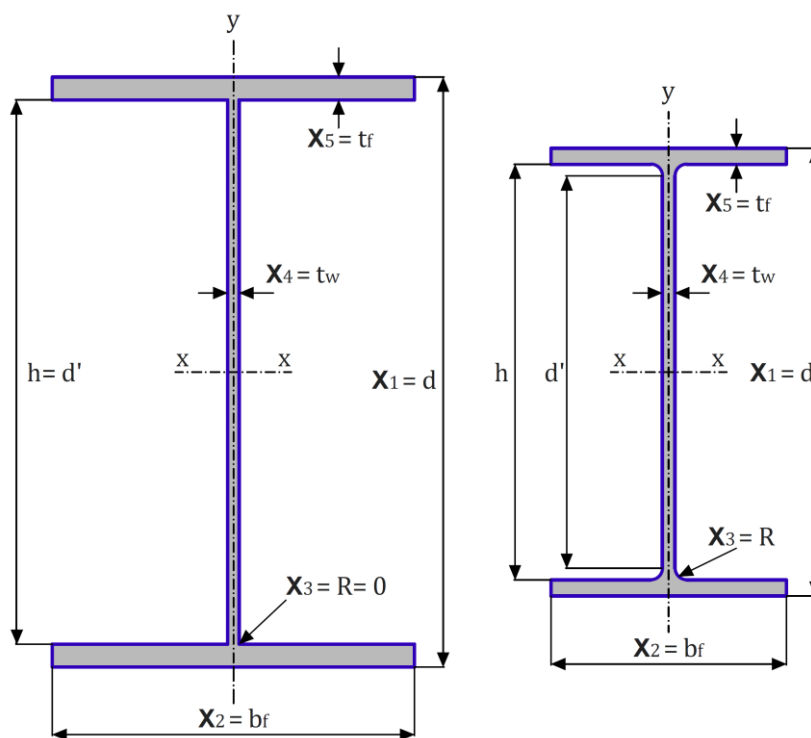


Figura 2 – Variáveis de projeto geométricas em perfil soldado e laminado I e H, e o vetor X

A Programação Quadrática Sequencial (PQS) utiliza como base o método de Newton, e parte de um ponto inicial, presente na região de busca. A partir de uma solução inicial, o método parte para a solução ótima de subproblemas quadráticos, para cada iteração. A cada passo, o problema é aproximado da solução ótima global, chegando assim na solução ótima do problema.

A formulação do PQS foi determinada utilizando a função interna *fmincon* do MATLAB 2016a: $[Xg, \text{peso_min}, \text{exitflag}, \text{output}] = \text{fmincon}(\text{problem})$. Contendo, uma função objetivo (*problem.objective*), um ponto inicial (*problem.x0*) e restrições (*problem.nonlcon*, *problem.lb*, *problem.ub*), além dos critérios de parada (*problem.options*). Para a função objetivo, foi definido a massa total da estrutura. Como ponto inicial, definiu-se $X_0^i = [550 \ 450 \ 0 \ 11 \ 22] \text{ mm}$ (determinado como a média de todos os perfis I e H catalogados). Para as restrições, foram definidas como na formulação do AG (equações (5) e (6)). Os critérios

de parada, estabeleceu-se uma tolerância de 10^{-12} para a diferença de solução entre um passo e outro e tolerância de 10^{-4} para o cálculo das restrições. Como resultado, a função informa o conjunto de variáveis de projeto encontradas (x_g), massa total da estrutura ($peso_min$), uma flag informando o sucesso do método ($exitflag$), e uma variável do tipo *structure* com informações adicionais sobre o resultado ($output$).

Já o Algoritmo Genético resolve problemas com ou sem restrições, e se baseia no processo de seleção natural que imita a evolução biológica. Basicamente o algoritmo modifica a população repetidamente selecionando indivíduos de três formas: elitismo, cruzamento de dois indivíduos que são pais de futuros filhos para a próxima geração (busca exploratória) e mutações de alguns indivíduos (busca exploratória). Após sucessivas gerações, a população converge para um único indivíduo, que é a solução ótima.

Para a formulação computacional do problema, foi utilizado a função *ga* do *Optimization Toolbox™* do MATLAB 2016a. A formulação para o Algoritmo Genético segue apresentada nas equações de (3) a (6) e as variáveis de projeto (X) na Figura 2.

$$F(\mathbf{X}_{bin})_{AG} = \begin{cases} \mathbf{X}_{bin}^i \rightarrow \mathbf{X}^i \\ \rho_{aço} \sum_{i=1}^n [A_b^i(\mathbf{X}^i) L_i] \end{cases} \quad (3)$$

$$[0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0]_{lb}^i \leq \mathbf{X}_{bin}^i \leq [1 \ 1 \ \dots \ 1 \ 1]_{ub}^i \quad (4)$$

$$\mathbf{g}^i(\mathbf{X}^i) = \left\{ \begin{array}{l} g_{EL}^i(\mathbf{X}^i) \\ g_w^i(\mathbf{X}^i) \\ g_{enr}^i(\mathbf{X}^i) \\ g_{geo}^i(\mathbf{X}^i) = \begin{cases} g_{\lambda}^i(\mathbf{X}^i) \\ g_{kc}^i(\mathbf{X}^i) \end{cases} \end{array} \right\} \leq 0 \quad (5)$$

$$\mathbf{h}^i(\mathbf{X}^i) = [] = 0 \quad (6)$$

onde: \mathbf{X}^i é a variável de projeto (representado na figura 2); \mathbf{X}_{bin}^i é a variável de projeto em binário do i -ésimo elemento; $\rho_{aço}$: é a massa específica do aço (7850 kg/m^3); A_b^i é a área do perfil do i -ésimo elemento; L_i é o comprimento do i -ésimo elemento; n é a quantidade de elementos estruturais do tipo barra.

A Eq. (3) é a função aptidão, definida pela massa total da estrutura. Para esse problema de variável discreta, houve a necessidade de uma troca de variável para atender a função interna do MATLAB *ga*. Essa troca está sendo simbolizada dentro da função aptidão (3). Observe que toda a técnica de otimização pelo algoritmo genético será feita com base em um vetor com variáveis binárias. Cada vetor com variáveis binárias representa um indivíduo que fornece uma

solução para o problema. Esse vetor é composto por um conjunto de perfis, que estão representados por valores binários.

A variável \mathbf{X}_{bin} é um vetor com n_{var} variáveis, e todas sendo valores de 0 ou 1, exclusivamente, para cada *gene* do *cromossomo*. O n_{var} irá depender da tabela de perfis usada como catálogo. Para a tabela de catálogo da GUERDAU, $n_{var} = 7$ e para todos os perfis soldados encontrados na ABNT NBR 5884:2005, $n_{var} = 9$. Esse número de variáveis define a quantidade máxima possível de uma codificação em binário para apenas um elemento do tipo barra. Garantindo que a variável \mathbf{X}_{bin} obtenha valores que sejam somente inteiros, em todas as suas células e restringindo os limites inferiores e superiores como descrito em (4), é possível controlar o vetor \mathbf{X}_{bin} como sendo um vetor com variáveis binárias. Dessa forma, cada vetor com n_{var} células binárias, representa um valor inteiro quando convertido. Assim este vetor representa a posição do perfil no catálogo, e é possível transformar o vetor \mathbf{X}_{bin} no \mathbf{X} (figura 2) para que possa ser determinado a massa do perfil destinado ao binário encontrado em \mathbf{X}_{bin} . Dessa forma, o nosso problema se torna um problema de variável discreta, onde será limitado aos perfis dos catálogos da GERDAU e da NBR 5884:2005.

Os limites superiores e inferiores (4) são os binários que representam o inteiro convertido mínimo e máximo para n_{var} espaços no vetor. Note que o valor inteiro para o binário do limite inferior é 0 e para o limite superior é variado, dependendo de n_{var} . Se $n_{var} = 7$, portanto o valor do inteiro que representa o binário do limite superior é 127 (1 1 1 1 1 1 1), e se $n_{var} = 9$ o limite superior será 511 (1 1 1 1 1 1 1 1 1). Como a tabela de perfis não possui exatamente o número de elementos correspondente aos limites determinados pelos binários, já que a quantidade máxima de um binário com n_{var} é de $2^{n_{var}}$, foi necessário incluir uma condição dentro da função aptidão a qual quando o vetor binário \mathbf{X}_{bin} for transformado em um indivíduo \mathbf{X} não existente ele retorna o último perfil da tabela. Por exemplo, um perfil do catálogo da GERDAU (que possui 88 perfis) entre as posições 89 e 128 o qual não existe, ele irá retornar sempre ao perfil de maior massa da tabela.

As funções de restrições não lineares, Eq. (5) e Eq. (6), foram determinadas de acordo com as limitações do problema. Elas podem ser divididas em cinco seções: restrições aos estados-limites ($g_{ELi}(\mathbf{X}_i)$); restrição a perfis de alma esbelta ($g_{wi}(\mathbf{X}_i)$); restrição a enrijecedores ($g_{enri}(\mathbf{X}_i)$); restrições geométricas de inequações ($g_{geoi}(\mathbf{X}_i)$) e igualdades ($h_{geoi}(\mathbf{X}_i)$). Dentro da função de restrições geométricas $g_{geoi}(\mathbf{X}_i)$ tem-se: restrições ao índice de esbeltez ($g_{li}(\mathbf{X}_i)$) e restrições ao valor de kc ($g_{kci}(\mathbf{X}_i)$). Lembrando que as funções de restrição $g_i(\mathbf{X}_i)$ devem ser menores que zero e as $h_i(\mathbf{X}_i)$ iguais a zero.

Tabela 1 – Parâmetros definidos para o Algoritmo Genético.

Número Total de Variáveis de Projeto:	$n_{var} \cdot n_{grupos}$
Tipo de Variável:	Real com codificação em binário
Tamanho da população Inicial:	500
Criação da população Inicial:	<i>Uniform</i>
Tipo de Avaliação da função fitness:	<i>Rank</i>
Tipo de seleção:	<i>Stochastic uniform</i>
Indivíduos Elite:	25



Tipo de Crossover:	<i>Scattered</i>
Taxa de Crossover:	0.8
Tipo de mutação:	<i>Adaptive feasible</i>
Tipo de Restrições:	Não-lineares
Algoritmo de Restrições:	<i>Augmented Lagrangian</i>
Penalidade Inicial:	10
Fator de Penalidade:	100
Número máximo de gerações:	100
Número máximo de gerações sem alterar o resultado:	50

onde: n_{var} é o número de variáveis binárias de cada elemento correspondente a cada catálogo de perfis (GUERDAU, $n_{var} = 7$; CS, $n_{var} = 8$; CVS, $n_{var} = 8$; VS, $n_{var} = 8$; Todos perfis soldados, $n_{var} = 9$); n_{grupos} é o número de grupos de elementos (caso a otimização não seja feito por grupos, n_{grupos} é igual a número total de elementos).

O dimensionamento ótimo foi implementado no MATLAB 2016a, e com o auxílio do GUIDE (*Graphical User Interface Development Environment*). Desse modo, foi possível elaborar uma interface gráfica para facilitar o estudo (figura 1).

Para a etapa de análise estrutural, foi utilizado o Structure3D, que é um programa implementado no MATLAB. O programa foi desenvolvido na Universidade Federal do Espírito Santo primeiramente pelos ex-alunos Hélio Gomes Filho e Mindszenty Júnior Pedroza Garozi e obteve pequenas atualizações por alunos de projetos de graduação e iniciação científica, sendo o Prof. Dr. Élcio Cassimiro Alves como o professor orientador desse projeto.

O Structure3D faz a análise linear de estruturas, pelo método dos deslocamentos e ainda fornece os diagramas e deformadas de estruturas tridimensionais com carregamentos uniformemente distribuídos e forças nodais. A etapa de verificação e otimização, foi incluída no programa Structure3D, como um módulo adicional, e tornando o programa autossuficiente.

3 EXEMPLOS PARA VALIDAÇÃO

Para validar e mostrar a aplicação do programa dois exemplos são apresentados. Para validação do programa, os resultados do programa são comparados com os já obtidos na literatura. E como forma de aplicação um exemplo foi comparado com a solução de um programa comercial.

3.1 Exemplo 01 – Pilar com carga axial e flexão assimétrica

O exemplo de Fakury *et. al* (2016), que consiste em um pilar de seção transversal em perfil X CVS 350 x 73, submetido à flexão composta (Figura 3), foi utilizado para validar a formulação proposta neste trabalho.

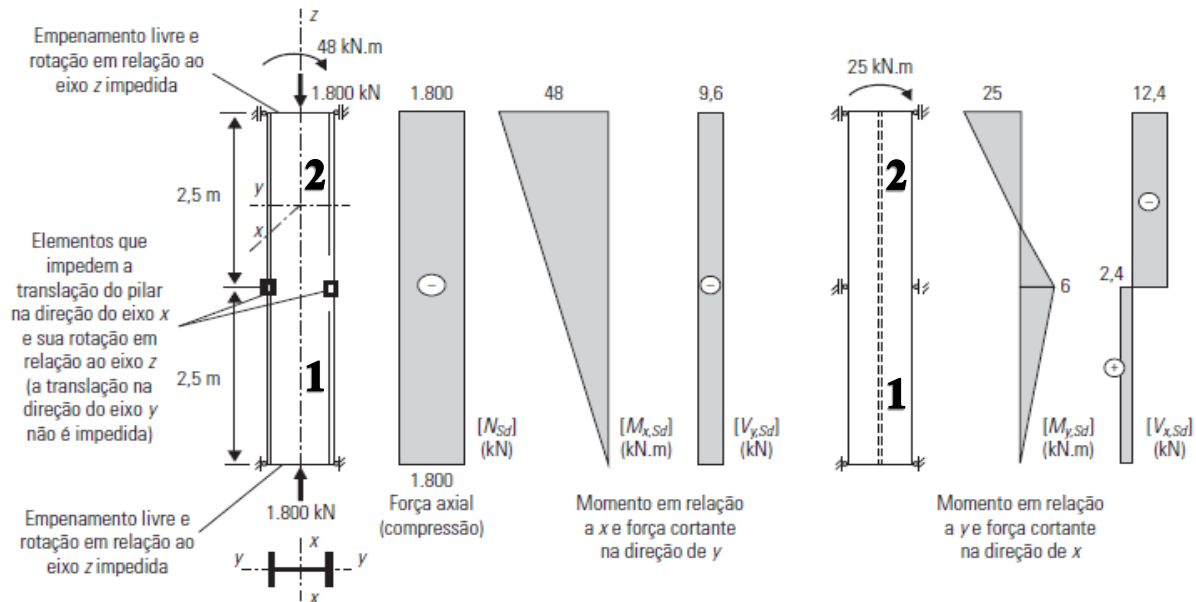


Figura 3 - Verificação de barra flexo-comprimida em perfil I soldado.

Fonte: (Fakury *et. al*, 2016)

De acordo com Fakury *et.al* (2016) os esforços de segunda ordem determinado pelo método do MAES, prescrito na ABNT NBR 8800:2008 Anexo D, constataram que os esforços de primeira ordem não seriam alterados, já que o coeficiente de amplificação calculado nas duas direções do pilar foi menor que um.

Na tabela 2 é mostrado os resultados de esforços resistentes de cálculo de forma comparativa entre o programa Structure3D desenvolvido na plataforma do MATLAB 2016a e os resultados de Fakury *et. al* (2016).

Tabela 2 - Comparação dos resultados de esforços resistentes de cálculo.

Esforços Resistentes	Unidade	Structure3D	Fakury <i>et. al</i> (2016) *
$M_{Rd,FLA,z}$	[kN.m]	415,40	415,55
$M_{Rd,FLM,z}$	[kN.m]	404,83	404,87
$M_{Rd,FLT,z}$	[kN.m]	415,40	415,55
$M_{d,ela,z}$ **	[kN.m]	559,74	-
$V_{Rd,y}$	[kN]	634,77	634,77
$M_{Rd,FLM,y}$	[kN.m]	121,92	121,90
$M_{d,ela,y}$ **	[kN.m]	124,38	-
$V_{Rd,z}$	[kN]	1.193,20	1.194,00
$N_{c,Rd}$	[kN]	2.601,10	2.606,00

* Foram obtidos dividindo o esforço característico pelo coeficiente de ponderação das resistências.

** $M_{d,ela}$ é o momento fletor resistente de cálculo que assegura a validade da análise elástica.

Para a combinação mais desfavorável de esforços solicitantes, Fakury *et al.* (2016) verificaram o efeito dos esforços combinados de momento fletor e axial da mesma forma que foi proposta neste trabalho, e obtiveram o resultado da Eq. (7). Os resultados dessa verificação no programa de dimensionamento Structure3D podem ser visualizados na Figura 4.

$$\frac{1.800}{2.606} + \frac{8}{9} \left(\frac{48}{404,87} + \frac{25}{121,90} \right) = 0,69 + 0,29 = 0,98 < 1,0 \quad OK! \quad (7)$$

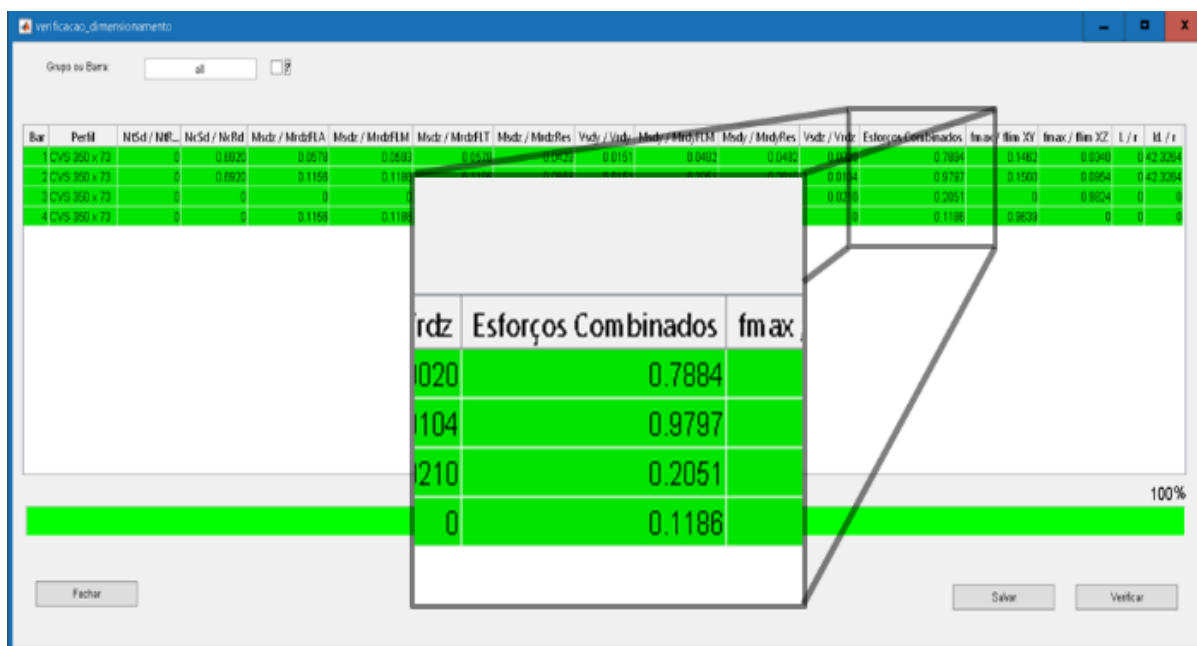


Figura 4 - Resultados da verificação pelo Structure3D.

Observe que pelos diagramas (figura 3) que o elemento mais solicitado aos esforços é a barra 2. Assim, a combinação de efeitos mais desfavorável encontra-se na barra 2. Comparando os esforços resistentes com esses solicitantes, é possível obter uma relação de 0,9797 (figura 4), valor muito próximo ao encontrado na literatura (Eq. 7). Assim, mostrou-se que o software está válido para verificar os esforços.

Após validar a verificação, o pilar foi submetido ao processo de otimização. A otimização apresentou o mesmo perfil (CVS 350 x 73) que o proposto por Fakury *et al.* (2016), o que garante a validade do processo de otimização e verificação. Apesar de não ter encontrado um perfil mais leve, a formulação empregada para esse exemplo mostra que é válida. Era de se esperar que o perfil ótimo fosse em torno do escolhido por Fakury *et al.* (2016), já que na verificação aos esforços combinados, equação (7), deu um valor muito próximo de 1. Assim, pode-se partir para problemas mais complexos de otimização.

3.2 Exemplo 02 – Pórtico Espacial com 16 barras

O segundo exemplo busca apresentar de forma mais ampla a formulação aqui proposta e é composto de um pórtico tridimensional conforme apresentado na Figura 5. O pórtico foi modelado no programa comercial CYPE 3D, e foi dimensionado utilizando os perfis soldados

do catálogo CVS da ABNT NBR 5884:2005. O pórtico é composto por 16 barras, e todas as bases são engastadas. Ainda, possui 2 pavimentos, com 3 m de pé direito, e vão de 10 x 10 metros. Na Figura 5 está o pórtico modelado no CYPE 3D, e na Figura 1 o pórtico modelado no programa aqui desenvolvido, intitulado Structure3D.

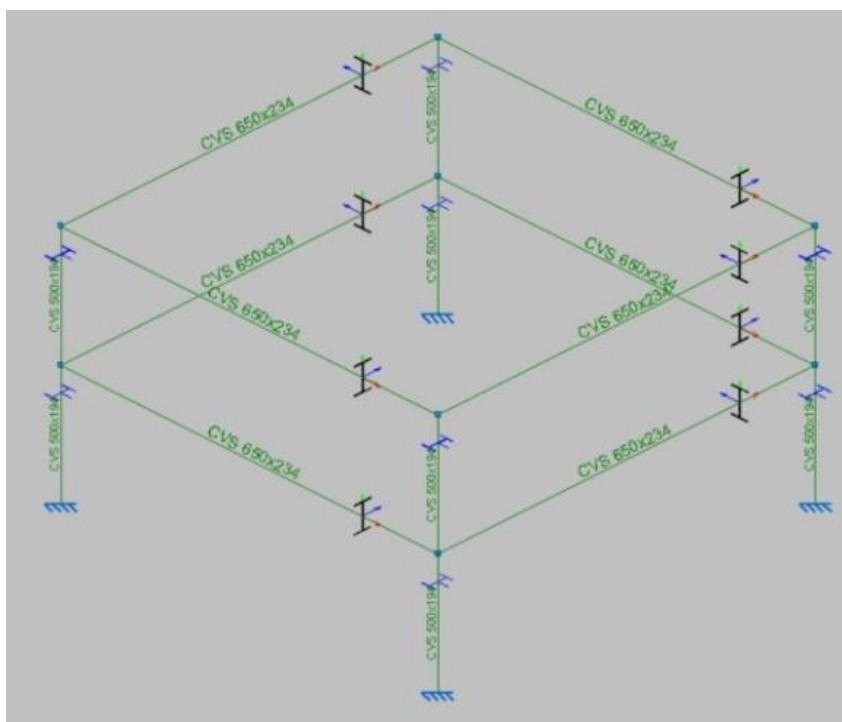


Figura 5 - Modelo do Pórtico tridimensional com vigas CVS 650 x 234 e pilares CVS 500 x 194 no programa comercial CYPE 3D.

O pórtico possui carregamento uniformemente distribuído característico nas vigas, de 40 kN/m, sendo que o fator de ponderação das ações foi considerado como 1,5 (mesmo coeficiente utilizado no CYPE 3D). Os coeficientes de flambagem por flexão, k_z e k_y , foram tomados iguais a 1,0 e o fator de modificação para diagrama de momento fletor não uniforme foi considerado igual a 1,0. A flecha máxima definiu-se como $L/300$ para todas as barras e o peso próprio foi considerado na análise. Toda a análise, tanto no programa comercial quanto no Structure3D, foi de primeira ordem.

Com a finalidade de comparar a verificação no Structure3D, a estrutura foi modelada da mesma forma que no CYPE 3D (Figura 1). Ainda, as vigas e os pilares foram agrupados separadamente em dois grupos (tanto no software Structure3D quanto no CYPE 3D). No CYPE 3D, o dimensionamento foi executando utilizando a opção “*Quick section design*”. Com esta opção, o CYPE 3D encontrou o perfil CVS 650 x 234 para as vigas, e o perfil CVS 500 x 194 para os pilares (figura 5). Na figura 6, é possível visualizar os resultados da verificação do CYPE 3D com o Structure3D, para os perfis CVS 650 x 234 (vigas) e CVS 500 x 194 (pilares).

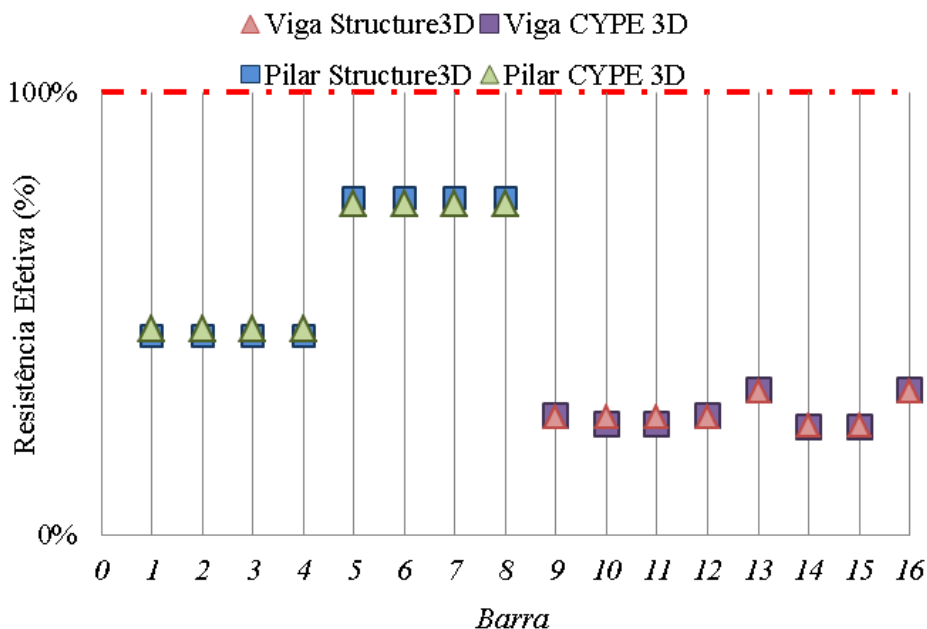


Figura 6 - Gráfico de dispersão com as verificações do CYPE 3D e do Structure3D

As barras de 1 a 4 e 5 a 8 são os pilares do 1º e 2º pavimento, e as barras de 9 a 12 e 13 a 16 são as vigas do 1º e 2º pavimento. Note que os resultados comparativos ficaram muito próximos, com um desvio médio de 1,0%, e todas as verificações atenderam. Note que a linha vermelha pontilhada, indica o máximo, quando o valor do momento resistente é igual ao solicitante.

Após a validação do problema de verificação aos esforços resistentes, o pórtico foi otimizado, com o objetivo de se obter uma solução melhor que a fornecida pelo CYPE 3D. Na tabela 3, estão os resultados em massa dos elementos dimensionados pelo CYPE 3D e otimizados pelo Structure3D.

Tabela 3 - Comparação da massa (kg) da estrutura entre os métodos do CYPE 3D e o Structure3D

Elemento	CYPE 3D	Structure3D	
		AG	PQS
Pilar	581.69	612.38	567.63
Viga	2,342.69	1,228.21	1,011.52
Massa Total*	23,395.04	14,724.72	12,633.20

* A massa total é formada pela massa do pilar mais a massa de viga multiplicado por 8

Note que os métodos de otimização obtiveram uma solução mais econômica do que a proposta pelo programa comercial CYPE 3D. Ainda, a solução do PQS obteve a solução mais econômica, com uma redução de 46% em comparação com o CYPE 3D. Já a otimização do AG, obteve uma redução de 37% na massa.

A solução fornecida pelo AG trata-se de uma solução de origem heurística, por isso é chamada de modelo probabilístico. Dessa forma, os seus dados são comumente apresentados em um conjunto de dados estatísticos, apresentado a melhor, a pior, a mediana, a moda e a

média de várias soluções encontradas. Entretanto, para este estudo, só são apresentadas as melhores soluções encontradas. Na figura 7 abaixo, é possível observar de forma gráfica os dados estatísticos e o comportamento de convergência do método aqui utilizado, para a melhor solução encontrada.

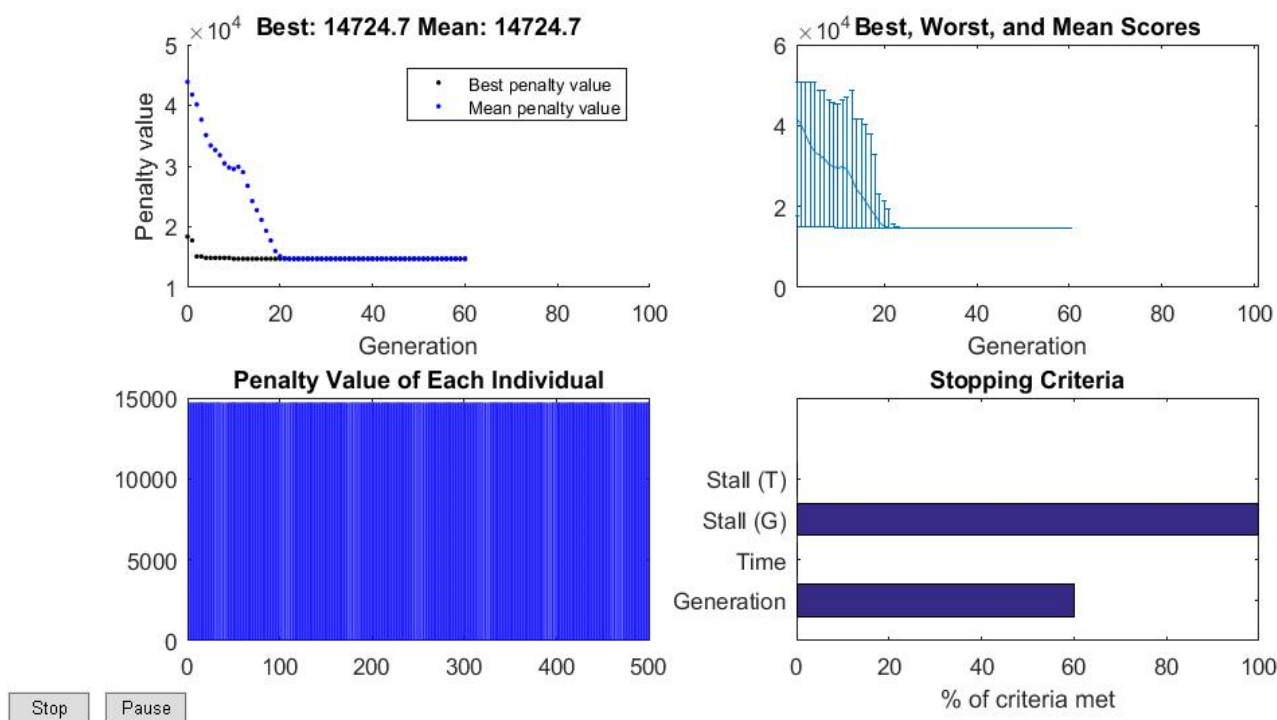


Figura 7 – Comportamento de convergência e dados estatísticos da melhor solução encontrada pelo AG.

Já para a metodologia do PQS os perfis encontrados não são catalogados. Dessa forma pode-se obter aproximações das dimensões obtidas no catálogo. Abaixo está a tabela 4 com os perfis dos pilares e das vigas otimizadas pelos métodos AG e PQS.

Tabela 4 - Dimensões dos perfis do pórtico tridimensional otimizados

Barra	Método	Perfil	kg/m	X					
				<i>bf</i>	<i>d</i>	<i>R</i>	<i>tw</i>	<i>tf</i>	
Pilares	CYPE 3D	CVS 500 X 194	193.9	500	350	0	16	25	
	Structure3D	AG	CVS 550 X 204	204.1	550	400	0	16	22.4
		PQS	-	189.2	513.2	427.7	0	11.1	22.1
Vigas	CYPE 3D	CVS 650 X 234	234.3	650	450	0	16	22.4	
	Structure3D	AG	CVS 500 X 123	122.8	500	350	0	9.5	16
		PQS	-	101.2	456.1	369.5	0	7.3	13.2

Em relação aos esforços normalizados, as soluções otimizadas requisitaram uma maior parcela da capacidade resistente disponível. No gráfico da Figura 8 é possível visualizar os esforços normalizados. Note que os resultados pela otimização pelo PQS obtiveram os esforços normalizados bem próximos de 100%.

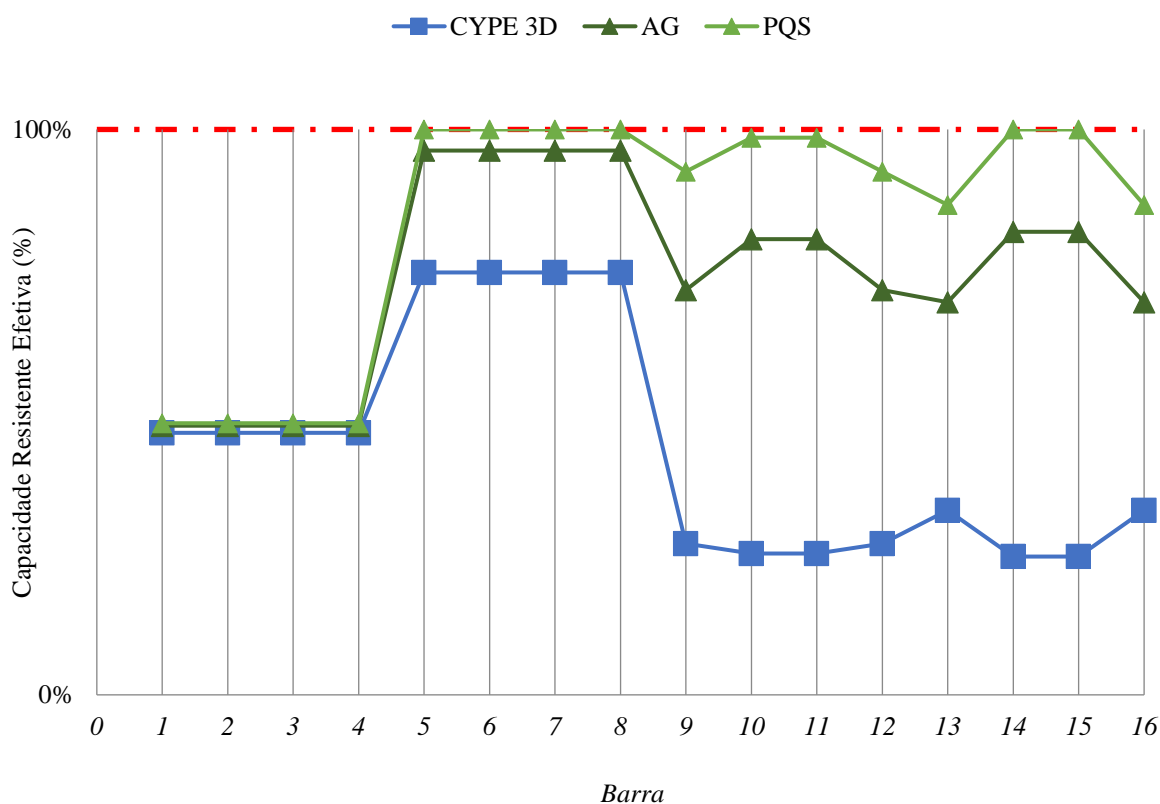


Figura 8 - Comparação do dimensionamento do CYPE 3D com os métodos de otimização AG e PQS

Observe que o método do PQS oferece soluções melhores que o AG e ao dimensionamento do CYPE 3D. Isso ocorre já que o PQS otimiza os perfis com variáveis contínuas, dessa forma, o seu método consegue alcançar 100% da capacidade resistente efetiva em grande parte das barras, tornando o método que fornece a melhor solução. Entretanto, para efeitos práticos, os perfis otimizados pelo método do PQS não são catalogados (tabela 4), havendo a necessidade de uma fabricação específica para determinado perfil. Já o método do AG, fornece uma solução discreta, com perfis catalogados, e com uma solução melhor que a proposta pelo dimensionamento do CYPE 3D. Note que em algumas barras, o método do AG chegou muito próximo da solução ótima alcançada pelo PQS, que apesar de ser um método discreto, pode alcançar soluções propostas por métodos com variável contínua.

4 CONCLUSÕES

Como proposto, a formulação foi validada e comparada a problemas da literatura e as soluções apresentadas por um programa comercial. De forma geral, esta formulação se mostrou eficiente na obtenção de uma solução mais econômica para os problemas de pórticos tridimensionais.

No primeiro exemplo, do pilar submetido a esforços combinados foi possível validar a formulação para a verificação a esforços combinados. Todos os esforços resistentes ficaram muito próximos. Ainda neste exemplo, foi utilizado à otimização discreta utilizando o



Algoritmo Genético, e mostrou-se que o perfil CVS 350 x 73 é o perfil ótimo da tabela de perfis da série CVS.

Já no segundo exemplo do pórtico tridimensional, foi proposta uma comparação entre o dimensionamento do CYPE 3D com a formulação aqui proposta. O AG do Structure3D forneceu uma estrutura mais leve, cerca de 37% mais leve, em comparação com o exemplo dimensionado no CYPE 3D. Já o PQS do Structure3D informou uma redução de 46%. Além disso, pela otimização com o AG do Structure3D notou-se que a redução na massa total foi permitida com um leve aumento da massa dos perfis dos pilares (193,9 kg/m para 204,1 kg/m +5,26%) para que pudesse reduzir a massa nas vigas (234,3 kg/m para 122,8 kg/m, -47,59%).

Percebe-se que a opção de otimização em projetos estruturais muda a etapa de planejamento do projeto. Esta etapa necessita que um profissional dimensione os elementos estruturais baseados na sua experiência em projeto, e nas restrições ocasionadas por agentes externos (tubulações, limitações arquitetônicas, necessidades do cliente, e entre outros). Entretanto, com a ferramenta de otimização, é possível obter uma solução sem a necessidade de uma profunda experiência estrutural, agilizando e depreciando o custo na etapa de projeto. Em um projeto integrado, utilizando a plataforma BIM, é possível chegar em soluções ótimas sem a necessidade de muito esforço técnico, porém, requisitando um esforço computacional elevado.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer primeiramente ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo. Em especial, o autor João Alfredo de Lazzari, agradece aos orientadores Dr. Prof. Élcio Cassimiro Alves e Dra. Profa. Adenilcia Fernanda Grobério Calenzani - que também são autores deste trabalho - pela orientação no projeto de graduação que resultou nesse trabalho. Agradecimentos também a banca examinadora do projeto representada pelo Dr. Prof. Macksuel Soares de Azevedo e Me. Francesco Mayer Sias.

REFERÊNCIAS

- Akbari, J., Ayubirad, M. S., 2016. *Seismic Optimum Design of Steel Structures Using Gradient-Based and Genetic Algorithm Methods*. International Journal of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology. Springer International Publishing.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008. NBR (8800): *Design of Steel and Composite Structures for Buildings*. Rio de Janeiro, RJ.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005. NBR 5884: 2005 - *Perfil I estrutural de aço soldado por arco elétrico – Requisitos gerais*. Rio de Janeiro, RJ.
- Carbas, S. 2015. *Optimum structural design of spatial steel frames via biogeography-based optimization*. Neural Comput & Applic, The Natural Computing Applications Forum 2016.



Centro Brasileiro da Construção em Aço, 2017. *Construção em Aço – Vantagens. O sistema construtivo em aço apresenta características significativas*. <<http://www.cbca-acobrasil.org.br/site/construcao-em-aco-vantagens.php>> Acessado em 27 de novembro de 2017.

De Lazzari, J. A., Alves, E. C., (2017). *Dimensionamento Otimizado de Perfis Laminados I*. Revista Engenharia Estudo e Pesquisa. Associação Brasileira de Pontes e Estruturas, v. 17, n. 2, jul./dez. 2017. Rio de Janeiro.

De Lazzari, J. A., Alves, E. C., Calenzani, A. F. G., (2017). *Optimum design of beams with hot-rolled I-section*. CILAMCE 2017 XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering. Florianópolis, SC.

Erdal, F.; Dogan, E.; Saka, M. P.(2011) *Optimum design of cellular beams using harmony search and particle swarm optimizers*. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 67, p. 237-247, 2011.

Fakury, R. H., Castro, A. L. R., Caldas, S. R. B., 2016. *Dimensionamento básico de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto*. São Paulo. Pearson Educatin do Brasil.

Lubke, G. P., Alves, E. C., Azevedo, M. S., (2017). *Dimensionamento Otimizado de Vigas Celulares de Aço*, Revista da Estrutura de Aço. Vol. 6, p 01-29, 2017.

MATLAB®, 2016. *Optimization toolbox user's guide*. Natick: Mathworks.

Novelli, L., Alves, E. C., Sias, F. M., Azevedo, M. S., Gomes Filho, H., Garozi, M. J. P., 2015. *Dimensionamento Ótimo de Estruturas Tubulares Espaciais Segundo a NBR 8800*. In: XXXVI Ibero-Latin American Congress on Computaional Methods in Engineering, 2015, Rio de Janiero, RJ.

Teles, M. L.; Gomes, H. M., 2010. *Comparação de algoritmos genéticos e programação quadrática sequencial para otimização de problemas em engenharia*. Rev. Teoria e prática na Engenharia Civil. Rio Grande, n.15, p-29-39, 2010.

Unde, Y., (2016). *Structural Design Optimization of Steel Buildings*. A thesis Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Science, Arizona State University, Tempe, AZ.