



OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE UM PÓRTICO ESPACIAL DE CONCRETO ARMADO UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

Halina dos Santos Salles

Franciane Conceição Peters

Webe João Mansur

salleshalina@gmail.com

fran@coc.ufrj.br

webe@coc.ufrj.br

Programa de Engenharia Civil, COPPE, LAMEMO, Universidade Federal do Rio de Janeiro
Av. Pedro Calmon s/n, Ilha do Fundão, 21941-596, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Resumo. No projeto de edificações, com o avanço da computação que permite a análise dos esforços em menor tempo, passa-se a buscar soluções otimizadas, e de menor custo. Nesse contexto, os projetistas almejam um projeto melhor e seguro referente a diversos aspectos estruturais, além da redução dos custos de material e mão-de-obra. Os métodos de otimização podem ser utilizados nesse intuito sem comprometer a segurança estrutural. Desse modo, este artigo tem por objetivo a otimização estrutural de um pórtico espacial de concreto armado, utilizando Algoritmos Genéticos. A construção do modelo computacional é realizada no programa Ansys, onde são aplicadas técnicas de discretização, via método dos elementos finitos, para a análise e obtenção dos esforços na estrutura. Um programa de Algoritmos Genéticos foi desenvolvido para o estudo, contendo também as especificações para o dimensionamento das armaduras dos elementos estruturais, incorporando diversas restrições para a solução. A função objetivo é formada pelos custos de concreto, forma e aço e será minimizada, sujeita a restrições da NBR 6118:2014 (Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento). Dessa forma, o procedimento aplicado nesse estudo visa otimizar as dimensões da seção transversal e armadura de vigas e pilares, obtendo projetos de custo mínimo, considerando apenas duas variáveis de projeto: altura das vigas e dos pilares. Os resultados preliminares mostram que a metodologia forneceu resultados coerentes com a prática e, ainda, surpreenderam com soluções quase ótimas que poderiam ser descartadas por um projetista.

Palavras-Chave: Otimização estrutural, Algoritmos genéticos, Concreto armado.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a competitividade entre as empresas aumentou a preocupação com a redução de custos na construção civil. Na engenharia estrutural, buscar uma equivalência entre economia e segurança é um grande desafio, visto que a redução considerável de insumos não pode comprometer a segurança e o comportamento da estrutura.

Nesse contexto, a procura por métodos que busquem um aproveitamento mais eficiente economicamente sem prejudicar a concepção estrutural é essencial. A otimização estrutural se introduz como um mecanismo eficaz para contribuir com a melhoria dos projetos, dimensionando os elementos estruturais com menor custo garantindo a integridade e desempenho estrutural. No mercado, é possível encontrar programas comerciais que realizam otimização, porém estes não fazem o dimensionamento das armaduras, impossibilitando a implementação de restrições que dependam, por exemplo, da disposição das armaduras na seção. Além disso, permitem o uso de número limitado de restrições, motivando assim o estudo sobre tal tema.

É comum os projetistas ao dimensionarem uma estrutura se basearem na sua experiência profissional quando realizam o lançamento e análise estrutural. Modificando apenas alguns parâmetros, eles conseguem um número limitado de modelos. Assim, os resultados são encontrados e analisados de acordo com a perspectiva empregada e a solução escolhida será aquela que for mais significativa de acordo com a experiência do projetista. Porém, apesar da solução eleita ser satisfatória, esse método pode conduzir a resultados não próximos do ótimo.

São muitos os trabalhos que tratam da otimização estrutural. Argolo (2000) apresentou uma formulação para o dimensionamento ótimo de seções retangulares de concreto armado à Flexão Composta Normal (FCN) empregando Algoritmos Genéticos. Os resultados do programa foram comparados com outros trabalhos da literatura que aplicaram otimização em seções transversais de concreto sem utilizar Algoritmos Genéticos, obtendo uma economia de até 12% em relação aos outros autores.

Silva (2001) estudou Algoritmos Genéticos como método de otimização aplicado a dois exemplos de estruturas de concreto armado: Um trecho de pilar dimensionado à Flexão Composta Oblíqua (FCO) e um pórtico plano de cinco pavimentos. O autor observou que a otimização do custo do pilar não foi eficiente, devido ao fato de os indivíduos que violaram restrições nas análises à FCO terem sido eliminados da população. Desta forma, para o problema de minimização do custo do pórtico plano de concreto armado, foi desenvolvido o módulo de verificação à FCN, fornecendo uma informação a mais que o módulo de FCO. O autor projetou uma solução para o pórtico plano através do programa comercial Eberick, buscando uma estrutura de concreto armado mais econômica possível, obtendo uma economia de 22,7% no resultado obtido pelo Algoritmo Genético, em relação à solução obtida com o programa comercial, confirmando a eficiência do método empregado.

Torres (2001) desenvolveu um procedimento para obtenção de pórticos planos de concreto armado com seções transversais retangulares para alcançar projetos ótimos utilizando o programa Ansys. A estratégia adotada é baseada no trabalho de Balling e Yao (1997), contido no Guia de otimização estrutural da ASCE (American Society of Civil Engineers), seguindo os critérios da norma americana (ACI) para o dimensionamento. O autor concluiu que, na maioria dos casos, quanto maior a quantidade de variáveis de projeto maior a redução da função objetivo, porém com a otimização disponível no Ansys nem sempre foi observado esse comportamento. Nesse trabalho, para todos os modelos estudados, as bases das vigas permaneceram praticamente constantes.

Bastos (2004) utilizou Algoritmos Genéticos para desenvolver um programa de otimização de seções retangulares de concreto armado submetidas à FCO. O programa desenvolvido pelo autor apresentou uma economia de até 13% em relação aos valores obtidos com os ábacos de Montoya. Já na comparação dos resultados extraídos da literatura utilizando outros métodos de otimização o programa conseguiu uma economia de até 34%.

De maneira geral, todos os trabalhos apresentados estudaram individualmente as situações de FCN e FCO, seja em elementos estruturais isolados ou pórtico plano. Na construção civil, principalmente em edificações, as estruturas (vigas e pilares) trabalham de forma solidária, isto é, atuam como um único conjunto estrutural. Desta forma, em uma única estrutura encontra-se mais de uma situação de projeto, tais como pilar de extremidade e pilar de canto em situação de FCN e FCO, respectivamente. Portanto, para abranger o estudo da aplicação de otimização estrutural em estruturas de concreto armado, o presente trabalho busca a otimização de um pórtico espacial de concreto armado utilizando Algoritmos Genéticos.

Sendo assim, este artigo tem como objetivo apresentar um estudo preliminar de otimização estrutural de um pórtico espacial de concreto armado. Para isso, um programa de Algoritmos Genéticos foi desenvolvido, contendo as especificações para o dimensionamento das armaduras dos elementos estruturais. A função objetivo a ser minimizada é composta pelo custo do concreto, da forma e do aço. Utiliza-se também penalização multiplicativa dos custos quando restrições previstas na norma brasileira ABNT NBR 6118 (2014) (Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento) são violadas. As variáveis de otimização aqui empregadas são duas: a altura da seção retangular das vigas e dos pilares. O modelo computacional é concebido no programa Ansys, discretização via método dos elementos finitos, para a análise e obtenção dos esforços e deformações na estrutura.

2 METODOLOGIA

No presente trabalho, busca-se encontrar as dimensões ótimas da seção transversal das vigas e pilares em concreto armado de um pórtico espacial. Para tal, um algoritmo genético é utilizado como ferramenta de otimização. Para cada solução candidata a análise de estruturas é determinada utilizando o programa Ansys e, posteriormente, o dimensionamento das armaduras é realizado seguindo as orientações da NBR 6118 (2014). Por fim, o custo total da estrutura é calculado, sendo este o objetivo a ser minimizado. Por fim, verificações das restrições penalizam o custo, de modo a evitar que soluções não viáveis sejam apontadas como ótima. A seguir são descritos os métodos empregados.

2.1 Algoritmos Genéticos

Os Algoritmos Genéticos (AGs) são métodos de busca inspirados pela teoria da evolução das espécies (Holland, 1975). Um AG parte de uma determinada população inicial, que é um conjunto de possíveis soluções do problema analisado, ou soluções candidatas. Ao longo do processo evolutivo, a população é avaliada através de notas. Essa avaliação dos indivíduos permite que os mais aptos influenciem mais o comportamento da convergência para uma solução, tendo maior probabilidade de darem origem a novos indivíduos. Os indivíduos podem sofrer modificações por meio dos operadores de cruzamento e mutação, produzindo descendentes para a próxima geração. Este procedimento é repetido até que uma solução

satisfatória seja encontrada. O Algoritmo 1 apresenta um pseudocódigo que representa um algoritmo genético:

Algoritmo 1

```
Inicialize a população
Avalie indivíduos na população
Repita
  Selecione indivíduos para reprodução
  Aplique operadores de recombinação e mutação
  Avalie indivíduos na população
  Selecione indivíduos para sobreviver
Até critério de parada satisfeito
Fim
```

Como principais vantagens do AG, podemos citar: fácil implementação, realizam buscas simultâneas em várias regiões do espaço de busca, funcionam para parâmetros contínuos ou discretos, e também com combinação deles, são versáteis e facilmente hibridizados com outras técnicas heurísticas e dificilmente se prendem a ótimos locais. Além disso, dispensam o cálculo do gradiente da função objetivo em relação aos parâmetros de otimização, o que nem sempre é simples de implementar ou possível de se calcular. Por essas razões, os AGs apresentam bom desempenho na solução de muitos problemas complexos, principalmente, com múltiplos mínimos ou máximos.

Apesar das vantagens mencionadas, os AGs demandam bastante esforço computacional, por causa do grande número de análises das funções aptidão e suas restrições, podem convergir lentamente para o ótimo global e demandam inúmeras escolhas de parâmetros de configuração, como taxa de aplicação dos operadores, o que pode tornar complexa a sua utilização. Por outro lado, a computação paralela da função objetivo para os inúmeros indivíduos da população é de fácil implementação e pode ser empregada para substancial redução do tempo de computação.

2.2 Interface entre AG e Ansys

Nesse trabalho foi desenvolvido um programa de otimização para pórtico espacial de concreto armado, utilizando AG e a análise de estruturas, passo intermediário para avaliação dos indivíduos foi realizada em ambiente Ansys. O programa que contém o AG inclui também o dimensionamento dos elementos estruturais e verificações das restrições, função objetivo e demais processos. A Fig. 1 apresenta o fluxograma da metodologia utilizada no programa.

Para o programa AG utilizou-se a linguagem de programação Fortran. O AG inicializa a população e segue para a avaliação dos indivíduos da população, criando o arquivo de entrada para o ambiente Ansys, através da plataforma programável do sistema (APDL). Assim, após o AG definir os dados de entrada, parte-se para a construção do modelo computacional e a análise da estrutura via Método dos Elementos Finitos (MEF) no Ansys, que fornecerá os relatórios dos esforços internos e deformações dos elementos estruturais. O Ansys produz dois relatórios, um para o Estado Limite de Último (ELU) e um para Estado Limite de Serviço (ELS). Em seguida, o AG faz a leitura dos relatórios gerados pelo Ansys e prossegue para as rotinas de dimensionamento.

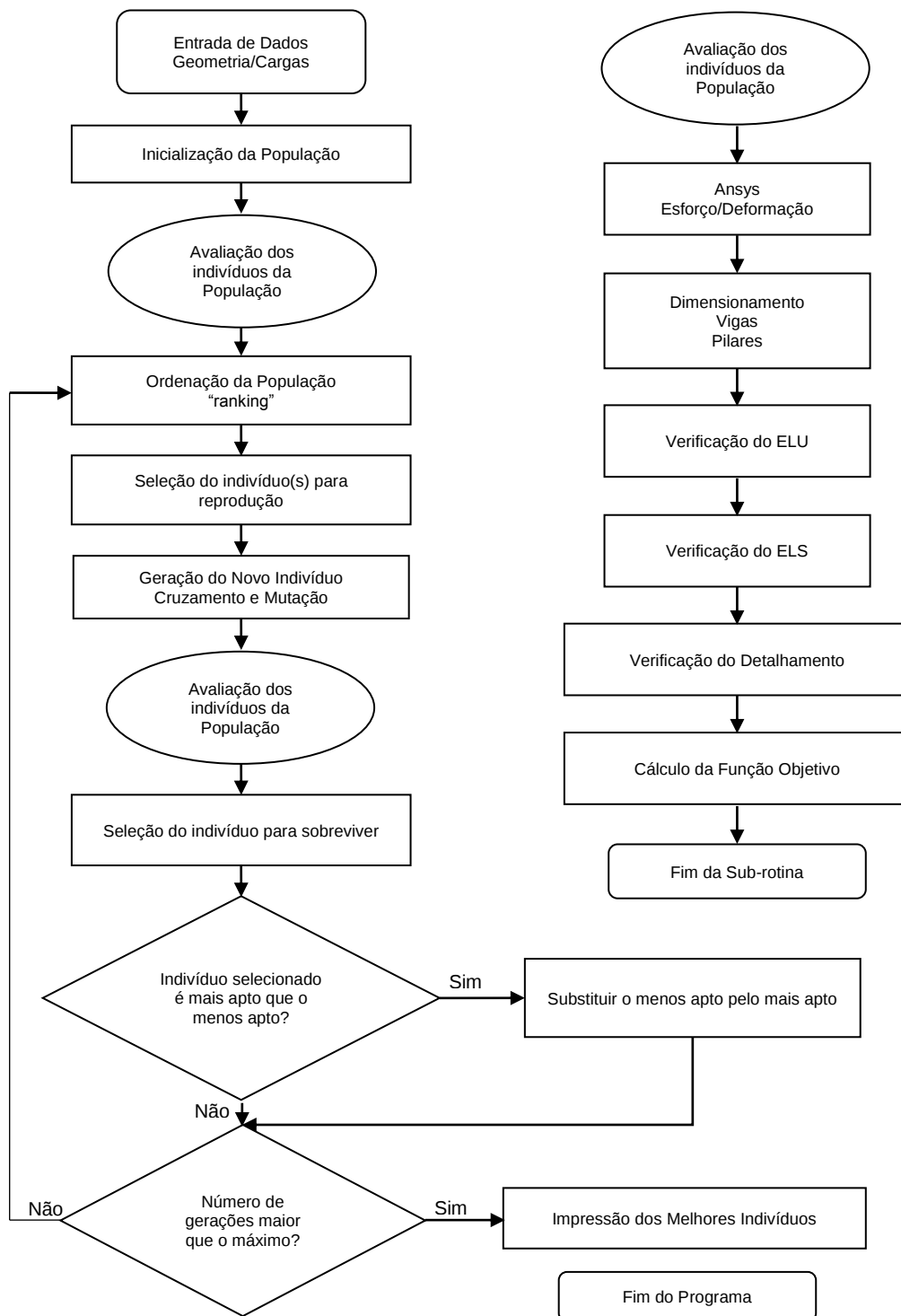


Figura 1. Fluxograma do programa desenvolvido, com detalhe à direita para a avaliação dos indivíduos

Após a avaliação da população, o AG colocará os indivíduos em ordem (ranking) de acordo com a aptidão e então irá repetir as seguintes etapas, até o critério de parada ser satisfeito: selecionar os indivíduos para reprodução, aplicar os operadores genéticos de

cruzamento e mutação, avaliar os indivíduos gerados e selecionar o que sobreviverá na população. Nessa última etapa, se o indivíduo gerado for melhor que o pior elemento da população atual, então este indivíduo será inserido na população, de acordo com sua classificação, gerando a população da nova geração.

2.3 Dimensionamento de concreto armado

Após leitura dos relatórios *output* do Ansys, a combinação do carregamento permanente com a variável é majorada pelo coeficiente de ponderação para obter os esforços referentes ao ELU. O dimensionamento da estrutura é realizado com os esforços obtidos no ELU. Para obter os esforços e deslocamentos referentes ao ELS, as combinações frequentes e quase permanentes são calculadas utilizando fatores de combinações condizentes com os estabelecidos pela NBR 6118 (2014). Os esforços e deslocamentos referentes ao ELS são utilizados para verificar a abertura de fissuras e a deformação excessiva.

Para cada viga, a armadura referente a resistência à flexão é calculada através da equação

$$A_{sv} = \frac{M_d}{f_{yd} (d - 0,4 x)} \quad (1)$$

onde A_{sv} é a área de aço da seção transversal da viga, M_d é o momento fletor solicitante de cálculo, f_{yd} é a tensão de cálculo do aço, d é a altura útil da viga e x é a altura da linha neutra da seção transversal da viga.

Ao contrário do caso das vigas, para efeito de simplificação, foram utilizadas tabelas de dimensionamento de pilares sujeitos à Flexo-Compressão Reta e Flexo-Compressão Oblíqua obtidas pelo software PACON, desenvolvidas por Araújo (2006). Assim, após verificação da situação de projeto que o pilar se encontra, o programa busca nas tabelas correspondentes, através de parâmetros obtidos pelos esforços solicitantes, a taxa mecânica (ω), com a qual se calcula a área da armadura, através da equação

$$A_{sp} = \omega \frac{b h_p 0,85 f_{cd}}{f_{yd}} \quad (2)$$

onde A_{sp} é a área de aço da seção transversal do pilar, b é a espessura do pilar, h_p é a altura do pilar, f_{cd} é a tensão de cálculo do concreto e f_{yd} é a tensão de cálculo do aço.

Para fins práticos, tanto para as vigas quanto para os pilares, busca-se a quantidade de barras e bitola de aço a serem utilizadas na armadura longitudinal e espaçamento e bitola das barras de aço para a armadura transversal em tabelas de aço comerciais a partir da área de aço necessária calculada. Com as armaduras conhecidas, calculadas em função dos esforços críticos, o custo e as restrições podem ser avaliados.

As hipóteses básicas de cálculo que foram adotadas nesse trabalho, atendendo as exigências da NBR 6118 (2014), são:

- a) Manutenção das seções planas;
- b) Solidariedade dos materiais;
- c) A resistência a tração do concreto é desprezada.

2.4 Constantes de projeto

As constantes de projeto são: geometria retangular das seções transversais, largura da seção transversal (b), a sobrecarga, as propriedades dos materiais (módulo de elasticidade do concreto e do aço, resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}), coeficiente de Poisson (ν) e resistência ao escoamento do aço de armadura passiva (f_y), cobrimento (c) e os valores dos custos dos materiais e mão-de-obra.

2.5 Variáveis de projeto

As variáveis independentes de projeto são as alturas da seção transversal das vigas e pilares. A armadura dos elementos estruturais e o peso próprio são determinados em função das variáveis independentes. Assim, no presente trabalho o problema de otimização é formulado com apenas duas variáveis: altura da seção das vigas (h_v) e altura da seção dos pilares (h_p).

2.6 Restrições de projeto

Todos os indivíduos gerados são verificados em relação ao Estado Limite Último (ELU), Estado Limite de Serviço (ELS) e detalhamento, conforme as recomendações estabelecidas pela NBR 6118 (2014). Caso alguma destas restrições não seja atendida, o indivíduo será penalizado. As restrições impostas para o problema são:

- Equilíbrio das seções transversais;
- Taxas de armadura máximas e mínimas;
- Espaçamentos máximos e mínimos da armadura;
- Verificação de abertura de fissuras;
- Verificação de deformações excessivas.

A razão entre o valor calculado e o limite estabelecido pela norma é uma penalização que tem valor maior que a unidade se o valor calculado superar os valores limites. Caso contrário, será igual à unidade.

2.7 Função objetivo

A função objetivo do problema de otimização a ser minimizada é o custo total do pórtico, que será penalizado se algum dos elementos estruturais violar restrições. O custo total consiste nos custos do material e da mão-de-obra do concreto, da armadura e da forma. O custo total do pórtico é dado pela equação

$$C_T = C_V + C_P \quad (3)$$

onde C_V é o custo total de todas as vigas e C_P é o custo total de todos os pilares. Lembrando que o custo de cada elemento estrutural será multiplicado pelas respectivas penalizações. Os custos das vigas e pilares, já penalizados se for o caso, serão dados por:

$$C_V = \sum_{i=1}^m \left[\prod_{r=1}^k Pen_r (C_{V_c} + C_{V_a} + C_{V_f}) \right] \quad (4)$$

$$C_p = \sum_{j=1}^n \left[\prod_{s=1}^p Pen_s (C_{P_c} + C_{P_a} + C_{P_f}) \right] \quad (5)$$

Na Eq. (4), m é a quantidade de vigas e o custo referente ao concreto, aço e forma são, respectivamente, C_{V_c} , C_{V_a} e C_{V_f} . Pen_r é a função de penalização para a r -ésima restrição e k é a quantidade de penalizações. Na Eq. (5), C_{P_c} , C_{P_a} e C_{P_f} são o custo referente ao concreto, aço e forma dos pilares, respectivamente, e n é a quantidade de pilares. Pen_s é a função de penalização para a s -ésima restrição; e p é a quantidade de penalizações.

As parcelas dos custos correspondentes às vigas são:

$$C_{V_c} = C_c L_v b h_v \quad (6)$$

$$C_{V_a} = C_a \gamma_a L_l * Nb + C_a \gamma_a L_w (L_v/s) \quad (7)$$

$$C_{V_f} = C_f L_v (b + 2 h_v) \quad (8)$$

As parcelas dos custos referentes aos pilares são:

$$C_{P_c} = C_c L_p b h_p \quad (9)$$

$$C_{P_a} = C_a \gamma_a L_l * Nb + C_a \gamma_a L_w (L_p/s) \quad (10)$$

$$C_{P_f} = C_f L_p 2 (b + h_p) \quad (11)$$

Nas equações acima, C_c é o custo do concreto por volume, C_a é o custo do aço por peso, C_f é o custo da forma por área, γ_a é o peso do aço, L_v é o comprimento da viga, b é a espessura da seção transversal, L_p é o comprimento do pilar, h_v é a altura da seção transversal da viga, h_p é a altura da seção transversal do pilar, L_l é o comprimento da armadura longitudinal, L_w é o comprimento da armadura transversal, Nb é o número de barras longitudinais e s é o espaçamento entre as armaduras transversais.

2.8 Critério de parada

Por simplicidade, uma vez que o problema a ser resolvido é relativamente simples com apenas dois parâmetros, o critério de parada adotado está relacionado ao número de gerações. Assim, nos resultados preliminares aqui apresentados, o número total de soluções candidatas testadas ao longo do processo foi escolhido de tal forma que fosse maior ou igual ao número de soluções no espaço de busca, o que não seria possível realizar se o número de incógnitas fosse significativamente maior.

3 APLICAÇÃO NUMÉRICA

Dado o caráter preliminar do trabalho, optou-se por analisar o comportamento da solução em função de apenas duas variáveis independentes, consideramos que todas as vigas têm a mesma altura da seção transversal, bem como os pilares. Entretanto, o modelo estrutural para a realização da otimização foi elaborado para explorar vários aspectos referentes ao dimensionamento e análise de estruturas complexas, como é o caso dos pórticos espaciais de concreto, o que será melhor explorado em trabalhos futuros.

Para esse estudo será considerado o pórtico espacial, apresentado na Fig. 2, formado por 5 andares (1 térreo + 4 pavimentos), com 17,50 metros de altura e uma área em planta de 15,00 metros de extensão por 10,00 metros de largura.

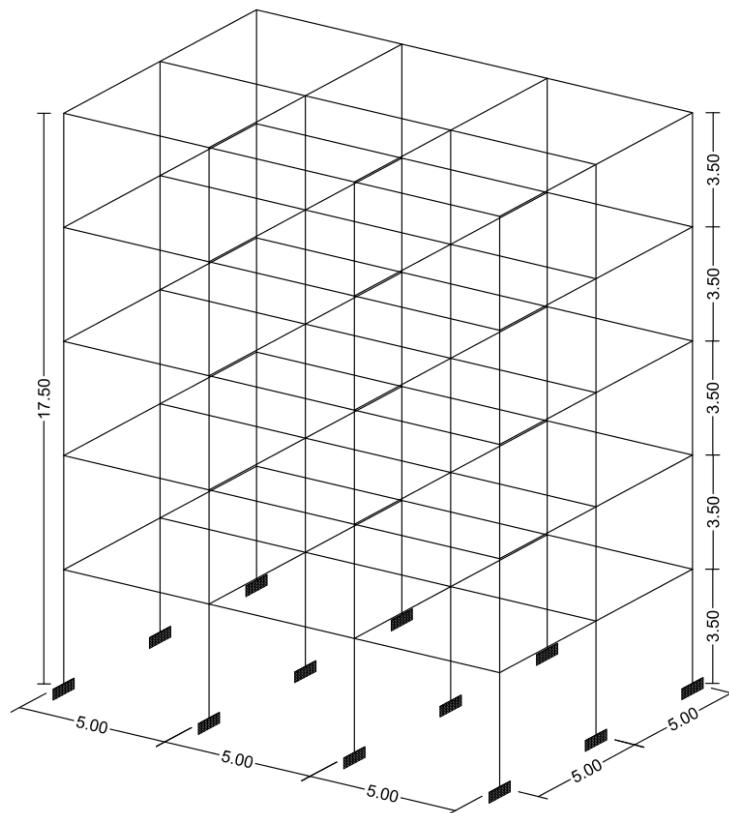


Figura 2. Pórtico espacial que terá seus elementos estruturais otimizados

Em relação aos carregamentos foram considerados o peso próprio da estrutura (PP) e sobrecarga (SD) de 15 kN/m. A resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}) de 30 MPa, módulo de deformação secante do concreto (E_{cs}) de 27 GPa, massa específica do concreto equivalente a 2500 kg/m³, resistência ao escoamento do aço de armadura passiva (f_y) de 500 MPa, módulo de elasticidade do aço (E_s) igual a 210 GPa, cobrimento (c) de 30 mm e coeficiente de Poisson (ν) igual a 0,2.

Como as variáveis de projeto são dimensões em centímetros, optou-se por utilizar codificação real dos cromossomos. Entretanto, posteriormente, decidiu-se considerar a

realidade da prática da construção brasileira e os valores das variáveis fornecidas pelo AG são transformados em números inteiros antes do dimensionamento das armaduras. O mínimo para altura dos elementos é de 25 cm e o máximo 50 cm. Foram realizados dois experimentos, um com população de 50 indivíduos e outro com 25 indivíduos, ao longo de 25 gerações com probabilidade de *crossover* de 45% e taxa de mutação de 55%. Os operadores de *crossover* sorteiam uma posição do cromossomo para troca do material genético entre os pais ou fazendo a combinação linear dos valores das variáveis dos pais, em ambos os casos gerando dois novos filhos. O operador de mutação modifica o valor das variáveis sorteadas para valores entre o atual e o máximo ou mínimo. Note que nesses experimentos preliminares o espaço de busca contém 625 (25x25) soluções candidatas enquanto cada rodada avalia 625 ou o dobro de indivíduos.

Para cada experimento, são apresentadas 2 rodadas independentes do AG, uma vez que havia a expectativa de se encontrar no mínimo duas soluções ótimas, uma com mais aço e menos concreto e outra com mais concreto e menos aço, o que foi verificado já na segunda rodada.

Os valores utilizados para os preços de concreto, forma e aço foram extraídos do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI), referente ao mês de julho de 2017 para a cidade do Rio de Janeiro.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram realizadas três diferentes comparações dos resultados obtidos. A Fig. 3 apresenta os resultados para a altura dos pilares ao longo das iterações realizadas para cada uma das configurações do AG. Na Fig. 4 é possível comparar a altura das vigas ao longo das iterações. A terceira comparação foi a do custo total do pórtico (Fig. 5) para as duas configurações do AG.

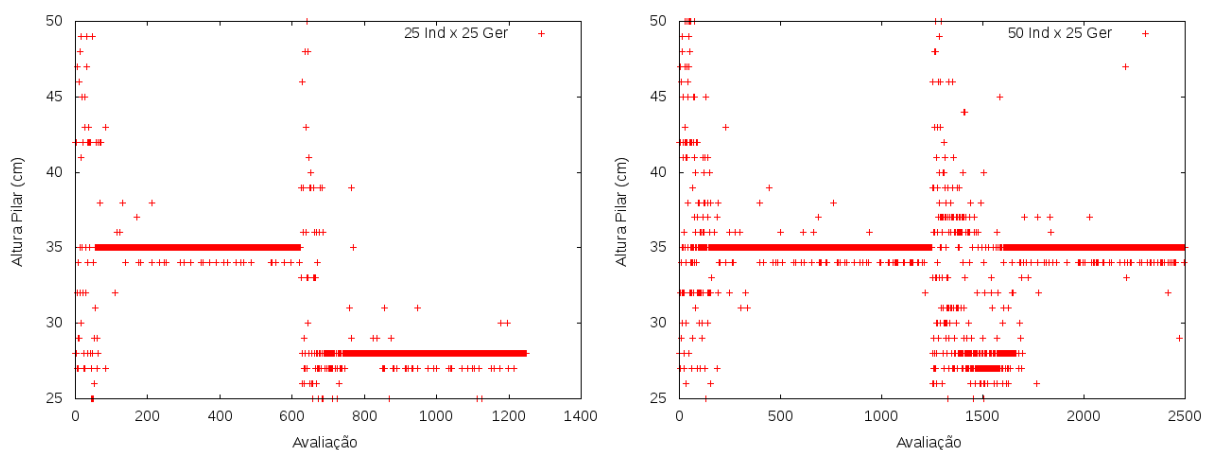


Figura 3. Altura dos pilares por avaliações para populações com 25 e 50 indivíduos

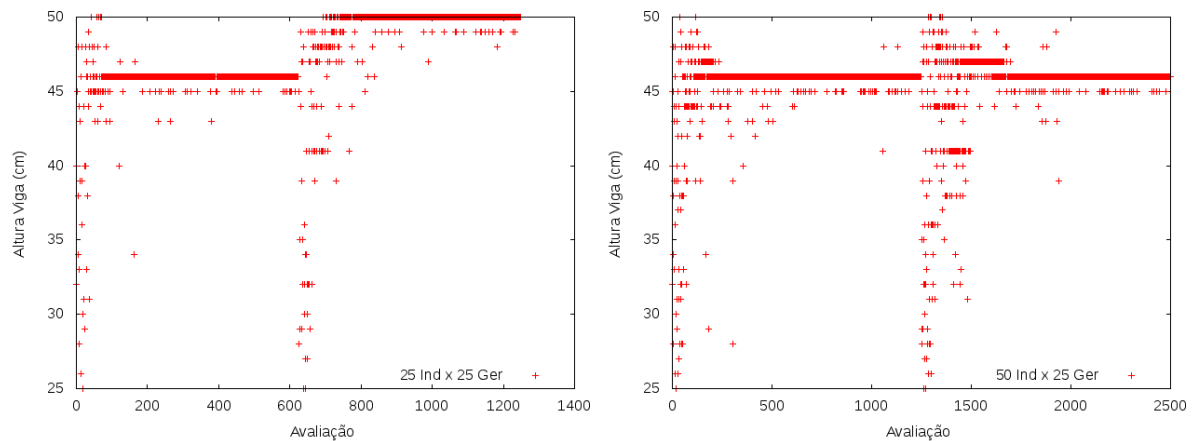


Figura 4. Altura das vigas por avaliações para populações com 25 e 50 indivíduos

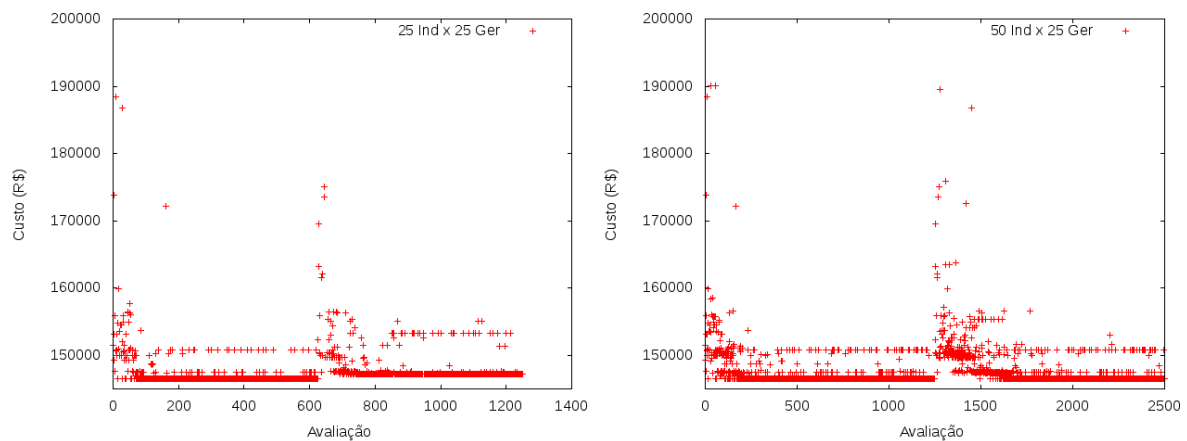


Figura 5. Custo do pórtico por avaliações para populações com 25 e 50 indivíduos

No experimento com população de 25 indivíduos, foram encontradas em cada rodada duas alturas ótimas para a seção dos pilares, 35 e 28 cm, e para seção das vigas, 46 e 50. Os gráficos de custo mostram que ambas as soluções alcançam o valor de R\$ 146.468,88. Na configuração do AG para 50 indivíduos, ambas as rodadas alcançaram o mesmo valor para altura ótima dos pilares e das vigas, sendo estes 35 e 46 cm, respectivamente.

Deve-se ressaltar que ambas as soluções não violam as restrições. Este resultado ilustra a multiplicidade de soluções para o problema e que as possíveis soluções ótimas variam com a relação de custo entre aço e concreto, que sofrem alterações frequentemente. Aqui cabe ressaltar que a experiência do projetista naturalmente descartaria a solução de 28 cm, embora critérios diversos aos custos, como os estéticos, pudessem induzir a escolha desta solução.

Comparando os resultados com população de 25 e 50 indivíduos, não foram encontradas diferenças nos valores ótimos. Sugere-se adotar critério de parada que considere a convergência da solução nos próximos experimentos, tendo em vista que o número de avaliações em todas as rodadas foi superior ao número de soluções do espaço de busca.

De acordo com esses resultados é possível discutir o universo dos engenheiros para escolha da concepção estrutural de projetos. Em geral, o projeto é influenciado por vários

aspectos externos, tais como a estética, funcionalidade e construção dos projetos arquitetônicos e complementares. Além disso, o engenheiro tem de buscar, entre todas as possibilidades, a estrutura mais econômica. Através dos resultados deste trabalho, a aplicação de métodos de otimização para a busca de valores aleatórios para as variáveis de projeto em todo o espaço de busca se justifica pelo fato de encontrarem valores não esperados por experiência dos engenheiros, abrindo um leque maior de possibilidades de encontrar um melhor resultado.

Esses resultados também dependem do tamanho do espaço de busca (limites superiores e inferiores definidos para as variáveis de projeto) e quantidade de iterações especificadas pelo usuário, mas são parâmetros práticos de serem avaliados. Após isso, os engenheiros podem comparar de maneira automatizada diversas soluções que atendam melhor os aspectos do projeto investigado, e assim elaborar sua proposta.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No que diz respeito ao objetivo principal deste trabalho, apresentar um estudo preliminar de otimização estrutural de um pórtico espacial de concreto armado com apenas duas variáveis de projeto, pode-se concluir que o mesmo foi concretizado com sucesso. Foram obtidos resultados coerentes, em comparação com resultados esperados do ponto de vista prático, além de fornecer soluções, a princípio, inesperadas pelos engenheiros. O método dos Algoritmos Genéticos apresentou um bom desempenho na otimização, funcionando como uma ferramenta que auxilia o usuário em sua tomada de decisão, fornecendo uma maneira automatizada de obtenção de seções de menor custo.

Este estudo trata da aplicação de um método de otimização aplicado ao projeto de estruturas de concreto armado modeladas por pórticos espaciais. É importante destacar que os resultados do trabalho consideram apenas duas variáveis de projeto, sendo um estudo preliminar que será expandido para considerar a variação de altura da seção dos pilares por pavimento. Pretende-se também estudar melhor os valores dos parâmetros relacionados ao AG e seus operadores, determinando-os para melhoria de seu desempenho.

Além disso, futuros estudos que incluam outros elementos estruturais, como lajes, escadas, dentre outros, devem ser realizados, bem como novas variáveis projetos podem ser consideradas como o f_{ck} do concreto, ou a largura das vigas e pilares, e ainda geometrias das seções transversais diferentes da retangular.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Ansys Inc. pela disponibilização do programa de simulação para engenharia Ansys Mechanical APDL Student, ao Professor Ibrahim Abd El Malik Shehata pelas contribuições a esta pesquisa e ao CNPq, à CAPES e à FAPERJ pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

Araújo, J. M., 2006. *PACON: Programa auxiliar para projetos de estruturas de concreto*. Versão 1.0. Editora Dunas.

Argolo, W. P., 2000. *Otimização se seções de concreto armado submetidas a flexo-compressão reta utilizando Algoritmos genéticos*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Bastos, E. A., 2004. *Otimização de seções retangulares de concreto armado submetidas à flexo-compressão oblíqua utilizando Algoritmos Genéticos*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Holland, J. H. 1975. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. The University of Michigan Press.

NBR ABNT 6118., 2014. *Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento*. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

Silva, E. E., 2001. *Otimização de estruturas de concreto armado utilizando Algoritmos Genéticos*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

Torres, J. V. S., 2001. *Otimização de pórticos de concreto armado utilizando o sistema computacional Ansys*. Dissertação de Mestrado, Centro de Tecnologia e Geociência, Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco.