Otimização da Flexão em Estruturas de Aço com Ligações Semi-Rígidas através de Algoritmos Genéticos

Alexandre A. Del Savio[1], Marco Aurélio C. Pacheco[2], Sebastião A. L. de Andrade[1], Pedro C. G. da S. Vellasco[3] e Luiz Fernando Martha[1]

[1] Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio
R. Marques de S. Vicente 225, Gávea, Rio de Janeiro, CEP 22453-900, RJ, Brasil
delsavio@rdc.puc-rio.br
andrade@civ.puc-rio.br
lfm@tecgraf.puc-rio.br
[2] Departamento de Engenharia Elétrica, PUC-Rio
R. Marques de S. Vicente 225, Gávea, Rio de Janeiro, CEP 22453-900, RJ, Brasil
marco@ele.puc-rio.br
[3] Departamento de Estruturas e Fundações, UERJ
R. São Francisco Xavier 524, Maracanã, Rio de Janeiro, CEP 20550-900, RJ, Brasil
vellasco@uerj.br

Resumo

Este artigo apresenta a metodologia e uma ferramenta para otimização da flexão em estruturas de aço com ligações semi-rígidas, através de algoritmos genéticos. Para tanto se implementou um algoritmo genético no programa FTOOL/SRC [1], que dispõe de uma interface eficiente para o pré-processamento, análise e pós-processamento de estruturas com ligações semi-rígidas. Os resultados comprovam a eficácia do algoritmo genético implementado e da metodologia proposta, visando uma distribuição de momentos fletores na estrutura mais eficiente a partir da variação da rigidez de suas ligações. O presente trabalho constitui uma importante contribuição para a metodologia de projeto estrutural de pórticos em aço, devido à consideração das ligações semi-rígidas.

Palavras chaves: otimização de estruturas de aço, ligações semi-rígidas, engenharia estrutural, algoritmos genéticos.

1 Introdução

Para garantir segurança e desempenho com máxima economia na construção de edifícios, é necessário utilizar métodos de otimização.

Tradicionalmente, o problema de projeto é resolvido por tentativa e erro, ditado por especificações de projeto e guiado pela experiência e intuição do projetista. Porém, pesquisas são continuamente feitas de forma a desenvolver ferramentas de projeto automatizadas para ajudar os engenheiros no, muitas vezes laborioso, processo de projeto.

Dentre as técnicas adotadas por ferramentas de otimização estrutural podem-se destacar a utilização da programação matemática e de algoritmos genéticos na busca de estruturas ótimas.

A escolha do algoritmo genético para resolver este problema de otimização deve-se a dispensa de um modelo matemático preciso sobre o problema, a busca global da solução, a representação simplificada da solução e a facilidade de implementação de regras e de heurísticas auxiliares.

Para uma otimização completa de uma estrutura de aço, um grande número de variáveis de projeto devem ser consideradas, juntamente com inúmeras restrições. Podem-se citar, por exemplo, a variação dos perfis metálicos (altura, base, etc.) e restrições de deslocabilidade vertical e horizontal, resistência, dentre outras.

O objetivo deste trabalho é desenvolver e implementar uma metodologia de otimização para o projeto de pórticos planos de aço, onde as variáveis de projeto são as rijezas das ligações. Deseja-se fundamentalmente encontrar uma distribuição de momentos fletores que permita o melhor dimensionamento do perfil, ou seja, não permitir que situações como a de uma viga bi-rotulada mostrada na figura 1, onde a rigidez a flexão da ligação viga-coluna é zero ocorram.

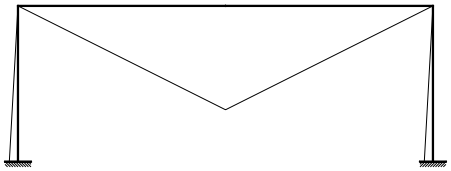

Fig. 1. Distribuição dos momentos fletores em um pórtico simples, com a rigidez das ligações viga-coluna igual a zero.

2 Ligações Semi-Rígidas

As ligações estruturais desempenham um papel fundamental no comportamento global das estruturas de aço. Sabe-se que o comportamento real das ligações encontra-se entre duas situações extremas, ou seja, entre as hipóteses de comportamento rígido e flexível. A hipótese de comportamento rígido implica que o ângulo entre os membros adjacentes a ligação permanece imutável. Já, a hipótese de comportamento flexível leva à condição de que nenhum momento é transmitido entre os membros adjacentes à ligação.

No caso intermediário, ligações semi-rígidas, o momento transmitido será resultante da rotação relativa entre os membros adjacentes. Conseqüentemente, na análise global de uma estrutura, as ligações modificam não apenas os deslocamentos, mas também, a distribuição e a magnitude dos esforços internos em toda a estrutura.

Pelo motivo apresentado, a consideração das ligações semi-rígidas na modelagem estrutural e na sua análise torna-se indispensável.

3 Formulação e Modelagem do Problema de Otimização

O problema investigado traduz-se em otimizar a flexão em estruturas de aço, variando-se as rijezas das ligações. Ver figura 2.

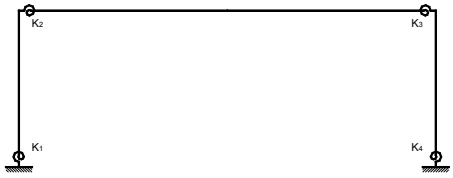

Fig. 2. Variáveis de projeto – a rigidez de cada ligação.

Nos itens a seguir serão descritos os tratamentos dados ao modelo para ser submetido ao algoritmo genético implementado, bem como a modelagem das ligações no programa FTOOL/SRC [1].

3.1 Representação do Problema: Cromossoma

A representação escolhida foi a do tipo representação por números reais, por esta oferecer melhor desempenho em problemas de otimização de parâmetros com variáveis sobre domínio contínuo. Isto se torna ainda mais relevante em grandes domínios onde a representação binária requer um longo cromossomo.

A representação por reais é mais rápida na execução, porque evita a decodificação. Ela oferece maior precisão (depende do computador) e tem a propriedade que dois pontos próximos um ao outro no espaço de representação, estão também próximos no espaço do problema. Ela evita também o fenômeno denominado de *Hamming Cliffs*.

Desta forma o cromossomo (equação 1) é uma lista de rijezas correspondentes às ligações. O número de ligações n define a ordem de grandeza do cromossoma.

$$Cromossoma \rightarrow (k_1,...,k_n) \qquad \textbf{(1)}$$

Para o exemplo da estrutura da figura 2 tem-se o seguinte cromossoma:

$$Cromossoma \rightarrow (k_1,k_2,k_3,k_4) \qquad \textbf{(2)}$$

3.2 Função de Avaliação

A função de avaliação é função da distribuição dos momentos fletores em cada elemento. Esta função foi modelada para que momento fletor no início do elemento seja igual ao momento fletor no final do elemento. Assim a melhor avaliação, por exemplo, de um elemento individual é:

$$\frac{M_{1_i}}{M_{1_j}} = 1 \qquad (3)$$

Desta forma a expressão geral de avaliação englobando todos os elementos da estrutura é:

$$f_{valor\ \ próximo}(k_1,\ldots,k_n) = \sum_{e=1}^{nelem} \frac{M_{ei}}{M_{ej}} = nelem \qquad (4)$$

onde a função representa uma busca a um valor próximo, tornando-se uma avaliação ótima quando for igual ao número total de elementos da estrutura (*nelem*). Cada elemento possui dois nós, o nó inicial *i* e o final *j*. M_{ei} e M_{ej} correspondem respectivamente aos momentos fletores aplicado no início e no fim do elemento *i* e *n* é o número de ligações da estrutura.

Para adaptar a função de avaliação, equação 4, de busca a um valor próximo ao algoritmo genético implementado transformou-se o problema de busca a um valor próximo em um problema de busca a um valor mínimo ou seja:

$$f_{mínimo}(k_1,\ldots,k_n) = ABS\left(nelem - \sum_{e=1}^{nelem} \frac{M_{ei}}{M_{ej}} \right) \qquad (5)$$

3.3 Modelagem das Ligações no FTOOL/SRC [1]

Na figura 3 é apresentada a interface gráfica do FTOOL/SRC [1] para a modelagem das ligações semi-rígidas. Nesta figura pode-se visualizar o desenho da mola na tela representando a ligação, juntamente com o valor da sua rigidez inicial.

Maiores detalhes sobre a utilização do programa FTOOL/SRC referentes aos tipos de análises e aos tipos de elementos disponíveis para representar a ligação semi-rígida podem ser encontrados na dissertação de mestrado de Del Savio [1] e em Del Savio [4].

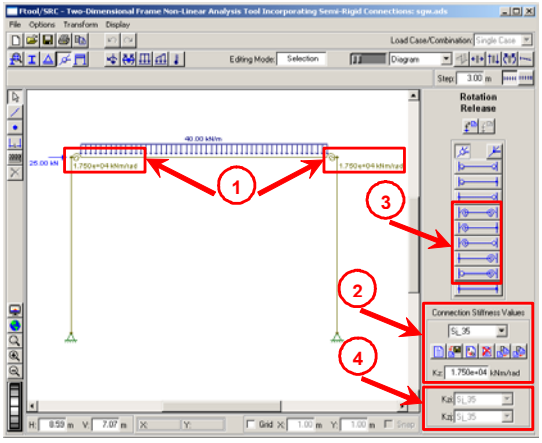

Fig. 3. Pré-processamento das ligações semi-rígidas.

4 Algoritmo Genético Híbrido

Para o problema de otimização apresentado no item anterior, desenvolveu-se um algoritmo genético híbrido, que consiste na construção de um algoritmo genético inspirado no "algoritmo de otimização em uso". Este algoritmo incorpora o conhecimento no domínio do problema, resultando em um sistema mais familiar para o usuário. Este algoritmo também fornece uma semente para o algoritmo genético, a partir da modelagem inicial do problema definido pelo usuário, garantindo soluções mais consistentes.

A implementação do algoritmo genético partiu do programa disponibilizado por Michalewicz [4] e das notas de aula de computação evolucionária disponibilizadas pelo professor Pacheco - ICA [5].

As técnicas de seleção utilizadas incluíram uma seleção por avaliação acumulativa (presente no código original) e uma seleção por normalização linear (implementada neste trabalho).

As técnicas de reprodução usadas contemplaram a troca de toda a população com elitismo (presente no código original) e a troca parcial da população (*steady state*) sem duplicados (implementada neste trabalho), que garante maior eficiência do paralelismo de busca devido não possuir indivíduos duplicados.

Os operadores genéticos adotados para mutação incluíram uma mutação randômica uniforme (presente no código original), *Creep* – Método de Ajuste 1 com *creep* pequeno e/ou grande (implementada neste trabalho). O creep

busca uma solução próxima através de ajustes aleatórios em ambas as direções (+ e -).

Por fim o crossover usado pode ser feito através de crossover de um ponto (presente no código original) e crossover aritmético (implementado neste trabalho), que realiza uma combinação linear de dois genitores.

Mas, o que merece destaque nas implementações é a técnica de roleta de operadores, onde todos os operadores (mutação e crossover) são selecionados e aplicados de acordo com a técnica de parametrização de pesos que varia linearmente ao longo da evolução. A figura 4 apresenta todos os parâmetros implementados para configuração do algoritmo genético.

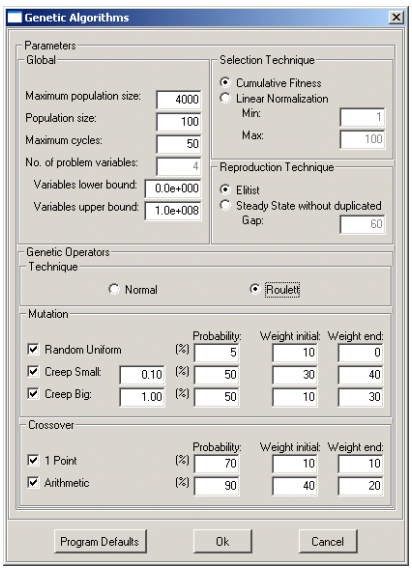

Fig. 4. Parâmetros de configuração do algoritmo genético.

5 Avaliação de cada Indivíduo

Na figura 5 é apresentado o fluxograma de avaliação de cada indivíduo. A avaliação de cada indivíduo consiste na modelagem automática da estrutura, FTOOL/SRC [1], com as variáveis de projeto dadas pelo cromossomo. A partir desta modelagem gera-se um arquivo neutro que vai ser lido pelo programa FEMOOP [3] (análise estrutural via método dos elementos finitos). Este programa fornece como resultado os esforços e deslocamentos da estrutura em forma de arquivo neutro lido pelo FTOOL/SRC [1] que gera a visualização dos resultados e colhe os momentos fletores de cada elemento realizando a avaliação do cromossomo e retornando-a para o algoritmo genético.

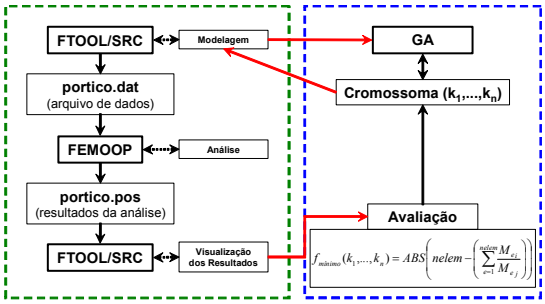

Fig. 5. Fluxograma de avaliação de cada indivíduo.

6 Resultados

A otimização foi executada em um pórtico com 16 metros de comprimento e 6 metros de altura, sob uma carga vertical de 100kN no ponto central da viga e uma carga horizontal de 10kN no topo da primeira coluna, tal como mostra a figura 6.

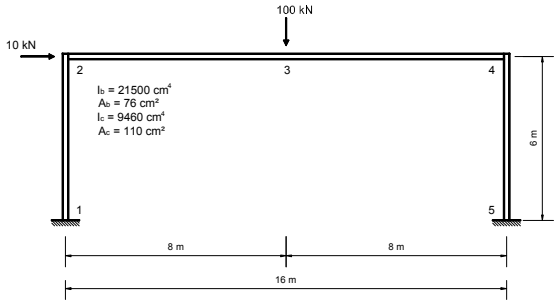

Fig. 6. Pórtico de um pavimento.

A estrutura sob análise foi idealizada com diferentes valores para a rigidez de suas ligações. A figura 2 mostra o modelo estrutural idealizado para este pórtico, já com as molas representando os elementos de ligação. Neste modelo, $k_{2,3}$ representam as rijezas das ligações viga-coluna, enquanto $k_{1,4}$ representam a da ligação coluna-fundação (placa de base). A rigidez da articulação entre viga e coluna pode ser idealizada como rígida (ligação soldada), rotulada (cantoneira simples de alma), ou semi-rígida (cantoneira de topo e assento). Por simplicidade e para testar o desempenho do algoritmo genético, a condição rotulada foi adotada para a ligação à esquerda e a direita da viga.

Para a base da estrutura, considerou-se um valor intermediário de rigidez, que está relacionado à rigidez da coluna e igual a EI_c/L_c,

onde I_c e L_c são a inércia e o comprimento da coluna, respectivamente.

O algoritmo genético busca a rigidez de cada mola entre os limites de zero (rotulada) e a rigidez de um engaste perfeito (assumida igual a 1,0E+8).

Os valores definidos para as rijezas das ligações foram usados como sementes no algoritmo genético híbrido. Os parâmetros de configuração utilizados na otimização da estrutura apresentada na figura 6 e 8 são apresentados na figura 7.

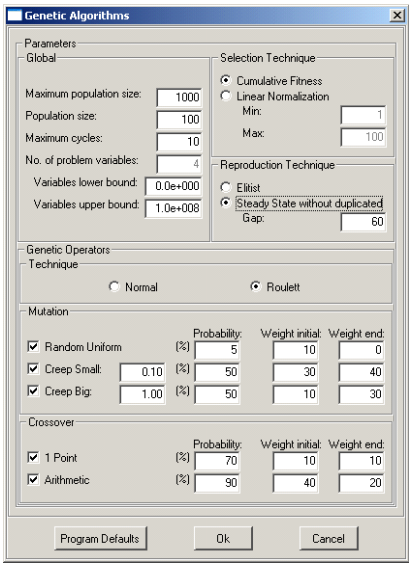

Fig. 7. Parâmetros utilizados para otimização da estrutura dada na figura 6 e para as rijezas mencionadas anteriormente (ver figura 8).

Na figura 8 é apresentada a modelagem inicial das rijezas das molas do problema e na figura 9 o seu diagrama de momentos fletores.

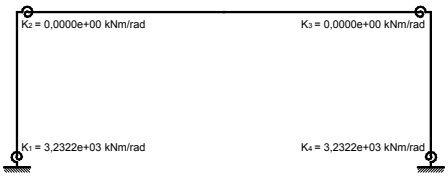

Fig. 8. Modelagem inicial das rijezas das molas do problema.

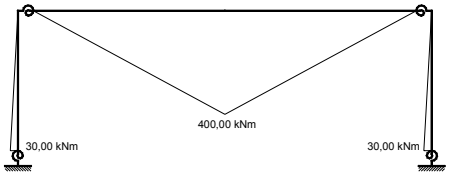

Fig. 9. Momentos fletores referentes a modelagem inicial.

Na figura 10 e 11 são apresentados os resultados obtidos pelo algoritmo genético híbrido na otimização dos momentos fletores, variando-se as rijezas das ligações.

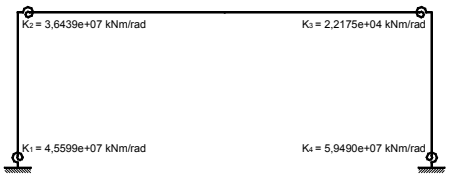

Fig. 10. Modelagem das ligações semi-rígidas obtida pelo algoritmo genético.

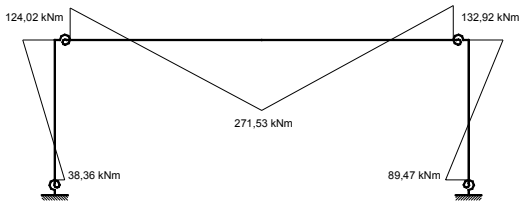

Fig. 11. Momentos fletores referentes à modelagem encontrada pelo algoritmo genético.

Com o objetivo de verificar a qualidade dos resultados obtidos pelo algoritmo genético implementado realizou-se a mesma análise do modelo inicial, descrito anteriormente (figura 6 e 8) utilizando-se busca aleatória. Os resultados desta comparação são apresentados na figura 12.

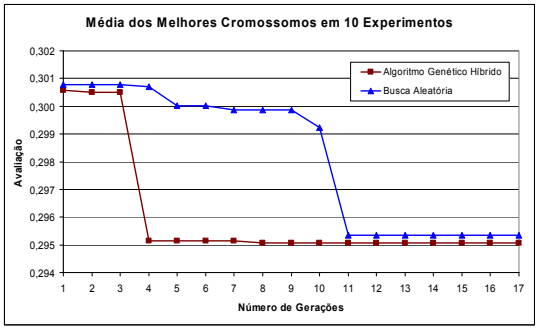

Fig. 12. Comparação entre o algoritmo genético e a busca aleatória.

7 Considerações Finais

Após analise dos resultados obtidos na seção 6 pode-se observar a grande modificação na distribuição dos momentos fletores iniciais (modelagem dada pelo usuário, figura 8) e finais (encontrada pelo algoritmo genético, figura 10). Houve uma melhor distribuição dos momentos fletores nas estruturas otimizadas pelo algoritmo genético híbrido, validando as implementações realizadas bem como a metodologia adotada para a função de avaliação do problema.

Por fim, analisando-se a comparação entre o algoritmo genético e a busca aleatória, figura 12, pode-se constatar que a avaliação converge para um valor próximo de 0,295, sendo este valor aproximadamente atingido pelo o algoritmo genético na 4ª geração enquanto a busca aleatória aproximou-se deste valor apenas na 11ª geração, porém não atingindo a avaliação encontrada pelo algoritmo genético. Isto demonstra que o algoritmo genético possui uma performance superior à busca aleatória, como era de se esperar.

As implementações realizadas neste trabalho podem ser refinadas de modo a melhorar ainda mais a performance do algoritmo. Em particular, pode ser interessante adicionar mais um elemento de pressão evolutiva – um mecanismo de pressão cultural. Assim, um sistema de dupla herança, tanto genética individual quanto cultural, pode adaptar-se melhor e responder com mais eficiência em problemas de otimização estrutural.

Referências Bibliográficas

[1] Del Savio, A. A., ***"Modelagem Computacional de Estruturas de Aço com Ligações Semi-Rígidas"***, MSc. Dissertation, Civil Engineering Department – PUC-Rio, Brazil, (in Portuguese), 2004.

[2] Del Savio, A. A., Andrade, S. A. L. de, Vellasco, P. C. G. da S., Martha, L. F, ***"A Non-Linear System for Semi-Rigid Steel Portal Frame Analysis"***, CST - The Seventh International Conference on Computational Structural Technology, Lisbon, Portugal, 2004.

[3] Martha, L. F., Parente Jr., E., ***"An Object-Oriented Framework for Finite Element Programming"***, Proceedings of the Fifth World Congress on Computational Mechanics, IACM, Vienna, Austria, Jul. 2002.

[4] Michalewicz, Z., ***"Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs"***, 3rd edn. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1996.

[5] Pacheco, M. A. C., ***"Notas de Aula: Computação Evolucionária"***, ICA, 2004.