



SPOLM 2008

ISSN 2175-6295

Rio de Janeiro- Brasil, 05 e 06 de agosto de 2008.

## APLICAÇÃO DE HEURÍSTICAS NO PROJETO DE ESTRUTURAS METÁLICAS PARA ENGENHARIA CIVIL

**Wanderson Gomes de Almeida**

Faculdades Integradas de Caratinga  
Rua João Pinheiro, 168 – Centro – Caratinga – MG  
[wandersonwmpp@gmail.com](mailto:wandersonwmpp@gmail.com)

**Msc. Rafael Francisco dos Santos**

Faculdades Integradas de Caratinga  
Rua João Pinheiro, 168 – Centro – Caratinga – MG  
[rafafic@gmail.com](mailto:rafafic@gmail.com)

**Dr. Valdenir de Souza Júnior**

Faculdades Integradas de Caratinga  
Rua João Pinheiro, 168 – Centro – Caratinga – MG  
[vsouzajunior@yahoo.com.br](mailto:vsouzajunior@yahoo.com.br)

### RESUMO

Atualmente a crescente demanda por ferramentas de otimização em uma construção civil são comuns para solução de problemas em que o principal objetivo é determinar estruturas de aço com peso mínimo, com maior possibilidade de resistência e com boa durabilidade, conseqüentemente menor custo, no intuito de alcançar uma boa economia no final da construção.

O presente trabalho aborda a implementação de uma ferramenta de otimização para auxiliar engenheiros e projetistas no desenvolvimento de projetos de estruturas metálicas para engenharia civil realizando testes em várias soluções. Para isso é utilizado o método numérico chamado Método dos Elementos Finitos com o objetivo de realizar um pré-dimensionamento e a verificação da adequação de cada elemento, se determinado elemento não resiste aos esforços, o mesmo é substituído e os cálculos são refeitos.

O objetivo deste trabalho é aplicar a meta heurística Algoritmo Genético (AG) aliado a metodologia Reconexão de Caminhos (Path-Relinking) ao problema descrito acima, modificando os operadores genéticos na busca por melhores Estruturas Metálicas.

**Palavras Chave:** Algoritmo Genético; Reconexão de Caminhos; Método de Elementos Finitos; Avaliação Estrutural.

### ABSTRACT

Now to crescent it disputes for optimization tools in a building site are common for solution of problems in that the main objective is to determine structures of steel with minimum weight, with larger resistance possibility and with good durability, consequently smaller cost, in the intention of reaching a good economy in the end of the construction.

The present work approaches the implementation of an optimization tool to aid engineers and planners in the development of projects of metallic structures for civil

engineering accomplishing tests in several solutions. For that the method called numeric Method of the Finite Elements is used with the objective of accomplishing a pay-sizing and the verification of the adaptation of each element, if certain element doesn't resist to the efforts, the same is substituted and the calculations are redone.

The objective of this work is to apply the goal heuristic Genetic Algorithm (GA) ally the methodology Path Relinking to the problem described above, modifying the genetic operators in the search for better Metallic Structures.

**Words Key:** Genetic Algorithm; Path Relinking; Method of Finite Elements; Structural Evaluation.

## **.INTRODUÇÃO**

Em uma construção civil são comuns problemas em que o principal objetivo é determinar estruturas de aço com peso mínimo (mínimo custo), com maior possibilidade de resistência e com boa durabilidade, no intuito de alcançar uma boa economia no final da construção. Por exemplo, se for obtido uma redução no peso, por menor que seja, em cada unidade fabricada de peças de aço, que contém grande número de unidades, corresponderá a uma economia global considerável.

No projeto de uma estrutura normalmente é feito um pré-dimensionamento e a seguir é verificada a adequação de cada elemento. Se determinado elemento não resiste aos esforços, o mesmo é substituído e os cálculos são refeitos. Assim, a busca de uma solução de projeto viável envolve um processo de tentativa e erro, por parte do projetista. Dependendo da sua experiência e habilidade, pode-se chegar à soluções bastante diferentes umas das outras, tornando adequado a utilização de ferramentas computacionais.

Assim, torna-se conveniente o uso de ferramentas computacionais para que possa encontrar soluções das quais os perfis metálicos escolhidos sejam os mais leves possíveis, de modo a minimizar os custos da construção além de atenderem às condições de serviço.

## **.PROJETO DE ESTRUTURAS METÁLICAS**

Utilizar a estrutura metálica em uma construção civil tem como vantagem a precisão milimétrica. Para isto é necessário o desenvolvimento do projeto completo e totalmente ajustado antes mesmo de iniciar as obras. Desta forma o usuário poderá até fazer encomendas dos móveis e armários, já no início da construção, pois as medidas finais serão exatamente as mesmas do projeto.

O objetivo do Projeto de Estrutura Metálicas (PEM) é fazer com que a estrutura atenda à exigências de resistência aos esforços sem entrar em colapso e sem deformar ou vibrar excessivamente. Estes limites são definidos por normas técnicas em que o engenheiro estrutural dedica-se para melhor uso dos materiais disponíveis procurando alcançar o menor custo possível de construção e manutenção da estrutura [5].

Algumas etapas para o projeto estrutural são desenvolver o esquema estrutural, definir as cargas ou forças impostas na estrutura, calcular os esforços e deformações, dimensionar as peças estruturais e detalhar o projeto para execução. Para o projeto são usados tipos de elementos estruturais como pilares, vigas e tesouras. Estes elementos chegam na obra numeradas de acordo com o projeto de montagem com os furos dos parafusos para as ligações e no tamanho definitivo.

As etapas de projeto são tradicionalmente a mais demorada. Com a automatização destas etapas o projetista moderno poderá dedicar aos pontos mais problemáticos, possibilitando alterar o esquema estrutural e propor diversas condições de cargas para alcançar um melhor projeto final. Estas decisões podem ser realizadas por ferramentas computacionais para encontrar a melhor solução possível de forma a refinar o projeto [18].

### **1. DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS**

Conhecendo os esforços atuantes, o projetista determina as medidas de cada elemento estrutural dimensionando a peça que irá resistir a estes esforços. Considerando a

utilização do aço e suas propriedades, pode ser verificado se a peça é capaz de resistir aos esforços através dos princípios de resistência e da capacidade mecânica deste tipo de sólido.

Por exemplo, o projetista determina um ponto em uma seção da estrutura para atuar esforços a fim de obter uma seção com maior resistência às cargas impostas neste ponto. Se for viável economicamente, esta seção será utilizada na estrutura. Para elementos mais complexos, poderá ser necessário fazer a análise de vários pontos e testar várias seções a ser empregada, ou dimensionar toda a estrutura [18]. A seguir é mostrado o dimensionamento de um pórtico a temperatura ambiente composto por dois tipos de perfis diferentes como mostrado na figura 1. As tabelas 1 e 2 apresentam os parâmetros necessários para os cálculos de dimensionamento estrutural.

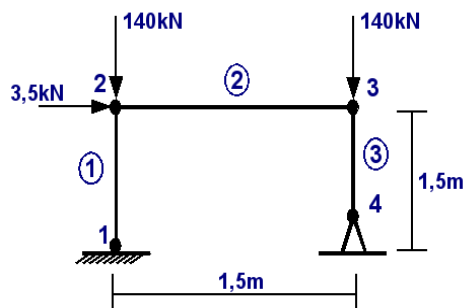


Figura 1 - Representação um portico e seus elementos estruturais.

Perfil	Código	Área (A)	Altura (d)	Esp. Alma (tw)	Esp. Aba (eab)	Resistência (Sx)	raio da seção (r)	Tamanho (L)
		m <sup>2</sup>	m	m	m	m <sup>3</sup>	m	m
48	W200x22	0,00286	0,20600	0,00622	0,00800	0,0001940	0,0223	1,50
54	W150x14	0,00173	0,15000	0,00432	0,00550	0,0000912	0,0230	1,50

Tabela 1 - Tabela com tamanho dos perfis e medidas de cada parte.

Perfil	Definição	Const. dos nós de apoio (k)	Força Normal (Fn)	Força Cortante (Fc)	Momento Fletor (Mf)
			N	N	N
48	Pilar 1 (P1)	0,5	13842,73	280,41	289,09
48	Pilar 2 (P2)	0,7	14157,27	69,59	104,39
54	Viga (V)	0,5	69,59	157,27	131,52

Tabela 2 - Tabela com forças atuantes em cada perfil.

Abaixo estão algumas definições necessárias:

- E – Módulo de elasticidade do material de 2,00E+011 Pa;
- $\sigma_y$  – Tensão de escoamento do material de 2,50E+008 Pa;
- Tadm – Tensão admissível de 1,00E+008 Pa;
- Tmax – Tensão máxima suportada;
- $\rho_a$  – Massa Específica do Aço com 7850 kg/m<sup>3</sup>.
- L – Comprimento do perfil;
- IE – Índice de esbeltez;
- IEc – Índice de esbeltez crítico;

- $W_{\min}$  – Módulo resistente mínimo;
- $\sigma_{\text{admin}}$  – Tensão de cisalhamento inadmissível para o material;
- $\sigma_{\text{cr}}$  – Tensão de escoamento crítico;
- $F_s$  – Fator de segurança;
- $F_{cr}$  – Força máxima suportada;

Pilar 1:

$$T_{\max} = \frac{F_c}{d - 2eab \cdot tw}$$

$$T_{\max} = \frac{280,41}{0,206 - 2 \cdot 0,008 \cdot 0,006}$$

$$T_{\max} = 237273$$

$$IE = \frac{k \cdot L}{r}$$

$$IE = \frac{0,5 \cdot 1,5}{0,0223}$$

$$IE = 33,63$$

$$IE_c = \sqrt{\frac{2 \cdot E}{y}}$$

$$IE_c = \sqrt{\frac{2 \cdot 3,14 \cdot 2,0 \cdot 10^{11}}{2,5 \cdot 10^8}}$$

$$IE_c = 125,66$$

- Para  $IE \geq IE_c$

$$\sigma_{\text{adm}} = \frac{\sigma^2 \cdot E}{1,92 \cdot IE^2}$$

- Para  $IE < IE_c$

$$F_s = \frac{5}{3} \cdot \frac{3}{8} \cdot \frac{IE}{IE_c} - \frac{1}{8} \cdot \left( \frac{IE}{IE_c} \right)^3$$

$$\sigma_{\text{adm}} = \frac{\sigma_y}{F_s} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{IE}{IE_c} \right)^2 \right]$$

$$33,63 < 125,66$$

$$F_s = \frac{5}{3} \cdot \frac{3}{8} \cdot \frac{33,63}{125,66} - \frac{1}{8} \cdot \left( \frac{33,63}{125,66} \right)^3$$

$$F_s = 1,76$$

$$\sigma_{\text{adm}} = \frac{2,5 \cdot 10^8}{1,76} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{33,63}{125,66} \right)^2 \right]$$

$$\sigma_{\text{adm}} = 136599162$$

$$F_{cr} = \sigma_{\text{adm}} \cdot A$$

$$F_{cr} = 136599161 \cdot 0,00286$$

$$F_{cr} = 390674$$

$$\sigma_{cr} = F_{cr} / A$$

$$\sigma_{cr} = 136599162$$

$$W_{\min} = \frac{M_f}{\sigma_{\text{adm}}}$$

$$W_{\min} = \frac{289,09}{136599162}$$

$$W_{\min} = 0,000002$$

- Se  $S_x < W_{\min} < T_{\max} < T_{\text{adm}} < F_n < F_{cr} < \sigma_{cr} < \sigma_y$  então o perfil resiste aos esforços e o peso é calculado.

$$S_x < W_{\min} < 0,000194 < 0,000002$$

$$T_{max} \square T_{adm} \square 237273 \square 1,0E+ 008$$

$$F_n \square F_{cr} \square 13842,73 \square 390674$$

$$\square_{cr} \square \square_y \square 136599162 \square 2,5E+ 008$$

- Perfil W200x22 é viável, pois resiste aos esforços.

$$Peso= A \square \rho_a \square L$$

$$Peso= 0,00286 \square 7850 \square 1,5$$

$$Peso= 33,68$$

Pilar 2:

$$T_{max} = \frac{69,59}{\square 0,206 - 2 \square 0,008 \square 0,006}$$

$$T_{max} = 58885$$

$$IE = \frac{0,7 \square 1,5}{0,0223}$$

$$IE = 47,09$$

$$IE_c = 125,66$$

$$47,09 \square 125,66$$

$$F_s = \frac{5}{3} \square \frac{3}{8} \square \frac{47,09}{125,66} - \frac{1}{8} \square \square \frac{47,09}{125,66} \square^3$$

$$F_s = 1,80$$

$$\square_{adm} = \frac{2,5 \square 10^8}{1,8} \square \left[ 1 - \frac{1}{2} \square \square \frac{47,09}{125,66} \square^2 \right]$$

$$\square_{adm} = 129093698$$

$$F_{cr} = 136599161 \square 0,00286$$

$$F_{cr} = 369208$$

$$\square_{cr} = 129093698$$

$$W_{min} = \frac{104,39}{129093699}$$

$$W_{min} = 0,0000008$$

$$S_x \square W_{min} \square 0,000194 \square 0,0000008$$

$$T_{max} \square T_{adm} \square 58885 \square 1,0E+ 008$$

$$F_n \square F_{cr} \square 14157,27 \square 369208$$

$$\square_{cr} \square \square_y \square 129093698 \square 2,5E+ 008$$

- Perfil W200x22 é viável, pois resiste aos esforços.

$$Peso= 0,00286 \square 7850 \square 1,5$$

$$Peso= 33,68$$

Viga:

$$T_{max} = \frac{157,27}{\square 0,15 - 2 \square 0,005 \square 0,004}$$

$$T_{max} = 261910$$

$$IE = \frac{0,5 \square 1,5}{0,023}$$

$$IE = 32,61$$

$$IE_c = 125,66$$

$$32,61 \square 125,66$$

$$F_s = \frac{5}{3} \square \frac{3}{8} \square \frac{32,61}{125,66} - \frac{1}{8} \square \square \frac{32,61}{125,66} \square^3$$

$$F_s = 1,76$$

$$\square_{adm} = \frac{2,5 \square 10^8}{1,8} \square \left[ 1 - \frac{1}{2} \square \square \frac{47,09}{125,66} \square^2 \right]$$

$$\square_{adm} = 137122945$$

$$F_{cr} = 137122945 \square 0,00173$$

$$F_{cr} = 237223$$

$$\square cr = 137122945$$

$$W_{min} = \frac{131,52}{137122945}$$

$$W_{min} = 0,000001$$

$$S_x \square W_{min} \square 0,0000912 \square 0,000001$$

$$T_{max} \square T_{adm} \square 261910 \square 1,0E+008$$

$$F_n \square F_{cr} \square 69,59 \square 237223$$

$$\square cr \square \square y \square 137122945 \square 2,5E+008$$

- Perfil W150x14 é viável, pois resiste aos esforços.

$$Peso = 0,00173 \square 7850 \square 1,5$$

$$Peso = 20,37$$

Peso Total do pórtico:

$$Peso_{Total} = \sum Peso$$

$$Peso_{Total} = 33,68 \square 33,68 \square 20,37$$

$$Peso_{Total} = 87,72$$

## 2. AVANÇOS TECNOLÓGICOS NO PROJETO ESTRUTURAL

Este processo de dimensionamento podem ser realizado com auxílio do computador. Desta forma, o projetista terá maior liberdade para alterar o dimensionamento com o objetivo de simplificar a construção podendo, assim, padronizar as seções sugeridas pelo programa computacional [5]. Como execução final do PEM é utilizado o detalhamento, em que, o projetista fornece desenhos detalhados das peças e conexões da estrutura, além da geração de listas de materiais e de outras informações necessárias para a construção.

Os carregamentos aplicados na estrutura também podem ser determinados através de modelagens computacionais, surgindo a necessidade de programas que utilizem Métodos Numéricos, como o Método dos Elementos Finitos (MEF), com o objetivo de simular o comportamento de prédios e de edifícios elevados levando em consideração as pressões estáticas e as dinâmicas do vento [5].

## .HEURÍSTICAS APLICADAS A ESTRUTURAS METÁLICAS

Como mencionado, foi utilizado o Método de Elementos Finitos (MEF) para a análise de Estruturas Metálicas cuja sua popularidade tem crescido devido à versabilidade e praticidade do método, resolvendo diversos problemas.

Neste trabalho será feito um estudo comparativo da otimização estrutural utilizando o Algoritmo Genético Elitístico com e sem o método Path Relinking. Para a avaliação das soluções, o MEF será utilizado para avaliar perfis metálicos, os quais, deverão ser os mais leves possíveis de modo a minimizar os custos da construção além de resistir aos esforços tanto a temperatura ambiente quanto sob condições de elevação de temperatura.

### 1. CODIFICAÇÃO

Para a criação da População Inicial, os indivíduos são criados através de sorteios de números aleatórios dentre a quantidade de perfis existente na tabela. A codificação dos genes utilizada é em decimal. As conversões de binário para decimal são evitadas através da comparação dos números decimais sorteados com os números decimais que identificam cada perfil da tabela. Definido por norma em cada andar os pilares serão de mesmo perfil. A figura 2 mostra um exemplo de codificação de uma estrutura do tipo pórtico, do x1 ao x6 representam respectivamente os perfis 49, 37, 38, 23, 54 e 31 da tabela 3.

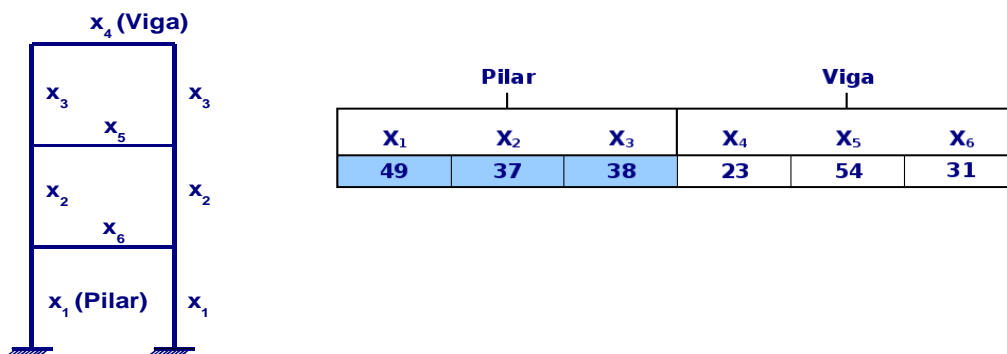


Figura 2 - Codificação de uma estrutura do tipo pórtico num cromossomo.

Tabela 3 - Exemplo de tabela de perfis metálicos [11].

Tabela de Perfis de Abas Largas (Perfis I)

Perfil	Código	Área (A) mm <sup>2</sup>	Altura (d) mm	Esp. da alma (tw) mm	Aba		Eixo x-x			Eixo y-y		
					largura (bf) mm	espessura (tf) mm	I 10 <sup>6</sup> mm <sup>4</sup>	S 10 <sup>3</sup> mm <sup>3</sup>	r mm	I 10 <sup>6</sup> mm <sup>4</sup>	S 10 <sup>3</sup> mm <sup>3</sup>	r mm
23	W360x51	6450	355	7,24	171	11,6	141,0	794	148	9,68	113,0	38,7
31	W310x33	4180	313	6,6	102	10,8	65,0	415	125	1,92	37,6	21,4
37	W250x58	7400	252	8,00	203	12,5	87,3	693	109	18,80	185,0	50,4
38	W250x45	5700	266	7,62	148	13,0	71,1	535	112	7,03	95,0	35,1
49	W150x37	4730	162	8,13	154	11,6	22,2	274	68,5	7,07	91,8	38,7
54	W150x14	1730	150	4,32	100	5,5	6,8	91,2	62,9	0,91	18,2	23,0

## 2. FUNÇÃO DE AVALIAÇÃO

Na função de adequação, os genes do cromossomo formarão um vetor de perfis, a ser passado para as subrotinas do programa FRAME [8], que utiliza o MEF, de acordo com as seções da estrutura definidas no arquivo de entrada como mostrado na figura 3.

Pilar			Viga			Pilar		
X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub>
49	37	38	23	54	31	38	37	49

Figura 3 - Vetor de perfis a ser passado para as subrotinas do FRAME.

Este programa de avaliação estrutural será usado para determinar se a estrutura metálica formada pelo indivíduo suporta as condições de carregamento impostas. As subrotinas utilizadas no programa são [5]:

- INPUT: Realiza a leitura de um arquivo com os dados referentes as estruturas, tais como o número de nós, número de elementos, número de nós por elemento, carregamentos, condições de apoio, propriedades e tipos dos elementos;
- ASSEM: Realiza a montagem da matriz de rigidez global e o vetor global de cargas;
- STIFF: Realiza a geração da matriz de rigidez para cada elemento de pórtico;
- ELASS: Realiza a alocação na matriz global a matriz de rigidez de cada elemento que compõe a estrutura e forma de banda simétrica;
- BOUND: Introduce as condições de apoio na matriz de rigidez global e no vetor de cargas da estrutura;

- SLBSI: Realiza o sistema de equações  $KU = P$ , utilizando o método da eliminação de GAUSS;
- FORCE: Realiza o calculo dos esforços para o elemento de pórtico;
- OUTPUT: Gera o arquivo de saída com os resultados dos deslocamentos nodais e esforços nos elementos de pórtico.

A figura 4 mostra a representação do funcionamento do FRAME.

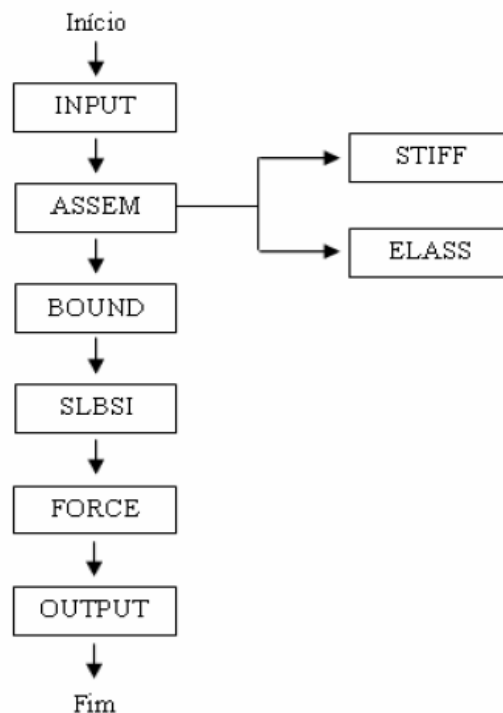


Figura 4 - Fluxograma do funcionamento do FRAME [5].

Caso a estrutura retornada seja válida, seu peso e sua condição de validade será retornado como valor de adaptação para o indivíduo, caso contrário, o programa retornará o peso da estrutura como sendo infinito, ou seja, o peso será aumentado mil vezes, por se tratar de uma solução inviável.

Após este processo, os indivíduos são ordenados em ordem crescente conforme a aptidão através do método de ordenação QuickSort [21], devido sua complexidade ser  $O(\log(n))$ . Desta forma, os de menor adaptação estarão nas primeiras posições na população. Aqueles que forem de melhor aptidão será a estrutura de maior durabilidade, maior resistência aos esforços e menor peso, conseqüentemente, terão maior probabilidade de sobrevivência e possuirão maior chance de serem escolhidos pelo método de seleção.

### 3. CRITÉRIO DE PARADA

O AG irá executar até que seja atingida o numero de interações estabelecida ou enquanto não obtiver uma população de indivíduos viáveis. Quando o critério de parada for satisfeito o melhor indivíduo encontrado será a melhor solução. Enquanto não for satisfeito é aplicado os operadores genéticos até formar a nova população com bons indivíduos.

### 4. OPERADORES GENÉTICOS

Os operadores genéticos são responsáveis por realizar modificação em características fundamentais de indivíduos selecionados gerando descendentes para a próxima população. Os principais operadores são: seleção, cruzamento e mutação.

#### 4.1. OPERADOR DE SELEÇÃO

O operador de seleção é utilizado para selecionar indivíduos que farão parte na nova



população e se reproduzirem conforme sua função de adaptação. Foi determinado que a seleção será realizada sob uma porcentagem de vezes em que um mesmo individuo seja escolhido. Com isso será limitado as chances em que um mesmo indivíduo entre no processo de recombinação evitando convergência prematura.

Este operador foi implementado utilizando o método da roleta. Cada indivíduo da população ocupa um setor da roleta de acordo com a sua adaptação, onde os mais bem adaptados ocupam maior parte da roleta. Para minimizar o peso de estruturas metálicas foi utilizado uma função de adaptação relativa junto ao cálculo da roleta da seguinte forma:

$$\mu_i = \frac{\mu_{\text{máximo}} - \mu_i}{\mu_{\text{máximo}} - \mu_{\text{mínimo}}}, i = 1, \dots, n$$

Onde  $\mu_i$  e  $\mu$  são as funções de adaptação escalada e original, respectivamente. Dessa forma, os indivíduos de menor valor de adaptação, ou seja, os mais bem adaptados serão favorecidos, pois terão pontuação maior, conseqüentemente, maior chance de serem escolhidos, já os de maior valor de adaptação terão menor pontuação e menor chance de ser escolhido. A tabela 4 mostra um exemplo com este calculo e a figura 5 mostra a representação da roleta utilizada:

Tabela 4 - Descrição do calculo da roleta com a função de adaptação relativa.

Indivíduo	Cromossomo	Adaptação (Peso)	Pontuação	% do Total
1	49 17 49 49 48 48	500	7	38,9
2	46 49 38 49 39 53	501	6	33,3
3	49 49 17 49 50 53	503	4	22,2
4	49 23 46 49 31 48	506	1	5,6
Total		2010	18	100

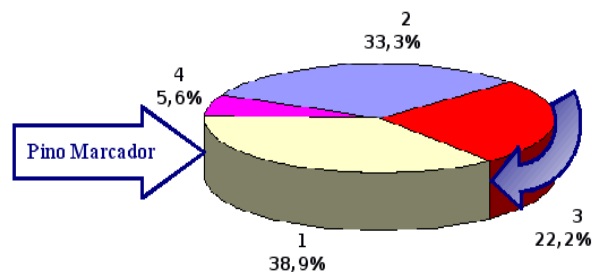


Figura 5 - Representação da roleta utilizada.

## 4.2. OPERADOR DE RECOMBINAÇÃO

O operador de recombinação é utilizado para realizar o processo de cruzamento e mutação nos indivíduos escolhidos que ainda não fazem parte da população elite de acordo com as taxas para a probabilidade de cruzamento e mutação. Caso for realizado o cruzamento, será aplicado a mutação nos Filhos gerados de acordo com a probabilidade de mutação. Caso não for realizado o cruzamento será aplicado a mutação nos Pais.

### 4.2.1. OPERADOR DE CRUZAMENTO

Os operadores de cruzamento mais usados na literatura são o cruzamento uniforme, o de um ponto e de dois pontos. Tem como objetivo a propagação de genes de um casal de indivíduos formando novos indivíduos filhos. No algoritmo implementado foi utilizado estes

operadores realizando comparações entre o desempenho de cada um. Os operadores de cruzamento foram implementados utilizando a codificação dos genes em decimal seguindo as mesmas idéias descritos na literatura. A figura 6 mostra cruzamento uniforme usado:

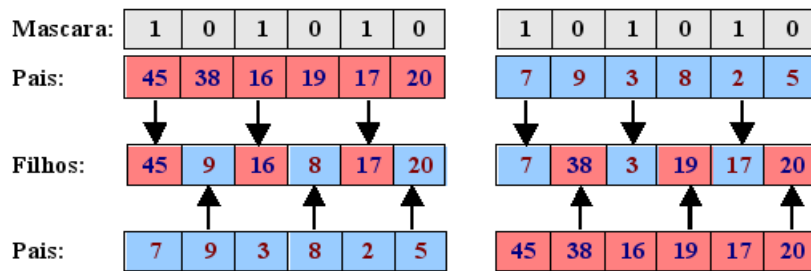


Figura 6 – Representação do Cruzamento Uniforme em decimal.

#### 4.2.2. OPERADOR DE MUTAÇÃO

O operador mutação é responsável pela diversidade na população evitando a convergência prematura dos AG's. A diversidade é perdida quando ocorre o aparecimento de um super-indivíduo que em poucas gerações domina toda a população.

Neste trabalho o operador foi implementado da seguinte forma: para cada indivíduo que entrar no processo de mutação gera-se a quantidade aleatória de genes. Dentre esta quantidade, é sorteado um genes aleatórios para sofrer a mutação. Também é verificado a probabilidade de ocorrer mutação em cada gene. Ocorrendo a mutação, é gerado um gene aleatório de zero ao numero de perfis da tabela substituindo o gene escolhido. A figura 7 mostra a representação do operador de mutação usado:

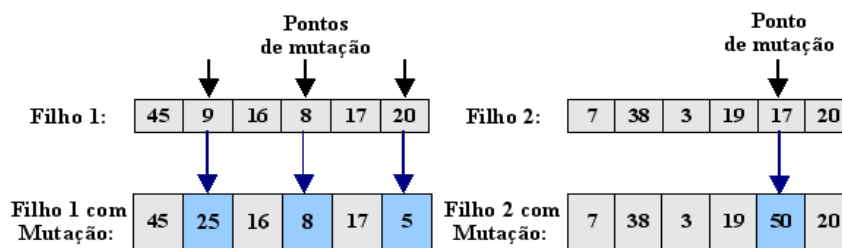


Figura 7 – Representação da mutação utilizando codificação em decimal.

### 5. ELITISMO

Neste trabalho foi utilizado a atualização da população mantendo uma porcentagem elite de melhores indivíduos. Ao atualizar a população a geração de piores indivíduos são eliminados no processo de cruzamento e mutação, surgindo assim, uma nova população com indivíduos melhores.

O método Path Relinking (PR) aplicado no elitismo terá como objetivo melhorar ainda mais os indivíduos selecionados para elite. É utilizado Reconexão *forward*. Entre as duas soluções, a solução início é a de pior qualidade e a solução guia é a de melhor qualidade. Entre as soluções intermediárias, geradas pelo PR, a que for de melhor solução substituirá a solução guia na elite de bons indivíduos. No capítulo seguinte será mostrado resultados com o uso do PR combinado ao AG na escolha de melhores perfis para o projeto de estruturas metálicas. O processo de intensificação é ilustrado na figura 8:

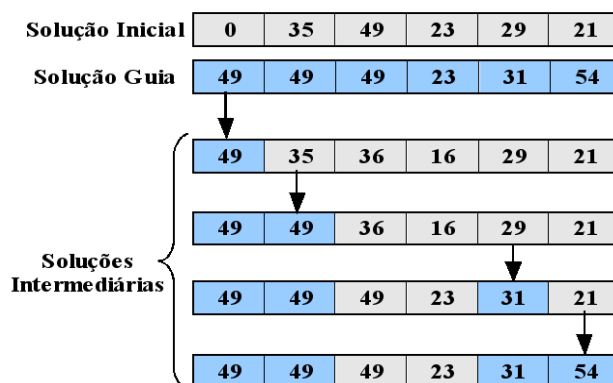


Figura 8 - Processo de Intensificação em decimal.

Através do fluxograma da figura 9 pode ser obtido uma visão ampla do funcionamento do algoritmo implementado. Os dados das estruturas são lidos do arquivo de entrada, a população inicial é gerada aleatoriamente de acordo com o número de perfis da tabela, avalia os indivíduos pontuando-os com os pesos calculados pelas subrotinas do programa FRAME, baseado nesta pontuação os operadores genéticos são aplicados e gerado a nova população. Todo este processo é repetido até que seja alcançado o número de interações pré-estabelecido ou até que seja alcançadas melhores soluções.

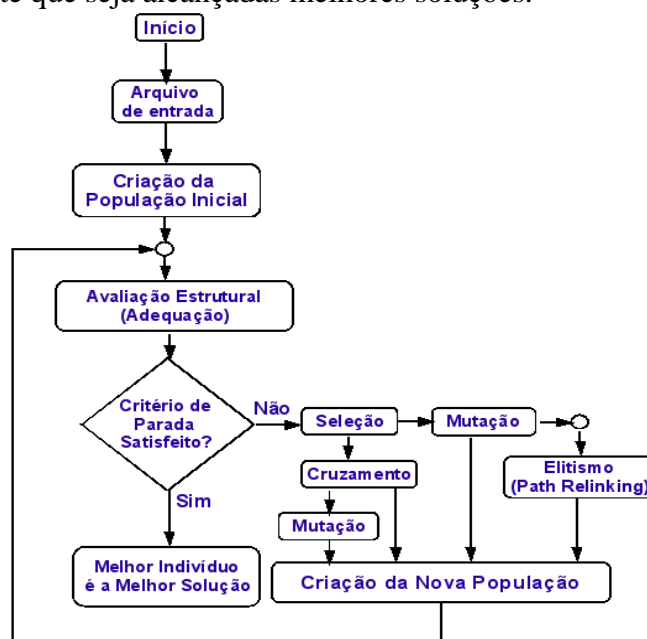


Figura 9 - Fluxograma do funcionamento do AG combinado ao PR.

## .ANÁLISE DOS RESULTADOS

Esta seção tem como objetivo mostrar, analisar e verificar a aplicabilidade dos AGs através dos resultados dos testes realizados na solução do problema de escolha de perfis no projeto de estruturas metálica. O AG foi desenvolvido com codificação em decimal, a qual foi possível representar os números decimais que identificam os perfis na tabela, desta forma, foi evitado conversões desnecessárias como a de binário para decimal. Com isso, a implementação foi mais simples e eficiente devido a complexidade do problema. Os resultados obtidos pelo AG foram comparados com os diferentes operadores de cruzamento sem a utilização e com a utilização do PR.

Para aplicar o algoritmo proposto foi implementado os cálculos para dimensionamento estrutural demonstrados anteriormente e para dimensionamento de vigas e pilares condicionados ao incêndio demonstrados por Almeida [1]. Será avaliado se a estrutura formada pelo AG resiste aos esforços sob altas temperaturas no período de dez minutos. Também foi considerado que os pilares seriam expostos ao incêndio por todos os lados e as vigas estaria protegidas por uma camada de laje sendo expostas ao incêndio por três lados como mostrado na figura 10.

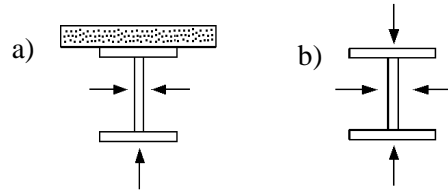


Figura 10 - a) Viga exposta sob incêndio. b) Pilar exposto sob incêndio [3].

A figura 11 mostra a análise de um pórtico de nove elementos com seus respectivos nós, as forças atuantes nos nós 2, 3, 4 e 5, a medida de cada lado e os apoios de engaste no nó 1 e rotulado no nó 8.

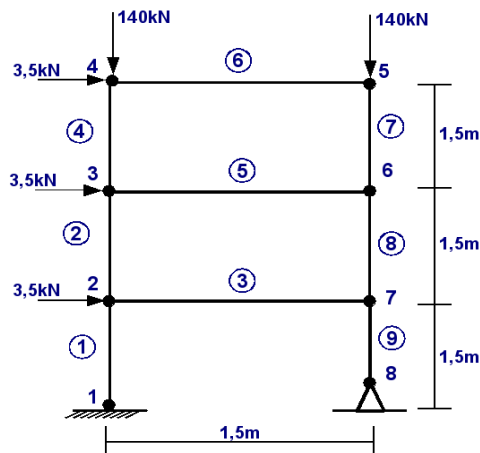


Figura 11 - Análise estrutural de pórtico de nove elementos.

A linguagem de programação foi o C++ por ser orientado a objetos dando um melhor entendimento, compreensão e organização do código fonte, além de possibilitar uma implementação eficiente e dinâmica dos dados. O algoritmo foi compilado utilizando o compilador g++ 3.3.6 da distribuição Debian do Sistema Operacional Linux. Os testes foram realizados em um computador Intel (R) Celeron (R) CPU 2.26GHz, com memória cache de 256 KB e 256 MB de memória RAM. O tempo computacional do programa obteve em média 13 minutos em 300 interações. As variáveis têm o seguinte significado:

- X e Y: Coordenada do nó no eixo x e y, respectivamente;
- j1 e j2: Marcam as extremidades do elemento onde estão os nós;
- A: Área do perfil;
- IX e IY: Momento de inércia no eixo x e y, respectivamente;
- Tadm: Tensão admissível;
- FX, FY, FZ: Forças em x, y e z, respectivamente;
- Ke: Fator de redução do Módulo de Elasticidade;
- Ky: Fator de redução da Tensão de Escoamento;
- E: Módulo de Elasticidade;
- Oy: Tensão de Escoamento;
- K: Constante das condições de apoio;

- X-DISP, Y-DISP: Deslocamentos no eixo x e y, respectivamente;
- Z-ROT: Rotação no eixo z;
- RX, RY, RZ: Reações no eixo x, y e z, respectivamente.

A tabela de 5 apresenta os dados de entrada para o programa.

#### INFORMAÇÕES SOBRE O PORTICO

Numero de Nós	8
Numero de elementos	9
Numero de materiais	1
Numero de perfis na estrutura	6
Numero de apoios	2
Numero de nos com cargas	4

#### COORDENADAS DE CADA NÓS

Nó	X	Y	CONDIÇÕES DE APOIO		
			1	1	1
1	0	0	0	0	0
2	0	1500	0	0	0
3	0	3000	0	0	0
4	0	4500	0	0	0
5	1500	4500	0	0	0
6	1500	3000	0	0	0
7	1500	1500	0	0	0
8	1500	0	1	1	0

#### DADOS DOS MATERIAIS

Elemento	Jl	Jz	K	A	IX	IY	Tadm
1	1	2	0,5	0,00473	2,22E-005	7,07E-006	1,00E+ 008
2	2	3	0,5	0,00473	2,22E-005	7,07E-006	1,00E+ 008
3	2	7	0,5	0,00473	2,22E-005	7,07E-006	1,00E+ 008
4	3	4	0,5	0,00645	1,41E-004	9,68E-006	1,00E+ 008
5	3	6	0,5	0,00418	6,50E-005	1,92E-006	1,00E+ 008
6	4	5	0,5	0,00173	6,84E-006	9,12E-007	1,00E+ 008
7	5	6	0,7	0,00473	2,22E-005	7,07E-006	1,00E+ 008
8	6	7	0,5	0,00473	2,22E-005	7,07E-006	1,00E+ 008
9	7	8	0,5	0,00473	2,22E-005	7,07E-006	1,00E+ 008

#### CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO

Nó	FX	FY	FZ
2	3500000	0	0
3	3500000	0	0
4	3500000	-140000000	0
5	0	-140000000	0

#### ELEVACAO DE TEMPERATURA NO PORTICO

Elemento	Seção	Definição	Temp. do Aço	Calor Esp. do Aço	Intervalo de tempo	Tempo Final	Temperatura	Ke	Ky
1	1	P	20	600	1	10	661,5	0,199	0,322
2	2	P	20	600	1	10	661,5	0,199	0,322
3	3	V	20	600	1	10	551,2	0,451	0,621
4	4	P	20	600	1	10	724,5	0,120	0,201
5	5	V	20	600	1	10	744,5	0,112	0,177
6	6	V	20	600	1	10	1157,9	0,009	0,008
7	3	P	20	600	1	10	661,5	0,199	0,322
8	2	P	20	600	1	10	661,5	0,199	0,322
9	1	P	20	600	1	10	661,5	0,199	0,322

Tabela 5 - Dados de entrada para o pórtico de 9 elementos.

Para o cálculo do dimensionamento de estruturas metálica sob alta temperatura basta multiplicar o fator de redução Ke ao módulo de elasticidade e o fator de redução Ky à Tensão

de escoamento. A tabela 6 mostra o Módulo de Elasticidade e a Tensão de Escoamento a temperatura ambiente e sob alta temperatura.

Elemento	Sem Elevação de Temperatura		Com Elevação de Temperatura	
	E	Oy	E	Oy
1	2,00E+ 011	2,50E+ 008	3,99E+ 010	8,06E+ 007
2	2,00E+ 011	2,50E+ 008	3,99E+ 010	8,06E+ 007
3	2,00E+ 011	2,50E+ 008	9,03E+ 010	1,55E+ 008
4	2,00E+ 011	2,50E+ 008	2,40E+ 010	5,02E+ 007
5	2,00E+ 011	2,50E+ 008	2,24E+ 010	4,41E+ 007
6	2,00E+ 011	2,50E+ 008	1,90E+ 009	2,11E+ 006
7	2,00E+ 011	2,50E+ 008	3,99E+ 010	8,06E+ 007
8	2,00E+ 011	2,50E+ 008	3,99E+ 010	8,06E+ 007
9	2,00E+ 011	2,50E+ 008	3,99E+ 010	8,06E+ 007

Tabela 6 - Modulo de Elasticidade e Tensão de Escoamento.

A tabela 7 mostra um exemplo de população inicial de 25 indivíduos formados com genes aleatórios. Cada indivíduo foi avaliado tendo como aptidão o peso da estrutura formada pelos seus genes. Pode ser observado que os indivíduos inviáveis tem o peso penalizado formando uma estrutura muito pesada em relação as estruturas viáveis. Desta forma, o AG fará a busca da melhor solução entre os menores pesos de soluções viáveis.

População Inicial gerada pelo Algoritmo Genético								
Ind	Cromossomo						Peso	Solução
1	21	23	15	4	28	1	1005,58	Viavel
2	42	28	8	35	24	30	1036,20	Viavel
3	15	42	1	27	12	6	1414,30	Viavel
4	37	11	37	53	16	14	27746,85	Inviavel
5	53	17	9	5	52	34	54805,56	Inviavel
6	16	55	12	25	5	49	59401,93	Inviavel
7	36	51	45	29	43	40	67996,62	Inviavel
8	27	40	20	0	14	7	68139,57	Inviavel
9	16	5	32	21	32	14	108234,27	Inviavel
10	45	47	9	8	11	48	108317,64	Inviavel
11	0	47	55	20	26	1	108577,39	Inviavel
12	40	7	19	4	8	17	126223,05	Inviavel
13	12	39	50	0	47	37	130366,21	Inviavel
14	20	39	31	55	52	35	135089,28	Inviavel
15	21	24	35	43	22	52	135152,98	Inviavel
16	23	52	44	24	3	13	139894,54	Inviavel
17	36	2	41	51	6	14	161674,05	Inviavel
18	19	23	19	19	39	29	233969,37	Inviavel
19	1	18	19	51	18	51	264968,70	Inviavel
20	55	0	54	21	42	41	293345,28	Inviavel
21	43	41	51	13	20	41	604057,50	Inviavel
22	41	54	45	8	35	55	702849,75	Inviavel
23	41	19	31	20	6	37	708148,50	Inviavel
24	51	33	37	27	53	27	720276,75	Inviavel
25	33	21	36	12	0	28	781271,25	Inviavel

Tabela 7 - Exemplo de População inicial.

A tabela 8 mostram os parâmetros e os resultados obtidos pelo AG utilizando diferentes porcentagens de cruzamento por indivíduo e diferentes probabilidades de cruzamento e mutação comparando o resultados com e sem PR. Para cada semente utilizada no gerador de números aleatórios, os AGs obtêm resultados diferentes. Por este motivo, foram realizadas três execuções e a média entre os pesos encontrados para cada teste, em seguida foi feito uma média geral dos pesos encontrados pelos três tipos de cruzamentos utilizados. Para este pórtico de 9 elementos foi realizada 300 interações utilizado uma população de 25 indivíduos com 6 genes cada e uma elite de 6 indivíduos.

Parâmetros		Tipo de Cruzamento	Sem Path Relinking		Com Path Relinking	
			Peso (kg)	Solução	Peso (kg)	Solução
Porcentagem de Cruzamento	30%	Cruzamento de um ponto	522,49	Viável	590,67	Viável
Probabilidade de Cruzamento	70%	Cruzamento de dois ponto	540,71	Viável	551,23	Viável
Probabilidade de Mutação	5%	Cruzamento uniforme	533,29	Viável	523,32	Viável
Media Geral			532,16		555,07	

Tabela 8 - Resultados obtidos pelo AG.

De acordo com os resultados encontrados, sem o uso do PR as soluções foram satisfatórias, mas com o uso do PR as soluções foram melhores na maioria dos testes se comparado pela média geral. Utilizando a probabilidade de cruzamento a 70% e de mutação a 10%, a melhor a média de pesos encontrados entre três execuções sem PR foi o cruzamento

Parâmetros		Tipo de Cruzamento	Sem Path Relinking		Com Path Relinking	
			Peso (kg)	Solução	Peso (kg)	Solução
Porcentagem de Cruzamento	50%	Cruzamento de um ponto	561,43	Viável	533,25	Viável
Probabilidade de Cruzamento	70%	Cruzamento de dois ponto	581,72	Viável	549,30	Viável
Probabilidade de Mutação	5%	Cruzamento uniforme	561,79	Viável	523,52	Viável
Media Geral			568,31		535,36	

#### Media de Pesos de Indivíduos sem Path Relinking

Parâmetros		Tipos de Cruzamento	Peso (kg)	Solução
Porcentagem de Cruzamento	30%	Cruzamento de um ponto	569,12	Viável
Probabilidade de Cruzamento	80%	Cruzamento de dois ponto	558,21	Viável
Probabilidade de Mutação	5%	Cruzamento uniforme	524,97	Viável
Media Geral			550,77	

#### Media de Pesos de Indivíduos com Path Relinking

Parâmetros		Tipos de Cruzamento	Peso (kg)	Solução
Porcentagem de Cruzamento	50%	Cruzamento de um ponto	558,88	Viável
Probabilidade de Cruzamento	80%	Cruzamento de dois ponto	523,79	Viável
Probabilidade de Mutação	5%	Cruzamento uniforme	533,21	Viável
Media Geral			538,63	

#### Media de Pesos de Indivíduos sem Path Relinking

Parâmetros		Tipos de Cruzamento	Peso (kg)	Solução
Porcentagem de Cruzamento	30%	Cruzamento de um ponto	511,98	Viável
Probabilidade de Cruzamento	70%	Cruzamento de dois ponto	524,97	Viável
Probabilidade de Mutação	10%	Cruzamento uniforme	527,40	Viável
Media Geral			521,45	

#### Media de Pesos de Indivíduos com Path Relinking

Parâmetros		Tipos de Cruzamento	Peso (kg)	Solução
Porcentagem de Cruzamento	50%	Cruzamento de um ponto	522,42	Viável
Probabilidade de Cruzamento	70%	Cruzamento de dois ponto	516,26	Viável
Probabilidade de Mutação	10%	Cruzamento uniforme	510,88	Viável
Media Geral			516,52	

de um ponto com porcentagem de ocorrer a 30% e com PR foi o cruzamento uniforme com porcentagem de ocorrer a 50%. A tabela 9 compara as melhores soluções com e sem PR.

**Melhores Indivíduos gerados sem Path Relinking**

Parâmetros		Tipos de Cruzamento	Cromossomo	Peso (kg)	Solução
Porcentagem de Cruzamento	30%	Cruzamento de um ponto	49 38 38 49 39 53	505,15	Viável
Probabilidade de Cruzamento	70%	Cruzamento de dois ponto	38 49 49 37 39 54	507,15	Viável
Probabilidade de Mutação	10%	Cruzamento uniforme	49 46 49 38 39 53	498,20	Viável
		Media Geral		503,50	

**Melhores Indivíduos gerados com Path Relinking**

Parâmetros		Tipos de Cruzamento	Cromossomo	Peso (kg)	Solução
Porcentagem de Cruzamento	50%	Cruzamento de um ponto	49 49 49 23 31 54	479,71	Viável
Probabilidade de Cruzamento	70%	Cruzamento de dois ponto	49 23 38 49 53 51	513,86	Viável
Probabilidade de Mutação	10%	Cruzamento uniforme	49 49 38 49 51 39	489,02	Viável
		Media Geral		494,20	

Tabela 9 - Melhores indivíduos.

A tabela 10 juntamente com os gráficos 12 e 13 mostram a evolução dos melhores indivíduos gerados pelas três formas de cruzamento com e sem PR. Dentre os indivíduos sem PR o cruzamento uniforme encontrou menor peso de 498,20kg, já dentre os indivíduos com PR o cruzamento de um ponto encontrou menor peso de 479,71kg.

Tabela 10 - Tabela mostrando a evolução dos melhores indivíduos com e sem PR.



Int.	Sem Path Relinking			Com Path Relinking		
	Cruz. de um ponto	Cruz. de dois pontos	Cruz. uniforme	Cruz. de um ponto	Cruz. de dois pontos	Cruz. uniforme
0	1005,58	907,26	954,01	986,27	916,57	846,03
10	787,16	654,57	742,30	748,54	684,13	629,61
20	665,76	616,54	685,54	716,51	594,40	589,69
30	643,39	590,16	685,54	711,92	572,03	587,45
40	643,39	572,03	685,54	691,66	561,08	553,66
50	598,88	545,65	685,54	654,69	543,42	553,66
60	598,88	545,65	663,64	654,69	543,42	538,24
70	598,88	545,65	654,81	507,03	543,42	538,24
80	598,88	545,65	654,81	507,03	536,70	538,24
90	598,88	538,82	654,81	507,03	536,70	538,24
100	598,88	538,82	654,81	507,03	536,70	538,24
110	581,21	538,82	583,10	507,03	536,70	529,52
120	581,21	538,82	583,10	507,03	536,70	529,52
130	516,33	532,23	583,10	502,56	536,70	529,52
140	516,33	532,23	583,10	502,56	513,86	529,52
150	516,33	532,23	542,59	502,56	513,86	529,52
160	516,33	529,99	527,17	502,56	513,86	529,52
170	511,86	529,99	527,17	479,71	513,86	529,52
180	511,86	529,99	527,17	479,71	513,86	529,52
190	511,86	529,99	527,17	479,71	513,86	529,52
200	511,86	529,99	527,17	479,71	513,86	529,52
210	511,86	529,99	527,17	479,71	513,86	529,52
220	505,15	507,15	527,17	479,71	513,86	529,52
230	505,15	507,15	516,22	479,71	513,86	511,86
240	505,15	507,15	516,22	479,71	513,86	511,86
250	505,15	507,15	513,51	479,71	513,86	511,86
260	505,15	507,15	513,51	479,71	513,86	511,86
270	505,15	507,15	513,51	479,71	513,86	489,02
280	505,15	507,15	500,44	479,71	513,86	489,02
290	505,15	507,15	500,44	479,71	513,86	489,02
300	505,15	507,15	498,20	479,71	513,86	489,02

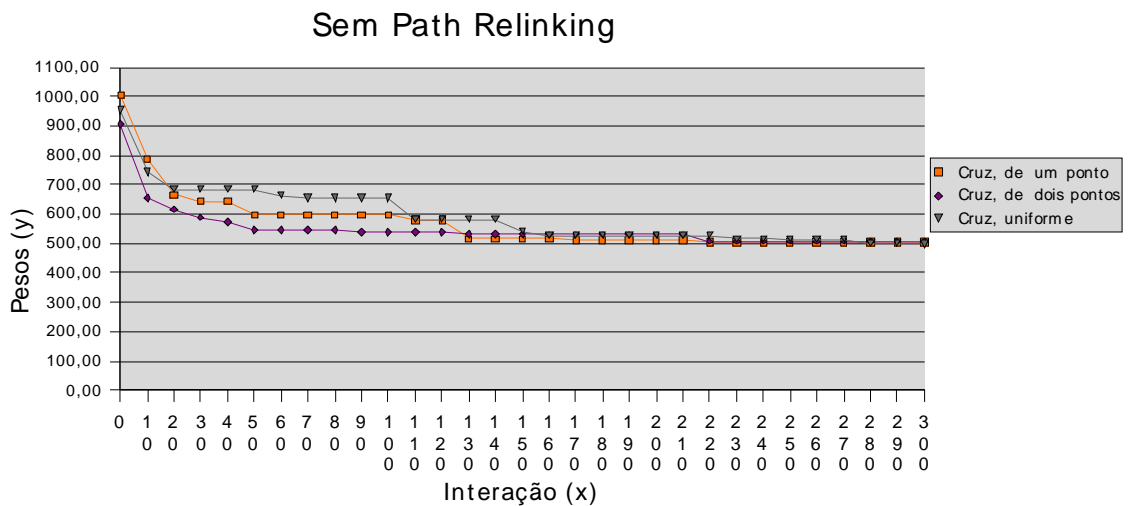


Figura 12 - Gráfico comparando os melhores indivíduos sem PR.

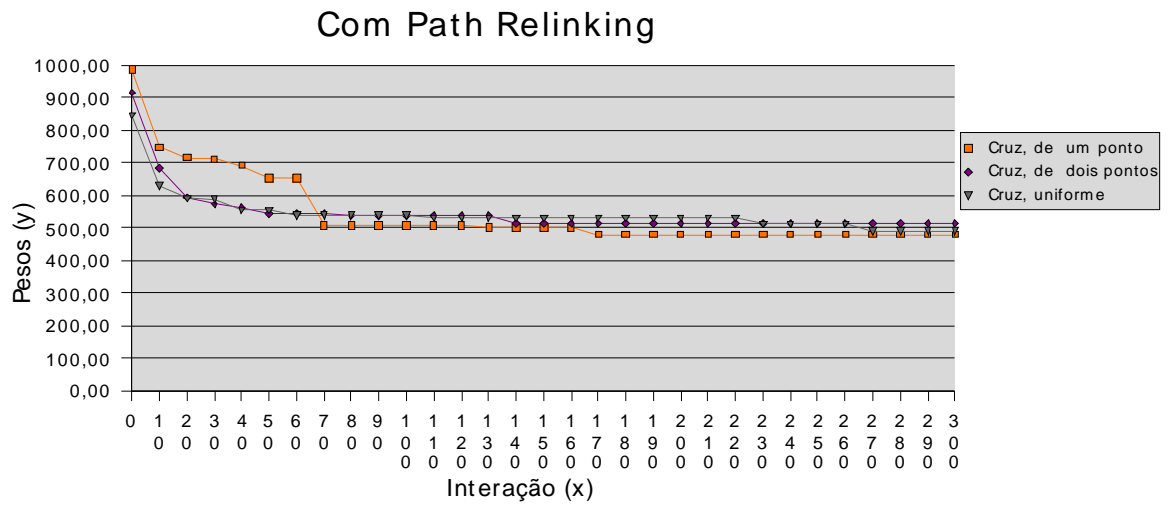


Figura 13 - Gráfico comparando os melhores indivíduos com PR.

A tabela 11 juntamente com os gráficos 14 e 15 mostram a evolução dos indivíduos gerados pelo cruzamento de um ponto com e sem PR e pelo cruzamento uniforme com e sem PR. Dentre os indivíduos os que alcançaram o menor peso foi o gerado com o cruzamento de um ponto utilizando o PR com 479,71kg e o gerado com o cruzamento uniforme também utilizando o PR com 489,02kg.

Tabela 11 - Tabela mostrando a evolução com o cruzamento de um ponto e uniforme.

		Cruzamento de Um Ponto			
		Cruzamento de Um Ponto		Cruzamento Uniforme	
Pesos (y)	Int.	Sem Path Relinking	Com Path Relinking	Sem Path Relinking	Com Path Relinking
	1100,0				
1000,0					
900,0					
800,0	0	1005,58	986,27	954,01	846,03
700,0	10	787,16	748,54	742,30	629,61
600,0	20	665,76	716,51	685,54	589,69
500,0	30	643,39	711,92	685,54	587,45
400,0	40	643,39	691,66	685,54	553,66
300,0	50	598,88	654,69	685,54	553,66
200,0	60	598,88	654,69	663,64	538,24
100,0	70	598,88	507,03	654,81	538,24
0,0	80	598,88	507,03	654,81	538,24
	90	598,88	507,03	654,81	538,24
	100	598,88	507,03	654,81	538,24
	110	581,21	507,03	583,10	529,52
	120	581,21	507,03	583,10	529,52
	130	516,33	502,56	583,10	529,52
	140	516,33	502,56	583,10	529,52
	150	516,33	502,56	542,59	529,52
	160	516,33	502,56	527,17	529,52
	170	511,86	479,71	527,17	529,52
	180	511,86	479,71	527,17	529,52
	190	511,86	479,71	527,17	529,52
	200	511,86	479,71	527,17	529,52
	210	511,86	479,71	527,17	529,52
	220	505,15	479,71	527,17	529,52
	230	505,15	479,71	516,22	511,86
	240	505,15	479,71	516,22	511,86
	250	505,15	479,71	513,51	511,86
	260	505,15	479,71	513,51	511,86
	270	505,15	479,71	513,51	489,02
	280	505,15	479,71	500,44	489,02
	290	505,15	479,71	500,44	489,02
	300	505,15	479,71	498,20	489,02

Figura 14 - Gráfico dos melhores indivíduos utilizando cruzamento de um ponto.

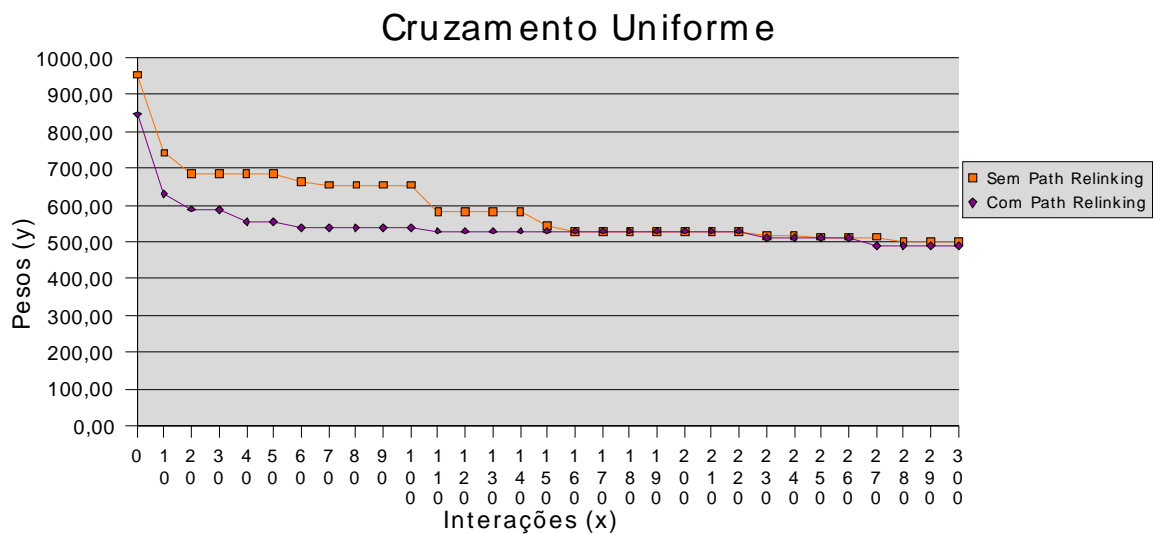


Figura 15 - Gráfico dos melhores indivíduos utilizando cruzamento uniforme.

A tabela 12 juntamente com o gráfico 16 mostram a evolução dos melhores

indivíduos gerados pelo cruzamento uniforme sem PR e pelo cruzamento de um ponto com PR. Dentre os melhores indivíduos, o que alcançou o menor peso foi o gerado pelo cruzamento de um ponto utilizando o PR com 479,71kg.

#### Melhores Soluções

Int.	Cruz. uniforme sem PR	Cruz. de um ponto com PR
0	954,01	986,27
10	742,30	748,54
20	685,54	716,51
30	685,54	711,92
40	685,54	691,66
50	685,54	654,69
60	663,64	654,69
70	654,81	507,03
80	654,81	507,03
90	654,81	507,03
100	654,81	507,03
110	583,10	507,03
120	583,10	507,03
130	583,10	502,56
140	583,10	502,56
150	542,59	502,56
160	527,17	502,56
170	527,17	479,71
180	527,17	479,71
190	527,17	479,71
200	527,17	479,71
210	527,17	479,71
220	527,17	479,71
230	516,22	479,71
240	516,22	479,71
250	513,51	479,71
260	513,51	479,71
270	513,51	479,71
280	500,44	479,71
290	500,44	479,71
300	498,20	479,71

Tabela 12 - Tabela mostrando a evolução das melhores soluções encontradas.

Figura 16 - Gráfico comparando as melhores soluções encontradas.

Das melhores soluções encontradas, o cruzamento uniforme obteve o menor peso dentre os testes realizados sem PR, já com o cruzamento de um ponto obteve o menor peso dentre os testes realizados com PR e sem PR. Abaixo segue as tabelas de dimensionamento da melhor solução encontrada.

DESLOCAMENTOS						
Nó	SEM ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA			COM ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA		
	X-DISP	Y-DISP	Z-ROT	X-DISP	Y-DISP	Z-ROT
1	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000
2	0,00088309	-0,00019700	-0,00043860	0,00367530	-0,00098487	-0,00127530
3	0,00149810	-0,00040653	-0,00016884	0,00644100	-0,00204360	-0,00134670
4	0,00181810	-0,00056828	-0,00022637	0,00926770	-0,00339650	-0,00214190
5	0,00181320	-0,00070482	-0,00020058	0,00882610	-0,00352720	-0,00195210
6	0,00149210	-0,00048142	-0,00013185	0,00638470	-0,00241220	-0,00089375
7	0,00088742	-0,00024698	-0,00029568	0,00368420	-0,00124300	-0,00080592
8	0,00000000	0,00000000	-0,00073958	0,00000000	0,00000000	-0,00328120

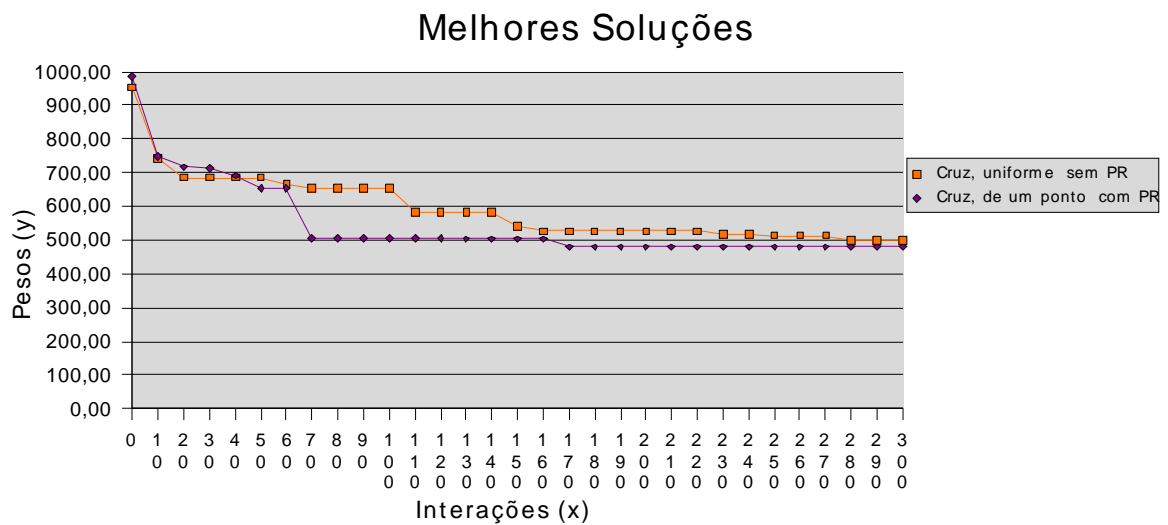


Tabela 13 - Deslocamentos realizados na estrutura.

Tabela 14 - Forças aplicadas nas extremidades do elemento.

Tabela 15 - Reações obtidas na estrutura.

A tabela 16 mostra os dados da melhor estrutura encontrada pelo AG que são: os elementos estruturais, as seções do pórtico, os perfis, o código de cada perfil, a massa específica do aço, os pesos calculados de cada perfil encontrado e a condição de ser viável ou inviável. Se o perfil resiste as condições de carregamento então este perfil é viável se não é inviável. Caso um perfil que compõe a estrutura for inviável então toda a estrutura se torna

**ESFORÇOS INTERNOS NAS EXTREMIDADES DO ELEMENTO**

Elemento	Nós	SEM ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA			COM ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA		
		Força Normal	Força Cortante	Momento Fletor	Força Normal	Força Cortante	Momento Fletor
1	1	124239,53	8748,06	7859,30	123778,11	8553,20	7167,16
1	2	124239,53	8748,06	5262,78	-123778,11	-8553,20	5662,63
2	2	132144,38	2516,51	1088,90	133062,60	2514,49	1927,96
2	3	132144,38	2516,51	2685,86	-133062,60	-2514,49	1843,78
3	2	2731,55	7904,85	6351,69	-2538,70	-9284,49	-7590,59
3	7	2731,55	7904,85	5505,59	2538,70	9284,49	-6336,14
4	3	139106,62	2366,69	2856,48	139864,41	2534,17	3697,92
4	4	139106,62	2366,69	693,55	-139864,41	-2534,17	103,34
5	3	3350,18	6962,24	5542,34	3519,68	-6801,81	-5541,70

**REAÇÕES**

Nos	SEM ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA			COM ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA			
	RX	RY	RZ	RX	RY	RZ	
1	-8748055	124239533	7859,3	-8553197	123778109	7167,16	
8	-1751945	155760467	0	-1946803	156221891	0	
8	6	147855,62	4483,49	3847,57	146937,40	4485,51	3312,32
8	7	147855,62	4483,49	2877,67	-146937,40	-4485,51	3415,94
9	7	155760,47	1751,94	2627,92	156221,89	1946,80	2920,20
9	8	155760,47	1751,94	0,00	-156221,89	-1946,80	0,00

utura é viável.

**PESOS E SEÇÕES USADAS NOS ELEMENTOS**

Elemento	Seção	Perfil	Código	Massa Esp. do Aço (kg/m <sup>3</sup> )	Peso do Perfil (kg)	Solução
1	1	49	W150x37	7850	55,70	Viável
2	2	49	W150x37	7850	55,70	Viável
3	3	49	W150x37	7850	55,70	Viável
4	4	23	W360x51	7850	75,95	Viável
5	5	31	W310x33	7850	49,22	Viável
6	6	54	W150x14	7850	20,37	Viável
7	3	49	W150x37	7850	55,70	Viável
8	2	49	W150x37	7850	55,70	Viável
9	1	49	W150x37	7850	55,70	Viável
Peso Total do Pórtico:					479,71	Viável

elementos.

## .CONCLUSÕES

O desenvolvimento deste trabalho mostrou a possibilidade de uma boa aplicação do método PR combinado ao AG na otimização do dimensionamento de estruturas metálicas condicionadas tanto a temperatura ambiente quanto a altas temperaturas.

O AG realizou a busca pela melhor solução entre os menores pesos de soluções viáveis devido a penalização nos pesos dos indivíduos inviáveis, os quais, formaram uma estrutura muito pesada em relação as estruturas viáveis. Se o perfil resiste as condições de carregamento então este perfil é viável se não é inviável. Caso um perfis que compõe a estrutura for inviável então toda a estrutura se torna inviável.

Ao penalizar os indivíduos inviáveis aumentando a aptidão, percebeu-se que o AG foi eficiente com o operador de seleção utilizando o método da roleta na busca de estruturas mais leves e viáveis, ou seja, que suportam as condições de carregamento impostas. A intensificação das soluções na busca de estruturas cada vez melhores foi satisfatória com a utilização do PR.

Para o pórtico de nove barras, o AG utilizando o cruzamento uniforme obteve o menor peso dentre os testes realizados sem PR. Já entre os testes realizados com PR e sem PR, o cruzamento de um ponto obteve o menor peso.

Ao encontrar a melhor estrutura, o resultado foi um arquivo de saída com os deslocamentos nodais, os esforços nos elementos de pórtico, os perfis encontrados pelo AG, o código de cada perfil, os pesos calculados de cada perfil, o peso total do pórtico e a condição do pórtico ser viável ou inviável.

Com a análise dos resultados, foi possível observar que o pórtico de nove barras resistiu aos esforços aplicados, pois todos os perfis escolhidos foram viáveis tanto sob temperatura ambiente quanto sob altas temperaturas.

## .REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALMEIDA, Wesley Gomes de. *Algoritmos Genéticos para Projeto de Estruturas Metálicas sob Condições de Incêndio*. Monografia, Faculdade de Ciência da Computação das Faculdades Integradas de Caratinga, 2006.
- [2] ANDRADE, Marcos Ribeiro Quinet de. *Um GRASP com Reconexão de Caminhos para a Solução do Problema da Maximização da Diversidade*. Dissertação, Universidade Federal Fluminense, 2004.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *NBR 14323 Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio - Procedimento*. Rio de Janeiro, Junho 1999. 46 páginas.
- [4] BARCELLOS, João Carlos Holland de. *Algoritmo Genético Adaptativos: Um estudo comparativo*. Dissertação, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.
- [5] CASTRO, Li Chong Lee Bacelar de. *Algoritmo Genético Para Otimização de Estruturas Reticuladas*. Dissertação, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília, 2005.
- [6] DEJONG, K. *The analysis and behaviour of a class of genetic adaptive systems*. PhD thesis, University of Michigan, 1975.
- [7] DIAS, Ricardo H. *Importância e interferências da concepção dos subsistemas verticais em edifícios altos na arquitetura*. Disponível em <http://www.vitruvius.com.br/>. Acessado em: 30, set. de 2007.
- [8] FLEMING, John F. *Computer Analysis of Structural Systems*. Singapore: McGraw-Hill International Editions, 1989.
- [9] FRAGA, Marcelo Caramuru Pimentel. Uma metodologia híbrida Colônia de Formigas – Busca Tabu - Reconexão por Caminhos para resolução do Problema de Roteamento

- de Veículos com Janelas de Tempo. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática e Computacional), Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2006.
- [10] GOLDBERG, David E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Massachusetts: Addison-Wesley Co, 1989.
- [11] HIBBELER, Russell Charles, *Resistência dos Materiais*. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2000.
- [12] HOLLAND, J.H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press, Ann Arbor. 1975.
- [13] LACERDA, Estéfane G. M. de, CARVALHO, André Carlos P. L. F. de, *Capítulo 3 Introdução aos Algoritmos Genéticos*. Porto Alegre: Ed. Universitária/UFRGS: Associação Brasileira de Recursos Hídricos. p. 99-150.1999.
- [14] OLIVEIRA, Humberto César B. de, SOUZA, Mariane M. de, ALVARENGA, Guilherme B., SILVA, Ricardo M. de Abreu. *Adaptação do Algoritmo Genético no Tratamento do Problema de Roteamento de Veículos com Janela de Tempo*. Artigo, Departamento de Ciência da Computação da Universidade Federal de Lavras, 2006.
- [15] PFIL, Walter, PFIL, Michèle S. *Estruturas de aço dimensionamento prático*. 7. ed., rev. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2000.
- [16] ROSSETI, Isabel C. Mello. *Estratégias Sequenciais e paralelas de GRASP com reconexão por caminhos para o problema de síntese de redes a 2-caminhos*. Tese (Doutor(a) em Informática). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2003.
- [17] SANTOS, Rafael Francisco dos. *Aplicação de Algoritmos Genéticos na Solução de Problemas de Alocação de Tripulação*. Monografia, Faculdade de Ciência da Computação das Faculdades Integradas de Caratinga, 2003.
- [18] SOUZA JUNIOR. Valdenir de. *Simulação computacional do comportamento de estruturas de aço sob incêndio*. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004b.
- [19] YEPES, Igor. *Algoritmos Genéticos Paralelos*. Porto Alegre, RS: UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000.
- [20] YEPES, Igor. *Projeto ISIS – Sistemas Inteligentes*. Porto Alegre, RS: disponível em <http://www.geocities.com/igoryepes/visualizar2.htm>. Acessado em: 09, out. De 2007.
- [21] ZIVIANI, Nivio. *Projeto de Algoritmos Com Implementação em Pascal e C*. Quarta edição. Editora Pioneira, São Paulo, 1999.