

Otimização da rigidez de ligações resistentes a momento fletor utilizando algoritmo genético

Marcelo Rodrigo Carreira e Marcelo Guelbert

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)
Campus Campo Mourão, BR 369 - km 0.5
Campo Mourão, Paraná, CEP 87301-005, Caixa Postal 271, Brasil
Tel.: 44 3523 4156; Fax: 44 3523 4902
e-mail: m_carreira@yahoo.com.br

Resumen

Os métodos heurísticos são uma poderosa ferramenta para a otimização de problemas complexos. Os algoritmos genéticos são os métodos heurísticos que mais têm se destacado na otimização de problemas de engenharia. Este trabalho apresenta a implementação e o teste de um programa em linguagem C++ para a otimização de ligações parafusadas em peças de madeira. Foram usados os critérios de dimensionamento do EUROCODE 5 para a madeira e do EUROCODE 3 para as chapas de aço. Foram realizadas doze simulações e o programa apresentou uma boa convergência para ligações utilizando chapas de aço como elemento de ligação.

Palavras-chave: *Otimização, algoritmos genéticos, ligações, madeira, linguagem C++.*

STIFFNESS OPTIMIZATION OF MOMENT RESISTANT CONNECTIONS USING GENETIC ALGORITHM

Summary

The heuristic methods are a powerful tool for the optimization of complex problems. The genetic algorithms are the heuristic methods of larger prominence in the optimization of engineering problems. This paper presents the implementation and the test of a program in C++ language for the optimization of bolted connections in wood members. For the wood, the EUROCODE 5 design method were used and for the steel plates were used EUROCODE 3. Twelve simulations were accomplished and the program presented good convergence for connections using steel plates as connection element.

Keywords: *Optimization, genetic algorithms, connections, wood, C++ language.*

INTRODUÇÃO

As ligações resistentes a momento fletor são comumente empregadas nas junções entre coluna e viga, na união das vigas nas estruturas aperticadas (Figura 1) e também nas estruturas em balanço.

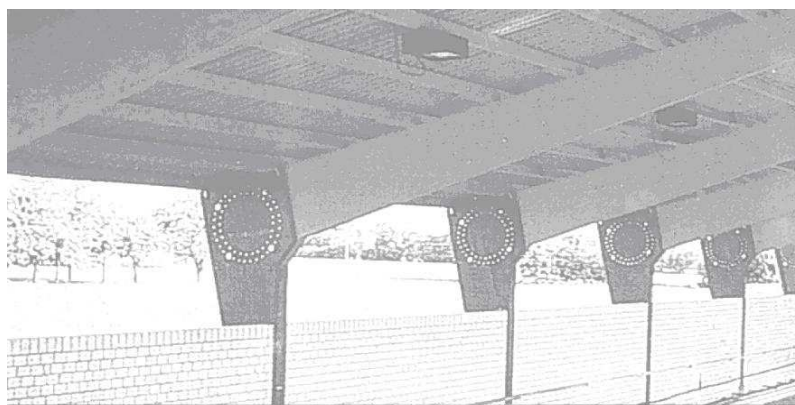


Figura 1. Estrutura portal frame utilizando ligações rígidas ao momento fletor.
Fonte: HEANEY & KNEEN¹

A consideração da rigidez das ligações é fundamental no dimensionamento de estruturas hiperestáticas, pois, afeta tanto a distribuição de tensões nas barras como o deslocamento global da estrutura. Nestas estruturas, é preciso dimensionar a ligação não só para resistir aos esforços atuantes, mas também para se obter a máxima rigidez possível, visando assim a minimização de deslocamentos.

Os critérios atuais de dimensionamento normalmente consideram uma ligação como sendo um engaste perfeito ou uma rótula perfeita. Entretanto, a utilização do modelo de engaste perfeito para o dimensionamento de ligações das estruturas hiperestáticas pode causar problemas de deslocamentos excessivos e acréscimo de tensões em função do modelo não representar com perfeição o funcionamento da ligação. Cabe observar que a reparação deste problema, depois da estrutura montada, além de ser complicada, apresenta elevado custo.

Maximizar a rigidez de uma ligação consiste em resolver um problema de otimização estrutural. Para CHAUDRY² *apud* CHEUNG³, a resolução de um problema de otimização se resume em maximizar ou minimizar uma função denominada função objetivo.

Objetivo

Este trabalho tem por objetivo implementar um software para a maximização da rigidez de ligações parafusadas resistentes a momento fletor empregando algoritmo genético como ferramenta de otimização e usando a norma EUROCODE 5⁴ para o dimensionamento da madeira e dos parafusos e a norma EUROCODE 3⁵ para o dimensionamento da chapa metálica de ligação.

REVISÃO DE LITERATURA

Ligações resistentes a momento fletor

As ligações rígidas ao momento fletor são caracterizadas por transmitirem integralmente o momento fletor atuante de uma barra a outra da estrutura. A Figura 2 apresenta dois exemplos de ligações resistentes ao momento fletor.

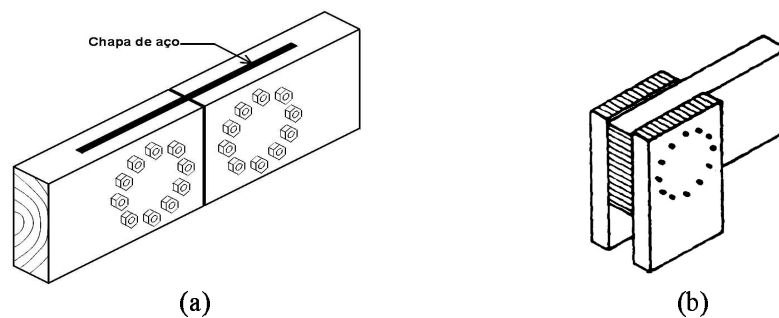


Figura 2. Exemplos de ligações resistente ao momento fletor: a) Emenda de vigas; b) Ligação viga-pilar

Dimensionamento das ligações

De acordo com OLIVEIRA SANTANA & MASCIA⁶, a verificação da resistência destas ligações é feita com base na resistência individual de cada pino. JOHANSEN⁷ afirma que a resistência de cada pino é função da resistência da madeira ao embutimento do parafuso (f_e) e da resistência do pino à flexão (f_y).

As equações dadas pelo EUROCODE 5 para o cálculo da resistência de um pino foram baseadas no trabalho de JOHANSEN, sendo esta resistência dada pelo menor valor da resistência característica (R_k), considerando os modos de ruptura dados na Tabela I para um ou dois planos de corte (Figura 3).

Corte simples	Esmagamento local na peça 1.
	Esmagamento local na peça 2.
	Esmagamento local das peças 1 e 2 com rotação do pino.
	Esmagamento na peça 1 e formação de uma rótula plástica por plano de corte
	Formação de duas rótulas plásticas por plano de corte com esmagamento das peças 1 e 2.
Corte duplo	Esmagamento local na peça 1.
	Esmagamento na peça 1 e formação de uma rótula plástica por plano de corte
	Formação de duas rótulas plásticas por plano de corte com esmagamento das peças 1 e 2.

Tabela I. Modos de ruptura de um pino

O EUROCODE 5 também traz equações para a determinação da resistência R_k de cada pino para o caso de ligações com chapas metálicas, considerando os mesmos modos de ruptura citados anteriormente.

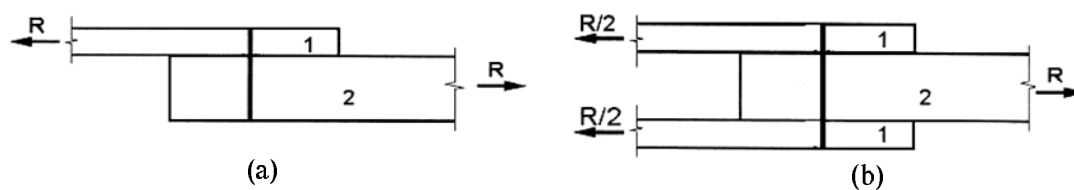


Figura 3. Corte simples (a) e corte duplo (b)

De acordo com o EUROCODE 5, a resistência de cálculo (R_d) de cada pino é determinada pela seguinte equação:

$$R_d = \frac{R_k \cdot K_{mod}}{\gamma_w} \quad (1)$$

Sendo:

K_{mod} = Coeficiente de modificação que leva em conta a duração do carregamento e a classe de umidade da madeira;

R_k = Valor característico da resistência de um pino;

$\gamma_M = 1,3$.
 γ_M = Coeficiente de minoração da resistência. No dimensionamento de ligações, adota-se $\gamma_M = 1,3$.

No caso de ligações utilizando chapas de aço, além das verificações já citadas, deve-se também verificar o corte do parafuso, o rasgamento da chapa e esmagamento da chapa na região do furo. O EUROCODE 3 define equações para a verificação destes elementos de ligação. Estas equações levam em conta:

- Para o corte do parafuso: A resistência última à tração no parafuso (f_{ub}), a classe do parafuso e a área de tração do parafuso (A_s);
- Para o esmagamento da chapa: A tensão última à tração da chapa (f_u); o diâmetro do parafuso (d) e a espessura da chapa (t);
- Para o rasgamento da chapa: A tensão de escoamento à tração da chapa (f_y), a área efetiva de cisalhamento da chapa ($A_{v,eff}$), o diâmetro do furo na face tracionada ($d_{0,v}$) e o diâmetro do furo na face de cisalhamento ($d_{0,v}$).

De acordo com OLIVEIRA SANTANA & MASCIA, as ligações rígidas ao momento fletor comportam-se como um sistema de barras rígidas ligando o centro de rotação e os pinos, sendo que os pinos giram em torno de um centro de rotação, o qual não é exatamente conhecido, pois depende da rigidez de cada pino.

Este tipo de ligação trata-se de um sistema altamente hiperestático no qual são feitas várias simplificações para fins de dimensionamento.

Uma delas é citada por HEANEY & KNEEN, que afirmam ser usual considerar o centro de rotação como sendo o centro de gravidade do grupo de parafusos e que as deformações por embutimento na madeira são consideradas proporcionais à distância em relação ao centro de rotação.

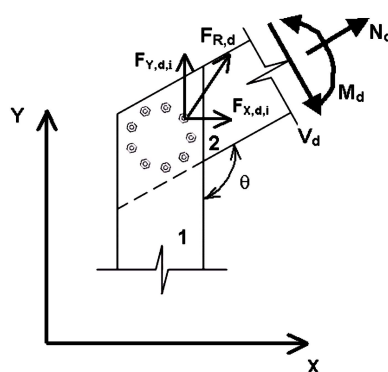


Figura 4. Esforços atuantes nos parafusos

Para o dimensionamento destas ligações, deve-se decompor os esforços de cálculo atuantes nas barras (M_d , N_d , e V_d), nas direções dos eixos globais X e Y, como mostra a Figura 4.

O dimensionamento de cada pino consiste em verificar a seguinte equação:

$$F_{R,d} < R_d \quad (2)$$

Sendo:

$F_{R,d}$: Valor de cálculo da força resultante em um parafuso;

R_d : Valor de cálculo da resistência de um pino, determinada de acordo com as equações do EUROCODE 5 já citadas anteriormente.

Vale lembrar que a distribuição de forças não é uniforme nos pinos, ou seja, cada pino apresenta um valor diferente para as componentes $F_{X,d,i}$ e $F_{Y,d,i}$, o que resulta em diferentes linhas de ação para as forças $F_{R,d}$.

Rigidez das ligações

De acordo com STAMATO⁸ *apud* STAMATO⁹, como as deformações por embutimento na madeira produzem grandes deformações nas ligações, a rigidez da ligação deveria ser considerada no dimensionamento o que, no caso de estruturas hiperestáticas, alteraria os cálculos dos deslocamentos da estrutura e a distribuição de tensões internas.

RACHER¹⁰ afirma que a rigidez rotacional destas ligações pode ser determinada por:

$$K_r = \sum_{j=1}^n K_\alpha \cdot r_j^2 \quad (3)$$

Sendo:

K_α = Rigidez de um pino, com um ângulo α em relação ao eixo global X.

r_j = Raio do j-ésimo pino.

Considerando a ligação feita com somente um tipo de pino, o módulo de deformação K_α pode ser adotado como sendo igual para todos os pinos. Desta forma, pode-se utilizar o módulo de deformação K_{ser} definido pelo EUROCODE 5 e a equação acima pode ser simplificada para:

$$K_{r,ser,d} = K_{ser} \cdot \sum_{j=1}^n r_j^2 \quad (4)$$

Sendo:

K_{ser} = Módulo de deslizamento de um pino, dado por

$$K_{ser} = \frac{\rho_k^{1,5} \cdot d}{20} \quad (5)$$

Sendo:

ρ_k = massa específica da madeira (Kg/m³);

d = diâmetro do pino (mm).

De acordo com o EUROCODE 5, o módulo de deslizamento K_{ser} é empregado na verificação do estado limite de utilização.

Então, para a ligação apresentada na Figura 4, a rigidez rotacional pode ser determinada por:

$$K_{ser,d} = K_{ser} \cdot (n \cdot r^2) \quad (6)$$

Sendo:

K_{ser} = Módulo de deslizamento;

n = número de pinos;

r = raio do círculo formado pela distribuição dos pinos.

Otimização estrutural

Atualmente, a busca por soluções otimizadas tem sido bastante comum na área de engenharia estrutural. Em geral, a otimização de um projeto consiste em reduzir custos e prazos, melhorar a qualidade de um produto ou processo, aumentar a segurança e a confiabilidade estrutural, entre outros.

Para CASTILHO¹¹, a solução de um problema de otimização consiste em encontrar uma solução que identifica um ponto de máximo ou de mínimo de uma função denominada função objetivo.

A existência de uma grande quantidade e variedade de problemas de difícil resolução levou ao desenvolvimento de métodos eficientes para encontrar boas soluções (porém não ótimas) para os problemas de otimização. Estes métodos, nos quais a velocidade de processamento é tão importante como a qualidade da solução obtida, são denominados métodos heurísticos.

De acordo com CUNQUERO¹², um método heurístico pode ser definido como:

”... um procedimento para resolver um problema de otimização bem definido mediante uma aproximação intuitiva, sendo que a estrutura do problema é utilizada de forma inteligente para obter uma boa solução”.

É importante esclarecer que ao contrário dos métodos exatos, que permitem encontrar a solução ótima para o problema, os métodos heurísticos limitam-se a encontrar uma boa solução para o problema, porém não necessariamente a ótima. Entretanto, o tempo empregado por um método exato para encontrar a solução ótima de um problema difícil, é de magnitude tão grande em relação aos métodos heurísticos que, em muitos casos, tornam-se inaplicáveis.

Neste sentido, a utilização de um método heurístico é bastante interessante pelo fato de utilizarem estratégias mais simples e, geralmente, encontrarem uma boa solução para diversos problemas de otimização de um modo razoavelmente rápido e eficiente.

Para CUNQUERO, as principais vantagens dos métodos heurísticos são:

- É aplicável a problemas de natureza tal que não se conhece nenhum método exato de resolução. Ainda que exista um método exato de resolução, o uso computacional deste método é muito elevado;
- O método heurístico é mais flexível do que os métodos exatos permitindo, por exemplo, a incorporação de condições de difícil modelação.

Dentre os vários métodos heurísticos, o que mais tem se destacado na literatura é o método baseado em Algoritmo Genético.

A opção pelo uso do algoritmo genético neste trabalho foi norteadada pela fácil implementação do método e principalmente pelo fato de apresentar resultados bastante confiáveis, além de serem utilizados com relativo sucesso como uma técnica de otimização em várias áreas de pesquisa.

Estrutura dos algoritmos genéticos

De acordo com SALVADOR¹³, os Algoritmos Genéticos são algoritmos de otimização global, baseados nos mecanismos de seleção natural e da genética.

Os Algoritmos Genéticos empregam uma estratégia de busca voltada em direção ao reforço da busca de pontos de “alta aptidão”, ou seja, pontos nos quais a função a ser minimizada (ou maximizada) tem valores relativamente baixos (ou altos).

CHEUNG¹⁴, complementa afirmando que os AG's são métodos de busca estocástica que imitam matematicamente os mecanismos da evolução natural das espécies, compreendendo

processos da genética das populações e da sobrevivência e adaptação dos indivíduos. Os algoritmos genéticos são considerados métodos de busca estocástica, pois, combinam regras probabilísticas e determinísticas tanto nas fases de seleção como nas transformações.

Nos AG's, as variáveis do problema são representadas como genes em um cromossomo, também denominado indivíduo. Cada coordenada de um ponto no espaço solução pode ser entendida como um gene. O indivíduo é o próprio ponto formado pelo conjunto de coordenadas (genes).

CHEUNG¹⁴ explica que os cromossomos tendem a evoluir gradativamente através de sucessivas iterações, produzindo novas gerações de indivíduos mais aptos.

Ainda de acordo com CHEUNG¹⁴, após várias gerações, o algoritmo converge para a solução ótima ou sub-ótima do problema.

Os AG's utilizam elementos como a sobrevivência dos mais aptos e a troca de informação genética de uma forma estruturada, porém, aleatória.

Para SALVADOR, apesar da troca da informação genética ser aleatória, os AG's exploram informações históricas para encontrar novos pontos de busca nos quais são esperados melhores desempenhos. Isto é feito por meio de processos iterativos, nos quais cada iteração é chamada de geração.

A Figura 5 apresenta a estrutura geral dos algoritmos genéticos.

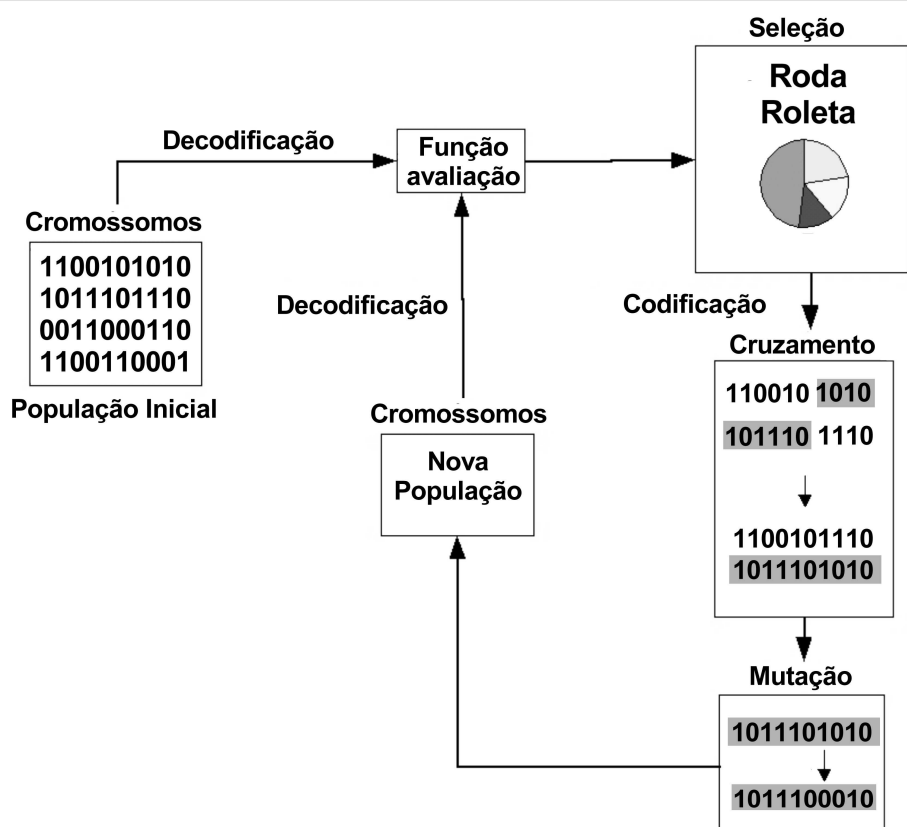


Figura 5. Estrutura geral dos algoritmos genéticos. Fonte: Adaptado de CHEUNG¹⁴

METODOLOGIA

Tipos de ligações consideradas

Para a implementação do programa foram escolhidos dois tipos de ligações comuns em pórticos de madeira laminada colada sendo a união central entre as vigas do pórtico e a ligação entre a viga e o pilar, conforme mostra a Figura 6.

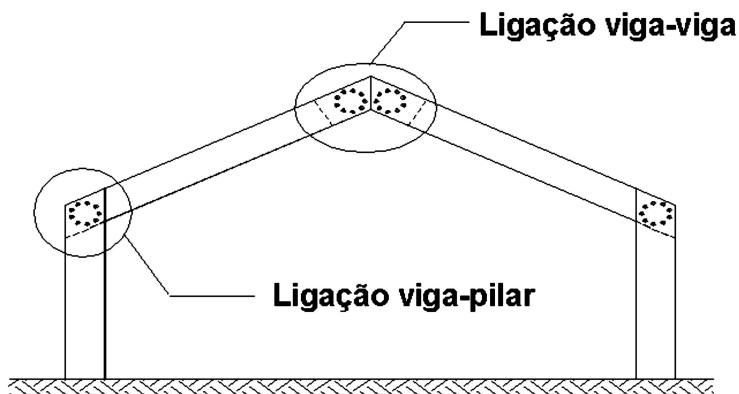


Figura 6. Ligações consideradas no programa

As vigas foram consideradas como peças simples e os pilares como peças duplas. Foi considerada a utilização de uma chapa de aço embutida entre as vigas na ligação central, semelhante à Figura 2a. Desta forma, tanto os parafusos da ligação central como os parafusos da ligação viga-pilar estão em corte duplo.

Cálculo dos esforços atuantes nos pinos

A determinação dos esforços atuantes em cada pino foi feita considerando-se a decomposição dos esforços de cálculo atuantes na ligação (M_d , V_d , N_d) em relação aos eixos globais X e Y. Esta decomposição é mostrada na Figura 7.

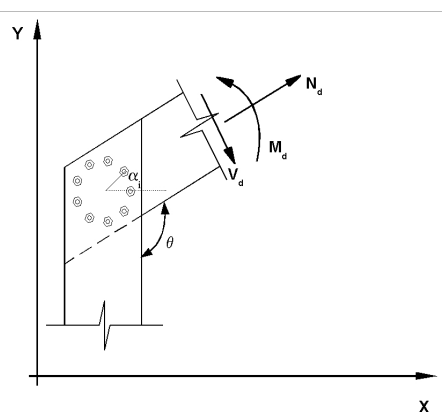


Figura 7. Esforços atuantes nos parafusos

Assim, a componente atuante na direção global X de cada parafuso, é dada por:

$$F_x = N_{d,x} + V_{d,x} + F_{x,Md} \quad (7)$$

E na direção Y por:

$$F_y = N_{d,y} + V_{d,y} + F_{y,Md} \quad (8)$$

O programa calcula a força resultante $F_{R,d}$ das componentes F_x e F_y em cada parafuso da ligação e determina o ângulo ϕ entre esta força e as fibras de cada peça de madeira. Com este ângulo determina-se a resistência ao embutimento nesta direção utilizando-se a equação de Hankinson.

Codificação das variáveis

Optou-se por trabalhar com representação real para as variáveis, portanto, não foi necessário codificar as variáveis do problema.

Variáveis do problema

O problema tem as seguintes variáveis de entrada:

- Propriedades de resistência dos materiais empregados;
- Coeficiente de modificação das propriedades;
- Massas específicas dos materiais;
- Grupo de espécie de madeira empregada;
- Dimensões das peças a serem unidas;
- Esforços atuantes;
- Ângulo entre as barras.

As variáveis resposta são:

Diâmetro dos parafusos: Os diâmetros mínimo e máximo para os parafusos fixados pelo EUROCODE 3 são respectivamente 10mm e 30mm. Desta forma, os valores dos diâmetros foram carregados em um vetor para que a seleção aleatória, sempre respeitasse os valores padronizados pelo EUROCODE 3;

Número de parafusos: O número de parafusos é limitado tanto pelo diâmetro dos mesmos como pela altura da viga. Foi fixado como número mínimo 4 parafusos e como número máximo o maior valor possível respeitando-se o espaçamento mínimo de 6 vezes o diâmetro do pino entre os centros de cada pino;

Raio do círculo: O raio do círculo da ligação tem seu valor limitado pela altura da peça de madeira e pelo diâmetro do parafuso, pois a distância mínima entre o centro do pino e a borda da viga não deve ser inferior a 3 vezes o diâmetro do parafuso. No programa foi fixado como raio mínimo 50mm e como raio máximo, o valor correspondente à metade da altura da viga menos 3 vezes o diâmetro do parafuso.

Restrições do problema

O problema a ser otimizado possui as seguintes restrições:

Ruptura dos elementos de ligação: A ruptura de um parafuso ou da chapa metálica de ligação foi considerada como uma restrição do problema. O programa verifica pino por pino se a resistência de cálculo ao corte do parafuso é maior ou igual à força atuante no parafuso. Verifica também, o rasgamento da chapa e esmagamento da chapa na região do

furo. Se o coeficiente de segurança para um destes modos de ruptura for inferior a 1,0 o programa atribui a função pen_2 o valor 0 (zero).

Ruptura da madeira: A ruptura da madeira também foi tratada como um restrição do problema, sendo matematicamente representada pela função pen_1 . Para a verificação das ligações, foram analisadas as seguintes verificações para o corte duplo: Esmagamento local na madeira; esmagamento da madeira e formação de uma rótula plástica no pino para cada plano de corte; formação de duas rótulas plásticas por plano de corte com esmagamento das peças. Na determinação da resistência de cada modo de ruptura citado foram utilizadas as equações do EUROCODE 5. Da mesma forma, se o coeficiente de segurança para um destes modos de ruptura for inferior a 1,0 o programa atribui a função pen_1 o valor 0 (zero).

Função objetivo

A função a ser otimizada pelo programa é:

$$F_{obj} = K_{ser,d} \cdot pen_1 \cdot pen_2 \quad (9)$$

Sendo:

$K_{ser,d}$: Rigidez rotacional de cálculo;

pen_1 : Função penalidade para a restrição de ruptura na madeira;

pen_2 : Função penalidade para a restrição de ruptura em um pino ou na chapa metálica.

Seleção

Foi adotada a técnica tipo roda roleta para a seleção dos indivíduos mais aptos, na qual os indivíduos foram ordenados em ordem decrescente de aptidão, sendo selecionados aleatoriamente para o cruzamento.

Cruzamento e mutação

Foi adotada a técnica de cruzamento em um ponto.

A mutação pode gerar indivíduos “defeituosos” pois, ao trocar os genes, pode atribuir ao indivíduo um valor para o número de parafusos ou para o raio do círculo fora dos limites permitidos. Para corrigir este problema optou-se por incluir uma estratégia de reparação.

Estratégia de reparação

A estratégia de reparação adotada consiste em verificar se os valores atribuídos, após a mutação, ao número de parafusos e ao raio do círculo violam os limites mínimos e máximos pré-estabelecidos. Se ocorrer a violação, o programa irá fixar o valor da variável no limite mínimo ou máximo, conforme o caso.

Fluxograma do programa

A Figura 8 apresenta o fluxograma do programa de otimização de ligações parafusadas.

Implementação do programa

O programa para otimização da rigidez de ligações parafusadas foi implementado na linguagem C++. O programa foi feito utilizando o software Builder C++, versão 5.0 da Borland.

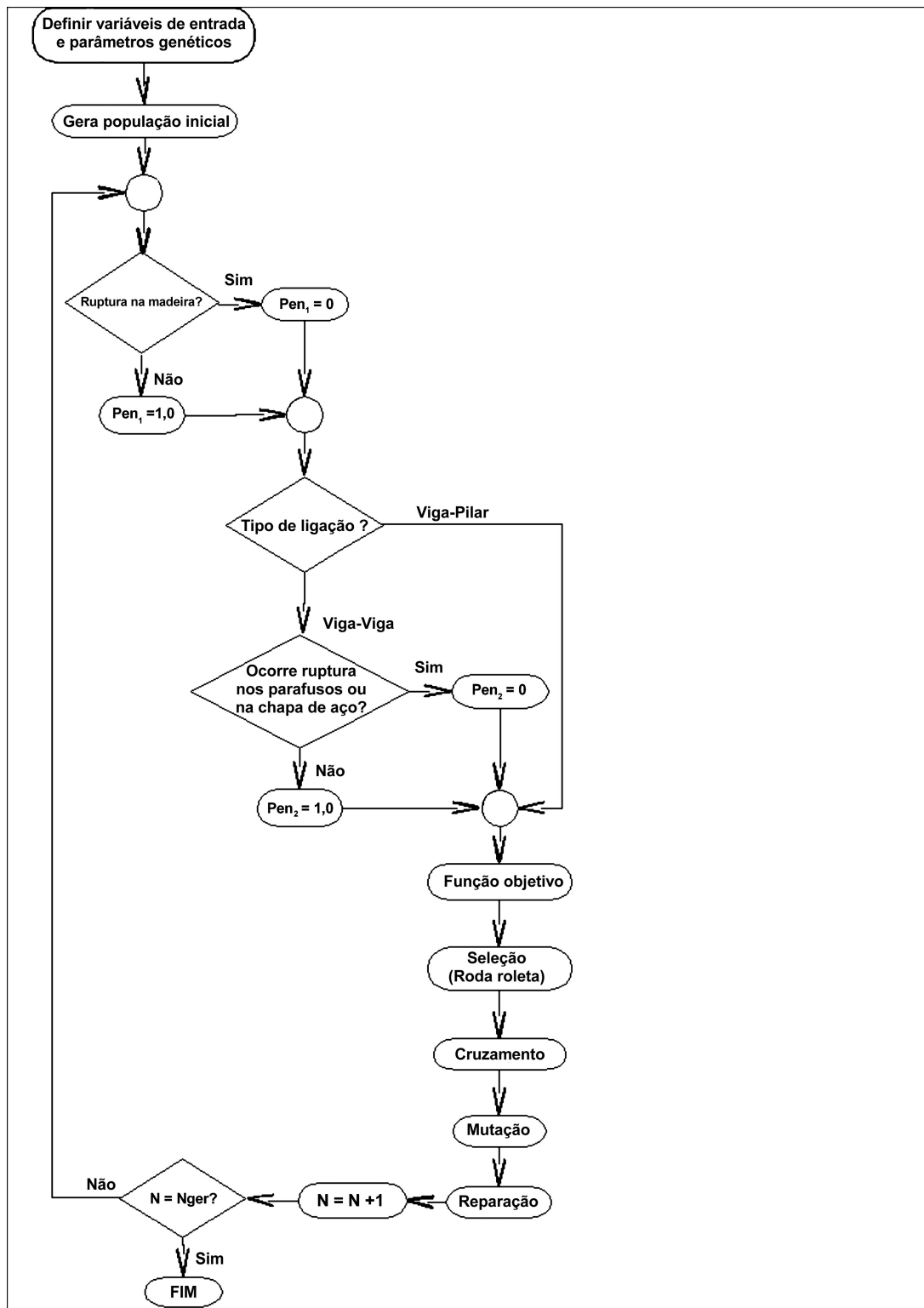


Figura 8. Fluxograma do programa

Simulações

Para avaliar o programa foram feitas seis simulações para cada uma das duas ligações de um pórtico plano em madeira laminada colada com os seguintes esforços:

<i>Ligação</i>	<i>Nd (kN)</i>	<i>Vd (kN)</i>	<i>Md (kN× m)</i>
Viga - Pilar	-20,0	8,0	24,0
Viga - Viga	-11,0	4,0	15,0

Tabela II. Situações de projeto para simulação

Os parâmetros genéticos utilizados nas simulações foram:

- Tamanho da população: 10000 indivíduos;
- Número de gerações: 20
- Taxa de cruzamento: 0,95
- Taxa de mutação: 0,05

As propriedades dos materiais e os coeficientes de segurança usados nas simulações foram:

<i>Ligação viga-pilar</i>				
$t_1=5$ cm	$\gamma_M=1.3$	$\rho_{k1}=600$ (kgf/m ³)	$f_{h,k,1}=30$ (Mpa)	$\theta=110^\circ$
$t_2=10$ cm	$\gamma_S=1.1$	$\rho_{k2}=600$ (kgf/m ³)	$f_{h,k,2}=30$ (MPa)	$h=75$ cm
Grupo de espécie= softwood			$k_{mod}=0.56$	
Classe do parafuso =4.6				
<i>Ligação viga-viga</i>				
$t_1=2.5$ cm	$\gamma_M=1.3$	$\rho_{k1}=7800$ (kgf/m ³)	$f_{u,k,1}=400$ (Mpa)	$\theta=110^\circ$
$t_2=10$ cm	$\gamma_S=1.1$	$\rho_{k2}=600$ (kgf/m ³)	$f_{h,k,2}=30$ (MPa)	$h=75$ cm
Grupo de espécie= softwood			$k_{mod}=0.56$	
Classe do parafuso =4.6				

Disponibilização do programa

O software está disponível para download no site <http://mrcarreira.tripod.com/software.html>.

RESULTADOS

A Tabela III e a Tabela IV apresentam respectivamente os resultados obtidos nas simulações com o algoritmo genético para as ligações viga-viga e viga-pilar.

<i>Simulação</i>	<i>Ligação viga-viga</i>			
	<i>Diâmetro do parafuso (mm)</i>	<i>Número de parafusos</i>	<i>Raio do círculo (mm)</i>	<i>Rigidez (kN·m / Rad)</i>
1	10	30	345	119762,98
2	10	30	345	119762,98
3	10	30	345	119762,98
4	10	30	345	119762,98
5	10	30	345	119762,98
6	10	30	345	119762,98

Tabela III. Simulações para a ligação viga-viga

<i>Simulação</i>	<i>Ligação viga-pilar</i>			
	<i>Diâmetro do parafuso (mm)</i>	<i>Número de parafusos</i>	<i>Raio do círculo (mm)</i>	<i>Rigidez (kN·m / Rad)</i>
<i>1</i>	<i>20</i>	<i>14</i>	<i>315</i>	<i>13610,84</i>
<i>2</i>	<i>18</i>	<i>16</i>	<i>321</i>	<i>14538,12</i>
<i>3</i>	<i>20</i>	<i>14</i>	<i>315</i>	<i>13610,84</i>
<i>4</i>	<i>20</i>	<i>14</i>	<i>315</i>	<i>13610,84</i>
<i>5</i>	<i>22</i>	<i>12</i>	<i>309</i>	<i>12348,85</i>
<i>6</i>	<i>20</i>	<i>14</i>	<i>315</i>	<i>13610,84</i>

Tabela IV. Simulações para a ligação viga-pilar

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise da literatura e os resultados das simulações computacionais permite deduzir que:

As ligações rígidas ao momento fletor comportam-se como um sistema altamente hiperestático no qual são feitas várias simplificações para fins de dimensionamento como a consideração de que o centro de rotação coincide com o centro de gravidade do grupo de pinos.

Os algoritmos genéticos são métodos heurísticos de busca estocástica que imitam os mecanismos de seleção natural e evolução das espécies na busca de uma solução ótima para o problema de otimização.

A simulação para a ligação viga-viga apresentou o mesmo resultado nas seis tentativas. Entretanto, na simulação para a ligação viga-pilar, o algoritmo apresentou uma pequena variação nos resultados, sendo que o melhor resultado foi obtido com 18 parafusos de 16mm e raio do círculo com 321mm, apresentando rigidez de 14538,12 kN·m / Rad.

Observou-se ainda que o melhor resultado obtido na ligação viga-pilar foi aquele que combinou o menor diâmetro de parafuso com a maior quantidade de parafusos e o maior raio possível para o círculo. O resultado é coerente, pois com a redução do diâmetro é possível aumentar o raio do círculo e utilizar uma quantidade maior de parafusos, melhorando assim a distribuição de tensões nas barras e conseqüentemente aumentando a rigidez da ligação.

Por fim, conclui-se que o algoritmo genético é uma poderosa ferramenta para problemas de otimização, pois, otimiza funções não diferenciáveis, encontra o ótimo global, resolve problemas complexos em um tempo muito inferior aos métodos tradicionais de otimização além de ser de fácil implementação computacional.

REFERÊNCIAS

- 1 A. Heaney e P. Kneen, "Timber Structures: An Introduction to Limit States Design Using AS 1720.1", Sidney, (1999).
- 2 F.H. Chaudry, "Planejamento de Recursos Hídricos", Notas de aula, Universidade de São Paulo – EESC, São Carlos, (2001).
- 3 P.B. Cheung, "Curso de Introdução aos Algoritmos Genéticos – Parte 1", Universidade de São Paulo – EESC, São Carlos, (2002).
- 4 Comité Européen de Normalisation, EUROCODE 5 - Desing of Timber Structures, (1996).
- 5 Comité Européen de Normalisation, EUROCODE3: Design of Steel Structures, (2002).

- 6 L.C. Oliveira Santana e N.T. Mascia, “Critérios para o Dimensionamento de Ligações Submetidas a Momento Fletor”, IX Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, Cuiabá, (2004).
- 7 K.W. Johansen, “Theory of timber connections”, *International Association for Bridge and Structural Engineering*, Zurich, Vol. **9**, pp. 249-262, (1949).
- 8 G.C. Stamato, “Ligações em estruturas de madeira compostas por chapas de madeira compensada”, Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, (2002).
- 9 G.C. Stamato, “Resistência ao embutimento da madeira compensada”, Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, (1997).
- 10 P. Racher, “Moment resisting connections”, *Timber Engineering*, STEP 1, C16/1- C16/10, (1995).
- 11 V.C. Castilho, “Otimização de Componentes de Concreto Pré-moldado Protendidos Mediante Algoritmos Genéticos”, Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, (2003).
- 12 R.M. Cunquero, “Algoritmos Heurísticos en Optimización Combinatoria”, Notas de Aula, Universitat de Valencia, Disponível em: www.uv.es/~marti/docencia/doctorado, Acessado em (31/10/2005).
- 13 O. Salvador, “Introdução aos algoritmos genéticos”, Universidade Católica de Pelotas, Pelotas, (2005).
- 14 P.B. Cheung, “Curso de Introdução aos Algoritmos Genéticos – Parte 2”, Universidade de São Paulo – EESC, São Carlos, (2002).