

OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE PÓRTICOS PLANOS CONSIDERANDO OS EFEITOS CAUSADOS PELAS LIGAÇÕES SEMIRRÍGIDAS

Marcos Henrique Bossardi Borges, henrique.borges@farroupilha.ifrs.edu.br¹

Bruno Vettorazzi, bruno.vettorazzi@farroupilha.ifrs.edu.br¹

Adelano Esposito, adelano.esposito@farroupilha.ifrs.edu.br¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul - Campus Farroupilha, Av. São Vicente, 785, Farroupilha-RS

Resumo: Nos últimos anos, agências reguladoras internacionais vêm apresentando novas abordagens quanto ao comportamento das ligações em estruturas metálicas, a fim de reproduzir fielmente os efeitos causados por estas ligações na resistência mecânica da estrutura. Aliado a isto, a forte competição industrial demanda por projetos cada vez mais otimizados, próximos ao limite de resistência de seus componentes. Neste contexto, o projeto ótimo de estruturas metálicas torna-se uma tarefa complexa, exigindo formulações numéricas que possam considerar o comportamento real destes sistemas, as quais considerem as rigidezes presentes nas ligações e sua influência nas variáveis do projeto. Sendo assim, o presente trabalho visa a implementação de um algoritmo de otimização estrutural, o qual considera a influência das ligações semirrígidas na análise de pórticos planos. Para tal, um algoritmo de otimização metaheurística será acoplado a um modelo numérico de elementos finitos capaz de considerar diferentes níveis de semirrigidez para as ligações, refletindo em uma modelagem mais realista. Com base nos exemplos analisados, os resultados obtidos neste trabalho demonstram a forte influência que a semirrigidez causa ao comportamento mecânico das estruturas analisadas, replicando ao problema de otimização, o qual resultou em soluções ótimas, notavelmente distintas.

Palavras-chave: análise estrutural, ligações semirrígidas, algoritmo metaheurístico, otimização estrutural.

1. INTRODUÇÃO

Tradicionalmente, o projeto de estruturas de pórticos traz a hipótese de que as conexões possuem comportamento idealmente rígido. Em contrapartida, agências europeias e norte-americanas, junto a comunidade acadêmica, apresentaram nas últimas décadas estudos (Bjorhovde *et al.* (1996); Carter *et al.* (2016); Topping and Bittnar (2002) e Baniotopoulos and Wald (2000)) que verificaram a abordagem semirrígida como sendo uma alternativa mais pertinente para a modelagem das ligações. Simões (1996) afirmou que em se tratando a conexão como semirrígida uma avaliação mais confiável do comportamento da estrutura é obtida, proporcionando economia adicional aos resultados do projeto.

Frente ao aumento na utilização desses sistemas estruturais, cresce o interesse por modelos numéricos mais adequados ao comportamento de tais sistemas. Ramires (2010) defende que é cada vez maior a necessidade do uso de recursos computacionais como importante ferramenta na engenharia, não servindo para substituir a experiência do engenheiro, mas sim como complemento para a execução de tarefas repetitivas e dispendiosas, possibilitando que várias alternativas estruturais sejam testadas de forma a minimizar os custos da estrutura.

Apesar dos constantes avanços na área de otimização estrutural envolvendo pórticos e treliças, a complexidade numérica envolvida potencializa o desenvolvimento de novas contribuições para a área, visto que no Brasil o tema só começou a receber atenção nos últimos anos, e mesmo assim, com ênfase voltada para as ligações em si, e não para a influência que estas podem exercer sobre a estrutura (dos Santos, 1998).

Sendo assim, propõe-se neste trabalho a implementação de um algoritmo de otimização por enxame de partículas (PSO, do inglês *Particle Swarm Optimization*) aliado ao algoritmo de análise estrutural de pórticos planos tendo em consideração a semirrigidez das ligações, a fim de verificar a influência da combinação de perfis de viga e coluna no dimensionamento da estrutura, e ao mesmo tempo, dos valores de rigidez na variação dos deslocamentos e rotação das extremidades, determinantes nos valores de cargas críticas na análise, proporcionando resultados ótimos condizentes.

Neste documento, apresentam-se em diferentes seções o procedimento computacional, os resultados e discussão das aplicações deste estudo e, por fim, as conclusões obtidas. O procedimento computacional subdivide-se entre as formulações utilizadas para a análise de pórticos planos com influência das ligações semirrígidas seguido pela otimização estrutural, onde se discorre da implementação do algoritmo PSO, enquanto que na seção de resultados e discussão mostra-se a aplicação do algoritmo de análise em exemplos conhecidos da literatura, com a finalidade de validar o modelo de

elementos finitos, como também, verificação dos perfis ótimos encontrados para uma estrutura, comparando-se as ligações rígidas e semirrígidas e a discussão da consequência dessas nos valores encontrados. Por fim, a conclusão traz as considerações com base no estudo realizado.

2. ANÁLISE DE PÓRTICOS PLANOS E RIGIDEZ DE LIGAÇÃO

Para a análise estrutural, o método utilizado consiste no cálculo da rigidez da estrutura, comumente utilizado na literatura (e.g. Higaki, 2014; Przemieniecki, 1968; Soares *et al.*, 2004), sendo determinada pela relação entre os nós que unem os elementos de viga e coluna, apresentada na Eq. (1):

$$\{F\} = [K] \{d\} \quad (1)$$

onde as forças aplicadas, F , e deslocamentos resultantes, d , são relacionados à matriz de rigidez global da estrutura, K , a qual é montada a partir da superposição das matrizes de rigidez K_r dos i elementos.

Conforme apresentado por Kermani (1996), a matriz de rigidez elástica de um elemento i de pórtico plano, com as ligações rígidas pela abordagem tradicional, contém termos que são funções das translações e rotações no sistema de coordenadas local, dada pela Eq. (2).

$$[K_{ri}] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \quad \text{simetria} \quad (2)$$

onde E corresponde ao módulo de elasticidade do material, L ao comprimento, A à área da seção transversal e I ao momento de inércia de área do elemento.

De acordo com Xu (2001), a implementação da semirrigidez na análise se dá por meio da modelagem de cada conexão de viga-coluna como uma mola rotacional de comprimento zero. As flexibilidades de conexão são modeladas a partir da rigidez rotacional S_1 e S_2 de cada mola nas extremidades da viga. Simões (1996) afirma que a vantagem dessa abordagem é de que o procedimento em geral é o mesmo do método convencional da matriz de rigidez baseada nos deslocamentos comumente adotado para ligações rígidas, por não introduzir quaisquer elementos lineares extras ao sistema. Xu (2001) propõe que para refletir a rigidez relativa do elemento de viga-coluna e a mola rotacional nas extremidades de ligação, aplica-se, conforme Simões (1996), o “fator de fixidez” definido na Eq. (3).

$$\alpha_j = \frac{\phi_1}{\phi_2} = \frac{1}{1 + \frac{3EI}{S_j L}}, j = 1, 2 \quad (3)$$

sendo S_j a rigidez rotacional da extremidade de conexão e EI/L , a rigidez flexural do elemento de viga-coluna adjacente (Monforton, 1962). Segundo Xu (2001) *apud* Cunningham (1990), o fator de fixidez α_j define a rigidez de cada conexão de extremidade relativa ao elemento adjunto e pode ser interpretado como a razão entre a rotação final ϕ_1 da viga com a rotação combinada ϕ_2 do elemento e da ligação devido a uma unidade de momento último, conforme mostrado na Fig. 1.

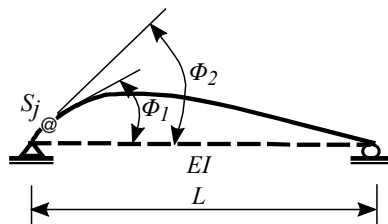


Figura 1: Relação entre rigidez de conexão e fator de fixidez.

Fonte: Xu (2001)

Os valores de α_j , de acordo com Kermani (1996), dependem do conhecimento prévio da rigidez rotacional dos respectivos nós nas extremidades do elemento e de suas propriedades geométricas e elásticas. Xu (2001) sentencia que podem reproduzir o comportamento de todo tipo de ligação, admitindo-se como flexíveis as ligações que possuem rigidez rotacional zero (fazendo $\alpha_j = 0$), e como idealmente rígidas aquelas com rigidez rotacional infinita (com $\alpha_j = 1$). Dessa forma, uma ligação semirrígida possui um fator de fixidez dentro do intervalo zero e um ($0 < \alpha_j < 1$).

É válido afirmar então, visto que as curvas verdadeiras que relacionam cada tipo de restrição flexível tem de ser determinada experimentalmente ou com método preditivo (Bodig *et al.*, 1991 *apud* Monforton e Wu, 1963), o dimensionamento adequado da rigidez de ligação em pórticos planos torna-se significativamente complexo, necessitando ferramentas numéricas que atendam as normas reguladoras e proporcionem uma modelagem fiel ao comportamento real da estrutura.

Para a análise considerando a semirrigidez das ligações, a matriz de rigidez elástica de um elemento i com duas conexões semirrígidas que possuam rigidez rotacional S_1 e S_2 , pode ser representada pela matriz de rigidez do elemento

com ligações rígidas, mostrada na Eq. (2), modificada por uma matriz de correção semirrígida K_{ci} (apresentada por Xu, 2001, analogamente àquelas de Monforton, 1962 e Csébfalvi, 2007) determinada na Eq. (4), que segue.

$$[K_{ci}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{4\alpha_2 - 2\alpha_1 + \alpha_1\alpha_2}{4 - \alpha_1\alpha_2} & \frac{-2L\alpha_1(1 - \alpha_2)}{(4 - \alpha_1\alpha_2)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{6(\alpha_1 - \alpha_2)}{L(4 - \alpha_1\alpha_2)} & \frac{3\alpha_1(2 - \alpha_2)}{4 - \alpha_1\alpha_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{4\alpha_1 - 2\alpha_2 + \alpha_1\alpha_2}{4 - \alpha_1\alpha_2} & \frac{2L\alpha_2(1 - \alpha_1)}{4 - \alpha_1\alpha_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{6(\alpha_1 - \alpha_2)}{L(4 - \alpha_1\alpha_2)} & \frac{3\alpha_2(2 - \alpha_1)}{4 - \alpha_1\alpha_2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Portanto, a matriz de rigidez do elemento i considerando as ligações semirrígidas, K_i^{SR} , é dada pelo produto da matriz K_{ri} do elemento com ligações rígidas e da matriz de correção requerida, K_{ci} . Conhecendo-se a matriz de rigidez do elemento de viga-coluna da Eq. (4) para valores específicos de fatores de fixidez que reflitam a rigidez das conexões, a análise de pórticos planos com ligações semirrígidas pode prosseguir diretamente utilizando-se o método de deslocamentos tradicional (Xu, 2001).

3. OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL

A otimização estrutural, de acordo com da Silva (2011), tem como objetivo encontrar os valores ótimos (de acordo com os objetivos) para as variáveis do projeto que atendam a todas as restrições impostas, ou seja, maximizar ou minimizar a função objetivo relacionada ao problema em questão. Para tal, segundo Arora (2004) e Haftka and Gürdal (1991), um problema de otimização com restrição pode ser definido pela Eq. (5) como sendo:

Encontrar um vetor de n -variáveis de projeto $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ que minimize uma função de custo

$$f(\mathbf{x}) = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (5a)$$

sujeito às n_g restrições de desigualdades

$$g_i(\mathbf{x}) = g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0; \quad i = 1, \dots, n_g \quad (5b)$$

e às n_e restrições de igualdade

$$h_j(\mathbf{x}) = h_j(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0; \quad j = 1, \dots, n_e \quad (5c)$$

onde cada variável de projeto x_n deve estar dentro do intervalo limitado pelas restrições laterais $x_n^{min} \leq x_n \leq x_n^{max}$. Uma vez que no presente trabalho a $f(\mathbf{x})$ está relacionada à massa da estrutura, o valor ótimo desta função corresponde a menor massa possível para a construção da mesma. Os valores do vetor $\mathbf{x}$, como resultado do processo de otimização, representam o conjunto de variáveis ótimas do projeto.

Este problema tem sido abordado frequentemente pelos métodos de otimização determinísticos, os quais utilizando o gradiente da função objetivo, possuem informação suficiente para encontrar rapidamente a solução ótima do problema. Entretanto, para funções não lineares, a existência de mínimos locais pode prejudicar a convergência destes métodos, ao passo que em se tratando de funções suaves e contínuas, o métodos determinísticos são uma alternativa bastante atraente. Segundo Gomes and Esposito (2013) em problemas de minimização da massa de treliças, com a alteração nos modos de frequência devido a modificação na forma da estrutura, surgem mínimos locais à função objetivo do problema de otimização, o que impõem dificuldades extras aos métodos determinísticos. Além destes, os métodos heurísticos vem sendo extensivamente explorados na literatura devido a uma série de características que potencializam sua aplicação para problemas complexos de análise estrutural, passíveis da existência de múltiplos mínimos locais. Uma destas características importantes baseia-se no fato destes métodos não demandarem o uso do gradiente da função, mas sim da avaliação numérica (via análise estrutural) da função objetivo. Isso é extremamente relevante ao lidar com problemas de otimização não linear com várias restrições. Assim, é apresentada uma breve contextualização do algoritmo Metaheurístico de Otimização por Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization* - PSO), destacando suas principais características.

3.1 Algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas (PSO)

O algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas (PSO) foi inicialmente proposto por Eberhart and Kennedy (1995), como sendo uma técnica inspirada no comportamento social de bandos de pássaros. A busca por alimento e a interação entre os pássaros ao longo do voo são modeladas como um mecanismo de otimização. Fazendo uma analogia, o termo partícula foi adotado para simbolizar os pássaros, representando as possíveis soluções do problema a ser resolvido. A topologia ou região percorrida pelos pássaros equivale ao espaço de busca e, encontrar o local com comida corresponde a solução ótima do problema. Basicamente, durante o processo evolutivo do algoritmo, dois parâmetros guiam a direção de procura das partículas: a posição atual da partícula e sua velocidade, ambas atualizadas iterativamente a fim de conduzir

o enxame à solução ótima do problema. Para tal, o algoritmo é iniciado randomicamente e, nas iterações posteriores, as posições e velocidades são atualizadas pelas Eqs. (6a) e (6b) (Shi and Eberhart, 1998). Segundo (Clerc, 1999) o parâmetro χ da Eq. (6c) é utilizado para evitar um comportamento divergente do algoritmo.

$$v_{i,j}(t+1) = \chi [\omega v_{i,j}(t) + c_1 r_1 (x_{lbest_{i,j}}(t) - x_{i,j}(t)) + c_2 r_2 (x_{gbest_j}(t) - x_{i,j}(t))] \quad (6a)$$

$$x_{i,j}(t+1) = x_{i,j}(t) + v_{i,j}(t+1) \quad (6b)$$

$$\chi = \frac{1.6}{\left| 2 - (c_1 + c_2) - \sqrt{(c_1 + c_2)^2 - 4(c_1 + c_2)} \right|} \quad (6c)$$

onde ω é o peso de inércia para as velocidades, $x_{i,j}(t)$ é o valor atual da variável de projeto j da partícula i , $v_{i,j}(t+1)$ é a velocidade atualizada da variável de projeto j da partícula i , $x_{lbest_{i,j}}(t)$ é a variável de projeto ótima j encontrada até agora pela partícula i , $x_{gbest_j}(t)$ é a variável de projeto ótima j encontrada até agora pelo enxame, r_1 e r_2 são dois vetores contendo números aleatórios com distribuição uniforme no intervalo $[0,1]$, c_1 é uma componente cognitiva da partícula e c_2 é uma componente social do enxame, elas são constantes que influenciam a direção das partículas de modo a guiá-las para melhores posições.

Na etapa final do código, é implementado o critério de convergência do algoritmo, o qual consiste em satisfazer duas condições simultaneamente. Uma delas pode ser definida como a razão entre o desvio padrão e o valor médio das funções de todas as partículas, a qual deve ser menor ou igual a uma tolerância especificada (tol_{cov}). A outra condição, tolerância pelo fator de penalização (tol_{FP}), consiste em estabelecer uma tolerância para a violação das restrições, a qual não comprometa a validação da solução. Atendendo as duas condições, o processo é finalizado, do contrário, o algoritmo volta a iterar a partir dos últimos resultados obtidos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, inicialmente, apresentam-se dois exemplos de estruturas conhecidas com resultados numéricos disponíveis na literatura, a fim de validar os resultados obtidos com o modelo de elementos finitos usado na análise numérica. Em seguida, é realizada a análise estrutural de um pórtico plano, a fim de avaliar os efeitos das ligações no comportamento da estrutura. Posteriormente, o mesmo problema é aplicado ao algoritmo de otimização, com o propósito de investigar a projeção dos efeitos da análise estrutural ao problema de otimização.

4.1 Análise Estrutural

O primeiro problema abordado consiste na solução linear elástica do pórtico de vinte andares e dois vãos (Fig. 2a), proposto por Soares *et al.* (2004), considerando os fatores de fixidez $\alpha_j = 1$ e $\alpha_j = 0,5$ para ligações rígidas e semirrígidas, respectivamente. O material utilizado é o aço ASTM A36 com módulo de elasticidade $E = 210 GPa$. A Tab. 1 traz as características dos perfis metálicos para vigas e colunas.

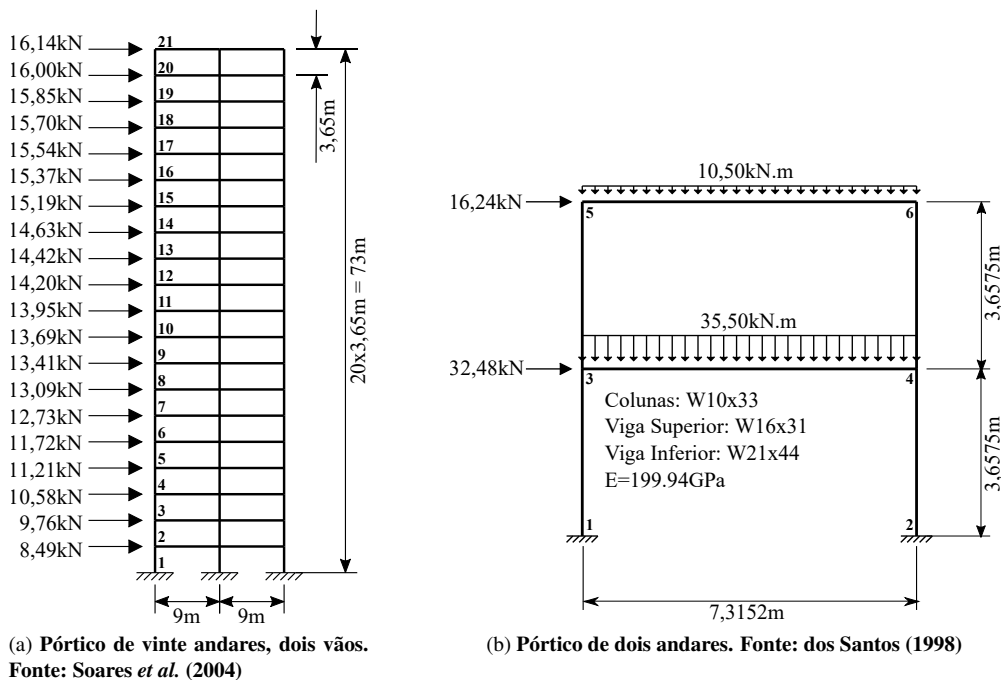


Figura 2: Pórticos planos.

Tabela 1: Dados dos perfis utilizados no pórtico de vinte andares, dois vãos.

Elemento	Área (m^2)	Momento de Inércia de Área (m^4)
Colunas (1º a 4º andares)	0,08650	0,00300520
Colunas (5º a 8º andares)	0,06520	0,00204370
Colunas (9º a 14º andares)	0,05010	0,00146930
Colunas (15º a 20º andares)	0,04010	0,00111134
Vigas (todas)	0,01826	0,00087410

Os resultados em termos de deslocamento lateral do nó 21, apresentados na Tab. 2, aproximam-se aos encontrados por Soares *et al.* (2004). A ligeira discrepância, segundo Dhillon and O'Malley (1999), pode ser justificada pelas diferentes formulações utilizadas na aplicação dos modelos corrigidos de ligações semirrígidas.

Tabela 2: Deslocamentos horizontais do nó 21 para o pórtico de vinte andares, dois vãos.

	Tipo de ligação	Deslocamento (m)
Soares <i>et al.</i> (2004)	rígida ($\alpha_j = 1$)	0,11969
	semirrígida ($\alpha_j = 0,5$)	0,256043
Presente Trabalho	rígida ($\alpha_j = 1$)	0,09386
	semirrígida ($\alpha_j = 0,5$)	0,261859

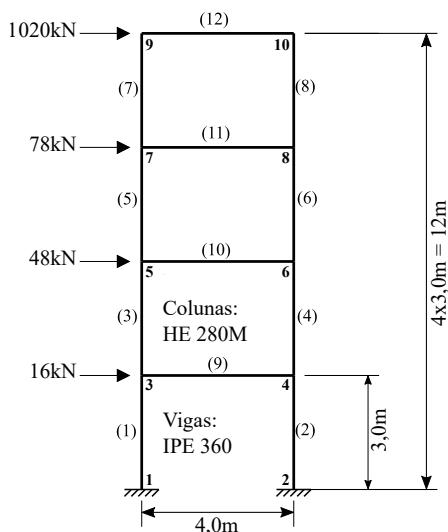
O segundo problema investigado neste trabalho consiste no pórtico apresentado na Fig. 2b, o qual foi analisado por Chen and Toma (1994), em teoria de 2ª ordem, e dos Santos (1998). Para efeito de comparação dos resultados, a referida estrutura foi analisada considerando as ligações como rígidas e semirrígidas em análise linear elástica. As respectivas comparações são apresentadas na Tab. 3 quanto aos deslocamentos horizontais do nó 5 e rotação da ligação 3.

Tabela 3: Deslocamentos horizontais e rotações do pórtico de dois andares.

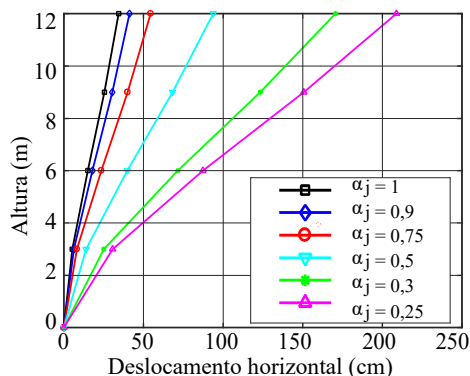
	Tipo de ligação	Desloc. horiz. do nó 5 (cm)	Rotação do nó 3 (rad)
dos Santos (1998)	rígida ($\alpha_j = 1$)	1,42	0,003984
	semirrígida (α_j não apres.)	3,33	0,006032
Presente Trabalho	rígida ($\alpha_j = 1$)	1,46	0,004174
	semirrígida ($\alpha_j = 0,6$)	3,35	0,007948

Analisando a Tab. 3 observa-se uma pequena divergência entre os resultados encontrados pelo autor referenciado com aqueles obtidos neste trabalho. Esta variação pode ser atribuída aos diferentes métodos utilizados na determinação dos valores de rigidez de ligação.

Com o propósito de investigar a influência que diferentes fatores de fixidez provocam ao comportamento das estruturas quanto aos deslocamentos laterais, o último problema abordado na verificação dos programas responsáveis pela análise estrutural foi o pórtico de quatro andares. Considerou-se que a estrutura seja fabricada em aço estrutural ASTM A36, com módulo de elasticidade $E = 210GPa$ e tensão de escoamento igual a $250MPa$. Demais informações a cerca dos carregamentos, perfis e dimensões podem ser obtidas na Fig. 3a.



(a) Pórtico de quatro andares.



(b) Deflexão lateral do pórtico de quatro andares.

Figura 3: Pórtico plano de quatro andares.

O gráfico da Fig. 3b apresenta os deslocamentos horizontais de cada pavimento da estrutura para diferentes fatores de fixidez, denunciando sua influência na deflexão lateral do pórtico.

A grande diferença entre os deslocamentos observados na Fig. 3b para os vários fatores de fixidez reflete a necessidade em se considerar a influência das ligações na correta previsão do comportamento destes sistemas estruturais, visto que um fator igual a 0,9, por mais que ainda represente uma conexão bastante rígida, já apresenta divergências aos obtidos com a rigidez tradicional (perfeitamente rígida). Os menores fatores de fixidez, provenientes da maior flexibilidade das ligações, repercutem diretamente na estabilidade estrutural, majorando significativamente os deslocamentos horizontais. É notável como os andares superiores são afetados de maneira ainda mais expressiva, como consequências ao acúmulo destes efeitos presentes nas ligações semirrígidas entre viga e coluna.

4.2 Otimização Estrutural: Análise da Função Objetivo do Problema de Otimização

Apurando os efeitos das ligações rígidas e semirrígidas à solução do problema de otimização, realizou-se, primeiramente, uma análise da função objetivo para a estrutura plana de quatro andares, apresentada na Fig. 3a. Para tal, considerou-se o seguinte problema de otimização: encontrar as áreas ótimas para a seção transversal das vigas e colunas $A = (A_{vigas}, A_{colunas})$, dentro dos limites máximos e mínimos das restrições laterais (A_{min}, A_{max}), que minimizem a massa total da estrutura, respeitando as restrições em termos de tensão de escoamento ($\sigma_y = 250 MPa$) e tensão crítica de Euler (σ_e), conforme formulação clássica do problema de otimização apresentado na Eq. (7).

$$\begin{aligned} \text{Função Objetivo : } M &= \sum_{i=1}^2 \rho A_i L_i \\ \text{Restrições : } |\sigma| &\leq \sigma_y \\ |\sigma| &\leq \sigma_e \\ A_{min} &\leq A \leq A_{max} \end{aligned} \quad (7)$$

onde M é a massa total da estrutura, ρ é a massa específica, A é a área da seção transversal e L o comprimento do elemento i ; a tensão crítica de Euler é definida pela Eq. (8).

$$\sigma_e = \frac{\pi^2 EI}{AL^2} \quad (8)$$

Tal como observado na Fig. 3b, as diferentes rigidezes provocam alterações no comportamento da estrutura em termos do deslocamento lateral, sendo assim, com o propósito de avaliar a influência destes efeitos na função objetivo, as Figs. 4 e 5 apresentam os domínios de segurança e de falha para o problema de otimização apresentado na Eq. (7), o qual considera como parâmetros para a rigidez das ligações na análise estrutural, fatores de fixidez iguais a 1 para ligações rígidas e 0,5 para ligações semirrígidas, respectivamente.

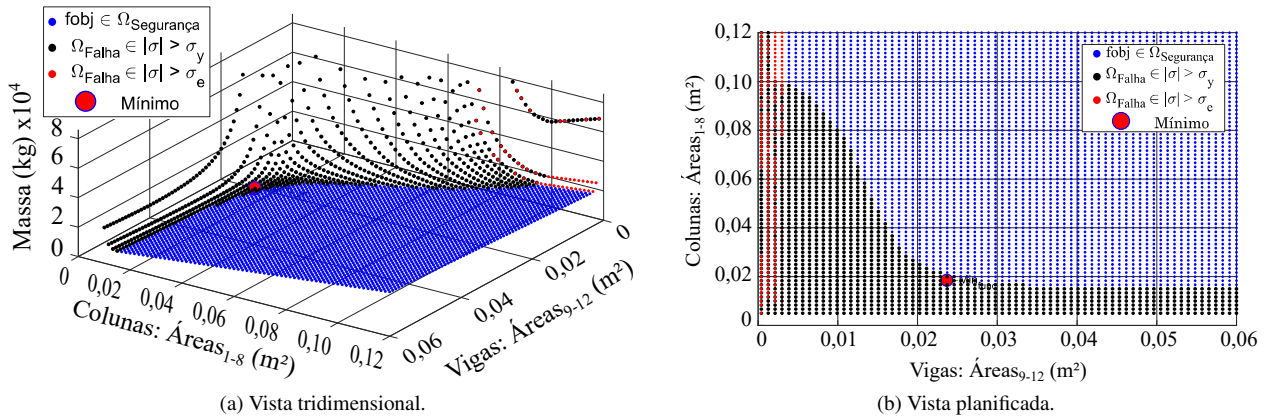


Figura 4: **Função objetivo considerando ligações perfeitamente rígidas** ($\alpha_j = 1$).

Nas Figs. 4 e 5, observa-se que a função objetivo, tanto sob considerações de rigidez ou semirrígidez, apresenta uma superfície contínua e suave, o que facilita a identificação do mínimo da função. Em se tratando do domínio de falha, nota-se na Fig. 4b e Fig. 5b, que a restrição de tensão de escoamento envolve toda a fronteira localizada nas proximidades do mínimo, demonstrando que a restrição de flambagem, cujo domínio encontra-se distante da região de segurança, não afeta a solução ótima deste problema.

Salientando ainda mais os efeitos causados pelas ligações na função objetivo, a Fig. 6 apresenta a superposição de ambas as funções objetivos, a fim de destacar a flutuação causada pela rigidez e semirrígidez na função objetivo e, consequentemente, à solução ótima do problema.

Figura 6 apresenta claramente os efeitos replicados pela análise estrutural, apresentados na Fig. 3b, à função objetivo do problema de otimização, ou seja, sob considerações das ligações perfeitamente rígidas, a melhor combinação para as áreas das vigas e colunas resultará na massa total da estrutural igual a 6901,33 kg. Já no caso das ligações semirrígidas, conforme previsto na análise estrutural apresentada na Fig. 3b, a combinação das variáveis de projeto corresponde a uma estrutura mais robusta, com massa igual a 11024,74 kg.

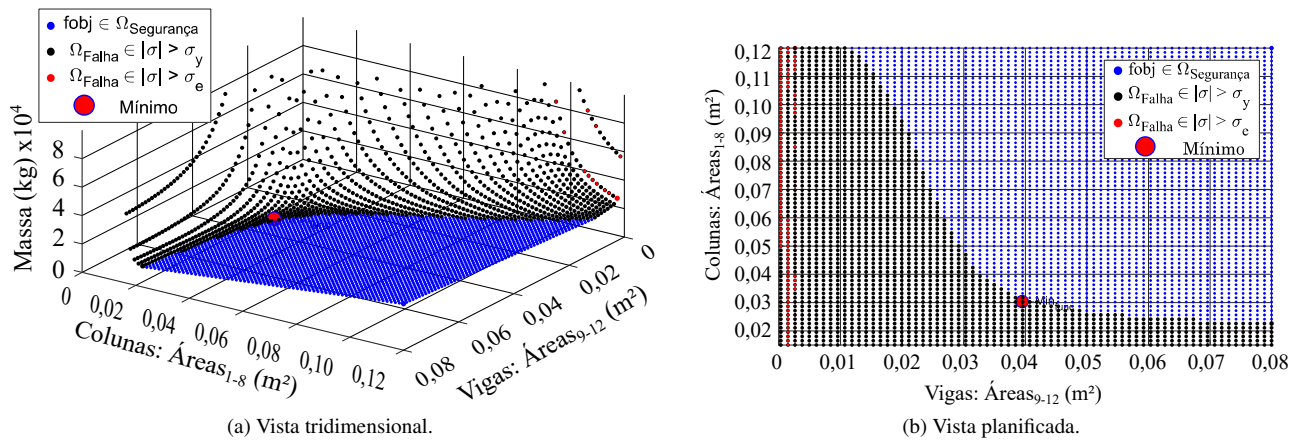


Figura 5: Função objetivo considerando ligações semirrígidas ($\alpha_j = 0,5$).

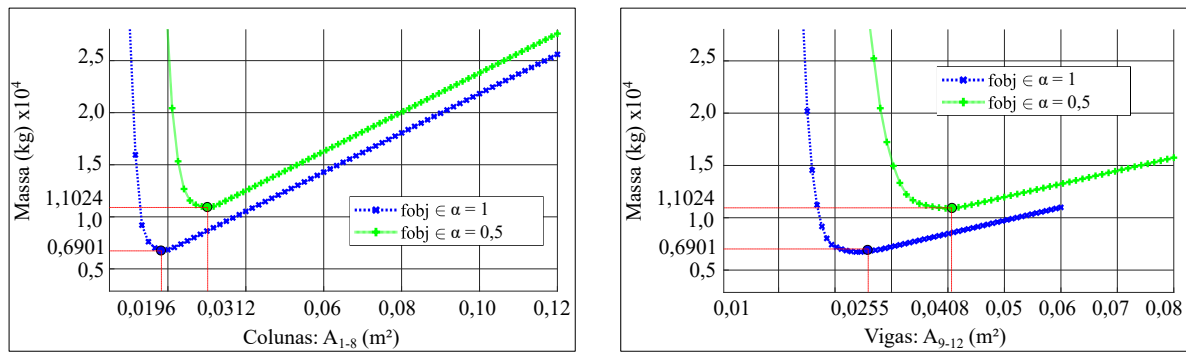


Figura 6: Sobreposição das funções objetivo para os diferentes valores de áreas das (a) colunas e (b) vigas.

Após realizar a análise da função objetivo, realizou-se a otimização do pórtico plano de quatro andares, utilizando o algoritmo de otimização por enxame de partículas. Para tal, foi mantida a mesma formulação do problema de otimização apresentada na Eq. (7), com exceção às variáveis de projeto, as quais passaram de duas para doze. Os parâmetros de calibração do PSO foram: inércia da partícula igual a 0,7; constante cognitiva social e individual iguais a 2,03; número de partículas correspondente a 35. Tabela 4 apresenta os resultados obtidos com a referida otimização, na qual podem ser observadas as diferenças entre as soluções ótimas da otimização considerando ligações rígidas e semirrígidas.

Tabela 4: Resultados da otimização do pórtico de quatro andares.

Elementos Estruturais	Áreas $\times 10^{-2} (m^2)$	
	Ligações Rígidas	Ligações Semirrígidas
1	2,2210	8,9556
2	0,7478	0,6583
3	1,8754	5,7148
4	2,2205	0,5532
5	2,2442	3,0844
6	1,0496	2,8852
7	1,4841	2,5938
8	1,7950	3,3294
9	2,4972	0,100
10	2,5843	3,7473
11	2,8108	4,8176
12	1,3820	2,1418
Massa (kg)	6126,32	9938,22

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados apresentados neste trabalho demonstram características relevantes quanto ao comportamento dos sistemas estruturais abordados. Pôde-se observar que a rigidez e semirrigidez das ligações afetam significativamente a deflexão da estrutura, tal que, quanto menor o fator de fixidez, maior a deflexão lateral da estrutura analisada. Além disso, observou-se que este comportamento foi replicado à função objetivo do problema de otimização, resultando num aumento expressivo da massa estrutural, sob consideração de fixidez igual a 0,5, quando comparado ao sistema considerando ligações perfeitamente rígidas. Tais resultados potencializam as análises realizadas neste trabalho em vista à melhor representação numérica do comportamento real destes sistemas estruturais.

6. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pelo Fomento Interno do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, regido pelo edital PROPPI N° 013/2016 – FOMENTO INTERNO 2017/2018, para o desenvolvimento das atividades de Bolsa de Iniciação Científica e/ou Tecnológica no Ensino Superior (BICTES).

7. REFERÊNCIAS

- Arora, J.S., 2004. *Introduction to Optimum Design*. Elsevier Academic Press, 2nd edition.
- Baniotopoulos, C.C. and Wald, F., eds., 2000. *Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on the Paramount Role of Joints into the Reliable Response of Structures*. Springer Science, Ouranopolis, Grécia. From the Classic Pinned and Rigid Joints to the Notion of Semi-rigidity.
- Bjorhovde, R., Colson, A. and Zandonini, R., eds., 1996. *Proceedings of the Third International Workshop on Connections in Steel Structures III*. Elsevier Science, Trento, ITA.
- Bodig, J., Pellicane, P.J. and Mutuku, R.N., 1991. "Nonlinear superposition model for the behavior of bolted joints". *Wood Science and Technology*, Vol. 25, pp. 33–45.
- Carter, C., Hajjar, J. and Bjorhovde, R., eds., 2016. *Proceedings of the Eighth International Workshop Connections in Steel Structures VIII*. American Institute of Steel Construction, Boston, EUA.
- Chen, W.F. and Toma, S., eds., 1994. *Advanced analysis of steel frames: theory, software and applications*. CRC Press.
- Clerc, M., 1999. "The swarm and the queen: Towards a deterministic and adaptive particle swarm optimization". *International Conference on Evolutionary Computation*, Vol. 3, pp. 1951 – 1957.
- Csébfalvi, A., 2007. "Optimal design of frame structures with semi-rigid joints". *Periodica Polytechnica*, Vol. 51, No. 1, pp. 9 – 15.
- da Silva, M.M., 2011. *Otimização de Estruturas Reticuladas Incluindo Não-linearidade Geométrica*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora.
- Dhillon, B.S. and O'Malley, III, J.W., 1999. "Interactive design of semirigid steel frames". *Journal of Structural Engineering*, Vol. 125, No. 5.
- dos Santos, L.B., 1998. *Influência da Rigidez das Ligações em Estruturas de Aço*. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Eberhart, R. and Kennedy, J., 1995. "A new optimizer using particle swarm theory". *Micro Machine and Human Science*, pp. 39 – 43.
- Gomes, H.M. and Esposito, A., 2013. *A Parallelised Firefly Algorithm for Structural Size and Shape Optimisation with Multimodal Constraints*. *Studies in Computational Intelligence*, Vol. 516. Yang X.S. (eds) Cuckoo Search and Firefly Algorithm.
- Haftka, R.T. and Gürdal, Z., 1991. *Element of Structural Optimization*, Vol. 11. Kluwer Academic Publishers, 3rd edition.
- Higaki, B.E., 2014. *Contribuição à Análise Estrutural de Edifícios de Aço com Ênfase nas Ligações Semi-Rígidas*. Tese de doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Kermani, A., 1996. "A study of semi-rigid and nonlinear behaviour of nailed joints in timber portal frames". *Journal of Forest Engineering*, Vol. 7, No. 2, pp. 17–33.
- Monforton, G.R., 1962. *Matrix Analysis of Frames with Semi-rigid Connections*. Master's thesis, Assumption University of Windsor, Windsor, Canadá.
- Przemieniecki, J.S., 1968. *Theory of Matrix Structural Analysis*. McGraw-Hill, Nova Iorque.
- Ramires, F.B., 2010. *Contribuição das Componentes Mistas em Ligações Semirrígidas*. Tese de doutorado, Pontifícia Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Shi, Y. and Eberhart, R., 1998. "A modified particle swarm optimizer". *1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings. IEEE World Congress on Computational Intelligence (Cat. No.98TH8360)*, pp. 69 – 73.
- Simões, L.M.C., 1996. "Optimization of frames with semi-rigid connections". *Computers & Structures*, Vol. 60, No. 4, pp. 531 – 539.
- Soares, Fiho, M., Guimarães, M.J.R., Sahlit, C.L. and Brito, J.L.V., 2004. "Wind pressures in frames structures with semi-rigid connections". *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science & Engineering*, Vol. XX, No. 2, pp. 180–189.
- Topping, B.H.V. and Bittnar, Z., eds., 2002. *Proceedings of the Sixth International Conference on Computational Structures Technology*. Civil-Comp, Praga.
- Xu, L., 2001. "Second-order analysis for semirigid steel frame design". *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 28, No. 1.

8. RESPONSABILIDADES AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

STRUCTURAL OPTIMIZATION OF PLANE FRAMES CONSIDERING THE EFFECTS CAUSED BY SEMI-RIGID CONNECTIONS

Marcos Henrique Bossardi Borges, henrique.borges@farroupilha.ifrs.edu.br¹

Bruno Vettorazzi, bruno.vettorazzi@farroupilha.ifrs.edu.br¹

Adelano Esposito, adelano.esposito@farroupilha.ifrs.edu.br¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul - Campus Farroupilha, Av. São Vicente, 785, Farroupilha-RS

Abstract: *Over the last years, international regulatory agencies have been presenting new approaches regarding the behavior of connections in metallic structures, in order to faithfully reproduce the effects caused by these on the mechanical strength of structures. Allied to this, strong industrial competition demands for projects yet more optimized, close to its components resistant limits. In this context, the optimal design of metallic structures becomes a complex task, requiring numerical formulations that can portray the real behavior of these systems, capable to consider the rigidities present in the connections and their influence on the design variables. Thus, present work aims at the implementation of a structural optimization algorithm, which takes the influence of semi-rigid connections in the analysis of plane frames. For this, a metaheuristic optimization algorithm linked to a finite element numerical model able to evaluate different levels for connection semi-rigidity is used, thereby reflecting in a more realistic modeling. Based on analyzed examples, the results obtained in this work demonstrate the strong influence that the semi-rigid approach causes to the observed structures mechanical behavior, replicating that to the optimization problem, resulting in remarkably different optimal solutions.*

Keywords: *structural analysis, semi-rigid connections, metaheuristic algorithm, structural optimization.*