

**INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA**
RIO GRANDE DO SUL
Câmpus Farroupilha

ALGORITMO PARA OTIMIZAÇÃO DE LIGAÇÕES ENTRE VIGA E COLUNA COM PLACA DE EXTREMIDADE ESTENDIDA

Matheus Romeiro Deves, matheusdeves7@hotmail.com¹
Adelano Esposito, adelano.esposito@farroupilha.ifrs.edu.br¹

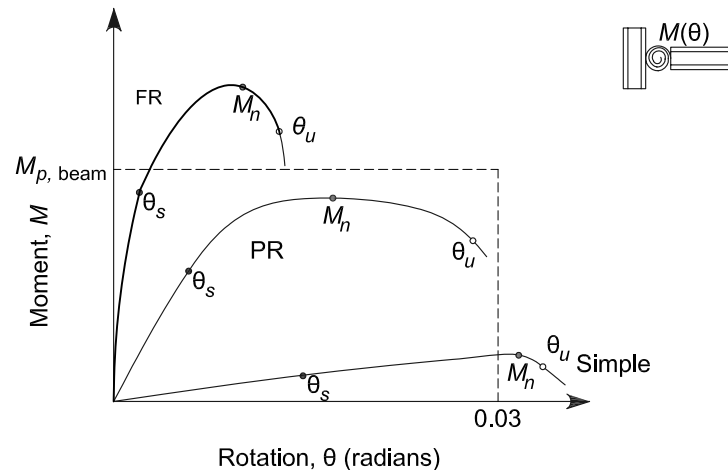
¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Câmpus Farroupilha, Avenida São Vicente, 785, Bairro Cinquentenário, CEP 95180-000, Farroupilha – RS.

Resumo: Ao longo dos últimos anos, os métodos de análise estrutural e regras para o projeto de ligações entre viga e coluna em estruturas metálicas vem sendo aprimorados, com o propósito de garantir maior segurança e precisão nesse dimensionamento. Entretanto, tais técnicas requerem a execução sequencial de vários cálculos, condições e combinações que, devido à complexidade presente, muitas vezes são negligenciadas na prática. Neste cenário, a utilização dos métodos de otimização estrutural representa uma alternativa atraente para lidar com as inúmeras possibilidades existentes no projeto ótimo de ligações metálicas, considerando as regras e recomendações previstas em códigos normatizados. Sendo assim, o propósito deste trabalho consiste em implementar um método de otimização estrutural de ligações entre viga e coluna com placa de extremidade estendida, com vistas às regras de projetos da Eurocode 3, parte 1-8 (2005). Para tal, realizou-se, inicialmente, a análise estrutural das ligações com base no método dos componentes, para obtenção do momento fletor resistente e rigidez rotacional admissível. Em seguida, o código de análise estrutural foi incorporado às restrições de montagem, fabricação, resistência mecânica e rigidez rotacional da ligação. Ao final da implementação numérica, acoplou-se o código de análise estrutural e restrições ao algoritmo de otimização por enxame de partículas (PSO). Os algoritmos desenvolvidos foram aplicados em um caso de literatura, típico de ocorrer na prática. Os resultados foram investigados sob dois aspectos: análise gráfica da função objetivo, para a combinação de duas variáveis de projeto; solução ótima obtida para seis variáveis de projeto. A análise gráfica revelou que a função objetivo é suave e convexa, facilitando a convergência do algoritmo de otimização. Em se tratando da solução ótima, esta ficou próxima à encontrada pelo autor referenciado, assegurando a qualidade dos resultados e potencializando a utilização desta implementação para o dimensionamento ótimo de ligações com placa de extremidade estendida.

Palavras-chave: Análise estrutural, ligações metálicas, placa de extremidade estendida, otimização estrutural, otimização por enxame de partículas.

1. INTRODUÇÃO

Com o aumento do uso de aço (vigas, colunas, entre outros elementos) nas construções civis nos últimos anos (Pinho, 2007), muitos estudos sobre ligações viga-coluna em estruturas metálicas vêm sendo realizados. De acordo com Li et al (1995), essas ligações tem papel fundamental em estruturas metálicas. As conexões recebem várias classificações, tendo como base normas técnicas existentes em países diferentes. Na Eurocode 3 Parte 1-8 (2005), essas ligações são classificadas de acordo com a forma de fixação entre a viga e a coluna, em dois grupos: conexões soldadas ou conexões feitas com parafusos, rebites e pinos. Além dessa, Aydın et al. (2015) distingue essas ligações em sete tipos: 1 - *single web angle*, 2 - *double web angle*, 3 - *header plate*, 4 - *top-and-seat angle*, 5 - *end plate without column stiffeners*, 6 - *end plate with column stiffeners*, e 7 - *T-stub*. Baseado no método experimental da viga-coluna, desenvolvido por Batho e Rowan (1931), AISC/360-10 (2010) apresenta três tipos de conexões: Completamente rígida (*fully restrained -FR*); Flexível (*simple*); e Semirrígida (*partially restrained -PR*), conforme a Fig. 1.



**Figura 1- Classificação de conexões segundo AISC/360-10 (2010).
Adaptado de AISC/360-10 (2010).**

Onde θ_s indica os pontos de carga de trabalho para as conexões; θ_u os pontos de rotação máxima das conexões; e M_n os pontos de força máxima das conexões. Segundo Romano (2001), o comportamento mecânico das ligações influi sensivelmente na distribuição dos esforços e deslocamentos das estruturas, tornando-se portanto essencial a correta escolha dessas conexões viga-coluna.

O projeto ótimo de pórticos de aço é obtido pela minimização do custo total da estrutura que, normalmente, considera como variáveis de projeto apenas as seções transversais das vigas e colunas, como a otimização do peso da estrutura apresentada por Hasançebi (2017). Neste processo, segundo Díaz et. al. (2012), as dimensões das conexões não são otimizadas, e seu custo é incorporado ao custo total da estrutura de forma proporcional à rigidez rotacional da conexão (isto é, alguns estudos demonstram que o custo de fabricação das ligações pode ser associado a rigidez rotacional da ligação). Segundo Hortencio et. al. (2017), a massa das conexões representa uma pequena parcela no peso total da estrutura, entretanto, o custo de fabricação de tais conexões pode influenciar significativamente no custo total da estrutura. Assim, observa-se que este processo não garante que a estrutura final seja a solução ótima do problema de otimização. Outra alternativa utilizada por alguns pesquisadores para obter o projeto ótimo de estruturas de aço consiste em encontrar as dimensões ótimas dos perfis e, posteriormente, realizar a otimização das ligações utilizando a rigidez rotacional e momento resistente dos perfis estruturais selecionados anteriormente.

Observa-se, portanto, que o projeto ótimo das ligações compreende uma etapa fundamental do projeto de otimização, tal que vários trabalhos podem ser encontrados na literatura abordando este tema. Cho e Park (1992) realizaram a otimização do projeto para custo mínimo de: placa de extremidade, placa de flange aparafusada e ligações viga-coluna com placa de flange soldada. A função foi definida em termos dos custos de material, mão de obra e fabricação. Como variáveis de projeto, os autores consideraram o número e o tamanho dos parafusos, as dimensões das placas (largura, comprimento e espessura) e as soldas. Xu and Grierson (1993) desenvolveram um algoritmo de otimização discreto contínuo para minimizar o custo das conexões semi-rígidas e membros de uma estrutura para cargas de projeto especificadas. Em Simões (1996) foi realizada a minimização do custo total da estrutura considerando os custos das ligações e membros. Neste trabalho, o custo das ligações foi associado a rigidez rotacional da ligação, convertido em peso. Kameshki e Saka (2001) desenvolveram um algoritmo genético para obter o peso mínimo de estruturas de aço. Usando esse algoritmo (com as mesmas restrições), Kameshki e Saka (2003) otimizaram as estruturas de aço para três tipos de conexões semirrígidas.

Pavlovčić et al. (2004) desenvolveu uma função objetivo para calcular o custo total da estrutura considerando as ligações como idealmente rígidas. Para tal, os autores consideraram os custos do aço, parafusos, transporte e montagem, além de todas as etapas de fabricação, tais como: soldagem, corte, perfuração, preparação de superfícies, montagem, alinhamento de flanges e pintura. Cabrero e Bayo (2005) desenvolveram a otimização de conexões semirrígidas para encontrar o momento fletor e a rigidez rotacional teóricas ideais. Dois exemplos de conexões semirrígidas são apresentados e seus resultados são comparados com conexões rígidas. Hayalioglu e Degertekin (2005) realizaram a otimização dos membros (vigas e colunas) e das conexões semirrígidas para estruturas de aços não-lineares. O algoritmo apresentado obtém o custo total mínimo do conjunto. Falcón e Montrull (2014) utilizaram um modelo chamado “Pórtico Auxiliar” para o dimensionamento ótimo de conexões semirrígidas.

Com base nos autores referenciados, observam-se estudos recentes associados à análise e otimização das ligações entre viga e coluna de pórticos metálicos. Isso ocorre devido aos grandes avanços dos métodos numéricos, bem como adequações dos procedimentos e normas técnicas (por exemplo: Eurocode 3 Parte 1-8, 2005) a fim de representar adequadamente o comportamento destas ligações na análise e otimização de pórticos metálicos. Neste

contexto, é desejável o desenvolvimento de novas ferramentas capazes de incorporar tais técnicas de análise ao projeto ótimo de ligações entre viga e coluna, principalmente em se tratando das ligações semirrígidas.

Este trabalho propõe um método de otimização de ligações entre viga e coluna com placa de extremidade estendida, a fim de encontrar o menor custo possível para essa. Para tal, o algoritmo é composto por um módulo de análise das ligações e outro de otimização estrutural. Quanto ao módulo de análise, são consideradas as formulações sugeridas pela Eurocode 3 Parte 1-8 (2005) e NBR-8800 (2008). Em se tratando da otimização, esta considera os parâmetros dimensionais das ligações como variáveis de projeto, restrições de resistência mecânica (momento resistente e rigidez rotacional), montagem e fabricação. Além disso, a função custo do problema de otimização engloba os valores monetários associados à fabricação, montagem e material, conforme apresentado em Díaz (2010). Para interpretar o comportamento das restrições no problema de otimização, a topologia da função objetivo é apresentada pela combinação de duas variáveis de projeto. O projeto ótimo das ligações é obtido utilizando o método de otimização por enxame de partículas (Particles Swarm Optimization - PSO), implementado em software MATLAB®, cuja solução é comparada com resultados apresentados na literatura.

2. ANÁLISE DA CONEXÃO COM PLACA DE EXTREMIDADE ESTENDIDA

2.1 Desenvolvimento do Método dos Componentes

Em grande parte dos projetos de pórticos metálicos, as ligações entre viga e coluna são consideradas como perfeitamente rígidas ou idealmente rotuladas (Hayalioglu, 2005). Entretanto, dependendo do modelo de ligação adotado, tal simplificação não garante uma representação adequada de sua resistência mecânica, interferindo na estimativa real do comportamento global da estrutura. Neste contexto, vários pesquisadores (Johnston e Mount (1942), Sourochnikoff (1950), Monforton e Wu (1963), Nethercot (1985), Faella et al., 2000) demonstram que as ligações viga-coluna apresentam um comportamento intermediário entre perfeitamente rígido e idealmente rotulado, denominado como sendo semirrígido. Um dos métodos de análise das ligações semirrígidas é apresentado no Eurocode 3 Parte 1-8 (2005), o qual permite incorporar à análise global da estrutura uma aproximação mais adequada das ligações. Tal método, denominado método dos componentes, consiste na avaliação individual do diagrama força-deslocamento para cada componente da ligação, apresentada na Fig. 2, em termos da rigidez inicial, resistência e capacidade de deformação. O método dos componentes é complexo e requer a utilização de várias regras para o cálculo da força, rigidez e capacidade de deformação das ligações. As principais etapas necessárias para projetar uma ligação de momento são:

- Determinar o caminho de atuação das forças através da conexão (por onde essa força deve passar). As forças na conexão devem estar em equilíbrio com o momento de flexão aplicado, a força de cisalhamento e / ou a força normal atuando na ligação.
- Após a identificação do caminho de atuação das forças, estas devem ser calculadas para cada componente da ligação, tal que, o componente pertencente ao caminho de atuação das forças com menor resistência determina a força resistente da ligação.
- A rigidez da ligação depende das deformações individuais dos componentes no caminho de atuação das forças, ou seja, a rigidez equivalente da ligação é descrita pela rigidez de cada componente pertencente à ligação, conforme a Fig. 2b.
- A capacidade de deformação é determinada através da deformação plástica de um ou mais componentes. Se a resistência da conexão exceder a resistência de um dos membros conectados, a capacidade de deformação proveniente do membro conectado não pode ser excedida.

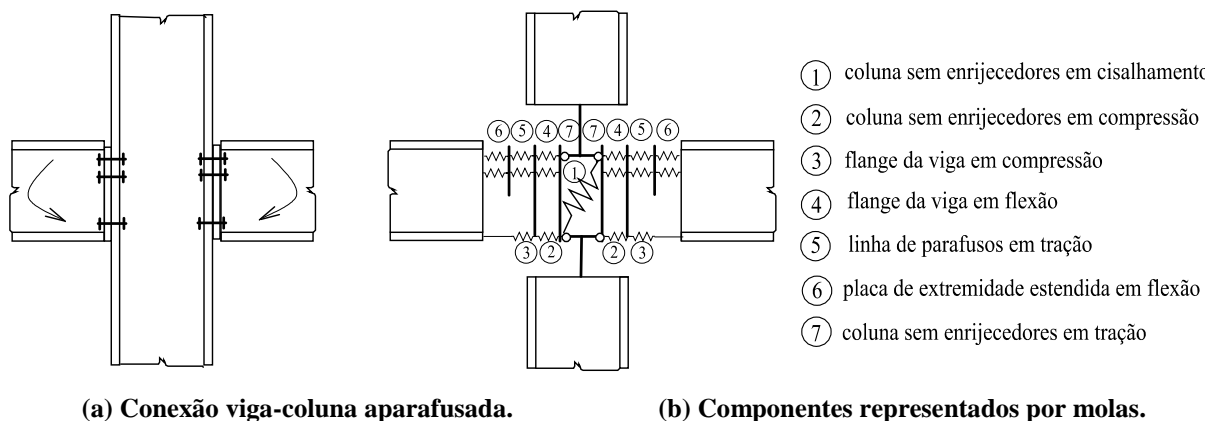


Figura 2- Representação do método dos componentes para uma conexão viga-coluna aparafusada.

Após as propriedades mecânicas de todos os componentes terem sido calculadas, os vários componentes podem ser montados para determinar a resistência, rigidez e capacidade de deformação da conexão. Além disso, segundo Romano (2001), esse método permite determinar a resistência potencial da ligação pela análise de três regiões distintas: zona tracionada, zona comprimida e zona de cisalhamento (ver a Fig. 3a), cuja resistência potencial da ligação é determinada em função da força resistente de qualquer linha, não apenas pelo momento resultante da força em relação ao centro de rotação da ligação, como pode ser observado na Fig. 3b.

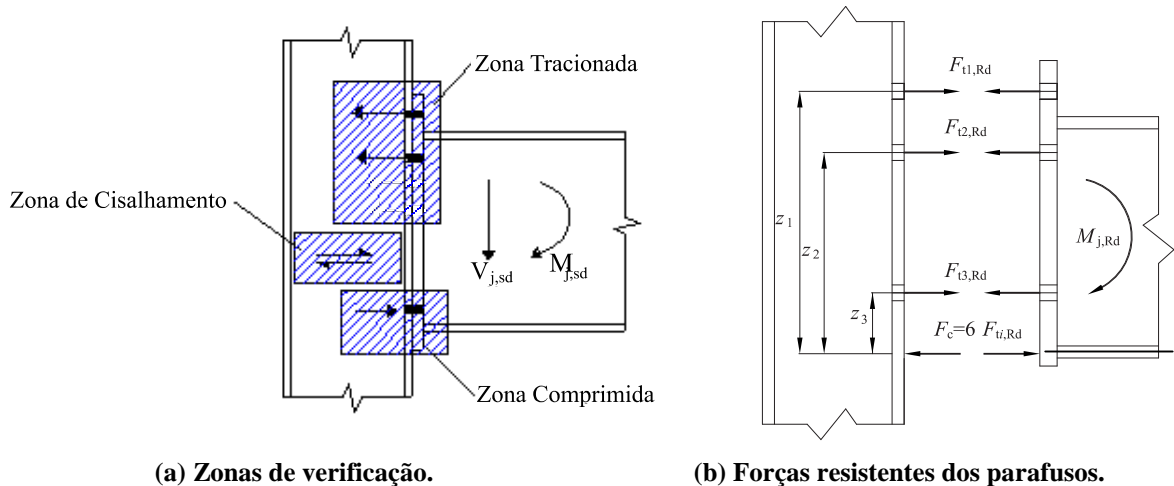


Figura 3- Representação esquemática das regiões e esforços na ligação com placa de extremidade estendida.

Adaptado de Romano (2001).

Conforme supramencionado, a complexidade do método dos componentes envolve uma série de procedimentos e regras as quais estão devidamente descritas na Eurocode 3 Parte 1-8 (2005). Sendo assim, este trabalho apresenta de forma breve, na seção 2.2, apenas as equações principais descritas na referida Norma, as quais compõem a formulação do problema de otimização proposto. No entanto, cabe ressaltar que a implementação numérica desenvolvida comporta todas as etapas previstas na Norma de forma automática. Para um estudo mais aprofundado, sugere-se que o leitor consulte as regras e recomendações do método dos componentes apresentadas na Eurocode 3 Parte 1-8 (2005).

2.2 Determinação da resistência das ligações e rigidez rotacional

Conforme indicado anteriormente, as propriedades principais quanto a utilização do método dos componentes estão associadas ao momento fletor resistente ($M_{j,Rd}$) e rigidez rotacional (S_j) da ligação. A Figura 4a apresenta uma conexão entre viga e coluna destacando os componentes considerados na análise pelo método dos componentes. A Figura 4b apresenta o correspondente diagrama momento x rotação resultante. De acordo com a Eurocode 3 Parte 1-8 (2005), assume-se que 2/3 do momento resistente calculado é elástico, formando uma linha reta determinada pela rigidez inicial calculada. Após atingir 2/3 do momento resistente, a rigidez é reduzida.

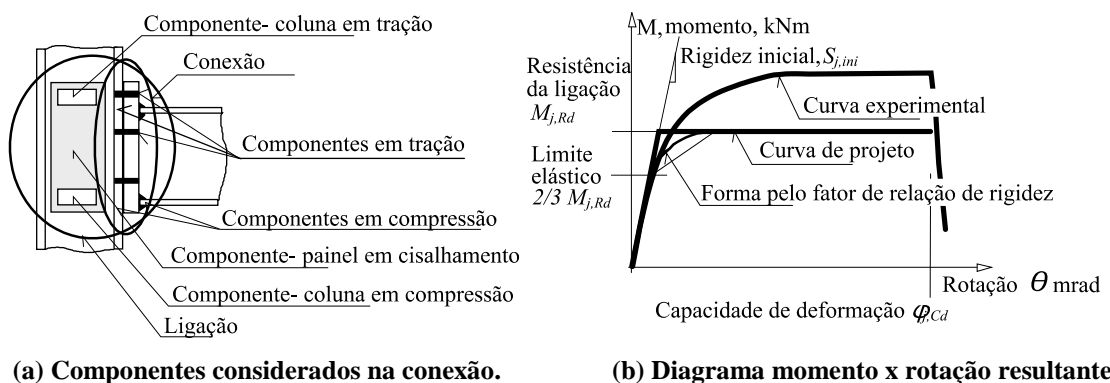


Figura 4- Análise dos componentes na conexão viga-coluna.

Em se tratando do momento fletor resistente, este está condicionado à resistência do componente mais fraco da ligação, sendo que, para uma distribuição de forças conforme a Fig. 3b (ligação viga-coluna com placa

de extremidade), a tração de cada linha de parafuso em relação ao centro de rotação da ligação define o momento fletor resistente da ligação, tal como apresentado na Eq. (1).

$$M_{j,Rd} = \sum z_r F_{tr,Rd} \quad (1)$$

onde r indica as linhas de parafusos da zona de tração, $F_{tr,Rd}$ é a força resistente da linha de parafusos r , e z_r é a distância entre a linha dos parafusos r até o centro de rotação da placa. Sendo assim, uma vez encontrada as resistências de cada linha de parafuso, o momento resistente da ligação pode ser dado pela Eq. (2).

$$M_{j,Rd} = z_1 F_{t1,Rd} + z_2 F_{t2,Rd} + z_3 F_{t3,Rd} \quad (2)$$

Conforme enunciado, a rigidez inicial da ligação compreende outro parâmetro de resistência previsto pelo método dos componentes. Para isso, deformações elásticas de componentes individuais são adicionadas. A deformação δ é definida pela Eq. (3).

$$\delta_i = \frac{F_i}{K_i E} \quad (3)$$

onde k é o coeficiente de rigidez do componente i , F é a força do componente i , e E é o módulo de elasticidade do material. A rotação da junta pode ser calculada a partir da deformação dos componentes, Eq. (4), considerando o braço de alavanca entre as zonas de tensão e compressão, conforme a Fig. 5.

$$\varphi_j = \frac{\sum \delta_i}{K_i E} \quad (4)$$

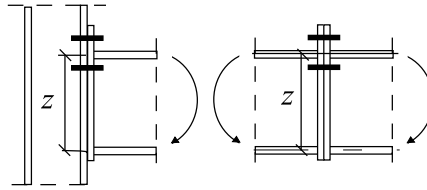


Figura 5- Estimativa da distância entre a linha dos parafusos r até o centro de rotação da placa de extremidade estendida.

Logo, combinando as Eqs. (3) e (4), a rigidez secante da ligação é obtida, conforme Eq. (5). A rigidez rotacional inicial é dada pela Eq. (6).

$$S_j = \frac{M_j}{\varphi_j} = \frac{F_i z_{eq}}{\varphi_j} = \frac{E z_{eq}^2}{\mu \sum \frac{1}{K_i}} = \frac{E z_{eq}^2}{\mu \left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_t} \right)} \quad (5)$$

$$S_{j,ini} = \mu S_j \quad (6)$$

onde z_{eq} é uma distância equivalente entre as linhas dos parafusos em relação ao centro de rotação, k_1 e k_2 são as rigidezes de translação efetiva das linhas de parafusos 1 e 2, respectivamente, e k_t é a rigidez de translação resultante. μ é a relação entre rigidez inicial e secante, dada pela Eq. (7).

$$\begin{aligned} \mu &= 1 && \text{para } M_{j,Ed} \leq \frac{2}{3} M_{j,Rd} \\ \mu &= \left(1,5 \frac{M_{j,Ed}}{M_{j,Rd}} \right)^\psi && \text{para } \frac{2}{3} M_{j,Rd} < M_{j,Ed} \leq M_{j,Rd} \end{aligned} \quad (7)$$

sendo $\psi = 2,7$ para uniões aparafusadas com placas de extremidade.

3. PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO DA CONEXÃO

A formulação geral do problema de otimização de ligações metálicas, considerando restrições de desigualdade e igualdade, pode ser representada matematicamente conforme Eq. (8).

$$\begin{aligned} \text{Encontrar} \quad & X = [x_1, x_2, \dots, x_{nc}] \\ \text{Minimizar} \quad & f(X) \\ \text{Sujeito a} \quad & h_j(X) = 0 \quad (j = 1, \dots, n_e) \\ & g_k(X) \geq 0 \quad (k = 1, \dots, n_i) \\ & x_i^l \leq x_i \leq x_i^u \quad (i = 1, \dots, n_v) \end{aligned} \quad (8)$$

onde X é o conjunto das variáveis de projeto, x_{nc} é a última variável de projeto do conjunto, $f(X)$ é a função objetivo, $h_j(X)$ é a j -ésima restrição de igualdade, $g_k(X)$ é a k -ésima restrição de desigualdade, x_i^l é o limite inferior da i -ésima variável de projeto, x_i^u é o limite superior da variável de projeto, n_e é o número de restrições de igualdade, n_i é o número de restrições de desigualdade e n_p é o número total de variáveis de projeto.

3.1 Variáveis de Projeto

As variáveis de projeto definidas para o problema de otimização abordado neste trabalho correspondem a 6 dos 28 parâmetros geométricos pertencentes à placa de extremidade estendida apresentada na Fig. 6, sendo elas: diâmetro dos parafusos (d); espessura da placa de extremidade estendida (t_p); largura da placa de extremidade estendida (b_p); distância horizontal do eixo do parafuso até a borda da placa de extremidade estendida (e); distância vertical entre o eixo da linha de parafusos 1 até a borda superior da placa de extremidade estendida (e_x); distância vertical entre os eixos das linhas de parafusos 1 e 2 (p_x). Os valores superiores e inferiores das variáveis de projeto em conformidade com o Eurocode 3 Parte 1-8 (2005), estão apresentados na Tab. 1.

Tabela 1- Valores superiores e inferiores das variáveis de projeto.

Variáveis de projeto	Valor mínimo (mm)	Valor máximo (mm)
d	10	18
t_p	20	25
b_{ep}	b_{fb}	b_{fc}
e	20,4	30
e_x	20,4	30
p_x	60	182

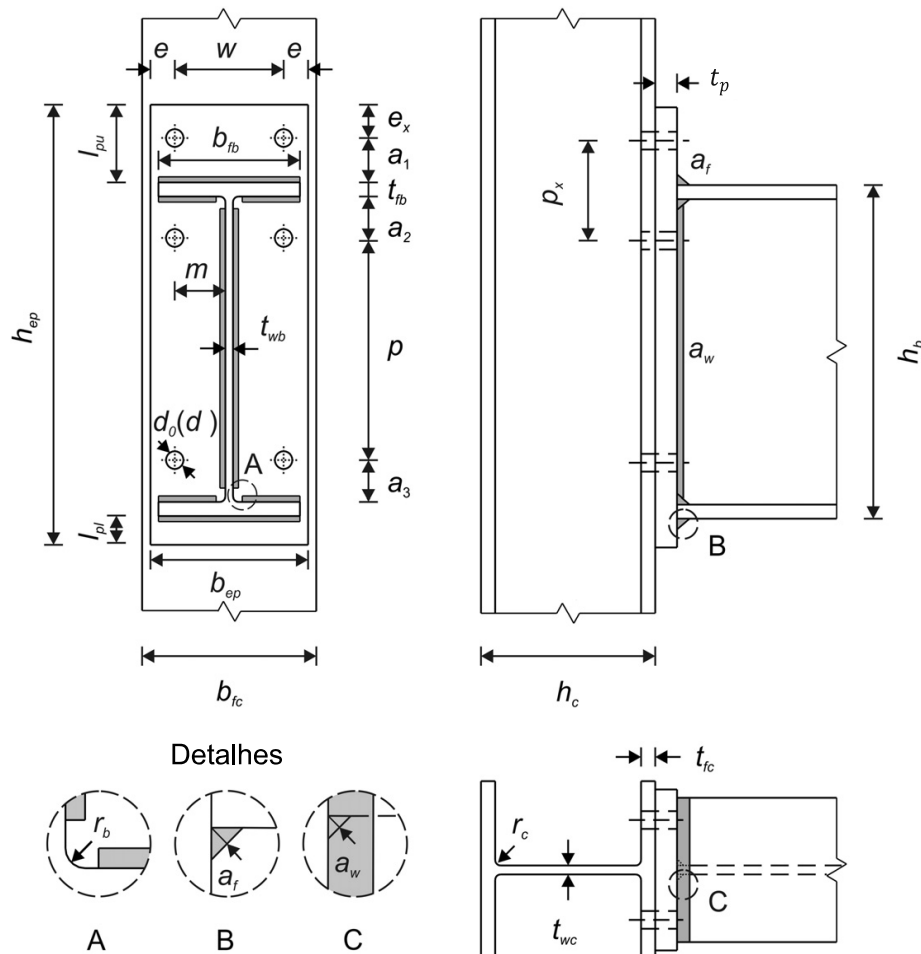


Figura 6- Parâmetros geométricos da placa de extremidade estendida, conforme Díaz et al. (2012).

3.2 Variáveis dependentes

As variáveis dependentes são as que são alteradas de acordo com a manipulação das variáveis de projeto. Logo, os 22 parâmetros restantes a serem definidos são apresentados a seguir.

1. Os parâmetros t_{fb} , b_{fb} , h_b , r_b , t_{wb} , t_{fc} , b_{fc} , h_c , r_c , t_{wc} , são dimensões da viga e da coluna, as quais são definidas a partir de tabelas de especificações de perfis.
2. Usando as normas espanholas UNE-ENV 1090:1996 e UNE-ENV 1993-1-1:1992, o diâmetro dos furos dos parafusos (d_0), em mm, é calculado conforme a Eq. (9).

$$d_0 = d + 1 \text{ para } d \leq 12$$

$$d_0 = d + 2 \text{ para } 12 < d \leq 27 \quad (9)$$

$$d_0 = d + 3 \text{ para } d > 27$$

3. Conforme a seção 4.5.3.3 do Eurocode 3 Parte 1-8 (2005), as espessuras das gargantas de solda a_f e a_w , em mm, são calculadas com base no método simplificado para a resistência de projeto de uma solda de filete.
4. Os demais parâmetros são calculados de acordo com as Eqs. 10 – 17, sendo todos em mm.

$$a_1 = a_2 = \frac{p_x - t_{fb}}{2} \quad (10)$$

$$a_3 = 2d \quad (11)$$

$$h_{ep} = e_x + a_1 + h_b + l_{pl} \quad (12)$$

$$l_{pl} = a_f \sqrt{2} + 2 \quad (13)$$

$$l_{pu} = e_x + a_1 \quad (14)$$

$$m = 30 \text{ para } d \leq 20$$

$$m = 35 \text{ para } 20 < d \leq 22 \quad (15)$$

$$m = 40 \text{ para } d > 22$$

$$p = h_b - 2t_{fb} - a_2 - a_3 \quad (16)$$

$$w = b_{ep} - 2e \quad (17)$$

3.3 Função objetivo

A função objetivo do problema de otimização abordado neste trabalho consiste no custo total da ligação com placa de extremidade estendida, cuja expressão matemática foi modelada em termos dos custos de chapa, parafusos, soldas, montagem da chapa de extremidade estendida na viga (Díaz, 2010), conforme Eqs. 18 – 21.

$$C_p = cu_p(b_{ep}h_{ep}t_p)\rho_A \quad (18)$$

$$C_t = cu_t\left[\frac{6\pi d^2}{4}(0,65d + t_p + t_{fc} + 0,80d + 0,5d)\right]\rho_A \quad (19)$$

$$C_s = cu_s[a_f^2(2b_{fb} + 2(b_{fb} - 2r_b - t_{wb})) + 2a_w^2(h_b - 2t_{fb} - 2r_b)]\rho_A \quad (20)$$

$$C_m = cu_m(b_{ep}h_{ep}t_p)\rho_A \quad (21)$$

Sendo assim, o custo total da ligação consiste no somatório das referidas parcelas, o qual pode ser dado pela Eq. (22).

$$C_{US} = C_p + C_t + C_s + C_m \quad (22)$$

onde ρ_A é o peso específico do aço; C_p o custo da chapa cortada, perfurada, tratada; cu_p o custo, por unidade de peso, da chapa cortada, perfurada, tratada (1,10 €/kg); C_t o custo dos parafusos; cu_t o custo, por unidade de peso, dos parafusos (5,00 €/kg); C_s o custo da soldagem acabada; cu_s o custo, por unidade de peso, da soldagem acabada

(7,30 €/kg); C_m o custo da montagem da chapa de extremidade estendida na viga; cu_m o custo, por unidade de peso, da montagem da chapa de extremidade estendida na viga (0,60 €/kg).

3.4 Restrições

Na otimização, os parâmetros dimensionais das ligações são considerados como restrições geométricas, cujos valores máximos e mínimos apresentados na Tab. 2, estão associados ao diâmetro do furo (d_0). As restrições de montagem compreendem a distância do centro do parafuso à alma da viga (m), distâncias a_1 , a_2 e a_3 , cujos valores máximos e mínimos também estão apresentados na Tab. 2.

Tabela 2- Valores mínimos e máximos para os parâmetros geométricos.

Parâmetros geométricos	Valor mínimo (mm)	Valor máximo (mm)
e	$1,2d_0$	30
e_x	$1,2d_0$	30
p_x	$2,2d_0$	$\text{mín}[200; 14(\text{mín}(t_p, t_{fc}))]$
p	$2,2d_0$	$\text{mín}[200; 14(\text{mín}(t_p, t_{fc}))]$
w	$2,4d_0$	$\text{mín}[200; 14(\text{mín}(t_p, t_{fc}))]$
Parâmetros de montagem		
a_1	m	-
a_2	m	-
a_3	m	-

A restrição quanto à resistência mecânica da ligação está associada ao momento fletor resistente ($M_{j,Rd}$), o qual deve ser maior ou igual ao momento fletor atuante na ligação ($M_{j,Ed}$), de acordo com a Eq. (23).

$$M_{j,Rd} \geq M_{j,Ed} \quad (23)$$

A restrição de rigidez da ligação está condicionada à rigidez rotacional resistente ($S_{j,ini}$), a qual deverá ser maior ou igual à rigidez rotacional atuante na ligação ($S_{j,Ed}$), conforme Eq. (24).

$$S_{j,ini} \geq S_{j,Ed} \quad (24)$$

3.5 Algoritmo PSO

O algoritmo padrão de otimização por enxame de partículas (*Particles Swarm Optimization-PSO*), foi proposto inicialmente por Kennedy e Eberhart (1995), como um método de otimização para modelar a busca por alimento e a interação entre o bando de pássaros ao longo do voo. Para tal, cada pássaro é tratado com uma partícula, e a região percorrida pelos pássaros corresponde ao espaço de busca. Esse método consiste em buscar a solução ótima, onde o espaço de busca é dado pela função objetivo do problema. Para isso, cada partícula sobrevoa o hiperespaço tendo influência do seu histórico de voo e das experiências de voo do conjunto de partículas (enxame).

Para haver a convergência para a solução ótima, cada partícula compreende um conjunto de coordenadas no hiperespaço que caracterizam a melhor solução (fitness) no momento. Com esse histórico gravado, a melhor solução encontrada individualmente por cada partícula e a melhor solução encontrada até então por alguma das partículas do enxame (melhor posição global) são gravadas nos termos $lbest$ e $gbest$, respectivamente. Esses termos são utilizados para a atualização da velocidade ao longo das iterações, conforme a Eq. (25). Já a nova posição é calculada usando informações da nova velocidade e da posição atual da partícula, apresentada na Eq. (26). O parâmetro χ é utilizado para evitar um comportamento divergente do algoritmo, conforme a Eq. (27). Essas atualizações ocorrem para um número fixo de iterações ou quando não houver atualização nas posições ótimas das partículas, ou seja, quando o método encontrou a melhor posição global. As coordenadas que compõem esse ponto no hiperespaço são as variáveis de projeto.

$$v_{i,j}^{k+1} = \chi[\omega v_i^k + c_1 r_1 (xlbest_{i,j}^k - x_{i,j}^k) + c_2 r_2 (xgbest_j^k - x_{i,j}^k)] \quad (25)$$

$$x_{i,j}^{k+1} = x_{i,j}^k + v_{i,j}^{k+1} \quad (26)$$

$$\chi = \frac{1,6}{|2 - (c_1 + c_2) - \sqrt{(c_1 + c_2)^2 - 4(c_1 + c_2)}|} \quad (27)$$

onde ω corresponde a inércia das partículas; v_i^{k+1} é a velocidade atualizada da partícula i correspondente a variável de projeto j ; v_i^k é a velocidade atual da partícula i correspondente a variável de projeto j ; $x_{i,j}^{k+1}$ é a posição atualizada da partícula i correspondente a variável de projeto j ; $x_{i,j}^k$ é a posição atual da partícula i correspondente a variável de projeto j ; $xlbest_{i,j}^k$ é a melhor posição já encontrada pela partícula i correspondente a variável de projeto j ; $xgbest_j^k$ é a melhor posição já encontrada pelo enxame de partículas correspondente a variável de projeto j ; c_1 é a constante de aceleração cognitiva (individual), referente à $xlbest_{i,j}^k$; c_2 é a constante de aceleração social (enxame), referente à $xgbest_j^k$; r_1 e r_2 são números aleatórios que podem estar entre zero e um.

Os vetores atualizados de velocidade e posição somados à inércia (ω) de cada partícula (influência do movimento anterior) determinam a atualização das partículas ao longo das iterações, como mostrado na Fig. 7. Como apresentado, o algoritmo PSO realiza o cálculo da função objetivo de maneira independente para cada partícula do enxame, usando informações do melhor desempenho de cada partícula separadamente e também da melhor partícula do enxame, o que faz com que todas respostas converjam. Essas características tornam esse método robusto, eficiente e simples de desenvolver.

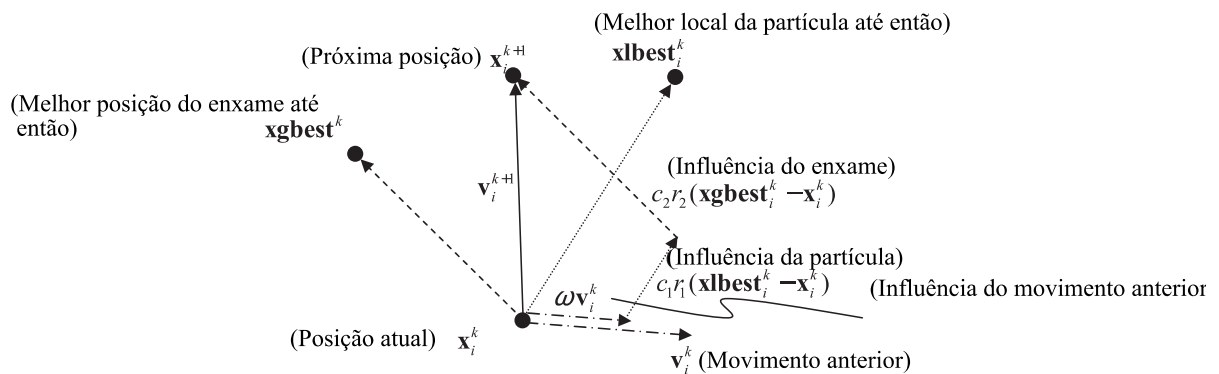


Figura 7- Representação vetorial da atualização da posição e velocidade de uma partícula do PSO.
Adaptado de Hassan *et al.* (2005).

4. RESULTADOS

4.1 Exemplo

Com o propósito de testar e validar a implementação numérica realizada neste trabalho, utilizou-se o problema abordado por Díaz (2010). O estudo de caso proposto pelo autor consiste na otimização de uma ligação com placa de extremidade estendida, a qual está soldada à face de uma viga fabricada em perfil IPE 300 e aparafusada à mesa de uma coluna em perfil HE 160 B. Os parâmetros geométricos e propriedades mecânica dos perfis estão apresentados nas Tabs. 3 e 4, respectivamente. A Fig. 8 apresenta de forma esquemática a configuração da ligação com placa de extremidade estendida a ser otimizada, cujos parâmetros geométricos a serem otimizados estão apresentados na Fig. 6 e descritos na Tab. 1. A ampliação da Fig. 8 representa a disposição dos perfis estruturais que comportam a referida ligação.

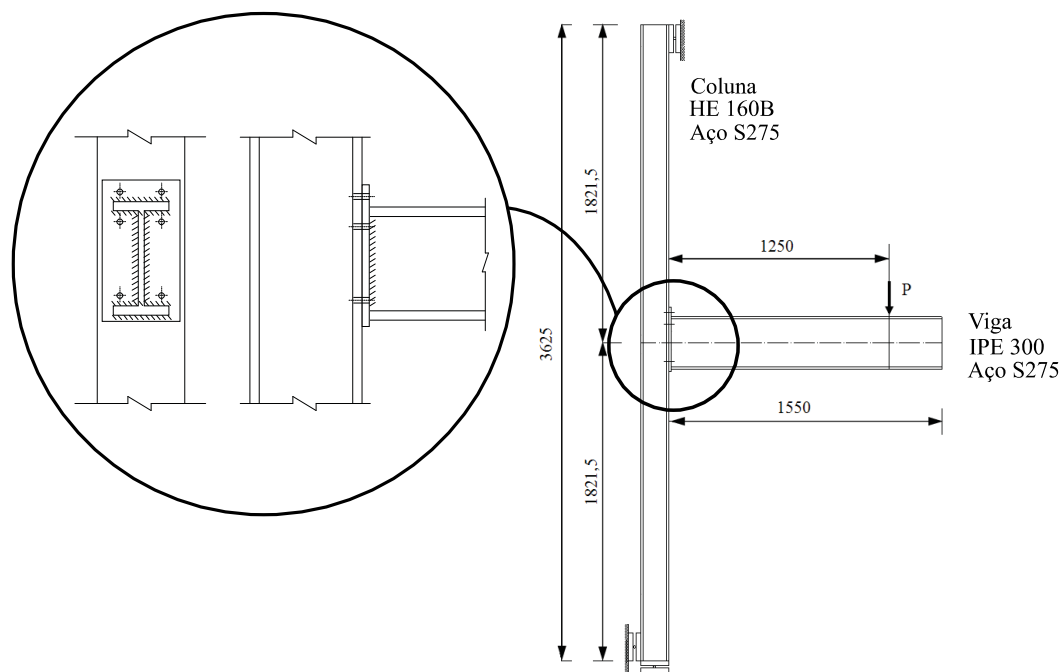


Figura 8- Geometria da estrutura analisada, com a ampliação da ligação de placa com extremidade estendida.
Adaptado de Díaz (2010).

O carregamento externo aplicado na estrutura da Fig. 8 produz um momento fletor atuante na ligação ($M_{j,Ed}$) equivalente à 75 kNm e uma rigidez rotacional de 18000 kNm/rad .

Tabela 3- Parâmetros geométricos dos perfis da viga e da coluna.

Perfil	b_f	h	r	t_f	t_w
Viga IPE300	150	300	15	10,7	7,1
Coluna HE160B	160	160	15	13	8

Tabela 4- Propriedades mecânicas do aço S275.

	Aço	Parafuso (Classe 10.9)
Módulo de Elasticidade longitudinal, E(MPa)	210000	210000
Coefficiente de Poisson	0,3	0,3
Peso específico, $\rho(\text{kg/m}^3)$	7850	7850
Limite elástico, $f_y(\text{MPa})$	275	900

4.2 Definição do Problema de Otimização

O problema de otimização da ligação com placa de extremidade estendida, apresentada na Fig. 8, consiste em encontrar as variáveis de projeto ótimas apresentadas na Fig. 6 e descritas na primeira coluna da Tab. 2, que minimizem a função custo da Eq. (22), respeitando as restrições de montagem, fabricação (ver Tab.2), resistência mecânica e rigidez rotacional da Tab. 5, e pertençam ao conjunto de valores discretos/contínuos dentro dos intervalos apresentados nas colunas 2 e 3 da Tab. 2.

Tabela 5- Restrição de resistência mecânica e rigidez rotacional.

Viga	Coluna	$S_{j,min}$ (kNm/rad)	$M_{j,Ed}$ (kNm)
IPE300	HE160B	18000	75

4.3 Resultados da Otimização: Análise da Função Objetivo

Atendendo à proposta deste trabalho, os resultados para o problema de otimização abordado foram investigados, inicialmente, quanto à influência das restrições no comportamento da função objetivo para a combinação das seguintes variáveis de projeto: diâmetro do parafuso \times espessura da placa de ligação; diâmetro do parafuso (d) \times distância p_x . Os resultados obtidos estão apresentados nos gráficos das Figs. 9 e 10.

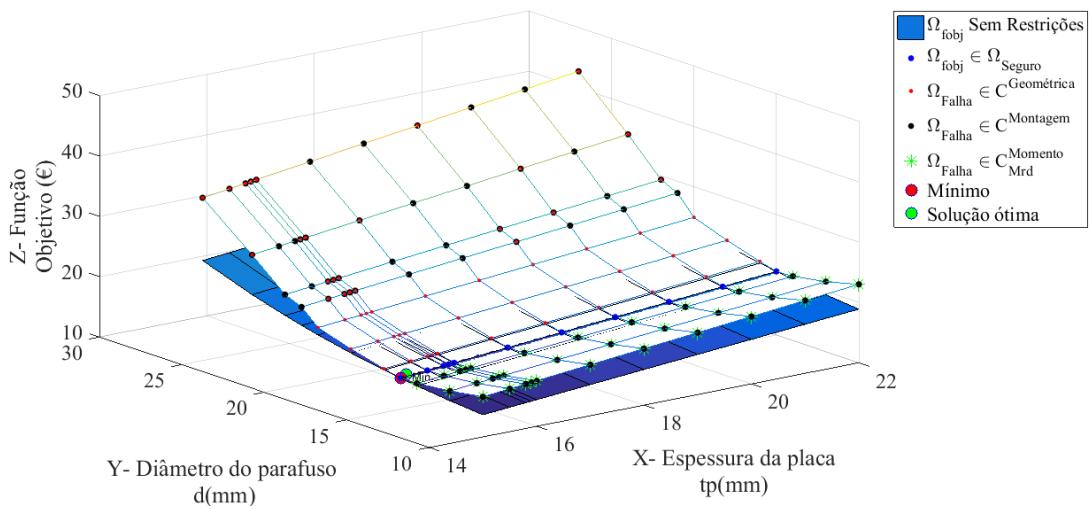


Figura 9- Resultado da função objetivo para a combinação do diâmetro do parafuso \times espessura da placa de ligação.

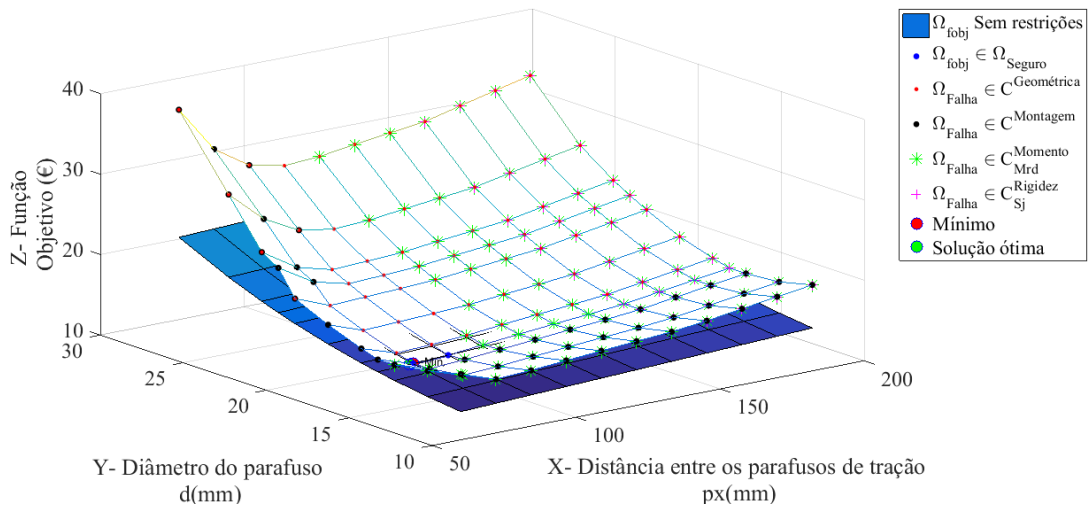


Figura 10- Resultado da função objetivo para a combinação do diâmetro do parafuso \times distância p_x .

Tal como apresentado nas Figs. 9 e 10, as superfícies em plano inclinado correspondem ao domínio da função objetivo sem penalização, ou seja, a combinação das variáveis de projeto que resultar na violação de alguma restrição não provocará qualquer influência sobre a função objetivo. Este motivo justifica a uniformidade da função. Em contrapartida, ao aplicar os efeitos das restrições violadas à função objetivo, por meio de funções de penalização, observa-se que o domínio originalmente plano sofre uma flutuação ancorada em pontos associados às restrições de geometria, montagem, momento fletor e rigidez rotacional. Observa-se, portanto, que a penalização

aplicada ao problema de otimização em face garantirá a formação de um único mínimo global, pertencente ao domínio de segurança da função objetivo.

O gráfico apresentado na Fig. 9 demonstra que, as restrições geométricas ($\Omega_{Falha} \in C^{Geométrica}$) delimitam os contornos do domínio de segurança da função objetivo ($\Omega_{fobj} \in \Omega_{seguro}$) para a combinação com altos valores de diâmetro dos parafusos e espessura de chapa. Este comportamento pode ser confirmado ao analisar a formulação da restrição geométrica para:

$$2,2d_0(d) \leq p \leq \min[200; 14(\min(t_p, t_{fc}))],$$

na qual, com o aumento do diâmetro do parafuso e espessura da chapa, os limites desta restrição são reduzidos. Além disso, o aumento no diâmetro do parafuso resulta na redução da dimensão p (conforme Eq. (16)), fazendo com que esta combinação das variáveis de projeto tangenciem os limites do domínio de segurança Ω_{seguro} . Por tal motivo, no projeto da união investigada, o aumento na bitola do parafuso e espessura da chapa não garante que o projeto geométrico da ligação seja adequado às especificações da Eurocode 3 Parte 1-8 (2005). Já para baixos valores de diâmetro dos parafusos, as restrições de momento fletor ($\Omega_{Falha} \in C_{Mrd}^{Momento}$) delimitam os contornos do domínio de segurança da função objetivo ($\Omega_{fobj} \in \Omega_{seguro}$). Isso é explicado, pois quanto menor o diâmetro dos parafusos, menor as forças resistentes de cada linha de parafusos, o que diminui o momento fletor resistente da conexão, conforme Eq. (2).

Em se tratando do gráfico apresentado na Fig. 10, observa-se que a combinação das variáveis diâmetro dos parafusos (d) com a distância entre centros da primeira linha à segunda linha de parafusos (p_x), provoca uma flutuação da função objetivo nos pontos onde alguma restrição foi violada, tal como ocorreu no gráfico da Fig. 9. Entretanto, além da violação das restrições geométricas e de montagem, observa-se a ativação da restrição de momento fletor e rigidez rotacional. As restrições de momento fletor ($\Omega_{Falha} \in C_{Mrd}^{Momento}$) delimitam os contornos do domínio de segurança da função objetivo ($\Omega_{fobj} \in \Omega_{seguro}$) para altos valores de p_x . Em se tratando da restrição de momento fletor, a função objetivo revela que o aumento da dimensão p_x provoca uma redução da distância Z_2 (distância do centro da segunda linha de parafusos ao centro de rotação da placa), reduzindo a força resistente na segunda ($F_{t2,Rd}$) e terceira ($F_{t3,Rd}$) linha de parafusos, porém, redistribuindo a força remanescente à primeira linha de parafusos ($F_{t1,Rd}$). Com isso, o momento resistente associado à primeira linha de parafusos é reduzido, tornando a restrição de momento fletor mais sensível ao aumento da variável de projeto p_x . Com relação à restrição de rigidez rotacional, essa é diretamente proporcional ao momento fletor, conforme a Eq. 5. Logo, considerando o mesmo raciocínio anterior, altos valores de p_x , resultará na redução no valor do momento fletor resistente da conexão e, conseqüentemente, reduzindo a rigidez rotacional admissível.

Em suma, os gráficos demonstram que a função objetivo do problema analisado é suave e convexa, não revelando a presença de mínimos locais em decorrência da violação das restrições. Essa demonstração gráfica revela que o algoritmo de otimização será capaz de encontrar com facilidade a solução ótima do problema, visto que a função apresenta um único mínimo global.

4.4 Projeto Ótimo da Ligação com Placa de Extremidade Estendida

Após investigar o comportamento da função objetivo pela combinação de algumas das variáveis de projeto do problema de otimização abordado neste trabalho, utilizou-se o algoritmo de otimização por enxame de partículas (PSO) para obtenção das seis variáveis de projeto, apresentadas na Tab. 1, que caracterizam o projeto ótimo da ligação com placa de extremidade estendida. Para tal, foram utilizados os parâmetros de calibração adimensionais do método, conforme Tab. 6.

Tabela 6- Parâmetros de calibração.

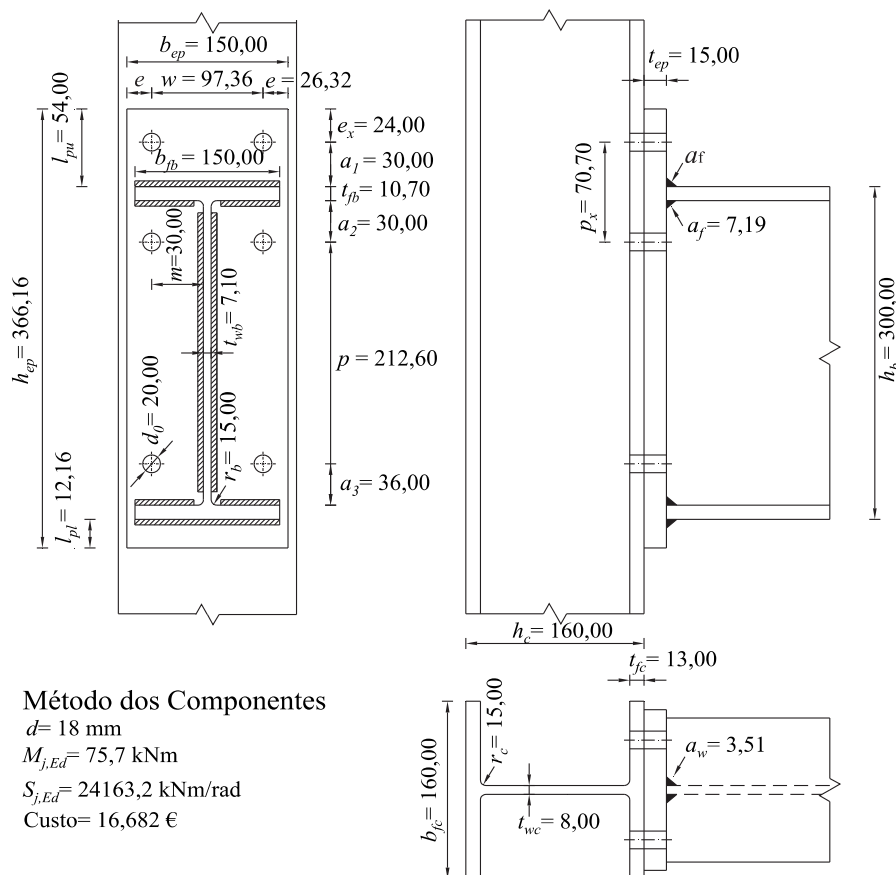
Número de partículas	Número de variáveis de projeto	ω	c_1	c_2
35	6	0,75	2,05	1,65

A solução ótima quanto às variáveis de projeto, custo das ligações, rigidez rotacional e momento fletor resistente da ligação otimizada neste trabalho, estão apresentados na Tab. 7.

Tabela 7- Variáveis de projeto, custo das ligações, rigidez rotacional e momento fletor resistente da ligação otimizada.

Parâmetro	d (mm)	t_p (mm)	b_{ep} (mm)	e (mm)	e_x (mm)	p_x (mm)	Custo (€)	$S_{j,Ed}$ (kNm/rad)	$M_{j,Ed}$ (kNm)
Díaz (2010)	15	15,1	150,2	25,9	20,7	70,9	15,27	21174,4	74,4
PSO (Este trabalho)	18	15	150	26,429	24	70,7	16,682	24163,2	75,7
Diferença percentual (%)	20	0,66	0,13	2,04	15,94	0,28	9,25	-	-

Analisando a Tab. 7, observa-se que a solução do problema de otimização obtida com a formulação implementada neste trabalho se aproxima daquela apresentada por Díaz (2010). Nota-se que a diferença percentual maior ocorreu para o diâmetro dos parafusos e distância e_x , diferença esta que justifica um maior momento resistente e rigidez rotacional da ligação ótima obtida com o algoritmo desenvolvido. Acredita-se que esta discrepância esteja associada à formulação utilizada pelo autor referenciado, o qual aplicou o Método dos Elementos Finitos para obtenção de $M_{j,Rd}$ e $S_{j,Ed}$, ao invés das equações propostas pela Eurocode 3 Parte 1-8 (2005), utilizadas neste trabalho. Em complemento aos resultados apresentados na Tab. 7, a Fig. 11 apresenta os parâmetros geométricos que caracterizam a solução ótima obtida neste trabalho, contemplando as variáveis de projeto do problema de otimização, assim como as variáveis dependentes e independentes.

**Figura 11- Parâmetros geométricos otimizados (unidades em mm).**

Para uma melhor interpretação da solução ótima durante o processo evolutivo, a próxima subseção apresentará uma análise gráfica do comportamento da função custo, variáveis de projeto e restrições ao longo das iterações (ou gerações do PSO), até a convergência.

4.4.1 Análise Gráfica da Convergência do PSO

As Figs. 12 e 13 mostram a evolução e comportamento das melhores soluções encontradas pelo PSO ao longo das iterações até a convergência do método.

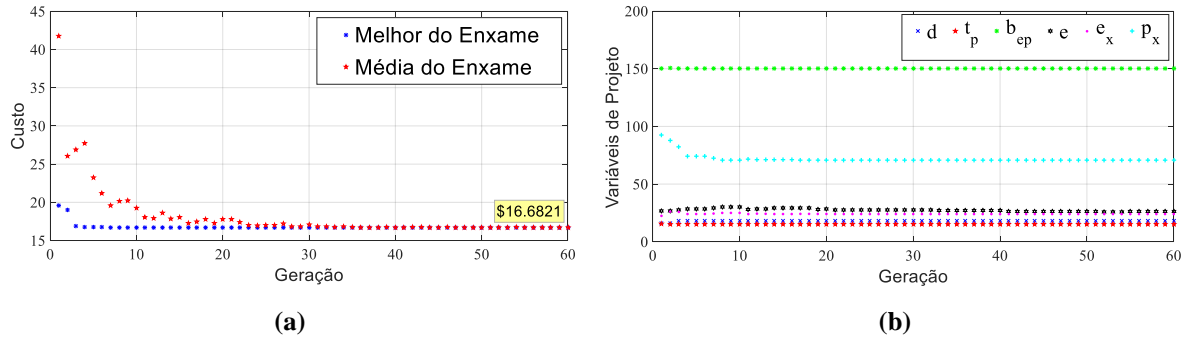


Figura 12- (a) Convergência das partículas; (b) Comportamento das variáveis de projeto.

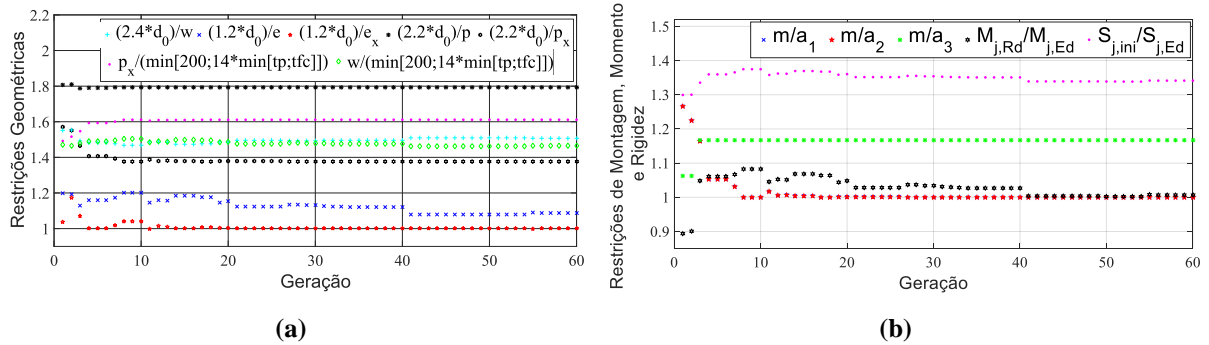


Figura 13- (a) Comportamento das restrições geométricas.; (b) Comportamento das restrições de montagem, momento fletor e rigidez rotacional.

No gráfico da Fig. 12a, observa-se a convergência do melhor valor da função custo, encontrado pelo enxame (gbest), bem como o valor médio associado. Observa-se que logo nas primeiras iterações o PSO consegue se aproximar da solução ótima, muito embora o correspondente valor médio do enxame demanda por um maior número de iterações. Neste aspecto, sabendo que o critério de convergência do PSO é atingido no instante (geração) em que o valor médio se aproxima da melhor solução encontrada pelo enxame para aquela geração, fica claro que o algoritmo encontrou a solução ótima do problema de otimização abordado, pois observa-se na Fig. 12a uma sobreposição das soluções entre os intervalos de 50 a 60 gerações. A rápida convergência do método pode estar associada a topologia da função objetivo, a qual, por ser suave e convexa (ver Fig. 9 e 10), não apresenta mínimos locais que poderiam prejudicar a convergência do algoritmo. Em se tratando da Fig. 12b, o gráfico apresenta a minimização da função objetivo (Custo) ao longo do processo de convergência do PSO, flutuação esta que caracteriza a minimização da função objetivo (Custo) ao longo das iterações, isto é, ao analisar a Eq. (10) observa-se que: quanto menor o valor da dimensão p_x , menor a distância a_1 , o que consequentemente diminuirá a altura da placa de ligação (h_{ep}), conforme a Eq. (12). A redução da altura da placa, para um mesmo valor de espessura e largura, provocará a diminuição da sua massa e custos associados ao aço e montagem da ligação com placa de extremidade estendida, conforme as Eqs. (18) e (21). O diâmetro do parafuso (d) teve um aumento durante as iterações, o que aumenta o custo associado ao peso dos parafusos, conforme a Eq. (19), porém esse valor é insignificante frente aos outros custos apresentados. Sendo assim, a redução dos referidos custos devido à diminuição no valor da variável de projeto p_x , justifica a minimização do custo total da ligação durante o processo de convergência. Já os gráficos das Fig. 13a e Fig. 13b mostram o comportamento das restrições geométricas, de montagem, de momento fletor e rigidez rotacional ao longo das iterações. Nesses gráficos, atendendo às Eqs. (23) a (24), a restrição está violada nos pontos dos referidos gráficos com valores inferiores a um. Sendo assim, pode-se observar que apenas as duas primeiras iterações do algoritmo produziram soluções com restrição de momento fletor violada (Fig. 13b). Entretanto, a partir da terceira iteração até a convergência do PSO, todas as soluções ótimas pertencem ao domínio de segurança do problema, localizadas nas fronteiras das restrições geométricas ($1,2d_0/e_x$), montagem

(m/a_2) e momento ($M_{j,Rd}/M_{j,Ed}$). Com a variação das variáveis de projeto na Fig. 12b, pode-se analisar nas Fig. 13a e Fig. 13b a flutuação das restrições, e o conseqüente valor da função custo na Fig. 12a. Na iteração 41, por exemplo, observa-se na Fig. 13b, uma queda no valor da restrição de momento fletor. O que justifica essa variação é uma diminuição no valor da variável de projeto e , conforme Fig. 12b. A redução dessa dimensão provoca um aumento na distância entre centro w e, quanto menor a distância entre o centro do furo e a borda lateral da chapa de ligação (dimensão e), menor a área resistente ao momento fletor, tornando-a uma região crítica. Por fim, pode-se observar nos gráficos da Fig. 13 que a solução ótima obtida pelo PSO ao término do processo de otimização não apresenta nenhuma restrição ativa, assegurando a montagem, fabricação e resistência do projeto proposto pela implementação realizada neste trabalho.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um método capaz de obter os parâmetros geométricos ótimos das ligações entre viga e coluna com placa de extremidade estendida, obtendo o menor custo possível, utilizando o algoritmo de otimização por enxame de partículas integrado à metodologia para dimensionamento de ligações proposta pela Eurocode 3 Parte 1-8 (2005). Para tanto, inicialmente, implementou-se as formulações propostas pelo Eurocode 3 Parte 1-8 (2005), as quais permitiram estimar a resistência mecânica da ligação em termos do momento fletor e rigidez rotacional sob a influência de vários aspectos previsto na referida Norma. Posteriormente, foi formulado o problema e otimização da ligação com placa de extremidade estendida, onde definiu-se as variáveis de projeto, restrições e função objetivo. As variáveis de projeto envolveram os parâmetros geométricos da ligação, os quais descrevem o projeto completo da ligação. As restrições foram modeladas quanto ao momento fletor resistente, rigidez rotacional, montagem e fabricação previstas pela Eurocode 3 Parte 1-8 (2005). A função objetivo foi construída em termos dos custos associados à ligação, conforme procedimento apresentado por Díaz (2010).

Para testar e validar a implementação desenvolvida, os algoritmos foram aplicados ao problema de otimização investigado por Díaz (2010). Inicialmente, realizou-se a análise do comportamento da função objetivo, frente a variabilidade de algumas variáveis de projeto. Os resultados demonstraram que as restrições provocam uma suave flutuação na topologia da função objetivo, sem a formação de mínimos locais, o que favoreceu ao método de otimização encontrar o mínimo global da função. Além disso, observou-se que na combinação diâmetro do parafuso \times espessura da placa, as restrições geométricas são ativadas quando tem-se altos valores de diâmetro dos parafusos juntamente com altas espessura de chapa, enquanto para baixos valores de diâmetro dos parafusos, as restrições de momento fletor são ativadas. Já para a combinação diâmetro do parafuso \times distância p_x , as restrições de momento fletor e rigidez rotacional delimitam os contornos do domínio de segurança da função objetivo para altos valores de p_x . Na otimização, os resultados obtidos pelo algoritmo PSO se aproximaram dos valores apresentados pelo autor referenciado, sustentando maior segurança quanto à implementação desenvolvida. Com a interpretação gráfica do processo evolutivo de convergência do PSO, pôde-se observar que o algoritmo encontrou o valor mínimo da função custo de forma rápida, respeitando as restrições impostas pela Eurocode 3 Parte 1-8 (2005) à função objetivo, garantindo assim que a solução pertence ao domínio de segurança do problema de otimização abordado. Além disso, pode-se afirmar que os valores das variáveis de projeto obtidas pelo algoritmo implementado contemplam o projeto ótimo da ligação com placa de extremidade estendida, garantido o equilíbrio entre custo e as características de montagem/resistência mecânica da ligação.

Por fim, pode-se concluir que o presente trabalho demonstrou o potencial da otimização estrutural quando aplicada à otimização de ligações entre viga e coluna com placa de extremidade estendida, obtendo o custo mínimo dessas, para incorporar ao custo total de estruturas metálicas.

6. REFERÊNCIAS

- AISC/360-10, 2010. Specification for structural steel buildings. American Institute of Steel Construction, Chicago.
- Aydın, A.C., Kılıça, M., Maali, M. and Sagiroglu, M., 2015. “Experimental assessment of the semi-rigid connections behavior with angles and stiffeners”. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 114, pp. 338 – 348. doi:10.1016/j.jcsr.2015.08.017. URL <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.08.017>.
- Batho, C. and Rowan, HC. (1931). Investigation on beam and stanchion connections. Report of the Steel Structures Committee of the Division of Scientific and Industrial Research, 1 and 2, 1931-1934.
- Cabrero J.M., Bayo E., (2005). Development of Practical Design Methods for Steel Structures with Semirigid Connections. *Eng Struct*, 27:1125–1137.
- Cho HN, Park JB. Optimum design of beam-to-column connections in steel frame-works. Proc. of Korea–Japan Joint Seminar of Structural Optimization, Seoul, Korea; 1992.
- Da Silva Hortencio and Falcón. Optimal design of beam-column connections of plane steel frames using the component method. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2017.
- Díaz, C., Victoria, M., Querin, O.M. and Martí, P., 2012. “Optimum design of semi-rigid connections using metamodels”. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 78, pp. 97 – 106.

- Díaz, C., 2010. Diseño óptimo de uniones semirrígidas mediante simulación numérica y modelos de kriging. Tesis doctoral, universidad politécnica de cartagena departamento de estructuras y construcción.
- EN1993-1-8, 2005. Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints. European Union Per Regulation.
- Faella, C; Piluso, V e Rizzano, G., (2000). Structural Steel Semi-rigid Connections: Theory, Design and Software. 536 p., CRC Publisher, Boca Raton - Florida.
- Falcón, G.A.S, Montrull, P.M. (2014). Optimum Dimensioning of semi-rigid connections of Steel frame - "Auxiliary Frame" Model. XXXV Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, 22 p.
- Hasançebi, O. (2017). Cost efficiency analyses of steel frameworks for economical design of multi-storey buildings. Journal of Constructional Steel Research, 128: 380-396.
- Hassan, J., Iyengar, B., Scantlebury, N., Rodriguez Moncalvo, V., Campos, A.R. (2005). Photic input pathways that mediate the Drosophila larval response to light and circadian rhythmicity are developmentally related but functionally distinct. J. Comp. Neurol. 481(3): 266--275.
- Hayalioglu, M. S., Degertekin, S. O., (2005). Minimum Cost Design of Steel Frames with Semi-rigid Connections and Column Bases via Genetic Optimization. Computers & Structures, 83 (2005) 1849–1863.
- Johnston, B., Mount, E. Analysis of building frames with semi-rigid connections. Transactions of American Society of Civil Engineers, 107, 1942.
- Kameshki ES, Saka MP. Optimum design of nonlinear steel frames with semi-rigid connections using a genetic algorithm. Comput Struct 2001;79:1593–604.
- Kameshki ES, Saka MP. Genetic algorithm based optimum design of nonlinear planar steel frames with various semi-rigid connections. J Construct Steel Res 2003;59: 109–34.
- Kennedy, J. and Eberhart, R., 1995. "Particles swarm optimization". Neural Networks, IEEE International Conference on Proceedings, Vol. 4, pp. 1942 – 1948. doi:10.1109/ICNN.1995.488968. URL <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>
- Li T.Q., Choo B.S. & Nethercot D. A.. *Connection Element for the Analysis of Semi-Rigid Frames*. J. Construct. Steel Research, 32, Nottingham, 1995.
- Monforton, G.R. y Wu, T.S. Matrix analysis of semi-rigidly connected frames, Journal of Structural Engineering, ASCE, 89 (ST6), 3713–3742, 1963.
- NBR-8800, 2008. Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios - procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Nethercot, D. A. Joint action and the design of steel frames, Journal of the Institution of Structural Engineers, Part A Design and Construction, 63A, 271-279, 1985.
- Pavlovčič L, Krajnc A, Beg D. Cost function analysis in the structural optimization of steel frames. Struct Multi Optim 2004.
- Pinho, Fernando Ottoboni. Quando construir em aço? Roteiro para escolha do sistema estrutural mais adequado. Revista Engenharia, 2007.
- Romano, V.P. Dimensionamento de Ligações Viga-Coluna com Chapa de Topo: Modelo Eurocode 3. Dissertação, Universidade Federal de Ouro Preto, 2001.
- Simões LMC. Optimization of frames with semi-rigid connections. Comput Struct 1996.
- Sourochnikoff, B. Wind stresses in semirigid connections of steel framework, Transactions, ASCE, 115, 382, 1950.
- UNE-ENV 1090:1996, Ejecución de Estructuras de Acero. Parte 1-1: Reglas Generales y Reglas para la Edificación, 1997.
- UNE-ENV 1993-1-1:1992, Eurocódigo 3: Proyecto de Estructuras de Acero. Parte 1-1: Reglas Generales y Reglas para Edificios, 1996.
- Xu L, Grierson DE (1993) Computer automated design of semi-rigid steel frameworks. J Struct Eng-ASCE 119:1740–1760.

ABSTRACT

Matheus Romeiro Deves, matheusdeves7@hotmail.com¹
Adelano Esposito, adelano.esposito@farroupilha.ifrs.edu.br¹

¹ Federal Institute of Education, Science and Technology of Rio Grande do Sul - Farroupilha Campus, Avenida São Vicente, 785, Bairro Cinquentenário, CEP 95180-000, Farroupilha - RS.

Abstract: *Over the last few years, methods of structural analysis and rules for the design of beam and column connections in metal structures have been improved, in order to ensure a better degree of safety and precision in this design. However, such techniques require the sequential execution of various calculations, conditions, and*

combinations which, due to the present complexity, are often neglected in practice. In this scenario, the use of structural optimization methods represents an attractive alternative to deal with the innumerable possibilities in the optimum design of metallic connections, considering the rules and recommendations provided in standardized codes. Therefore, the purpose of this work is to implement a structural optimization method of beam and column connections with extended end plate, with a view to Eurocode 3 project rules, part 1-8 (2005). For this, the structural analysis of the connections was carried out initially, based on the method of the components, to obtain the resistant bending moment and the permissible rotational stiffness. Next, the structural analysis code was incorporated into the constraints of assembly, fabrication, mechanical strength and rotational stiffness of the bond. At the end of the numerical implementation, the structural analysis code and restrictions to the particle swarm optimization algorithm (PSO) were coupled. The developed algorithms were applied in a case of literature, typical to occur in practice. The results were investigated under two aspects: graphical analysis of the objective function, for the combination of two design variables and optimal solution obtained for six design variables. The graphical analysis revealed that the objective function is smooth and convex, facilitating the convergence of the optimization algorithm. In the case of the optimum solution, this was close to that found by the referenced author, assuring the quality of the results and potentializing the use of this implementation for the optimal dimensioning of connections with extended end plate.

Keywords: *Structural analysis, metallic connections, extended end plate, structural optimization, particle swarm optimization.*