



Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2025**
10º Congresso Latino-americano da Construção Metálica
09 de Setembro de 2025, São Paulo - SP, Brasil

Tema: Ligações: concepção, projeto e elementos de fixação

BANCO DE DADOS DE LIGAÇÕES VIGA-COLUNA PARA DIMENSIONAMENTO ÓTIMO DE PÓRTICOS PLANOS

José Carlos da Silva Gama Júnior¹

Gines Arturo Santos Falcón²

Resumo

O presente artigo apresenta a implementação computacional de um banco de dados de ligações viga-coluna exequíveis denominado BDD_LSR, uma ferramenta para auxílio computacional no dimensionamento otimizado de pórticos de aço considerando ligações de chapa de extremidade estendida semirrígidas. Observa-se que, no projeto de pórticos de aço considerando o comportamento semirrígido das ligações viga-coluna, há um alto custo computacional, principalmente no que tange ao detalhamento das componentes das ligações utilizando algoritmos evolucionistas, em particular os algoritmos genéticos. As combinações possíveis entre as componentes de ligações viga-coluna, como perfis estruturais, chapas, e diâmetros dos parafusos, são inúmeras. Nesse contexto, a BDD_LSR disponibiliza de forma automatizada as características mecânicas principais das ligações viga-coluna a partir das componentes disponíveis no mercado local. O cálculo do comportamento mecânico das ligações momento fletor resistente da ligação e grau de rigidez rotacional das ligações está baseado no Método das Componentes, que considera o comportamento semirrígido das ligações. Assim, o BDD_LSR possibilita a identificação das componentes para os perfis estruturais de vigas e colunas, garantindo que atendam aos graus de rigidez e momentos resistentes exigidos no projeto de pórticos de aço. Os principais resultados mostram uma redução do custo computacional na obtenção de pórticos de aço mecanicamente eficientes.

Palavras-chave: Ligação Viga-coluna; Pórticos de Aço; Banco de Dados; Ligações Semirrígidas

DATABASE OF BEAM-COLUMN CONNECTIONS FOR OPTIMAL DESIGN OF PLANE STEEL FRAMES

Abstract

This article presents the computational implementation of a database for feasible beam-to-column connections, called BDD_LSR, a tool to aid in the computational optimization of steel frame design considering semi-rigid extended endplate connections. It is observed that, in the design of steel frames considering the semi-rigid behavior of beam-to-column connections, there is a high computational cost, especially regarding the detailing of connection components using evolutionary algorithms, particularly genetic algorithms. The possible combinations of beam-to-column connection components, such as structural profiles, plates, and bolt diameters, are numerous. In this context, BDD_LSR provides automated Access to the main mechanical characteristics of beam-to-column connections based on

components available in the local market. The calculation of the mechanical behavior of the connections, including the moment resistance and rotational stiffness, is based on the Component Method, which considers the semi-rigid behavior of the connections. Thus, BDD_LSR allows for the identification of components for structural profiles of beams and columns, ensuring that they meet the required stiffness and moment resistance for the design of steel frames. The main results show a reduction in computational cost for obtaining mechanically efficient steel frames.

Keywords: Beam-Column Connection, Database, Steel Frames, Semi-rigid Connections

¹ Engenheiro Civil, Especialista, Discente, Laboratório de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes – RJ, Brasil.

² Engenheiro Mecânico, Doutor, Docente, Laboratório de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes – RJ, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A análise e o dimensionamento de ligações viga-coluna em pórticos de aço são etapas indispensáveis no projeto de edifícios de aço, uma vez que estas garantem a continuidade estrutural e a transmissão adequada de esforços entre os componentes estruturais. Dentre as diversas tipologias, as ligações de chapa de extremidade estendida são frequentemente utilizadas devido à sua versatilidade no ajuste da rigidez rotacional, podendo se adequar a condições rígidas, semirrígidas ou flexíveis dependendo da magnitude das cargas e das exigências de rigidez rotacional do projeto.

No contexto do dimensionamento ótimo de pórticos metálicos com algoritmos evolucionistas, um dos principais desafios é a necessidade de realizar um número elevado de cálculos repetitivos dos parâmetros estruturais, como o momento resistente e a rigidez rotacional inicial das ligações viga-coluna. Tais cálculos, quando realizados a cada iteração do algoritmo, tornam o processo de otimização custoso em termos de tempo computacional, devido ao elevado número de operações e à necessidade de reprocessamento dos parâmetros estruturais a cada ciclo.

Para superar esse problema, este artigo propõe a implementação de um sistema automatizado que armazena os resultados desses cálculos em um banco de dados, permitindo que os valores sejam reutilizados sem a necessidade de repetição a cada iteração. Isso acelera o processo de otimização e reduz o custo computacional, pois o acesso aos resultados previamente calculados é direto e imediato, sem a necessidade de recálculo constante. O sistema desenvolvido facilita o processo de análise estrutural, permitindo a configuração de parâmetros como o tipo de ligação, materiais, perfis e coeficientes de segurança, de acordo com a norma EN 1993-1-8 [1].

O banco de dados foi construído a partir de diversas combinações de perfis de vigas e colunas, espessuras de chapas e parafusos, todos disponíveis no mercado local e selecionados para atender critérios construtivos e normativos. Além disso, a integração dos dados em uma tabela organizada facilita a interpretação dos resultados, tornando o processo de projeto mais eficiente e menos propenso a erros.

2 LIGAÇÕES VIGA-COLUNA

No contexto das ligações entre vigas e colunas, um conjunto de forças transmitidas engloba forças axiais e de cisalhamento, momentos fletores e torção, sendo que esta última pode ser desconsiderada em análises de estruturas planas. Na maioria das ligações, os deslocamentos resultantes das forças axiais e de cisalhamento tendem a ser pequenos em comparação com os deslocamentos rotacionais. Como resultado, nos estudos sobre ligações, apenas as rotações são, em geral, consideradas para fins práticos [2]

Na Figura 1, o ângulo θ_r , como representa a rotação relativa ocorrida na viga em relação ao pilar após a aplicação de um momento fletor M .

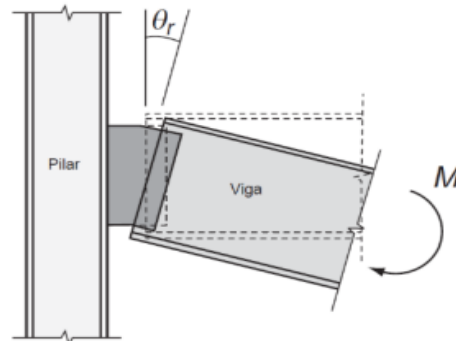


Figura 1 - Rotação θ_r da ligação pela ação de um momento fletor M (Adaptado de CHEN *et al*, 2011)

O comportamento das ligações ao serem submetidas à flexão pode ser ilustrado por meio de gráficos de momento-rotação ($M-\theta_r$). A Figura 1 apresenta a maneira como a ligação, varia em resposta à aplicação do momento fletor (M).

Representa-se a resistência das ligações viga-coluna por uma curva que vincula o momento aplicado à rotação, sendo esse um dos dados para a análise estrutural de uma ligação semirrígida. A análise estrutural de uma ligação pode ser representada como uma mola rotacional que conecta a linha média dos membros, considerando três propriedades fundamentais: momento resistente, rigidez rotacional e capacidade de rotação, tal como ilustrado na Figura 2.

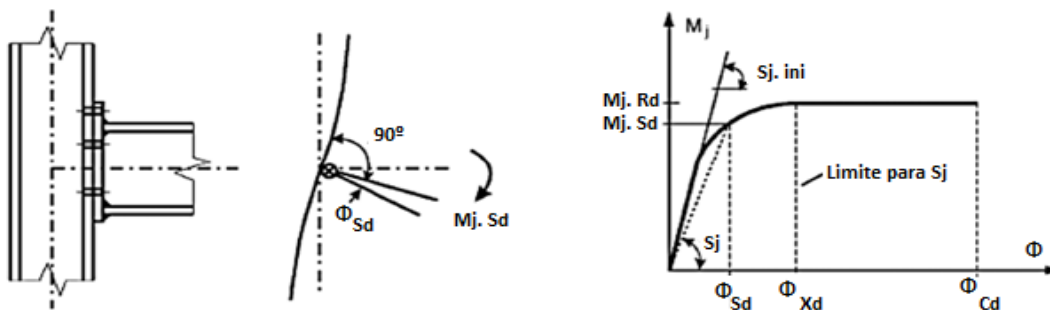


Figura 2 - Comportamento da ligação (CEN, 2005)

Onde $M_{j,Rd}$ é o momento resistente da ligação, $M_{j,Sd}$ é o momento solicitante da ligação, S_j o coeficiente de rigidez secante, Φ_{Sd} representa a rotação inicial da ligação, Φ_{Xd} é a rotação da ligação, e Φ_{Cd} é a capacidade rotacional.

Em conformidade com as prescrições do Eurocode 3 [1], no âmbito da análise estrutural de ligações, quando o valor de $M_{j,Sd}$ excede dois terços de $M_{j,Rd}$, recomenda-se a adoção da rigidez secante da ligação (S_j). Em situações opostas, nas quais $M_{j,Sd}$ não ultrapassa o limite de dois terços de $M_{j,Ed}$, sugere-se a utilização da rigidez inicial da ligação ($S_{j,ini}$). Via de regra, o primeiro cenário relaciona-se com os ELUs, e o segundo com o ELS. Convém notar que a rigidez inicial ($S_{j,ini}$) da ligação associa-se à inclinação elástica na curva momento-rotação da ligação, conforme abordado por Faella C, Piluso V, Rizzano G [3] e Hortencio RS, Falcón GAS [4].

Na Figura 3 - Comportamento da rotação relativa conforme a ação do momento nas ligações (Adaptado de CHEN et al 2011), se exhibe a diversidade de curvas possíveis, com grau de rigidez rotacional variando de flexíveis a rígidos, de acordo com a topologia da ligação viga-coluna, organizadas conforme sua capacidade resistente ao momento fletor (M) em função da rotação (θ). A curva ilustra, de forma comparativa, a rigidez e resistência de cada modelo de ligação, desde as mais flexíveis, como a cantoneira simples de alma, até as mais rígidas e resistentes, como o modelo T-STUB.

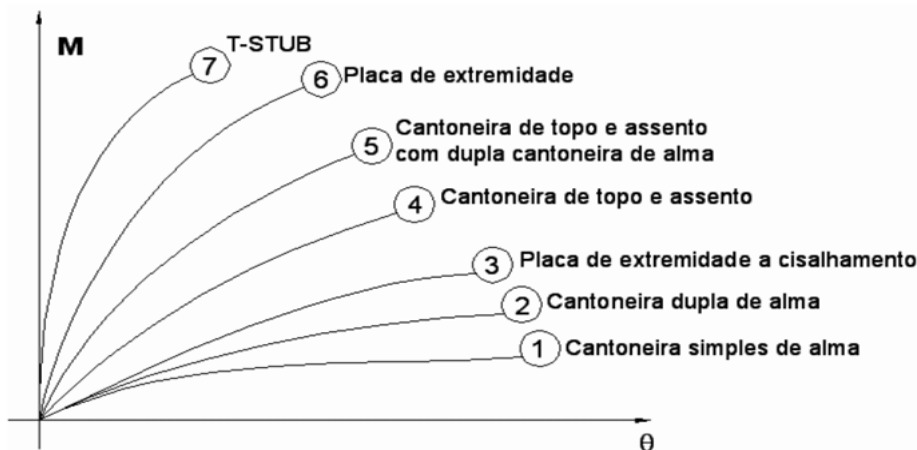


Figura 3 - Comportamento da rotação relativa conforme a ação do momento nas ligações (Adaptado de CHEN et al 2011).

Na Figura 3 observa-se o caráter semirrígido das ligações com placas de extremidade, sendo a espessura da placa e o diâmetro dos parafusos os parâmetros que mais influenciam na definição do grau de rigidez rotacional e do momento resistente da ligação.

2.1 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ligações de chapa de extremidade estendida são utilizadas em estruturas metálicas em razão da simplicidade de sua fabricação e montagem, mas sua eficiência depende diretamente de certos parâmetros geométricos. A Figura 1 - Parâmetros geométricos de uma ligação viga-coluna com chapa de extremidade (DÍAZ, 2010), ilustra detalhadamente os parâmetros geométricos de uma ligação viga-coluna com chapa de extremidade estendida, configurada por três linhas de parafusos.

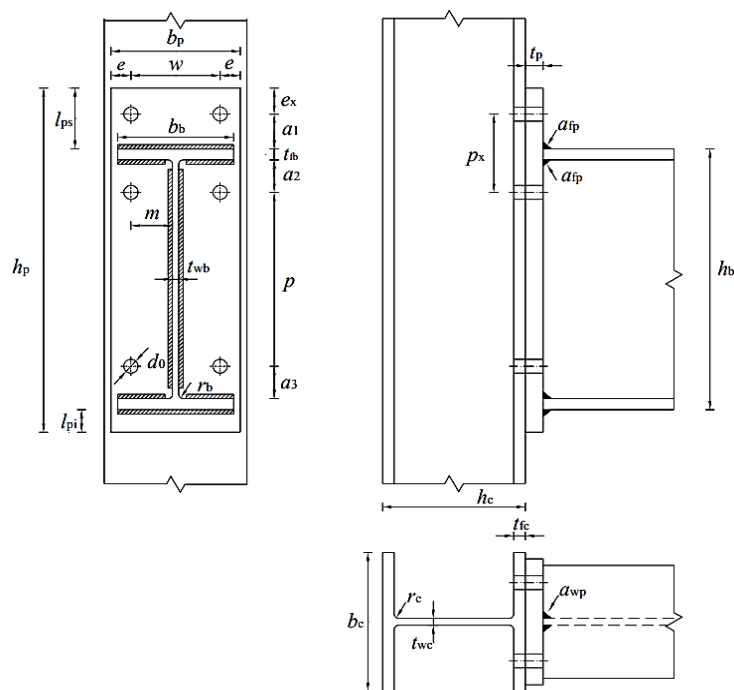


Figura 1 - Parâmetros geométricos de uma ligação viga-coluna com chapa de extremidade (DÍAZ, 2010)

No Quadro 1, encontram-se alguns parâmetros geométricos da ligação, que compõem a configuração da chapa de extremidade e a disposição dos parafusos.

Quadro 1 – Parâmetros geométricos (CEN, 2005)

Parâmetro	Descrição	Expressão
e	Distância horizontal da borda da chapa ao furo	$e = 1,5 * d_0$
w	Distância entre os eixos dos furos nas extremidades	$w = b_p - 1 * (e * 2)$
p	Espaçamento vertical entre filas de parafusos (2-3)	$p = h_b - 2 * (t_{fb} + (2^5) * a_{wp} + m)$
p_x	Espaçamento vertical entre filas de parafusos (1-2)	$p_x = 1,8 * a_{wp} * (2^5) + 2 * m + t_{fb}$
e_x	Distância da primeira fila de parafusos ao topo da chapa	$e_x = 1,5 * d_0$
b_p	Largura da chapa de extremidade	$b_p = \max(b_{fb}, b_{fc})$
h_p	Altura da chapa de extremidade	$h_p = l_p + h_b + l_{pi}$
a_{fp}	Espessura da garganta de solda nas mesas	$a_{fp} = 0,7 * \min(t_{fb}, t_p)$
a_{wp}	Espessura da garganta de solda na alma	$a_{wp} = 0,6 * d_0$

Entre os parâmetros que mais influenciam o custo da ligação, destacam-se: a largura da chapa de extremidade (b_p), o espaçamento vertical entre filas de parafusos (p e p_x), e a distância da primeira fila de parafusos ao topo da chapa (e_x). Esses parâmetros dialogam diretamente com o cálculo do momento resistente e da rigidez inicial da ligação. Além disso, a maioria dessas variáveis é função do diâmetro do parafuso e da espessura da chapa, o que evidencia a relevância desses dois elementos no processo de dimensionamento.

Com base nesses parâmetros geométricos, o estudo seguiu os preceitos descritos na subseção 2.2 para cálculo do comportamento mecânico de ligações de chapa de extremidade estendida.

2.2 MÉTODOS DAS COMPONENTES

O Método das Componentes é um enfoque mecânico-analítico que consiste em dividir uma ligação em uma série de elementos de molas (componentes), cada um com sua capacidade de resistência e rigidez a tração, compressão e cisalhamento. Isso permite prever o comportamento da ligação com respaldo nas características geométricas e mecânicas de cada componente.

O Eurocode 3 (CEN, 2005) [1] estabelece 20 componentes básicos presentes no projeto de ligações em estruturas de aço. Na Figura 2 é possível identificar oito deles, os quais formam uma ligação que envolve chapa de extremidade estendida.

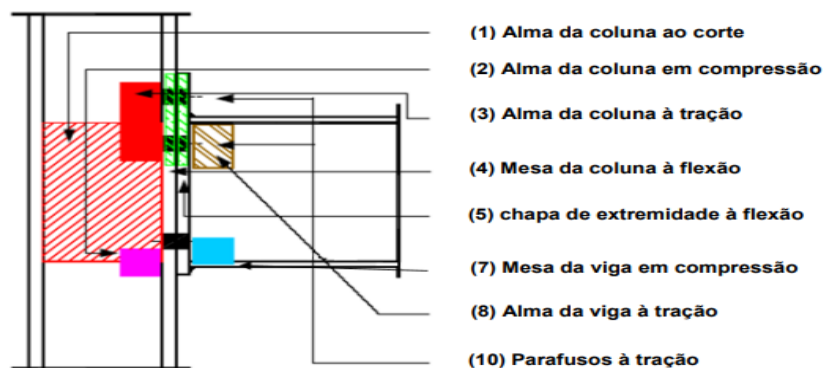


Figura 2 – Componentes de uma ligação com chapa de extremidade (LIMA, 2003)

Conforme observado na Figura 2, para ligações que envolvem chapa de extremidade estendida, os principais componentes estão catalogados no Quadro 2, de acordo com as zonas de tração, compressão e cisalhamento a que estão submetidos.

Quadro 2 – Componentes e Zonas da ligação de chapa de extremidade estendida

Zona	Componente
Cisalhamento	componente 1: alma da coluna submetida a cisalhamento;
	componente 3: alma da coluna sob tração;
Tração	componente 4: mesa da coluna sob flexão;
	componente 5: chapa de extremidade sob flexão;
	componente 8: alma da viga sob tração;
	componente 10: parafusos sob tração;
Comprimida	componente 2: alma da coluna sob compressão;
	componente 7: mesa e alma da viga sob compressão.

Entre os componentes presentes na Figura 2, alguns são sensíveis ao número de linhas de parafusos e à localização delas, a exemplo da alma da coluna sob tração, da mesa da coluna sob flexão, da chapa de extremidade sob flexão, da alma da viga sob tração e dos próprios parafusos sob tração. A avaliação dessas contribuições deve ser feita de maneira individual para cada linha de parafusos, bem como a interação entre as diferentes linhas de parafusos, tratando-as como uma fila coesa de elementos de fixação.

Com as componentes identificadas, pode-se calcular o coeficiente de rigidez correspondente a cada uma, permitindo a construção de um sistema de molas, conforme ilustrado na Figura 3, que simula o comportamento real com alta precisão.

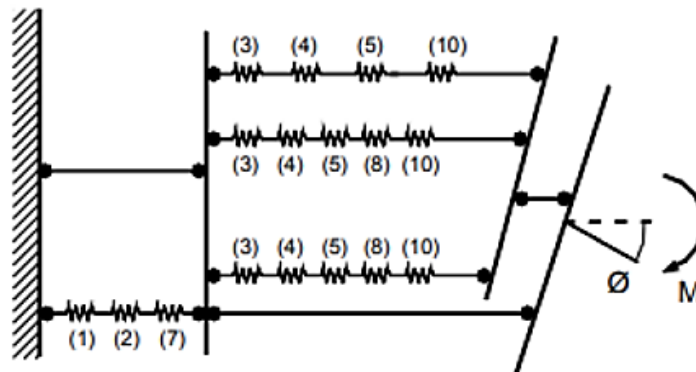


Figura 3 - Componentes da ligação representado em molas (LIMA, 2003)

Para determinar a rigidez rotacional das ligações viga-pilar parafusadas com chapa de extremidade, a norma EM 1993-1-8 [1] propõe o cálculo dos coeficientes de rigidez das componentes (1), (2), (3), (4), (5) e (10), conforme ilustrado na Figura 3. A metodologia para o cálculo desses coeficientes foi detalhada no Quadro 3.

Quadro 3 - Cálculos das Componentes (Díaz, 2010)

Componente	Equação	Descrição
ALMA DA COLUNA AO CORTE (COMPONENTE 1)	$K_1 = 0,38 \frac{A_{vc}}{\beta z}$	A_{vc} representa a área de corte de escoamento da alma da coluna, β é parâmetro de transformação e z representa a distância até o centro de compressão.
ALMA DA COLUNA A COMPRESSÃO (COMPONENTE 2)	$K_2 = \frac{0,70 \cdot b_{eff,c,wc} t_{wc}}{d_c}$	Sendo $b_{eff,c,wc}$ refere-se à largura efetiva à compressão da coluna, d_c representa a profundidade da alma da coluna e t_{wc} é a largura da alma da viga
ALMA DA COLUNA A TRAÇÃO (COMPONENTE 3)	$K_3 = \frac{0,7 \cdot b_{eff,c,wc} \cdot t_{wc}}{d_c}$	Sendo $b_{eff,c,wc}$ refere-se à largura efetiva à compressão da coluna, d_c representa a profundidade da alma da coluna e t_{wc} é a largura da alma da viga.
MESA DA COLUNA À FLEXÃO (COMPONENTE 4)	$K_4 = \frac{0,9 \cdot l_{eff} \cdot t_{fc}^3}{m^3}$	Em que l_{eff} representa o comprimento efetivo mínimo da fileira de parafusos, t_{fc} é a espessura da mesa da coluna e m refere-se a distância entre o eixo central do parafuso ao eixo central do raio de curvatura do pilar.
PLACA DE EXTREMIDADE À FLEXÃO (COMPONENTE 5)	$K_5 = \frac{0,9 \cdot l_{eff} \cdot t_p^3}{m^3}$	Onde t_p representa a espessura da placa de extremidade onde os parafusos estão fixados.
PARAFUSOS À TRAÇÃO (COMPONENTE 10)	$K_{10} = \frac{1,6 \cdot A_s}{L_b}$	Sendo A_s a área da seção transversal do parafuso e L_b a dimensão resultante da soma da distância total entra a cabeça e a porca do parafuso, acrescida de metade da espessura da cabeça e da porca.

2.2.7 RIGIDEZ DE LIGAÇÕES SEMIRRÍGIDAS

A determinação da rigidez de ligações semirrígidas envolve a combinação das rigidezes das componentes estruturais, organizadas inicialmente em série e posteriormente em paralelo, conforme ilustrado na Figura 6. A norma EN 1993-1-8 [1] estabelece a formulação da rigidez rotacional de uma ligação parafusada com chapa estendida e múltiplas fileiras de parafusos, especificada pela Equação (1). Para calcular a rigidez total da ligação, deve-se considerar os coeficientes de rigidez das diversas componentes, cujas expressões foram detalhadas nas subseções anteriores. A Equação utilizada para determinar a rigidez rotacional (S_j) da ligação contempla a contribuição de cada componente individual, conforme descrito nas Equações (1), (2), (3) e (4). Essas equações incorporam as interações entre os diferentes elementos da ligação e as linhas de parafusos, garantindo uma análise abrangente e precisa.

$$S_j = \frac{EZ^2}{\mu \left(\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_{eq}} \right)} \quad (1)$$

Em que:

$$K_{eq} = \frac{\sum_r k_{eff,r} h_r}{z_{eq}} \quad (2)$$

Onde h_r é a distância entre a linha r de parafusos e o centro da zona comprimida, z_{eq} é o braço de alavanca equivalente, determinado de acordo com a Equação (12), $ek_{eff,r}$ é o coeficiente de rigidez efetiva da fileira r de parafusos, determinado conforme a Equação (13)

$$z_{eq} = \frac{\sum_r k_{eff,r} h_r^2}{\sum_r k_{eff,r} h_r} \quad (3)$$

$$k_{eff,r} = \frac{1}{\sum_r \left(\frac{1}{K_{3,r}} + \frac{1}{K_{4,r}} + \frac{1}{K_{5,r}} + \frac{1}{K_{10,r}} \right)} \quad (4)$$

Os valores de $K_{3,r}$, $K_{4,r}$, $K_{5,r}$ e $K_{10,r}$ correspondem, respectivamente, aos valores de K_3 , K_4 , K_5 e K_{10} para a fileira r de parafusos.

2.2.8 MOMENTO RESISTENTE DE LIGAÇÕES SEMIRRÍGIDAS

O momento resistente de cálculo ($M_{j,Rd}$) de uma ligação é obtido a partir das resistências das componentes individuais. Em uma ligação viga-coluna com chapa de extremidade estendida, o momento resistente é determinado pelo componente mais frágil, funcionando como uma “corrente”, onde a resistência depende do elo mais fraco. As filas de parafusos são numeradas a partir da mais distante do centro de compressão, conforme ilustrado na Figura 4.

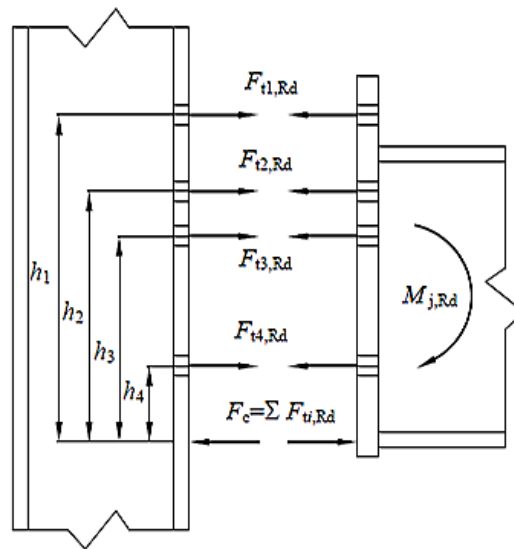


Figura 4 – Distribuição das forças atuando nas fileiras de parafusos (DÍAZ, 2010)

O momento resistente de cálculo é dado pela Equação (5).

$$M_{j,Rd} = \sum_r h_r * F_{tr,Rd} \quad (5)$$

Onde h_r é a distância da linha de parafusos até o centro de compressão, $F_{tr,Rd}$ é a resistência à tração de cada linha de parafuso (r), sendo r o número de linhas de parafusos da zona tracionada.

2.2.9 MÓDULO DE ANÁLISE DE LIGAÇÃO Calc_LSR_MC

O programa computacional Calc_LSR_MC[5] desenvolvido com base na norma EN 1993-1-8[1], foi utilizado para calcular a rigidez inicial de cada componente e a resistência de cada fileira de parafusos das ligações com chapa de extremidade estendida. O programa realiza uma análise iterativa de combinações possíveis, registrando os resultados em uma tabela, que é armazenada em planilha eletrônica e arquivo digital, possibilitando a visualização dos dados e os cálculos computacionais, que incluirá dados como M_{res} e S_{res} . No item 3 do terceiro capítulo, será apresentada uma tabela com os resultados gerados pelo programa, incluindo os dados do perfil viga, coluna, chapa e parafuso.

Para uma compreensão mais detalhada do funcionamento do algoritmo desenvolvido, são delineados a seguir, de maneira sequencial, as etapas do processo.

1. Inicialização

O processo inicia-se com a definição e inicialização das variáveis, incluindo aquelas relacionadas aos parâmetros de configuração, como tipos de ligação, materiais e coeficientes de segurança. Esta etapa assegura que o ambiente esteja adequadamente preparado para o carregamento das informações e a execução do algoritmo.

2. Carregamento dos dados do banco de dados

São carregadas as tabelas que contêm os perfis de vigas e colunas, as chapas, os parafusos e as configurações necessárias para a análise estrutural.

3. Criação da estrutura de armazenamento de dados

Uma variável denominada `BDD_LSR` é criada para armazenar os resultados obtidos nas combinações analisadas ao longo do processo.

4. Loop de combinações exequíveis

Um loop é iniciado para percorrer todas as combinações exequíveis entre os perfis estruturais de vigas e colunas.

- Para cada combinação, é acionada a função responsável por fornecer as propriedades dos perfis metálicos, tanto das vigas quanto das colunas.
- Verificam-se se as espessuras das chapas e diâmetros satisfazem os critérios de compatibilidade geométrica.

5. Cálculo estrutural das ligações

A função `Calc_LSR_MC` é executada, visando o cálculo do momento resistente ($M_{j,rd}$) e da rigidez rotacional inicial ($S_{j,ini}$) para cada tipo de ligação considerada no Quadro 3.

6. Armazenamento dos resultados

Os valores do momento resistente e da rigidez são armazenados na estrutura `BDD_LSR`.

7. Armazenamento final dos dados

Por fim, os resultados gerados são arquivados numa tabela (`BDD_LSR`) e salvos nos formatos Excel e digital para análises subsequentes.

- Assim, o arquivo `BDD_LSR` constitui um banco de dados de ligações viga-coluna (LVC's), considerando perfis de vigas e colunas, chapas de extremidade e parafusos.

2.2.10 RESTRIÇÕES CONSTRUTIVAS E CRITÉRIOS DE VERIFICAÇÃO

Antes da determinação da rigidez rotacional e do momento resistente das ligações, o módulo computacional Calc_LSR_MC realiza uma verificação detalhada das restrições construtivas relativas às

combinações geradas, assegurando a compatibilidade geométrica das dimensões dos elementos envolvidos. As verificações abrangem aspectos como espessuras das chapas, diâmetros dos parafusos e distâncias entre as fileiras de parafusos.

- 1. Largura da viga e da coluna:** A largura da viga não deve ser maior que a largura da coluna, de acordo com a relação:
 - Se $b_{fb} > b_{fc}$, onde b_{fb} é a largura da viga e b_{fc} é a largura da coluna, o cálculo é interrompido.
- 2. Distâncias verticais entre parafusos:** As distâncias entre os parafusos nas fileiras devem respeitar os seguintes critérios:
 - Se $p < 3d_p$ ou $p_x < 1,5d$, onde p é a distância vertical entre o parafuso 1 e 2, p_x é a distância entre o parafuso 2 e 3, e d é o diâmetro nominal do parafuso, o programa considera inválidas as distâncias e o cálculo é interrompido.
- 3. Espessura mínima da chapa:** A espessura da chapa deve ser superior a um valor mínimo para garantir que a ligação não tenha uma chapa excessivamente fina em combinação com parafusos robustos. Esse valor mínimo é calculado como:
 - $t_{p,min} = \frac{d_p}{3}$, onde d_p é o valor do diâmetro do parafuso e $t_{p,min}$ é a espessura mínima da chapa. Caso $t_p < t_{p,min}$, o programa interrompe o cálculo.
- 4. Espessura das chapas em relação à mesa da viga e da coluna:** A espessura da chapa deve ser maior ou igual às espessuras das mesas da viga e da coluna para garantir a compatibilidade construtiva entre os elementos:
 - Se $t_p < t_{fb}$ ou $t_p < t_{fc}$, onde t_{fb} e t_{fc} são as espessuras das mesas da viga e da coluna, respectivamente, o cálculo é interrompido, invalidando a configuração.

2.2.11 VALIDAÇÃO DO PROGRAMA CALC_LSR_MC

A validação dos resultados obtidos pelo programa Calc_LSR_MC - utilizado neste trabalho -foi realizada com base no modelo experimental T101.010, amplamente referenciado na literatura [6]. Este modelo foi inicialmente utilizado para estudar uma ligação viga-coluna com chapa de extremidade estendida parafusada, submetida a uma carga estática na extremidade da viga, como ilustrado na Figura . Os ensaios experimentais realizados consistiam no aumento progressivo da carga estática até o colapso da ligação ou até que o deslocamento máximo na extremidade da viga atingisse 200 mm. Para esses ensaios, foram empregados parafusos de alta resistência (classe 10.9) com protensão inicial.

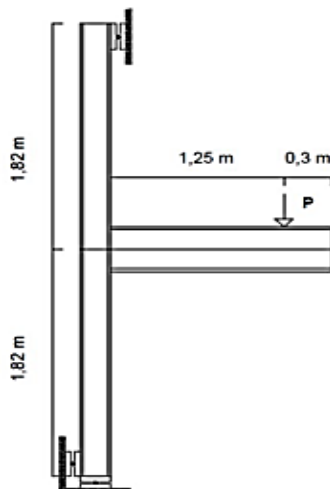


Figura 8 – Modelo Experimental T101.010 (JANSS *et al*,1987)

Ao longo do tempo o, modelo experimental T101.010 foi extensivamente utilizado por diversos autores, como Faella C, Piluso V, Rizzano G [3], Cabrero JM, Bayo E [7], Díaz C [8] e Hortencio RS, Falcón GAS [4], principalmente para validar resultados obtidos por meio de modelos numéricos. A Tabela 1 apresenta uma análise comparativa da rigidez rotacional inicial e do momento resistente da ligação viga-pilar do modelo T101.010, considerando os resultados do modelo JMRC proposto por Faella C, Piluso V, Rizzano G [3], do modelo EC3 de Díaz C [8] e do módulo de análise Calc_LSR_MC, utilizado neste trabalho.

Tabela 1 – Resultados do modelo T101.010

	JANSS	FAELLA	DÍAZ	Presente Trabalho
$S_{j,ini}$ (kn/m)	25316	20805	24181	23572,85
$S_{j,ini}$ (%)	107,4%	86,3%	102,6%	100%
$M_{j,Rd}$ (kn.m)	96,36	100,05	93,70	91,03
$M_{j,Rd}$ (%)	105,9%	109,9%	102,9%	100%

Observa-se que o Programa Calc_LSR_MC reproduziu valores de rigidez inicial e momento resistente da ligação dentro do esperado. A rigidez inicial encontrada foi o segundo menor valor entre os comparados, com uma diferença de 7,4% em relação ao maior valor, obtido por Janss J, Jaspart JP, Maquoi R. [6], e de 14,16% em relação ao menor valor, obtido por Faella C, Piluso V, Rizzano G [3]. O momento resistente apresentado pelo algoritmo foi o menor entre os observados, com uma diferença de até 9,9% em relação aos valores da literatura.

3. RESULTADOS

Foram utilizadas perfis e componentes disponíveis no mercado local e foram geradas 158787 ligações viga-coluna, combinações exequíveis de perfis de vigas e colunas, espessuras de chapas e diâmetros de parafusos. Para cada combinação possível, a análise das LVC considera quatro tipos de

configuração da ligação, que variam conforme a posição delas no pórtico, conforme o Quadro 4 e a Figura 9:

Quadro 4– Tipos e posições da LVC

Código	Descrição
V-CC (C)	Ligação viga-pilar, contínuo, a uma face
V-CF (A)	Ligação viga-pilar, extremo, a uma face
2V-CC (D)	Ligação viga-pilar, contínuo, a duas faces
2V-CF (B)	Ligação viga-pilar, extremo, a duas faces

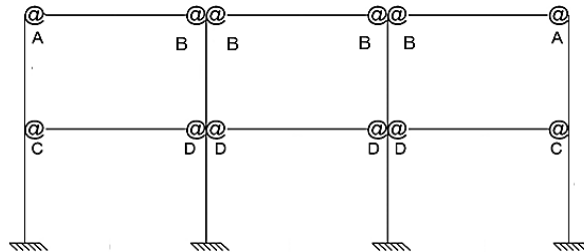


Figura 9 – Pórtico de 2 andares e 3 vãos (adaptado de CABRERO & BAYO, 2005)

Após a execução do código para a criação do banco de dados de combinações de chapas, parafusos e perfis de vigas e colunas. A maneira de exemplo, alguns resultados obtidos para cálculo os momentos resistentes ($M_{j,rd}$) e as rigidezes rotacionais iniciais ($S_{j,ini}$) para os tipos de ligações citados no Quadro 4, são apresentados nas Tabela 2 e 3.

Tabela 2 - Momento resistente ($M_{j,rd}$) das ligações viga-coluna

Viga	Coluna	d_p	t_p	$v - cc$	$v - cf$	$2v - cc$	$2v - cf$
W 150 x 13	W 150 x 22.5 (H)	12	8.0	12,38	7.90	12.39	7.90
W 150 x 13	W 150 x 22.5 (H)	16	8.0	15,90	9.91	15.91	9.91
W 150 x 13	W 150 x 22.5 (H)	20	8.0	17,91	12.50	17.92	12.50
W 150 x 13	W 150 x 22.5 (H)	22	8.0	19,46	14.77	19.46	14.77

Tabela 3 - Rigidez inicial ($S_{j,ini}$) das ligações viga-coluna

Viga	Coluna	d_p	t_p	$v - cc$	$v - cf$	$2v - cc$	$2v - cf$
W 150 x 13	W 150 x 22.5 (H)	12	8.0	1711.500	993.60	1954.51	1073.21
W 150 x 13	W 150 x 22.5 (H)	16	8.0	2119.730	1392.92	2520.47	1562.40
W 150 x 13	W 150 x 22.5 (H)	20	8.0	2632.117	1972.31	3303.27	2341.04
W 150 x 13	W 150 x 22.5 (H)	22	8.0	2831.851	2340.03	3635.84	2875.72

3.2 ÁBACOS DE DIMENSIONAMENTO

Adicionalmente, a ferramenta computacional desenvolvida possibilita a geração de ábacos para análise específica de determinadas configurações que podem surgir durante o processo de otimização, permitindo a estimativa preliminar da rigidez inicial e do momento resistente de ligações viga-coluna.

Esses ábacos auxiliam no projeto em fases iniciais, dispensando análises detalhadas. A maneira de exemplo, na Figura 10 apresenta-se um ábaco referente as vigas da série W 200 conectada ao pilar W 200 x 46.1 (H).

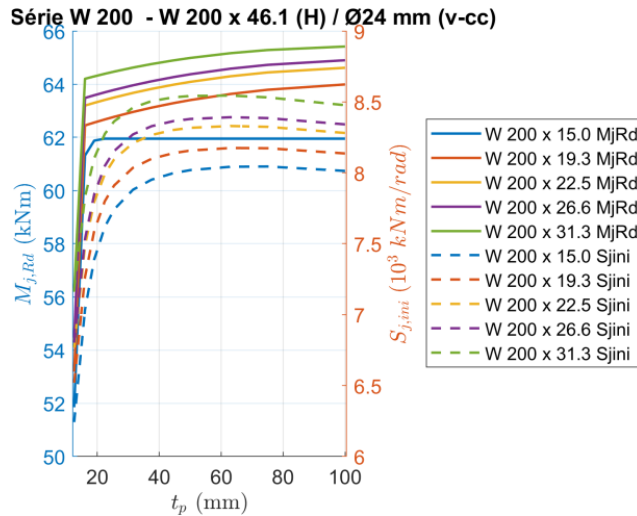


Figura 10- Ábaco de $M_{j,rd}$ e $S_{j,ini}$ para ligações W 200 / W 200x46.1 (H) com Ø24 mm (v-cc)

As curvas contínuas representam os valores de $M_{j,rd}$ (em kNm), enquanto as curvas tracejadas indicam os valores de $S_{j,ini}$ (em $10^3 kNm/rad$). Cada par de curvas está associado a uma combinação específica de viga-coluna, conforme indicado na legenda.

3.1 APLICAÇÕES UTILIZANDO O BANCO DE DADOS (BDD_LVC) NA OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL

Na aplicação do BDD_LVC no dimensionamento ótimo de pórticos de aço planos não contraventados, analisou-se um pórtico simples com um vão e dois pavimentos, composto por seis barras e quatro ligações entre vigas e colunas. A Figura 11 apresenta a geometria da estrutura, os carregamentos aplicados e a divisão dos elementos em grupos. Essa estrutura já foi objeto de estudo em trabalhos anteriores, como os de Simões [10] e Ferreira Júnior [11], dentre outros. Para fins de análise, os pilares e vigas foram agrupados em grupos, que utilizam os mesmos perfis estruturais, assim como também as rigidezes iniciais das ligações viga-coluna, agrupadas em grupos que utilizam as mesmas componentes (chapas de extremidade e parafusos). O processo de otimização estrutural foi conduzido por meio de um algoritmo genético, que, a cada iteração, buscava as melhores combinações de perfis e ligações com base em critérios normativos, construtivos, de desempenho mecânico e de minimização de custo.

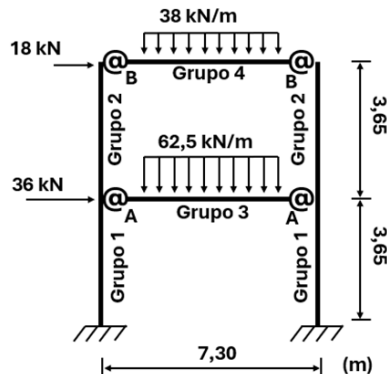


Figura 11 - Pórtico plano: 2 pavimentos e 1 vão, adaptado de Simões (1996)

Os resultados obtidos no presente trabalho foram comparados com aqueles apresentados em estudos anteriores, como os de Simões [10] e Ferreira Júnior [11]. A Tabela 4 e 5, apresenta os perfis estruturais obtidos em cada trabalho citado, juntamente com suas respectivas massas totais e equivalentes, permitindo uma avaliação preliminar dos resultados obtidos para os grupos otimizados.

Tabela 4 - Resultados ótimos dos perfis do pórtico de Simões 1996

Grupo	Simões (1996)	Ferreira (2018)	Presente Artigo (2025)
1	IPE 400	W 360 x 44,6	W 310 x 97,0 (H)
2	IPE 400	W 360 x 58,0	W 250 x 62,0 (H)
3	IPE 500	W 530 x 82,0	W 460 x 52,0
4	IPE 400	W 360 x 64,0	W 310 x 28,3
Massa Total (kg)	2114,1	1814,8	1746,9

Tabela 5 - Resultados dos componentes das ligações em mm

Autores	Grupo	t_p	d_p	Massa Equivalente (kg)
Simões (1996)	A	-	-	237,70
		-	-	
	B	-	-	
		-	-	
Ferreira (2018)	A	-	-	227,94
		-	-	
	B	-	-	
		-	-	
Presente Artigo (2025)	A	30	22,4	205,25
	B	19	33	

Importante destacar que os estudos de Simões [10] e Ferreira Júnior [11] apresentaram apenas os valores da massa equivalente das ligações, sem detalhar as dimensões das chapas e parafusos utilizados, enquanto este trabalho traz esses valores de forma explícita, permitindo uma compreensão mais detalhada dos componentes da ligação.

Para a obtenção dos resultados apresentados na Tabela 5, foi utilizado o banco de dados digital BDD_LVC ao longo das iterações do processo de otimização estrutural. A cada iteração do algoritmo genético, o programa acessava o BDD_LVC com o objetivo de identificar, dentre as combinações disponíveis, os conjuntos de chapas e parafusos mais adequados às características estruturais das vigas e colunas selecionadas. O critério de busca adotado considerou simultaneamente o momento solicitante e rigidez rotacional atuante na ligação, garantindo que os componentes escolhidos atendessem aos requisitos de desempenho mecânico. Com isso, reduziu-se significativamente o custo computacional do processo, o que resultou na diminuição do tempo total de execução da otimização da estrutura.

3.3 EXPORTAÇÃO E USO DOS DADOS

Os resultados foram armazenados em uma tabela que contém todas as combinações de perfis de vigas e colunas, espessuras de chapas, diâmetros de parafusos, momentos resistentes e rigidezes iniciais. O banco de dados pode ser exportado para um arquivo Excel, permitindo fácil acesso e análise adicional. Além disso, um arquivo digital foi salvo, disponibilizando o uso dos dados em futuras simulações ou estudos de otimização estrutural.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos neste trabalho mostram que os objetivos inicialmente propostos foram atingidos com sucesso. Em primeiro lugar, foi desenvolvido um banco de dados (BDD_LVC) que contém todas as combinações exequíveis de perfis de vigas e colunas, espessuras de chapas e diâmetros de parafusos, formando a base para a otimização estrutural. Esse banco de dados foi essencial para eliminar a necessidade de cálculos repetitivos, uma vez que os valores necessários para a análise das ligações viga-coluna estavam previamente armazenados.

Além disso, os resultados obtidos a partir dos cálculos das ligações viga-pilar foram analisados considerando as variáveis de espessura da chapa e diâmetro do parafuso, observou-se que à medida que essas variáveis aumentam, há um incremento significativo tanto no momento resistente ($M_{j,rd}$) quanto na rigidez inicial ($S_{j,ini}$) das ligações.

Nota-se, por meio dos ábacos, que o aumento da espessura da chapa (t_p) gera incrementos significativos em $M_{j,rd}$ e $S_{j,ini}$ apenas nas chapas mais finas, com estabilização progressiva a partir de 40 mm. Isso evidencia um limite a partir do qual o ganho estrutural torna-se pouco eficaz. Além disso, os valores de $M_{j,rd}$ e $S_{j,ini}$ de seções mais robustas, como W 200 x 31.3, confirma a sensibilidade desses parâmetros à geometria dos perfis envolvidos. Tais informações contribuem para decisões mais eficientes durante o pré-dimensionamento.

A verificação geométrica das combinações de vigas, colunas, chapas e parafusos indicou que a maioria das combinações atendem adequadamente às exigências construtivas estabelecidas. No entanto, algumas combinações, especialmente aquelas com chapas de espessura reduzida ou parafusos de diâmetro inferior, não cumpriram integralmente os critérios de compatibilidade geométrica, sendo,

portanto, descartadas. Tais restrições garantem que as dimensões dos elementos sejam adequadas para execução, prevenindo discrepâncias que possam comprometer a compatibilidade nas ligações entre os componentes.

No tocante à eficiência computacional, a utilização do BDD_LVC reduziu consideravelmente o tempo de execução do processo de otimização, uma vez que os cálculos não precisaram ser refeitos a cada iteração. O acesso direto aos dados do banco permitiu que o algoritmo genético selecionasse as melhores combinações de perfis e ligações de forma mais rápida, sem a necessidade de cálculos repetitivos para cada combinação.

Além disso, a redução da massa total das estruturas otimizadas foi de até 17% em relação aos modelos de referência, comprovando que o modelo não só melhorou a eficiência computacional, mas também gerou soluções estruturalmente mais leves e econômicas.

Dessa forma, conclui-se que a proposta metodológica é válida, podendo ser aplicada em diferentes contextos de projeto de estruturas metálicas. A ferramenta desenvolvida representa um avanço na automação do dimensionamento de pórticos com ligações semirrígidas e serve como base para estudos futuros.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPERJ, CAPES, e à UENF (Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro) pelo apoio financeiro e incentivo à realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

1. European Committee for Standardization (CEN). Design of steel structure. Part 1.1: general rules and rules for building. EN 1993-1-8, Eurocode 3. Brussels: CEN; 2005.
2. Chen WF, Lui EM. Stability design of steel frames. Boca Raton: CRC Press; 1991.
3. Faella C, Piluso V, Rizzano G. Structural steel semi-rigid connections: theory, design and software. Boca Raton: CRC; 2000.
4. Hortencio RS, Falcón GAS. Optimal design of beam-column connections of plane steel frames using the component method. Lat Am J Solids Struct. 2018;15(11):e68.
5. Falcón GAS, Montrull PM. Dimensionamento ótimo de ligações semirrígidas de pórticos de aço – modelo “pórtico auxiliar”. In: XXXV Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering; 2014; Fortaleza, CE. Fortaleza: [publicador não identificado]; 2014
6. Janss J, Jaspart JP, Maquoi R. Experimental study of the non-linear behaviour of beam-to-column bolted joints. In: Bjorhovde R, Brozzetti J, Colson A, editors. Connections in Steel Structures: Behaviour, strength & design. Elsevier Applied Science; 1987. p. 26-32.

7. Cabrero JM, Bayo E. Development of practical design methods for steel structures with semirigid connections. *EngStruct*. 2005;27:1125-37.
8. Díaz C. *Diseño óptimo uniones semirrígidas mediante simulación numérica y modelos kriging* [tese de doutorado]. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena; 2010.
9. Lima LRO. Comportamento de ligações com placa de extremidade em estruturas de aço submetidas a momento fletor e força axial [tese de doutorado]. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio; 2003.
10. Simões LMC. Optimization of frames with semi-rigid connections. *ComputStruct*. 1996;60:531–9.
11. Ferreira Júnior SS. Projeto ótimo de pórticos de aço com ligações semirrígidas utilizando algoritmos genéticos e elementos finitos híbridos [dissertação]. Campos dos Goytacazes: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF; 2018.
12. Chen WF, Kishi N, Komuro M. *Semi-rigid connections handbook*. Fort Lauderdale: J. Ross Publishing; 2011.