

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

VINÍCIUS DO NASCIMENTO STRACKE

ESTUDO DA RIGIDEZ DE LIGAÇÕES RÍGIDAS EM ESTRUTURAS METÁLICAS:
COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS ANALÍTICOS E NUMÉRICOS

PALMAS
2025

VINÍCIUS DO NASCIMENTO STRACKE

**ESTUDO DA RIGIDEZ DE LIGAÇÕES RÍGIDAS EM ESTRUTURAS METÁLICAS:
COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS ANALÍTICOS E NUMÉRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial à obtenção do grau de
Bacharel do Curso Superior de Engenharia Civil
do Instituto Federal de Educação, Ciência e
tecnologia do Tocantins – *Campus* Palmas.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Dias de Araújo e
Silva

PALMAS

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

S894e Stracke, Vínicius do Nascimento
ESTUDO DA RIGIDEZ DE LIGAÇÕES RÍGIDAS EM
ESTRUTURAS METÁLICAS: : COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS
ANALÍTICOS E NUMÉRICOS / Vínicius do Nascimento Stracke. –
Palmas, TO, 2025.
39 p. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia
Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
Tocantins, Campus Palmas, Palmas, TO, 2025.

Orientador: Thiago Dias de Araújo e Silva

1. Estruturas metálicas. 2. Rigidez rotacional. 3. Método dos
Elementos Finitos. I. Silva, Thiago Dias de Araújo e. II. Título.

CDD 624

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins
de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a).**

VINÍCIUS DO NASCIMENTO STRACKE

**ESTUDO DA RIGIDEZ DE LIGAÇÕES RÍGIDAS EM ESTRUTURAS METÁLICAS:
COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS ANALÍTICOS E NUMÉRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Bacharelado em
Engenharia Civil da Unidade de Palmas, do
Instituto Federal do Tocantins, como exigência à
obtenção do título de Bacharel, em Engenharia
Civil.

Aprovado em: 17/11/2025

BANCA AVALIADORA



Documento assinado digitalmente
THIAGO DIAS DE ARAUJO E SILVA
Data: 12/12/2025 15:21:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Thiago Dias Araújo e Silva, IFTO
Orientador



Documento assinado digitalmente
RODRIGO ARAUJO FORTES
Data: 12/12/2025 15:43:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. ME. Rodrigo Araújo Fontes, IFTO



Documento assinado digitalmente
ADRIANO DOS GUIMARAES DE CARVALHO
Data: 12/12/2025 17:35:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Adriano Dos Guimarães de Carvalho, IFTO

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à minha mãe, Adriana Freitas Do Nascimento, pelo apoio incondicional e incentivo em todos os momentos desta jornada acadêmica. Sua dedicação e amor foram fundamentais para que eu pudesse alcançar este objetivo.

Agradeço de forma muito especial à minha esposa, Karolyne Eleutério, por todo o companheirismo, paciência e apoio incondicional não apenas durante os longos anos de faculdade, mas em particular na reta final deste trabalho. Sua força e incentivo nos momentos de cansaço foram fundamentais para que eu pudesse alcançar este objetivo.

Ao meu orientador, Thiago Dias, expresso minha profunda gratidão pela orientação, paciência e conhecimento compartilhado. Sua expertise e conselhos foram essenciais para a realização deste trabalho.

Aos meus amigos, agradeço pela amizade, apoio e motivação contínuos. Cada momento de convivência e troca de ideias contribuiu para o meu crescimento pessoal e acadêmico.

A todos, deixo aqui o meu sincero agradecimento por terem feito parte desta importante etapa da minha vida.

“A engenharia é a arte de dirigir os grandes recursos da potência para o uso e a conveniência do homem.”

Thomas Tredgold

RESUMO

No dimensionamento de estruturas metálicas, a idealização de ligações viga-pilar como perfeitamente rígidas é uma premissa comum, porém simplificadora. Este trabalho investiga a validade dessa prática, com o objetivo de quantificar a divergência de comportamento entre o modelo analítico normativo (Método dos Componentes) e uma análise numérica refinada por Elementos Finitos (MEF). A metodologia partiu de uma ligação de referência, dimensionada como rígida no software CYPE 3D, que foi subsequentemente analisada via MEF no CYPE Connect. Os resultados revelaram uma divergência expressiva: a rigidez rotacional real da ligação, apurada pelo MEF, foi 89,6% superior à calculada pelo método analítico. Demonstrou-se que este comportamento, embora classificado como semirrígido, resulta em uma redistribuição de esforços que "alivia" a junta, fazendo com que o momento solicitante real seja aproximadamente 9% inferior ao previsto pelo modelo idealizado. Conclui-se que a prática normativa é segura, porém conservadora, e que a análise refinada permite a otimização do projeto, com potencial de redução de até 22% no peso dos componentes da ligação.

Palavras-chave: Estruturas metálicas, Rigidez rotacional, Método dos Elementos Finitos.

ABSTRACT

In the design of steel structures, the idealization of beam-column connections as perfectly rigid is a common yet simplifying premise. This study investigates the validity of this practice, aiming to quantify the behavioral divergence between the standard analytical model (Component Method) and a refined numerical analysis using the Finite Element Method (FEM). The methodology started with a reference connection, designed as rigid in the CYPE 3D software, which was subsequently analyzed via FEM in CYPE Connect. The results revealed a significant divergence: the actual rotational stiffness of the connection, determined by FEM, was 89.6% higher than that calculated by the analytical method. It was demonstrated that this behavior, although classified as semi-rigid, results in a redistribution of forces that "relieves" the joint, causing the actual soliciting moment to be approximately 9% lower than predicted by the idealized model. It is concluded that the standard practice is safe but conservative, and that refined analysis allows for project optimization, with a potential weight reduction of up to 22% in the connection's components.

Keywords: Steel structures, Rotational stiffness, Finite Element Method.

LISTA DE SIGLAS

EC	<i>Eurocódigo</i>
EN	<i>European Standard</i>
NBR	<i>Norma Brasileira Regulamentadora</i>
MEF	<i>Método dos Elementos Finitos</i>
CSI	<i>Computers and Structures</i>
CEFET-MG	<i>Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CEN	<i>European Committee for Standardization</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	PROBLEMA DE PESQUISA.....	12
3	JUSTIFICATIVA.....	12
4	OBJETIVOS	13
4.1	Objetivo geral.....	13
4.2	Objetivos específicos.....	13
5	REVISÃO DE LITERATURA.....	14
5.1	Ligações	14
5.1.1	Ligações Soldadas.....	14
5.1.2	Ligações Parafusadas.....	15
5.1.3	Tipos de ligações rígidas	15
5.2	Classificação das ligações	16
5.2.1	Norma NBR 8800:2008.....	17
5.2.2	Eurocode 3 (2005)	18
5.2.2.1	<i>Segundo a rigidez</i>	<i>18</i>
5.2.2.2	<i>Segundo a Resistência</i>	<i>20</i>
5.2.3	Calculo da rigidez inicial.....	21
5.2.3.1	<i>Segundo a NBR 8800:2008</i>	<i>21</i>
5.2.3.2	<i>Segundo o Eurocode 3 part 1-8 (2005)</i>	<i>21</i>
5.3	Softwares	22
5.3.1	CYPE 3D.....	22
5.3.2	CYPE CONNECT.....	23
5.4	Método dos elementos finitos (MEF)	24
6	PROCEDIMENTOS METODOLOGICOS.....	26
6.1	Concepção do Modelo Estrutural e Definição da Ligação de Referência.....	26
6.2	Análise pelo Método dos Componentes (Analítico)	28
6.3	Análise pelo Método dos Elementos Finitos (Numérico).....	28
6.4	Análise de Sensibilidade e Otimização.....	28
6.5	Análise Comparativa e Verificação dos Estados Limites	29
7	RESULTADOS.....	30
7.1	Análise do Modelo Analítico (Método dos Componentes).....	30
7.2	Análise do Modelo Numérico (Método dos Elementos Finitos)	31

7.3	Análise Comparativa e Resultados da Otimização.....	33
7.4	Quantificação do Momento Solicitante Real	35
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	36
9	REFERÊNCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

A utilização de componentes estruturais em aço abre portas para a realização de uma ampla gama de projetos, desde edifícios de vários pavimentos até pontes, estádios e galpões. Esses elementos entregam precisão e leveza, além de apresentar uma notável capacidade de suporte de carga.

Todavia, para assegurar que as estruturas mantenham suas características essenciais, tais como rigidez, resistência e estabilidade, é imprescindível que os componentes estejam interligados de forma adequada. Essas conexões, conhecidas como ligações, desempenham um papel crucial na transferência eficiente de esforços entre os elementos estruturais, garantindo sua capacidade de resistência conjunta às cargas aplicadas.

De acordo com Fakury, Silva e Caldas (2016), as ligações em estruturas de aço são compostas por elementos de ligação, tais como cantoneiras, enrijecedores e chapas e meios de ligação, sendo os parafusos e soldas.

A análise estrutural é uma etapa crucial no projeto de estruturas de aço, garantindo que os elementos selecionados na fase de pré-dimensionamento atendam aos requisitos de resistência e utilização. Esta análise emprega modelos matemáticos para avaliar as forças solicitantes e deslocamentos, considerando simplificações e concepções do comportamento real da estrutura.

Um exemplo de simplificação se manifesta no comportamento adotado das conexões entre os elementos estruturais, que são classificadas em categorias de rigidez. Essas conexões podem ser descritas como rígidas ou flexíveis. Uma conexão classificada como rígida demonstra um comportamento de engastamento perfeito. Nesse cenário, quando a carga é aplicada à estrutura, o momento fletor na conexão é integralmente transferido. Consequentemente, o ângulo entre os elementos estruturais permanece constante, assegurando uma continuidade rotacional sem falhas. Em contrapartida, nas conexões flexíveis, o comportamento se assemelha a uma rótula perfeita, onde não há transferência de momento fletor. Em termos simples, ocorre uma rotação relativa entre os elementos de conexão após a aplicação da carga na estrutura (Anelli, 2011).

Embora as ligações em estruturas de aço sejam frequentemente idealizadas como rígidas ou flexíveis para simplificar a análise estrutural, a realidade é mais complexa. De acordo com o Instituto Aço Brasil (2011), nenhuma ligação em uma

estrutura de aço se comporta exatamente como as descrições idealizadas de rígido ou flexível. Na verdade, cada ligação apresenta um desempenho que é uma combinação desses dois extremos, dependendo de uma variedade de fatores, incluindo o tipo de ligação, os materiais utilizados e as cargas aplicadas.

Este estudo tem como objetivo a análise das ligações rígidas entre vigas e colunas, tanto soldadas quanto parafusadas, considerando diferentes configurações, tais como chapa de extremidade e extremidade estendidas, com e sem enrijecedores. A análise destas ligações é crucial para compreender o comportamento estrutural das edificações metálicas, pois influenciam diretamente na estabilidade e na capacidade de carga da estrutura como um todo.

Nesse contexto, pretende-se investigar a rigidez dessas ligações, com foco na comparação entre modelos analíticos, como os recomendados pelo Eurocode 3 (2005), e modelos numéricos, como o Método dos Elementos Finitos (MEF). Essa abordagem permitirá uma avaliação minuciosa e precisa do comportamento das ligações, levando em consideração não apenas as características construtivas e os materiais envolvidos, mas também as condições reais de solicitação da estrutura.

Após essa análise, o próximo passo consistirá em avaliar o desempenho da estrutura diante das solicitações reais a que está sujeita. Será realizada uma análise dos efeitos dessas solicitações na estrutura, visando identificar possíveis áreas de maior concentração de esforços ou comportamentos inesperados. Esse processo é fundamental para compreender o comportamento real da estrutura e verificar a necessidade ajustes nos componentes estruturais.

2 PROBLEMA DE PESQUISA

No dimensionamento das estruturas metálicas, segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008), pressupõe-se que uma ligação rígida não possui movimento relativo entre os elementos, ou seja, a ligação é tão forte que eles se movem juntos como uma única unidade. Por outro lado, uma ligação flexível é aquela em que permitimos que os elementos conectados se movam independentemente um do outro.

Essas suposições simplificam a análise estrutural e podem não estão representando o seu comportamento real, que seria uma mistura de rigidez e flexibilidade. Levanta-se então o questionamento: quão preciso são nossos projetos e cálculos quando adotamos essas simplificações? Qual a viabilidade do uso de ligações rígidas nesse cenário? Estamos superestimando a resistência de nossas estruturas ao considerar todas as ligações como rígidas?

3 JUSTIFICATIVA

De acordo com Santos (1998), com o avanço tecnológico, particularmente com a introdução dos computadores, houve uma transformação significativa na forma como lidamos com a engenharia estrutural. No passado, era aceitável simplificar as ligações como sendo rótulas ou engastes para facilitar os cálculos. Contudo, com a habilidade dos computadores de realizar estudos mais complexos em um período de tempo reduzido, tornou-se viável levar em conta a rigidez das ligações na análise estrutural. Isso não apenas aprimora o projeto, mas também aumenta sua precisão e confiabilidade.

Compreender como as estruturas se comportam é muito importante, especialmente no Brasil, onde ainda usamos cálculos mais simples devido às normas. Precisamos estudar mais a fundo como as conexões entre as partes das estruturas afetam os cálculos para garantir que não exageremos nem subestimemos a resistência delas. Isso é crucial porque pode nos ajudar a usar os materiais de forma mais eficiente, o que pode reduzir os custos. Essa melhoria não só ajuda a construção civil, mas também torna a construção de estruturas de aço mais sustentável e eficiente, o que é importante para o desenvolvimento do setor.

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo geral

Analisar o comportamento das ligações rígidas em estruturas de aço, especificamente em uma ligação viga-pilar, através de um comparativo entre o comportamento real da estrutura por meio dos resultados obtidos pelos métodos analíticos e numéricos.

4.2 Objetivos específicos

- Averiguar o comportamento real da estrutura nas ligações rígidas através do método dos elementos finitos com software Cype Connect;
- Dimensionar estrutura com base nos métodos da NBR 8800 (ABNT, 2008) e Eurocode 3 part 1-8 (CEN, 2005);
- Comparar os resultados obtidos através do MEF, considerado como modelo de referência, com os métodos analíticos citados anteriormente e com resultados do CYPE 3D.

5 REVISÃO DE LITERATURA

5.1 Ligações

As ligações em estruturas metálicas são componentes essenciais para a transmissão de esforços entre diferentes partes da estrutura. De acordo com o Instituto Aço Brasil, as ligações são compostas por elementos de ligação, como enrijecedores, chapas de ligação, placas de base, cantoneiras, consolos, talas de emenda e partes das peças envolvidas na ligação. Além disso, os meios de ligação incluem soldas, parafusos, barras redondas rosqueadas e pinos (Instituto Aço Brasil, 2017).

Os elementos de ligação são responsáveis por facilitar a transmissão de esforços, enquanto os meios de ligação garantem a união das partes da estrutura. Esta distinção é fundamental para a compreensão dos diferentes tipos de ligações que podem ser utilizadas.

5.1.1 Ligações Soldadas

De acordo com Gonçalves (2016), a soldagem é um dos métodos mais comuns de união em estruturas metálicas devido à sua capacidade de criar conexões fortes e contínuas. A resistência das soldas depende da qualidade do material utilizado e da precisão na execução do processo de soldagem. A implementação correta de técnicas de soldagem pode resultar em juntas que são tão resistentes quanto o próprio material base. Além disso, a inspeção e o controle de qualidade são fundamentais para garantir a integridade das soldas, evitando problemas como fissuras e defeitos internos.

Conforme dito pelo Instituto Aço Brasil (2017), a união de componentes metálicos pode ser realizada através da fusão de eletrodos metálicos. Esse processo ocorre por meio do calor intenso gerado por um arco elétrico, que provoca a fusão parcial das partes que estão sendo unidas. Quando o material esfria, o metal base e o metal do eletrodo formam um único corpo sólido. A soldabilidade de um aço se refere à facilidade com que se pode executar uma junta de solda sem apresentar defeitos, fissuras ou falhas.

5.1.2 Ligações Parafusadas

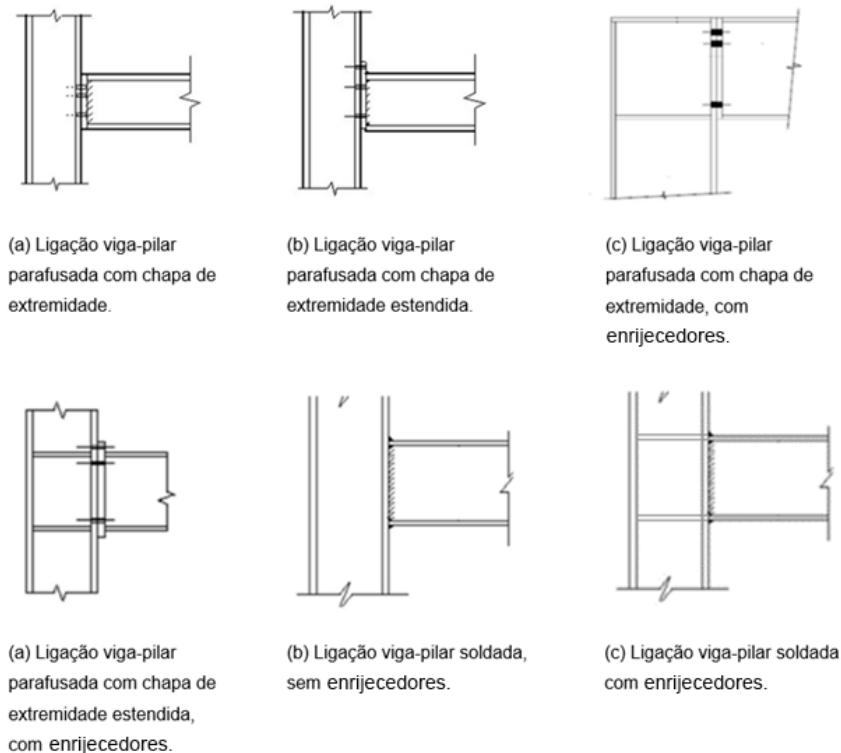
As conexões parafusadas podem ser de dois tipos: ligação do tipo contato ou do tipo atrito, no primeiro tipo, podem ser utilizados parafusos comuns ou de alta resistência, já que os parafusos são instalados sem aperto controlado (protensão). No segundo tipo, apenas o parafuso de alta resistência pode ser utilizado, uma vez que a resistência ao deslizamento está diretamente ligada à protensão aplicada aos parafusos (Instituto Aço Brasil, 2017).

As ligações parafusadas são utilizadas devido à sua simplicidade de montagem e desmontagem, o que facilita a manutenção e a possibilidade de ajustes no campo. As ligações de contato dependem da resistência ao esmagamento do material ao redor do furo do parafuso, enquanto as ligações de atrito dependem da força de fricção gerada pela protensão dos parafusos. A escolha entre os dois tipos de ligação depende das exigências específicas do projeto e das características dos materiais envolvidos (Instituto Aço Brasil, 2017).

5.1.3 Tipos de ligações rígidas

As ligações rígidas entre vigas e pilares são essenciais para evitar a rotação relativa entre esses componentes e são projetadas para transferir eficientemente o momento fletor e o esforço cortante na junta. Na prática, existem diferentes configurações dessas ligações, conforme ilustrado na Figura 1. No entanto, ao projetar essas conexões, um aspecto crucial é a capacidade do pilar de suportar cargas concentradas, especialmente aquelas provenientes das mesas da viga (Pfeil; Pfeil, 2009).

Figura 1 - Exemplos de ligações rígidas viga-pilar



Fonte: Adaptada de Pfeil e Pfeil (2009) e Instituto Aço Brasil (2017).

Esses esforços concentrados podem resultar em efeitos indesejáveis, como flambagem local ou escoamento da alma do pilar sob compressão e deformações excessivas na mesa do pilar devido à força de tração na mesa da viga. Para evitar esses problemas, é necessário incluir pares de enrijecedores horizontais nos pilares, localizados nos níveis das mesas das vigas (Pfeil; Pfeil, 2009).

Essas medidas adicionais visam reforçar a capacidade de absorção de carga do pilar e minimizar os efeitos negativos das cargas concentradas, garantindo assim a integridade estrutural e a estabilidade da conexão entre viga e pilar.

5.2 Classificação das ligações

Segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008), as ligações metálicas consistem em elementos de ligação, como enrijecedores, chapas de ligação, cantoneiras e consolos, e meios de ligação, como soldas, parafusos, barras redondas rosqueadas e pinos.

Segundo o Eurocode 3 (CEN, 2005), é o local onde dois ou mais elementos se encontram. Para fins de projeto é a montagem dos componentes básicos necessários para representar o comportamento durante a transferência das forças e momentos internos relevantes na ligação.

As ligações entre vigas e pilares são classificadas de acordo com seu comportamento em três tipos: flexíveis, semirrígidas e rígidas. Podemos definir o tipo de ligação de acordo com a rigidez e a resistência, os itens a seguir demonstram a classificação de acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2008) e do Eurocode 3 (2005).

5.2.1 Norma NBR 8800:2008

A norma brasileira define sua classificação de acordo com a rigidez, porém, não a determina. A mesma recomenda, se necessário, que seja determinada de acordo com o Eurocode 3 parte 1-8 (CEN, 2005) ou com base em resultados experimentais.

A norma brasileira define as seguintes inequações para classificar as ligações:

Ligação rotulada, se:

$$S_i \leq 0,5 * E * \frac{I_v}{L_v} \quad (1)$$

Ligação rígida, se:

$$S_i \leq 25 * E * \frac{I_v}{L_v} \quad (2)$$

Onde:

S_i é a rigidez rotacional inicial da ligação, correspondente a 2/3 do momento resistente de cálculo da ligação;

I_v é o momento de inércia da viga;

E é o módulo de elasticidade do material;

L_v é o comprimento da viga conectada à ligação.

A norma permite que, em qualquer caso, para análise elástica, a ligação pode ser considerada semirrígida, com a rigidez S_i constante durante todo o carregamento.

A equação 2 pode ser usado somente se satisfeita a relação:

$$\frac{K_v}{K_p} \geq 0,1 \quad (3)$$

Onde:

K_v é o valor médio de I_v/L_v para todas as vigas no topo do andar;

K_p é o valor médio de I_p/L_p para todas os pilares do andar;

I_p é o momento de inércia do pilar;

L_p é o comprimento do pilar conectado à ligação.

Caso a equação 2 seja satisfeita, mas a equação 3 não, a ligação deve ser considerada semirrígida.

5.2.2 Eurocode 3 (2005)

O Eurocode diz que o comportamento das juntas na distribuição de forças e momentos internos dentro de uma estrutura, e nas deformações globais da estrutura, devem ser considerados, porém, se forem suficientemente pequenos, podem ser negligenciados.

As ligações podem ser classificadas segundo a sua rigidez e pela sua resistência e ambas são classificadas como articuladas, semirrígidas e rígidas, conforme os itens seguintes.

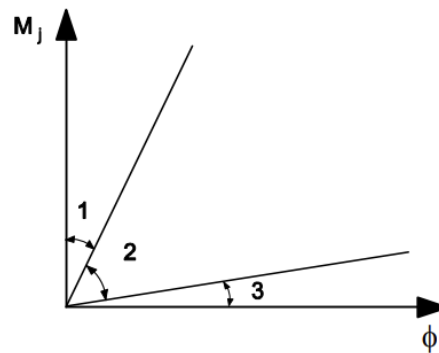
5.2.2.1 Segundo a rigidez

Segundo o Eurocode 3 (CEN, 2005), uma junta articulada deve ser capaz de transmitir os esforços internos, sem desenvolver momentos significativos que possam afetar adversamente os membros ou a estrutura como um todo e deverá ser capaz de aceitar as rotações resultantes sob as cargas de projeto.

Pode-se presumir que as juntas classificadas como rígidas possuem rigidez rotacional suficiente para justificar a análise baseada em plena continuidade, ou seja, como se fosse um único elemento.

Se uma junta não se encaixar nos critérios para ser considerada rígida ou articulada, ela deve ser classificada como semirrígida. Isso significa que ela tem alguma capacidade de resistência aos momentos, mas não é tão rígida a ponto de garantir plena continuidade, nem tão flexível quanto uma junta articulada.

Figura 2 - Classificação das ligações por rigidez



Fonte: Eurocode 3 (2005, p. 55)

A figura acima demonstra as zonas de rigidez das ligações, a zona 1 representa as ligações rígidas, a zona 2 as semirrígidas e a zona 3 as articuladas, seguindo as inequações abaixo.

Zona1:

$$S_{j,ini} \geq k_b * E * \frac{I_b}{L_b} \quad (4)$$

Zona 3:

$$S_{j,ini} \leq 0,5 * E * \frac{I_b}{L_b} \quad (5)$$

Onde:

$S_{j,ini}$ é a rigidez inicial da ligação;

$k_b = 8$ para casos onde o contraventamento reduz o deslocamento lateral em pelo menos 80%;

$k_b = 25$ para outros casos, desde que, cada andar obedeça $K_b/K_c \geq 0,1$;

K_b é o valor médio de I_b/L_b para todas as vigas na para superior do referido andar;

K_c é o valor médio de I_c/L_c para todas as colunas do referido andar;

I_b é o momento de inércia da viga;

I_c é o momento de inércia da coluna;

L_b é o comprimento da viga (centro a centro das colunas);

As ligações que não atenderem os critérios das inequações 4 e 5 devem ser classificadas como semirrígidas. As juntas nas zonas 1 ou 3 também podem, opcionalmente, ser tratadas como semirrígidas.

5.2.2.2 Segundo a Resistência

De acordo com o Eurocode 3, a classificação é feita comparando seu momento resistente de cálculo $M_{j,Rd}$ com os momentos resistentes de cálculo das barras que liga. Ao classificar as juntas, a resistência de cálculo de uma barra deve ser considerada como aquela da barra adjacente à junta. Segue abaixo as regras para cada classificação:

Articulada, se:

Deve ser capaz de transmitir os esforços internos, sem desenvolver momentos significativos que possam afetar adversamente os membros ou a estrutura como um todo;

Deverá ser capaz de aceitar as rotações resultantes sob as cargas de projeto;

O seu momento resistente de cálculo $M_{j,Rd}$ não for superior a 0,25 vezes o momento resistente de cálculo exigido para uma junta de resistência total, desde que também tenha capacidade de rotação suficiente.

Rígida se:

A resistência de cálculo de uma junta de resistência total não deve ser inferior à dos elementos ligados;

Uma junta pode ser classificada como de resistência total se cumprir os critérios indicados na Figura 3.

Figura 3 - Resistência das ligações



Fonte: Eurocode 3 (2005, p. 56)

Para o topo da coluna, deve respeitar as inequações abaixo:

$$M_{j,Rd} \geq M_{b,p\ell,Rd} \quad (6)$$

Ou

$$M_{j,Rd} \geq M_{c,p\ell,Rd} \quad (7)$$

Para demais ligações das colunas, deve respeitar as inequações abaixo:

$$M_{j,Rd} \geq M_{b,p\ell,Rd} \quad (8)$$

Ou

$$M_{j,Rd} \geq 2 * M_{c,pl,Rd} \quad (9)$$

Onde:

$M_{b,pl,Rd}$ é o momento resistente de cálculo plástico de uma viga;

$M_{c,pl,Rd}$ é o momento resistente plástico de cálculo de um pilar.

As ligações semirrígidas são aquelas que não atendem os critérios das ligações articuladas e rígidas mencionadas no item 5.1.2.2.

5.2.3 Cálculo da rigidez inicial

5.2.3.1 Segundo a NBR 8800:2008

Segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008), a rigidez da ligação viga-pilar é definida simplificada como dois terços do momento resistente de cálculo da ligação ($M_{j,Rd}$). A norma brasileira não especifica um método específico para calcular essa rigidez, recomendando, na ausência de diretrizes locais, a utilização das formulações do Eurocode 3 Part 1-8 ou baseando-se em resultados experimentais. Para simplificação, a norma considera a rigidez S_i como constante ao longo de todo o carregamento, facilitando assim a análise estrutural e permitindo a categorização adequada das ligações como rotuladas, rígidas ou semirrígidas conforme os critérios estabelecidos no item 5.2.1.

5.2.3.2 Segundo o Eurocode 3 part 1-8 (2005)

O Eurocode (2005), apresenta a rigidez da ligação e a rigidez inicial. A rigidez de uma ligação é definida pela relação entre a força aplicada e a deformação resultante. É uma medida da resistência de uma estrutura contra a deformação sob carga. Já a rigidez inicial de uma ligação refere-se à rigidez medida na fase inicial de carregamento, antes de qualquer deformação plástica significativa ocorrer.

A determinação da rigidez da ligação (S_j) é realizada pelo método dos componentes, considerando as rigidezes dos componentes básicos da ligação. Cada componente é representado por um coeficiente de rigidez elástica (k_i). A fórmula utilizada para calcular a rigidez da ligação é a Equação 10:

$$S_j = E * \frac{z^2}{\mu} * \sum_i \left(\frac{1}{k_i} \right) \quad (10)$$

Onde:

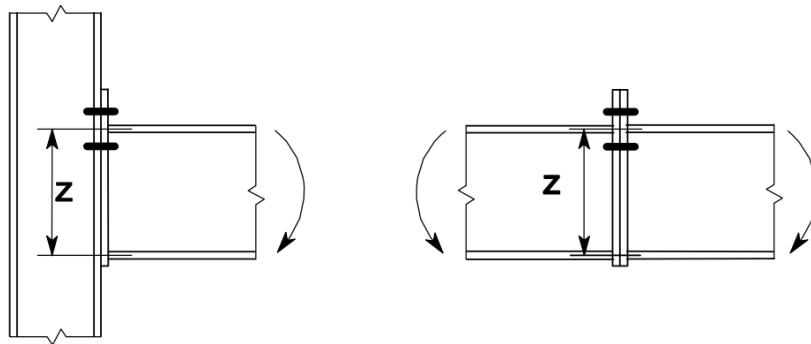
E é o módulo de elasticidade do aço.

z é o braço de alavanca mostrado na Figura 04.

k_i é o coeficiente de rigidez do componente básico “i” da ligação.

μ É a relação entre a rigidez inicial ($S_{j,ini}$) e a rigidez calculada (S_j). Como simplificação, a relação μ pode ser adotada com valor de 1 (significando que a rigidez inicial é diretamente utilizada sem ajustes adicionais), desde que o momento fletor solicitante de cálculo ($M_{j,Ed}$) não ultrapasse dois terços do momento fletor resistente de cálculo ($M_{j,Rd}$).

Figura 4 - Braço de alavanca z



Fonte: Eurocode 3 (2005, p. 98)

O coeficiente de rigidez (k_i) é um parâmetro essencial para determinar a rigidez de uma ligação (S_j). Ele representa a rigidez elástica de cada componente básico da ligação, como parafusos, soldas e chapas. Para calcular (k_i), é necessário considerar as características específicas de cada componente, incluindo sua geometria e propriedades do material. Os procedimentos detalhados para determinar os coeficientes de rigidez (k_i) são encontrados no item 6.3 do Eurocode 3, parte 1-8 (2005).

5.3 Softwares

5.3.1 CYPE 3D

O CYPE 3D é um programa eficiente e prático desenvolvido para o cálculo de estruturas em 3D, abrangendo elementos de concreto, aço, mistos (aço e concreto), alumínio, madeira, ou qualquer outro material. Ele também inclui funcionalidades para o dimensionamento de ligações, tanto soldadas quanto aparafusadas, de perfis de aço laminado, composto em duplo T e perfis tubulares. Além disso, o software permite

o dimensionamento de fundações, como placas de ancoragem, sapatas, blocos de coroamento de estacas, vigas de travamento e de equilíbrio (CYPE Ingenieros, 2024).

Desenvolvido pela CYPE Ingenieros, uma empresa com mais de 30 anos de experiência em Arquitetura, Engenharia e Construção, o CYPE 3D resulta de uma combinação de intensa atividade no campo da engenharia estrutural e pesquisa avançada no desenvolvimento de software. Desde o início, o desenvolvimento do software foi supervisionado por Vicente Castell Herrera, contribuindo para a posição de liderança no setor de software para Engenharia, Arquitetura e Construção (CYPE Ingenieros, 2024).

A empresa conta com mais de 60.000 usuários em vários países e a aquisição de 100.000 programas por profissionais da construção, software é amplamente reconhecido e utilizado. A colaboração com cerca de 400 universidades que incorporam o software em suas atividades acadêmicas e de pesquisa destaca ainda mais sua importância e a confiança depositada na ferramenta.

Assim, o CYPE 3D se apresenta como uma solução robusta e confiável para profissionais que buscam uma ferramenta completa para o cálculo e dimensionamento de estruturas em 3D, alinhada às necessidades contemporâneas do setor de construção.

5.3.2 CYPE CONNECT

O CYPE Connect é uma ferramenta de alta precisão, desenvolvida pela CYPE Ingenieros, dedicada à modelagem, análise e dimensionamento de ligações em estruturas metálicas, de madeira ou mistas. Sua principal característica, e o motivo de sua escolha para este trabalho, é a utilização do MEF para a análise detalhada do comportamento das juntas.

Diferente de módulos de dimensionamento que utilizam métodos analíticos simplificados, como o Método dos Componentes, o CYPE Connect discretiza os elementos da ligação em uma malha de elementos finitos. O software utiliza o motor de cálculo OpenSees, uma plataforma robusta e reconhecida no meio acadêmico e profissional, para realizar análises que capturam de forma mais fiel o comportamento contínuo da ligação, incluindo a distribuição de tensões e deformações plásticas.

Uma das maiores vantagens do CYPE Connect para a engenharia estrutural é sua interoperabilidade com outras plataformas da CYPE, como o CYPE 3D. O

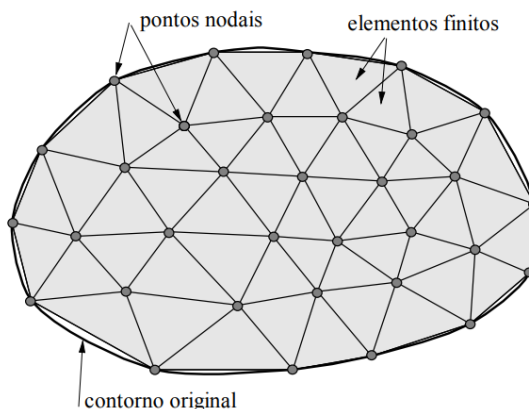
software permite importar diretamente a geometria do nó estrutural e, crucialmente, os esforços (momento fletor, esforço cortante e axial) calculados na análise global da estrutura. Isso garante uma transição de dados segura e precisa, eliminando erros de inserção manual e permitindo que a análise da ligação seja feita sob as exatas solicitações a que estará submetida.

Dessa forma, o CYPE Connect se apresenta como uma solução para verificar o comportamento real de ligações complexas, servindo como uma base de comparação fundamental para avaliar a precisão e as simplificações dos métodos analíticos recomendados por normas, como a NBR 8800:2008.

5.4 Método dos elementos finitos (MEF)

De acordo com Souza (2003), o método dos elementos finitos consiste em dividir um problema complexo em sub-regiões de geometria simples, como o formato triangular, quadrilateral, tetraédrico e outros, conforme ilustra a Figura 5. Essas sub-regiões apresentam dimensões finitas e por isso são chamadas de elementos finitos.

Figura 5 – Malha triangular de Elementos Finitos



Fonte: Souza (2003)

Este processo é bastante utilizado na engenharia, onde usualmente tenta-se resolver um problema complexo, subdividindo-o em uma série de problemas mais simples.

No contexto das estruturas metálicas, o MEF é particularmente útil para analisar e dimensionar componentes complexos e suas conexões. Programas de computador, como o Cype Connect, utilizam o MEF para fornecer análises detalhadas e precisas das estruturas, aproximando-se do comportamento real da estrutura e ajudando engenheiros a otimizar seus projetos para segurança e eficiência econômica.

De acordo com Cook *et al.* (2002), a formulação matemática do MEF envolve a criação de uma matriz de rigidez global a partir das matrizes de rigidez dos elementos individuais. Essa matriz global é então utilizada para resolver o sistema de equações que descreve o comportamento da estrutura. A precisão dos resultados obtidos pelo MEF depende da qualidade da malha de elementos finitos e da adequação do modelo matemático utilizado.

No caso das estruturas metálicas, as propriedades do material como o módulo de Young, a razão de Poisson e o limite de escoamento são dados necessários. Eles são usados para formular as matrizes de rigidez dos elementos, que relacionam os deslocamentos nodais às forças aplicadas. A matriz de cada elemento é montada em uma matriz de rigidez global que representa toda a estrutura. Condições de contorno e carregamento são então aplicadas ao modelo. As condições de contorno representam como a estrutura é apoiada, enquanto as condições de carregamento representam as forças ou deslocamentos aplicados à estrutura. A solução do sistema de equações resultante fornece os deslocamentos nodais, a partir dos quais podem ser calculados as deformações e tensões (Barbero, 2013).

Uma das grandes vantagens dos MEF, na análise de estruturas metálicas, é sua capacidade de lidar com carregamentos e geometrias complexas que seriam difíceis ou impossíveis de analisar usando métodos tradicionais. Outra vantagem, segundo a Computers and Structures (2024), é que pode considerar comportamentos não-lineares, como deformação plástica e grandes deslocamentos, comuns em estruturas metálicas sob altas cargas.

6 PROCEDIMENTOS METODOLOGICOS

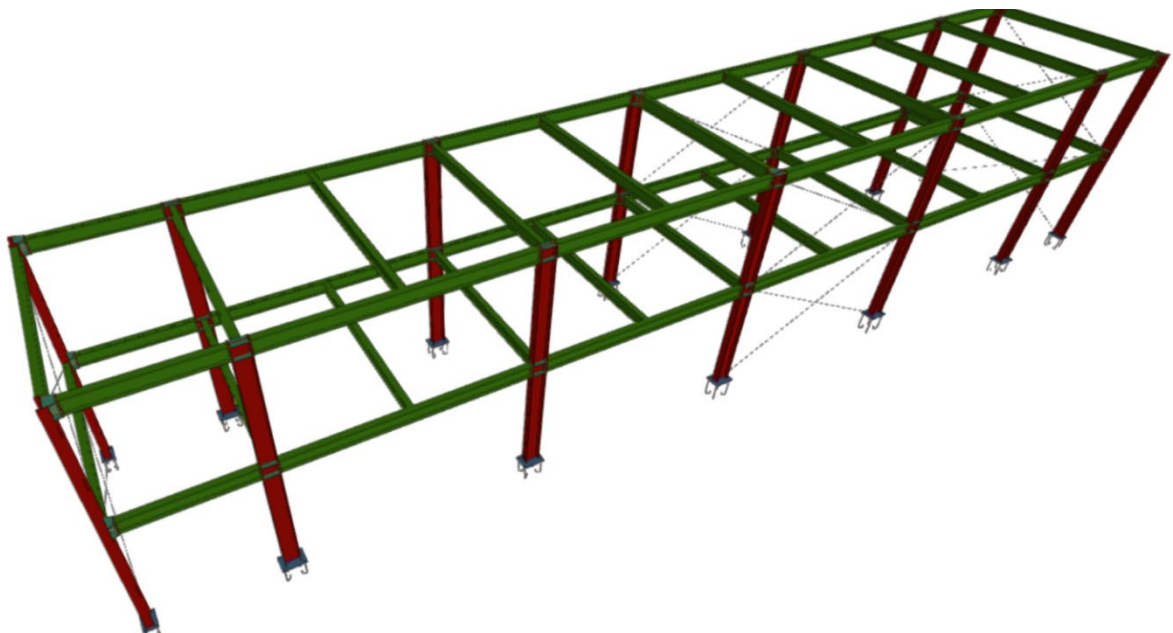
A presente pesquisa foi desenvolvida a partir de uma abordagem comparativa entre o método analítico normativo e a análise numérica, visando quantificar o impacto da rigidez real das ligações no dimensionamento de estruturas metálicas. A metodologia foi estruturada nas seguintes etapas:

6.1 Concepção do Modelo Estrutural e Definição da Ligação de Referência

O ponto de partida do estudo foi a concepção e análise de um modelo estrutural completo, representando um pórtico de um edifício em aço, utilizando o software CYPE 3D. Esta etapa inicial envolveu todos os procedimentos de uma análise estrutural convencional, incluindo:

- **Lançamento da Estrutura:** Modelagem dos elementos de barras (pilares e vigas) que compõem os pórticos do edifício.
- **Análise de Cargas:** Definição e aplicação das ações permanentes (peso próprio, revestimentos, entre outros) e variáveis (sobrecarga de utilização e ação do vento), seguindo os preceitos das normas NBR 8800 (ABNT, 2008), NBR 6120 (ABNT, 2019) e NBR 6123 (ABNT, 2023).
- **Sistema de Estabilidade Global:** Modelagem do sistema de contraventamento da estrutura para garantir sua estabilidade frente aos esforços laterais.

Figura 6: Modelo estrutural completo utilizado como base para o projeto

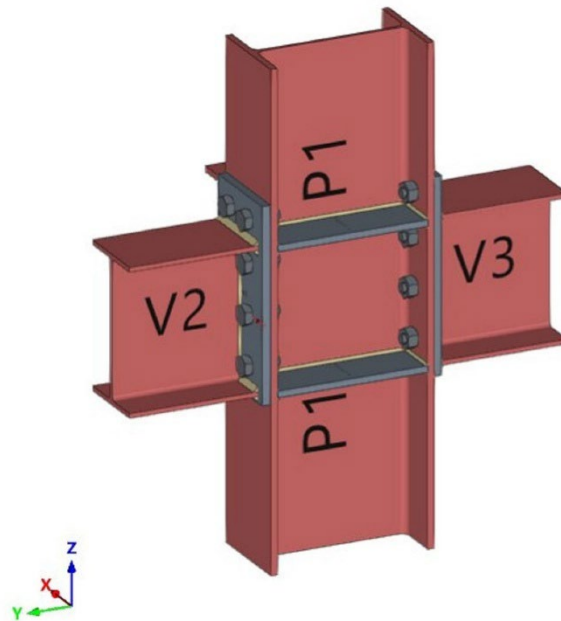


Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Na análise global inicial deste modelo completo, as ligações viga-pilar foram idealizadas como perfeitamente rígidas, adotando-se um coeficiente de engastamento de 1.0. A partir dos resultados, selecionou-se para estudo um nó viga-pilar representativo, submetido a um carregamento significativo de momento fletor, que passou a ser a "Ligação de Referência" da pesquisa. Os componentes desta ligação são:

- **Pilar:** Perfil W 360 x 64;
- **Viga (ligação principal):** Perfil W 310 x 38.7;
- **Aço dos Perfis:** A-572 Grau 50 ($f_y = 345$ MPa);
- **Chapa Frontal:** Espessura de 18 mm;
- **Parafusos:** Oito unidades de 7/8" (22 mm) ASTM A325T, pré-tensionados;
- **Enrijecedores no Pilar:** Espessura de 14 mm.

Figura 7: Modelo tridimensional da Ligação de Referência



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Modelo numérico da junta viga-pilar, desenvolvido no software CYPE Connect para a análise via Método dos Elementos Finitos. A imagem ilustra a montagem completa da "Ligação de Referência", com o pilar P1 (W 360x64) e as vigas V2 e V3 (W 310x38.7). O foco do estudo, cujos resultados são discutidos neste trabalho,

concentra-se na determinação da rigidez rotacional e do comportamento da ligação parafusada entre o pilar P1 e a viga V2.

6.2 Análise pelo Método dos Componentes (Analítico)

A "Ligação de Referência" foi dimensionada no módulo integrado do CYPE 3D, que emprega o Método dos Componentes conforme preconizado pelo Eurocode 3 e adaptado pela NBR 8800:2008. Esta análise fornece os resultados analíticos para a ligação, incluindo seu momento resistente (M_j, R_d), capacidade de rotação (ϕ_{cd}) e, fundamentalmente, a rigidez rotacional inicial ($S_{j,ini}$).

6.3 Análise pelo Método dos Elementos Finitos (Numérico)

Utilizando o software CYPE Connect, a geometria da "Ligação de Referência" foi replicada com a máxima fidelidade para uma análise via MEF. Embora os perfis principais de aço (A-572 Grau 50) sejam consistentes entre os modelos, foram adotados os materiais equivalentes disponíveis no CYPE Connect para os demais componentes, garantindo propriedades mecânicas praticamente idênticas. As chapas de ligação foram modeladas com aço S355 (equivalente ao A-572 345MPa) e os parafusos de alta resistência como sendo da classe 8.8 segundo a norma EN 14399-4 (equivalente ao ASTM A325). Este procedimento permitiu uma representação realista do comportamento contínuo da junta, capturando a distribuição de tensões e deformações nos seus diversos componentes para obter o valor numérico da rigidez rotacional inicial ($S_{j,ini}$).

6.4 Análise de Sensibilidade e Otimização

Com os valores de rigidez de ambos os métodos, a etapa seguinte consistiu em uma análise de sensibilidade no modelo global do CYPE 3D. O coeficiente de engastamento da junta estudada foi variado de 1.0 (rígido) até 0.5 (indicando maior flexibilidade), em intervalos. Para cada coeficiente, a análise foi realizada de duas maneiras: primeiro, mantendo o detalhamento da 'Ligação de Referência' inalterado para observar a variação no seu percentual de utilização; segundo, permitindo que o software propusesse um novo dimensionamento otimizado para os esforços solicitantes de cada cenário. É importante ressaltar que, durante esta análise de sensibilidade, os perfis da viga (W 310x38.7) e do pilar (W 360x64) foram mantidos fixos, para isolar exclusivamente o efeito da variação da rigidez da junta.

6.5 Análise Comparativa e Verificação dos Estados Limites

Uma vez obtidos os valores de resistência e comportamento das ligações conforme NBR 8800:2008 e Eurocode 3 (2005), a próxima etapa envolve a comparação desses resultados com os dados obtidos na análise numérica realizada no Cype Connect. Esta comparação permite avaliar a precisão e confiabilidade das normas em relação ao método dos elementos finitos.

Os resultados serão classificados de acordo com o comportamento das ligações frente aos momentos fletores aplicados. Para cada tipo de ligação, é verificado se o momento resistente calculado segundo as normas está de acordo com o comportamento observado na análise numérica. A classificação foi realizada de acordo com o item 5.2 deste trabalho.

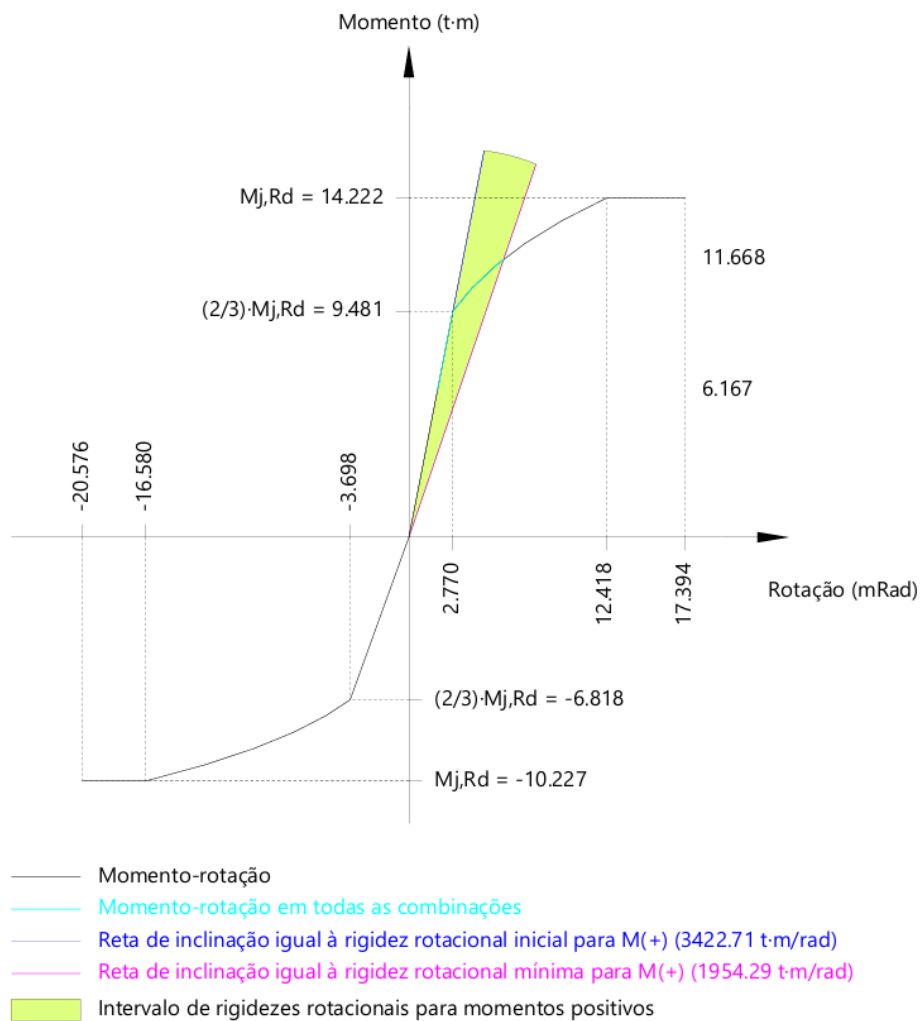
7 RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos a partir das análises do modelo analítico e do modelo numérico. A exposição dos dados de cada método é feita separadamente, a fim de caracterizar o comportamento de cada um, para então proceder com a análise comparativa direta e os resultados do estudo de sensibilidade.

7.1 Análise do Modelo Analítico (Método dos Componentes)

A "Ligação de Referência" foi dimensionada no CYPE 3D, partindo da premissa de um comportamento perfeitamente rígido (coeficiente de engastamento 1.0). A Figura 8 ilustra o comportamento Momento x Rotação para este modelo, que, segundo os critérios da NBR 8800:2008 e Eurocode 3 (2005), se enquadra na classificação de ligação rígida.

Figura 8 - Gráfico Momento x Rotação para a Ligação de Referência (Método dos Componentes)



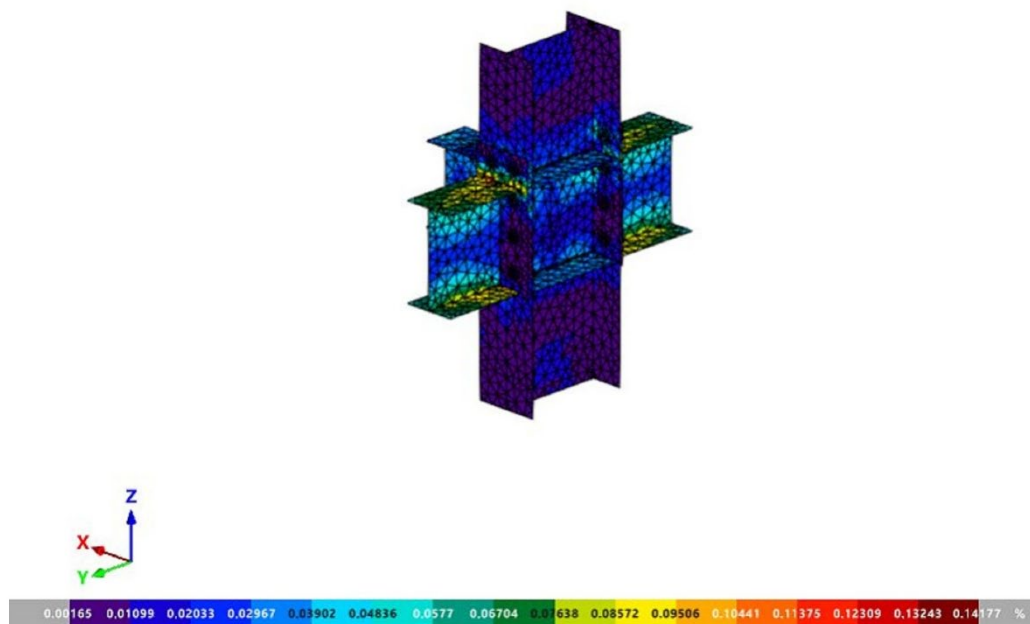
Fonte: Cype 3D

A análise deste modelo, que simplifica o comportamento da junta através de uma rigidez linear constante, resultou em uma rigidez rotacional inicial ($S_{j,ini}$) de 3422,71 t·m/rad. O momento resistente de cálculo ($M_{j,Rd}$) obtido foi de 139,5 kNm.

7.2 Análise do Modelo Numérico (Método dos Elementos Finitos)

A mesma ligação foi replicada e analisada no CYPE Connect via MEF. Para a análise, a geometria da junta foi discretizada em uma malha de elementos finitos triangulares (Figura 9). A geração da malha foi realizada automaticamente pelo software, aplicando um refinamento adaptativo nas regiões de maior concentração de tensões, como nas bordas dos furos e nas áreas de contato entre chapas e parafusos. Essa discretização buscou o equilíbrio entre a precisão dos resultados de tensão e deformação e o custo computacional do processamento.

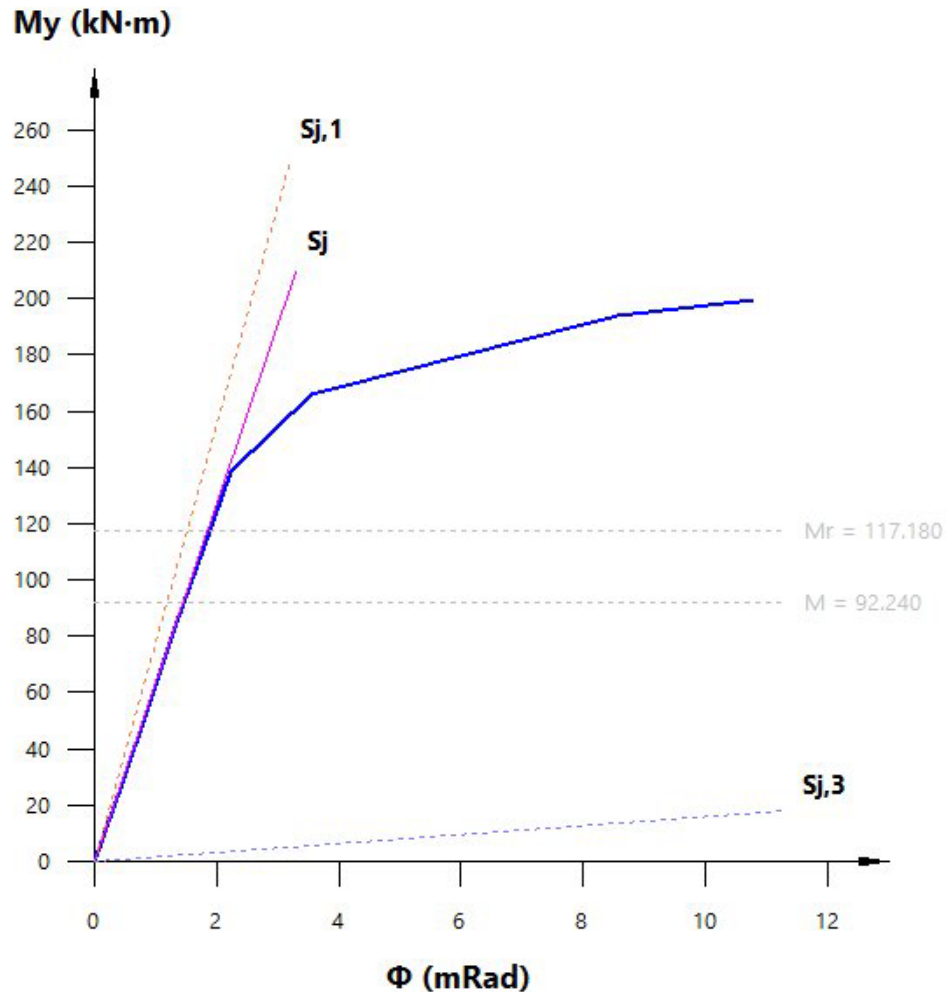
Figura 9 - Detalhe da Malha de Elementos Finitos da Ligação no Modelo Numérico



Fonte: CYPE connect

O diagrama Momento x Rotação obtido nesta análise (Figura 10) revela o comportamento não-linear da ligação.

Figura 10 - Gráfico Momento (M_y) x Rotação (Φ) da Ligação de Referência (MEF)



Fonte: CYPE Connect.

A análise do gráfico revela um comportamento complexo:

- **Rigidez Inicial Elevada ($S_{j,1}$):** A reta tracejada $S_{j,1}$ possui uma inclinação acentuada, indicando uma elevada rigidez no estágio elástico.
- **Comportamento Não-Linear:** A curva sólida demonstra a plastificação progressiva dos componentes, com a rigidez diminuindo após o momento fletor atingir aproximadamente 140 kN·m.
- **Momento Resistente (M_r):** O modelo MEF indicou um momento resistente de cálculo $M_r = 117,18$ kNm.

A análise numérica resultou em uma rigidez rotacional inicial ($S_{j,ini}$) de 6476,93 t·m/rad. No entanto, um achado fundamental desta análise foi a classificação da ligação. Segundo o relatório do CYPE Connect, a ligação é classificada como "Semirrígida". Essa classificação ocorre porque a rigidez calculada (6476,93 t·m/rad)

é inferior ao limite teórico de rigidez ($S_{j1} = 7958,69 \text{ t}\cdot\text{m/rad}$) estabelecido pelo próprio software para este caso específico.

Quadro 1 – Rigidez rotacional pelo MEF

Rigidez rotacional							
Elemento	Plano	L (mm)	S_j ($\text{t}\cdot\text{m/rad}$)	$S_{j,ini}$ ($\text{t}\cdot\text{m/rad}$)	S_{j1} ($\text{t}\cdot\text{m/rad}$)	S_{j3} ($\text{t}\cdot\text{m/rad}$)	Classificação
V2	XZ	5652.0	6458.38	6476.93	7958.69	159.17	Semi-rígida
V2	XY	5652.0	1019.33	974.35	688.09	13.76	Rígida

Fonte: CYPE Connect

7.3 Análise Comparativa e Resultados da Otimização

A Tabela 1 confronta diretamente a rigidez rotacional inicial obtida por ambos os métodos, quantificando a divergência entre os modelos.

Tabela 1 – Comparação da Rigidez Rotacional Inicial

Método de Cálculo	Rigidez Inicial ($S_{j,ini}$)
Análítico (Método dos Componentes)	3414,88 $\text{t}\cdot\text{m/rad}$
Numérico (Método dos Elementos Finitos)	6476,93 $\text{t}\cdot\text{m/rad}$

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A análise numérica resultou em um valor de rigidez 89,6% superior ao do modelo analítico. Com base nessa constatação, realizou-se a análise de sensibilidade no CYPE 3D, cujos resultados completos estão na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados Completos da Análise de Sensibilidade e Otimização

Coefficiente de Engastamento	Momento Solicitante (kNm)	% da Capacidade Original	Chapa (mm)	Parafuso
1,00	114,47	82,0%	18	7/8"
0,98	113,01	81,0%	18	7/8"
0,96	112,59	80,7%	18	7/8"
0,94	111,63	80,0%	18	7/8"
0,92	110,21	79,0%	18	7/8"
0,90	108,82	78,0%	15	3/4"
0,85	106,03	76,0%	15	3/4"
0,80	103,24	74,0%	15	3/4"
0,70	97,66	70,0%	15	3/4"
0,60	90,72	65,0%	15	3/4"
0,50	80,94	58,0%	12	5/8"

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Tabela 3, por fim, compara as propriedades das ligações otimizadas, evidenciando o trade-off entre a eficiência econômica e o comportamento estrutural da junta. A coluna "% da Capacidade Original" representa a taxa de utilização da "Ligação de Referência" (momento solicitante dividido pelo momento resistente) quando submetida ao momento solicitante de cada novo cenário, demonstrando a margem de segurança crescente e a viabilidade de otimização.

Tabela 3 – Comparação das Propriedades das Ligações Otimizadas

Propriedade	Ligação de Referência (Coef. 1.0)	Ligação Otimizada 1 (Coef. 0.90)	Ligação Otimizada 2 (Coef. 0.50)
Peso das Chapas	37,60 kg	33,43 kg (-11%)	29,26 kg (-22%)
Momento Resistente (M_{j,Rd})	139,5 kNm	140,1 kNm	122,2 kNm
Capacidade de Rotação (ϕ_{cd})	17,39 mRad	17,39 mRad	12,44 mRad (-28%)
Relação de Modos (β)	0,99	0,99	1,59

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

7.4 Quantificação do Momento Solicitante Real

A culminação da pesquisa é a determinação do momento fletor que a estrutura realmente solicita na ligação, considerando seu comportamento físico apurado pelo MEF. Para tal, foi calculado um "coeficiente de engastamento real", que traduz a rigidez do MEF para a linguagem do modelo global:

$$\text{Coeficiente Real} \approx (\text{Rigidez Real do MEF}) / (\text{Limite para Ligação Rígida})$$

$$\text{Coeficiente Real} \approx 6476,93 / 7958,69 \approx \mathbf{0,814}$$

Consultando a análise de sensibilidade para este coeficiente, estima-se que o momento solicitante real na junta seja de aproximadamente **104 kNm**. A Tabela 4 apresenta a comparação entre o cenário idealizado e o cenário real.

Tabela 4 – Comparação do Momento Solicitante

Cenário de Análise	Descrição	Momento Solicitante (kNm)
Idealizado	Comportamento de engaste perfeito (Coef. 1.0)	114,47 kNm
Real	Comportamento semirrígido (baseado na rigidez do MEF)	~104 kNm

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Este resultado quantifica o achado mais importante do trabalho: a consideração do comportamento semirrígido real da ligação, apurado via MEF, demonstra que o momento fletor efetivamente transmitido para a junta é aproximadamente 9% inferior ao previsto pelo modelo simplificado de engaste perfeito.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho partiu de uma premissa fundamental da prática de engenharia estrutural: a idealização de ligações viga-pilar como perfeitamente rígidas. O objetivo central foi investigar a validade dessa simplificação, comparando-a com uma análise numérica refinada pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), a fim de quantificar as divergências e avaliar o impacto real no dimensionamento. Ao correlacionar os resultados apresentados, foi possível construir uma cadeia de conclusões que respondem de forma robusta ao problema de pesquisa.

Inicialmente, confirmou-se que o comportamento real da ligação é significativamente mais rígido do que o previsto pelo modelo analítico normativo. A análise via MEF revelou uma rigidez rotacional de 6.476,93 t·m/rad, valor 89,6% superior ao calculado pelo Método dos Componentes. Essa divergência torna-se visualmente clara ao comparar a inclinação acentuada da rigidez inicial nos gráficos gerados. Conclui-se, portanto, que a premissa normativa baseada na NBR 8800, embora segura, mostra-se conservadora ao não capturar integralmente a robustez física da junta.

Uma consequência direta dessa rigidez real ser finita, e não infinita, como assume o modelo de engaste perfeito, é a alteração nos esforços que a ligação precisa resistir. O estudo comprovou numericamente que o comportamento semirrígido permite à junta sofrer pequenas rotações, gerando um efeito de redistribuição de esforços. Enquanto o modelo idealizado calculou um Momento Solicitante de 114,47 kNm, a análise do comportamento real apurou que o momento efetivamente transmitido é de aproximadamente 104 kNm. Essa redução de cerca de 9% demonstra que o modelo de engaste perfeito superestima o esforço na ligação, ocultando uma margem de segurança que pode ser convertida em otimização de projeto.

Essa constatação valida o potencial de otimização, mas impõe um equilíbrio técnico necessário. A análise de sensibilidade demonstrou que considerar o comportamento semirrígido permite o dimensionamento de ligações mais econômicas, alcançando-se uma redução de até 22% no peso das chapas. Contudo, observou-se uma contrapartida crítica: a solução mais econômica sofreu uma perda de 28% em sua capacidade de rotação e apresentou um aumento no fator de modo de falha. Isso indica que, embora a otimização seja viável e financeiramente atrativa,

ela altera o comportamento da ligação, tornando-a menos dúctil, o que exige do engenheiro uma ponderação consciente entre eficiência de material e desempenho da estrutura.

Em síntese, demonstra-se que a análise refinada via MEF não apenas oferece uma visão mais precisa, mas também fornece dados quantitativos para projetos mais eficientes. Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a verificação do Estado Limite de Serviço (ELS), analisando os deslocamentos na viga para garantir que as soluções otimizadas atendam aos critérios de conforto. Adicionalmente, sugere-se expandir a metodologia para outras tipologias, como ligações soldadas, e realizar uma análise de custo global que compare o impacto econômico total da estrutura otimizada versus a abordagem tradicional.

9 REFERÊNCIAS

ANELLI, J. S. de A. **Análise Numérica do Comportamento de “T-Stubs” em Ligações Viga-Coluna em Estruturas de Aço**. 2011. 149f. Projeto Final - Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

BARBERO, Ever J. **Finite Element Analysis of Composite Materials using Abaqus**. CRC Press, 2013.

COMPUTERS AND STRUCTURES. CSI Analysis Reference Manual: for SAP2000, ETABS, SAFE and CSiBridge. Walnut Creek: Computers and Structures, 2024. Disponível em: <https://www.csiamerica.com>. Acesso em: 15 out. 2024.

CYPE INGENIEROS. CYPE 3D: software para arquitetura, engenharia e construção. Versão 2024. Alicante: CYPE Ingenieros, 2024. Disponível em: <http://www.cype.com>. Acesso em: 18 nov. 2024.

CYPE INGENIEROS. CYPE Connect: software para projetos de ligações em estruturas de aço. Versão 2024. Alicante: CYPE Ingenieros, 2024. Disponível em: <http://www.cype.com>. Acesso em: 18 nov. 2024.

COOK, R. D.; MALKUS, D. S.; PLESHA, M. E.; WITT, R. J. **Concepts and Applications of Finite Element Analysis**. 4. ed. New York: John Wiley & Sons, 2002.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 1993-1-8: Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints**. Brussels, 2005.

FAKURY, Ricardo Hallal; SILVA, Ana Lydia Reis de Castro; CALDAS, Rodrigo Barreto. **Dimensionamento de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto**. São Paulo: Pearson, 2016.

GONÇALVES, Alexandre Dias. **Estudo comparativo das soldas realizadas com os processos de soldagem SMAW e TW aplicados na união de trilhos A 100 da norma DIN 536**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Ligações em estruturas metálicas**. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil / CBCA, 2017. 138 p.; 29 cm. -- (Série Manual de Construção em Aço). Revisão de Alexandre Luiz Vasconcellos.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michele. **Estruturas de aço: dimensionamento prático**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

SANTOS, Luciano Barbosa dos. **Influência da rigidez das ligações em estruturas de aço**. 1998. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

SOUZA, Remo Magalhães de. **O método dos elementos finitos aplicado ao problema de condução de calor**. 2003. 80 f. Universidade Federal do PARÁ, Belém, 2019.