

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Cândida Treméa

**A INFLUÊNCIA DA CONSIDERAÇÃO DA FLEXIBILIDADE
NAS LIGAÇÕES NO PROJETO DE ESTRUTURAS
METÁLICAS**

Porto Alegre
dezembro 2010

CÂNDIDA TREMÉA

**A INFLUÊNCIA DA CONSIDERAÇÃO DA FLEXIBILIDADE
NAS LIGAÇÕES NO PROJETO DE ESTRUTURAS
METÁLICAS**

Trabalho de Diplomação a ser apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Ruy Carlos Ramos de Menezes

Porto Alegre
dezembro 2010

CÂNDIDA TREMÉA

**A INFLUÊNCIA DA CONSIDERAÇÃO DA FLEXIBILIDADE
NAS LIGAÇÕES NO PROJETO DE ESTRUTURAS
METÁLICAS**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, dezembro de 2010

Prof. Ruy Carlos Ramos de Menezes
Dr, University Innsbruck, Áustria
Orientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Profa. Paulete Fridman Schwetz (UFRGS)
Mestre / UFRGS

Eng. Marcelo Marcondes de Carvalho
Engenheiro Civil / UFRGS

Prof. Ruy Carlos Ramos de Menezes (UFRGS)
Dr. pela University Innsbruck/Áustria

Dedico este trabalho a minha mãe, Lourdes, que sempre acreditou em mim e que tanto me ajudou e incentivou.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Ruy, orientador deste trabalho, pelo apoio constante e pela paciência com minha ansiedade.

Agradeço a Prof^a Carin pela dedicação e atenção.

O que não provoca minha morte faz com que eu fique
mais forte.

Friedrich Nietzsche

RESUMO

TREMÉA, C. **A Influência da Consideração da Flexibilidade nas Ligações no Projeto de Estruturas Metálicas**. 2010. 67 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Este trabalho aborda ligações semi-rígidas entre vigas e colunas, enfatizando a influência da flexibilidade dessas ligações na análise das estruturas metálicas e com o propósito de obter uma avaliação mais realista dos modelos estruturais que representam o comportamento dessas ligações. Este comportamento semi-rígido das ligações provoca diferentes distribuições das solicitações nos elementos que compõem a estrutura, se comparadas aos resultados obtidos com os métodos tradicionais de cálculo, apresentados na NBR 8800/2008, em que estas ligações são consideradas rígidas ou flexíveis. Os métodos utilizados para determinar as propriedades destas conexões são baseados no Eurocode 3, o qual apresenta subsídios para dimensionamento e análise de elementos metálicos que possuam flexibilidade nas conexões. Foi utilizado um software de análise numérica para a obtenção de resultados relativos ao comportamento momento-rotação e ao efeito da flexibilidade na distribuição de esforços que possam ser comparados aos encontrados na bibliografia consultada. Através da análise de um pórtico plano, em cujas ligações empregaram-se molas rotacionais, simulando diferentes graus de flexibilidade, foi possível observar a redistribuição das solicitações de acordo com a configuração da ligação.

Palavras-chave: ligações semi-rígidas; ligações aparafusadas; ligações soldadas; rigidez rotacional, momento resistente.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: diagrama da pesquisa.....	16
Figura 2: deformação rotacional na conexão.....	20
Figura 3: classificação das ligações quanto à rigidez.....	21
Figura 4: classificação das ligações quanto à resistência.....	23
Figura 5: tipos de ligações comuns e curvas momento-rotação.....	25
Figura 6: ligação flexível com uma cantoneira aparafusada.....	26
Figura 7: ligação flexível com duas cantoneira soldadas.....	27
Figura 8: ligação flexível com duas cantoneiras aparafusadas.....	27
Figura 9: ligação flexível com chapa de extremidade.....	28
Figura 10: ligação semi-rígida com chapa simples soldada.....	28
Figura 11: ligação semi-rígida com chapa de topo aparafusada assimétrica.....	29
Figura 12: ligação semi-rígida com chapa de topo aparafusada simétrica.....	30
Figura 13 ligação rígida soldada.....	30
Figura 14: modelagens para ligação viga-coluna.....	32
Figura 15: representações matemáticas de curvas momento-rotação.....	33
Figura 16: limites de classificação.....	37
Figura 17: regras de cálculo para a curva momento-rotação.....	39
Figura 18: método das componentes aplicado à ligação viga-coluna.....	42
Figura 19: rotina de verificações das ligações.....	43
Figura 20: braço de alavanca (tração/compressão).....	44
Figura 21: distribuição de forças.....	45
Figura 22: etapas da verificação da resistência a tração das linhas de parafusos.....	45
Figura 23: zonas críticas para análise da ligação.....	46
Figura 24: componentes de uma ligação viga-coluna.....	47
Figura 25: modelo de pórtico analisado.....	48
Figura 26: perfis que compõem o pórtico analisado.....	50
Figura 27: modelo analisado ligação semi-rígida.....	51
Figura 28: modelo de viga com molas rotacionais.....	52
Figura 29: modelo de viga deformada com molas rotacionais.....	52
Figura 30: dimensões da seção da viga, em centímetros	53
Figura 31: propriedades da seção da viga, em centímetros	54
Figura 32: inserção de coeficientes de rigidez para ligação flexível	54
Figura 33: diagrama momento fletor ligações rígidas.....	59

Figura 34 diagrama esforço cortante ligações rígidas.....	59
Figura 35: diagrama esforço normal ligações rígidas.....	60
Figura 36: diagrama momento fletor ligações flexíveis.....	60
Figura 37: diagrama esforço cortante ligações flexíveis.....	61
Figura 38: diagrama esforço normal ligações flexíveis.....	61
Figura 39: diagrama momento fletor ligações semi-rígidas.....	62
Figura 40: diagrama esforço cortante ligações semi-rígidas.....	62
Figura 41: diagrama esforço normal ligações semi-rígidas.....	63

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: dados do pórtico analisado.....	49
Quadro 2: dimensões e características dos perfis do pórtico analisado.....	49
Quadro 3: resultados ligações rígidas.....	56
Quadro 4: resultados ligações flexíveis.....	57
Quadro 5: resultados ligações semi-rígidas.....	58
Quadro 6: variação das solicitações para ligações rígidas comparadas às ligações semi-rígidas.....	64
Quadro 7: variação das solicitações para ligações flexíveis comparadas às ligações semi-rígidas.....	65

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 MÉTODO DE PESQUISA	14
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA.....	14
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	14
2.2.1 Objetivo principal	14
2.2.2 Objetivos secundários	14
2.3 PRESSUPOSTOS.....	15
2.4 PREMISSAS.....	15
2.5 DELIMITAÇÕES.....	15
2.6 LIMITAÇÕES.....	15
2.7 DELINEAMENTO DA PESQUISA.....	16
3 LIGAÇÕES METÁLICAS VIGA-COLUNA	18
3.1 CLASSIFICAÇÃO DAS LIGAÇÕES.....	19
3.1.1 Classificação quanto à rigidez rotacional	20
3.1.1.1 Ligações Flexíveis.....	21
3.1.1.2 Ligações Rígidas.....	21
3.1.1.3 Ligações Semi-rígidas.....	22
3.1.2 Classificação quanto à resistência ao momento	22
3.1.2.1 Ligações Rotuladas.....	23
3.1.2.2 Ligações de Resistência Total.....	24
3.1.2.3 Ligações de Resistência Parcial.....	24
3.2 TIPOS DE LIGAÇÕES.....	25
3.2.1 Ligação flexível com cantoneira simples na alma	26
3.2.2 Ligação flexível com duas cantoneiras na alma	26
3.2.3 Ligação flexível com chapa de extremidade	27
3.2.4 Ligação semi-flexível com chapa simples	28
3.2.5 Ligação semi-flexível com chapa de topo estendida aparafusada	29
3.2.6 Ligação rígida soldada	30
3.3 MODELAGEM COMPUTACIONAL DAS LIGAÇÕES SEMI-RÍGIDAS.....	31
3.3.1 Representação matemática	32
3.3.2 Modelagem numérica	33
4 REFERÊNCIAS NORMATIVAS	34
4.1 ABORDAGEM SEGUNDO NBR 8800/2008.....	34

4.2 ABORDAGEM SEGUNDO EUROCODE 3.....	35
4.2.1 Classificação das ligações segundo Eurocode 3	37
4.2.2 Propriedades das ligações.....	38
4.2.2.1 Resistência das ligações.....	39
4.2.2.2 Rigidez das ligações.....	41
4.2.3 Análise das ligações: método das componentes.....	41
5 ANÁLISE ELEMENTOS ESTRUTURAIS.....	48
5.1 ELEMENTOS UTILIZADOS NO PROCESSO DE ANÁLISE.....	48
5.2 DEFINIÇÃO DOS INTERVALOS DE RIGIDEZ.....	50
5.3 LIGAÇÃO SEMI-RÍGIDA UTILIZADA.....	51
5.4 ANÁLISE DO MODELO.....	51
5.5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	55
5.6 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS.....	63
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	66
REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

Soluções construtivas com estruturas de aço podem ser significativamente competitivas em relação a outras alternativas quando aspectos relacionados a prazos, produtividade e impacto ambiental são considerados. Comparações mais amplas do que o simples cotejamento de valores dos materiais têm sido cada vez mais adotadas e, assim, o emprego do aço cresce bastante relativamente ao que já foi.

O projeto de estruturas de aço no Brasil segue recomendações da NBR 8800, revisada e publicada em 2008. Mesmo com a recente revisão, esta Norma ainda não considera algumas abordagens, mais avançadas na perspectiva da modelagem, já existentes em normas internacionais. Por exemplo, os códigos de projeto da Comunidade Européia (Eurocodes) consideram a flexibilidade nas ligações como uma forma de melhor avaliar o real comportamento das estruturas. Na Norma brasileira, ligações entre vigas e colunas são consideradas como sendo ou do tipo engastadas (restrição total ao giro), ou do tipo rotuladas (giro totalmente livre). Mesmo assim, fortemente sustentado pela observação, sabe-se que comportamento real de qualquer tipo de ligação é algo intermediário, sendo o grau de flexibilidade associado ao tipo idealizado (mais flexíveis quando idealizadas como rótulas e menos flexíveis quando idealizadas como engastes). Além disso, a resposta da estrutura em termos de distribuição de esforços (por exemplo, de momentos) é dependente da flexibilidade da ligação. Portanto, pode-se inferir que brevemente a abordagem já prevista em normas como nos Eurocodes será contemplada também na Norma brasileira.

Neste contexto, este trabalho objetiva a abordagem dos impactos da consideração da flexibilidade das ligações e seus efeitos sobre a distribuição dos momentos fletores nos elementos estruturais e, com isso, suas implicações no projeto estrutural. Tais considerações são de grande importância para a realização de projetos com modelos matemáticos mais precisos. Adicionalmente, é lícito considerar que a utilização de modelos mais aprimorados também resulte em maior confiabilidade e, conseqüentemente, em maior economia numa perspectiva mais abrangente considerando o custo do risco.

Uma extensa revisão bibliográfica sobre o tema foi realizada com base na prática e em normas de projeto. Foram realizadas análises teóricas e avaliações de estruturas típicas com e sem tais considerações com base em recomendações da bibliografia.

A análise numérica se justifica ao passo que evita extrapolações dos resultados para as situações que não se pode comprovar experimentalmente, seja pela impossibilidade de monitoramento de um protótipo ou pela inacessibilidade dos instrumentos para coleta de dados. Como ferramenta para avaliações, tal estudo utilizou o programa SAP2000 para análise estrutural.

O trabalho é dividido em 6 capítulos. A este primeiro coube introduzir o assunto do trabalho e ao segundo capítulo, tratar do seu método, apresentando a questão de pesquisa, os objetivos primário e secundário, pressupostos, premissas, delimitações, limitações e delineamento da pesquisa, com fluxograma das atividades.

No terceiro capítulo são abordadas as ligações entre vigas e colunas em estruturas metálicas, suas classificações quanto à resistência à rotação e ao momento, tipos mais comuns para projeto. Ainda trata da modelagem de ligações semi-rígidas para a obtenção da curva momento-rotação.

O quarto capítulo trata dos procedimentos previstos pela NBR 8800/2008 no que diz respeito ao dimensionamento dos tipos de ligações que são contempladas por esta Norma, que são rígidas ou flexíveis. Este capítulo ainda aborda ligações semi-rígidas pelos métodos do Eurocode 3.

O quinto capítulo trata da análise dos elementos estruturais. Para tanto, apresentam-se as características desses elementos utilizados no processo de análise, os métodos de cálculos e suas aplicações e a comparação dos resultados dos diferentes métodos.

O sexto capítulo expõe as conclusões que englobam todas as análises realizadas no trabalho, assim como os resultados obtidos a partir dos distintos métodos utilizados.

2 MÉTODO DE PESQUISA

A seguir serão apresentados os elementos que definem esta pesquisa.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa deste trabalho é: quais os efeitos na distribuição dos esforços nos elementos estruturais com ligações semi-rígidas se comparadas às ligações totalmente rígidas ou totalmente flexíveis (ambas vinculações ideais) convencionalmente utilizadas para projeto de estruturas metálicas?

2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos do trabalho estão classificados em principal e secundários e são apresentados nos próximos itens.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é a comparação das respostas da estrutura quanto à distribuição de esforços solicitantes considerando ou não a flexibilidade nas ligações de estruturas metálicas.

2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários deste trabalho são:

- a) identificação dos casos onde os procedimentos de cálculo atualmente utilizados subestimam ou superestimam as solicitações;

- b) verificação dos modelos matemáticos para representar a flexibilidade das ligações.

2.3 PRESSUPOSTOS

São considerados válidos os métodos de dimensionamento de ligações metálicas entre viga e coluna apresentados no capítulo 6 da NBR 8800/2008, para ligações rígidas e flexíveis, e no Eurocode 3, para semi-rígidas, os quais serão utilizados para definir e caracterizar estas ligações.

2.4 PREMISSAS

A análise estrutural considera as ligações como pontos nodais. Quando nos nós não se modifica o ângulo relativo entre os elementos que o compõe após o carregamento, ou seja, é mantida a continuidade rotacional, estes são classificados rígidos e transmitem totalmente o momento fletor. Em contrapartida, são classificados como flexíveis os nós em que há giro livre e a conseqüente descontinuidade rotacional entre os elementos. Neste caso, não há nenhuma transmissão de momento fletor.

2.5 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimitou-se ao estudo de estruturas metálicas formadas por barras, como, por exemplo, pórticos estruturais de edifícios.

2.6 LIMITAÇÕES

O trabalho estará baseado em dados obtidos da literatura e não contemplará pesquisa experimental. Assim, as ligações semi-rígidas serão consideradas pelo método do Eurocode 3 e as ligações totalmente rígidas ou totalmente flexíveis pela NBR 8800/2008.

2.7 DELINEAMENTO DA PESQUISA

O delineamento do trabalho de pesquisa abrangeu os seguintes aspectos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) definição da estrutura utilizada;
- c) aplicação da NBR 8800/2008;
- d) análise numérica a partir do Eurocode 3;
- e) comparação dos resultados;
- f) conclusões.

A representação esquemática do delineamento da pesquisa segue na figura 1.

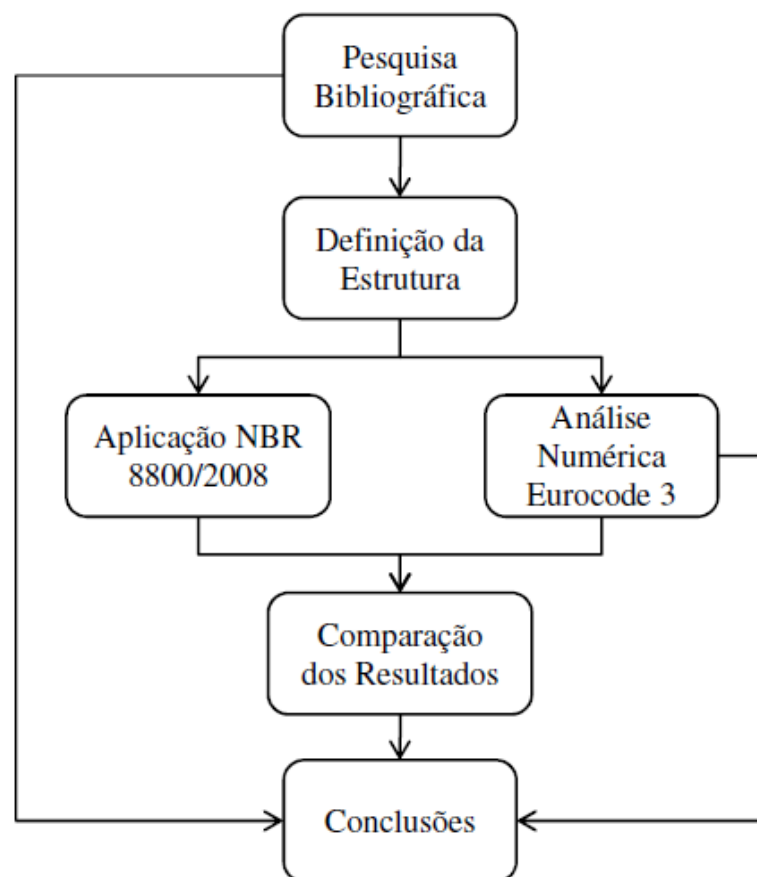


Figura 1: representação esquemática do delineamento da pesquisa

Inicialmente, realiza-se a pesquisa bibliográfica, objetivando o aprofundamento na questão da pesquisa, o conhecimento do método atualmente empregado para análise estrutural de acordo

com a NBR 8800/2008 e com o Eurocode 3 e ainda a verificação da relação momento fletor *versus* rotação nos casos de ligações rígidas, flexíveis ou semi-rígidas. Deve-se salientar que esta etapa estendeu-se ao longo do cronograma da pesquisa, a fim de garantir subsídios para as etapas posteriores.

A seguir, define-se a estrutura que será utilizada na análise numérica. Após, procede-se concomitantemente a aplicação de NBR 8800/2008, para casos em que não se utiliza flexibilidade das ligações, e a análise numérica, de acordo com as orientações do Eurocode 3, para casos em que faz-se uso de tal flexibilidade com a utilização de um software. A seguir, executa-se a etapa de comparação dos resultados obtidos nas etapas anteriores. Finalmente, apresentaram-se as conclusões e considerações finais.

3 LIGAÇÕES METÁLICAS VIGA-COLUNA

Segundo a NBR 8800, ligações metálicas são elementos de ligação, tais como enrijecedores, chapas de ligação, cantoneiras e consolos, ou ainda meios de ligação, como soldas, parafusos, barras redondas rosqueadas e pinos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 62).

Maggi e Gonçalves (2005, p. 21-22) acrescentam que:

As estruturas metálicas em geral, se observadas cuidadosamente, revelam uma característica de essencial importância sob o aspecto de sua concepção, projeto e construção, traduzida na influência do desempenho de suas ligações entre vigas e pilares no comportamento global da estrutura. Tal influência é acentuada pela possibilidade de utilização de uma grande diversidade de configurações e dispositivos para as ligações, o que potencialmente introduzirá descontinuidades geométricas aliadas às descontinuidades mecânicas oriundas do material utilizado, que podem induzir a um comportamento global não linear da estrutura.

Para Maggi e Gonçalves (2005, p. 22), segundo esta afirmação, é impossível apenas se considerar ligações idealizadas como perfeitamente rígidas ou flexíveis. Esta prática, convencionalmente usada em análise estrutural, sugere que as ligações são pontos nodais. Estes nós são classificados como rígidos quando se mantém a continuidade rotacional, sem modificação do ângulo relativo entre os elementos após a ação do carregamento, quando há transmissão total do momento fletor. No entanto, os nós em que não se tem nenhuma transmissão de momentos fletores e, conseqüentemente, apresentam descontinuidade rotacional entre os elementos que o compõe, são classificados como flexíveis. Inclui-se um tipo intermediário de classificação de ligações quanto à continuidade rotacional e à transmissão de momento que é a ligação semi-rígida.

Castro (2006, p. 23) considera que:

O comportamento real (semi-rígido) das ligações permite um dimensionamento mais correto e pode conduzir a economias significativas. Ao considerar este comportamento real nos projetos executados inicialmente com ligações flexíveis uma redução significativa nas flechas das vigas e uma diminuição do comprimento de flambagem das colunas, além de diminuir os deslocamentos laterais da estrutura.

Por outro lado, ao se admitir que as ligações são infinitamente rígidas, introduzem-se erros no cálculo das estruturas, em geral contra a segurança. Aliado a este fato o controle de rigidez de uma ligação semi-rígida permite uma melhor distribuição de momentos na viga gerando com isto uma economia significativa no custo global da estrutura.

O comportamento dos elementos de ligação tem sido objeto de estudo ao longo dos últimos anos, no sentido de se desenvolver modelos capazes de caracterizar completamente a resposta de ligações para vários tipos de solitação [...].

Com a avaliação de novos conceitos de projetos semi-rígidos, tem-se a possibilidade de dimensionar as estruturas de aço de forma mais racional e diminuindo os custos, pois há grande liberdade de detalhamento de ligações dentro dos limites extremos: rígida e flexível. Em geral, qualquer rigidez para uma determinada ligação pode ser conseguida para atender o comportamento estrutural desejado.

Um dos critérios para se ter uma economia nas estruturas é através da otimização do detalhamento de ligações. O Eurocode 3¹ [...] impõe limites para que a ligação seja considerada rígida, de acordo com as características dos elementos constituintes da mesma. Através do Eurocode 3² [...] pode-se classificar a ligação a partir da determinação do momento fletor resistente e da rigidez inicial da ligação. Para se otimizar um nó da estrutura, seu detalhe pode ser modificado passo a passo alterando a sua configuração geométrica sem modificar sua característica de nó.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DAS LIGAÇÕES

Pode-se classificar as ligações metálicas existentes entre viga e coluna de acordo com a rigidez e a resistência. Em função da rigidez, tem-se ligações flexíveis, rígidas e semi-rígidas. Quanto à resistência, as ligações podem ser: nominalmente rotuladas, de resistência total e de resistência parcial (NARDIN et al., 2007, p. 23). Castro (2006, p. 25) afirma que as propriedades de resistência à flexão e de rigidez a rotação caracterizam a curva momento *versus* rotação verificadas nas análises das ligações. Tais classificações serão descritas nos próximos itens.

¹ EUROCODE 3, prEN 1993-1-8, Design of steel structures – Part 1.8: Design of joints, 2003.

² op. cit.

3.1.1 Classificação quanto à rigidez rotacional

Mello (1999, p. 59) explica que:

A deformação nas conexões de aço entre vigas e colunas é dada pelo seu deslocamento rotacional, " θ_r ", causado pela curvatura dada pelo momento " M " no plano [...] [figura 2]. O efeito da deformação angular da conexão pode alterar o efeito da estabilidade das barras desde que a rotação adicional cause como resultado a redução na rigidez efetiva das barras para a qual as conexões são designadas. O acréscimo de rotação nas barras pode aumentar o efeito "P- Δ " e consequentemente, a estabilidade global da estrutura pode ser afetada.

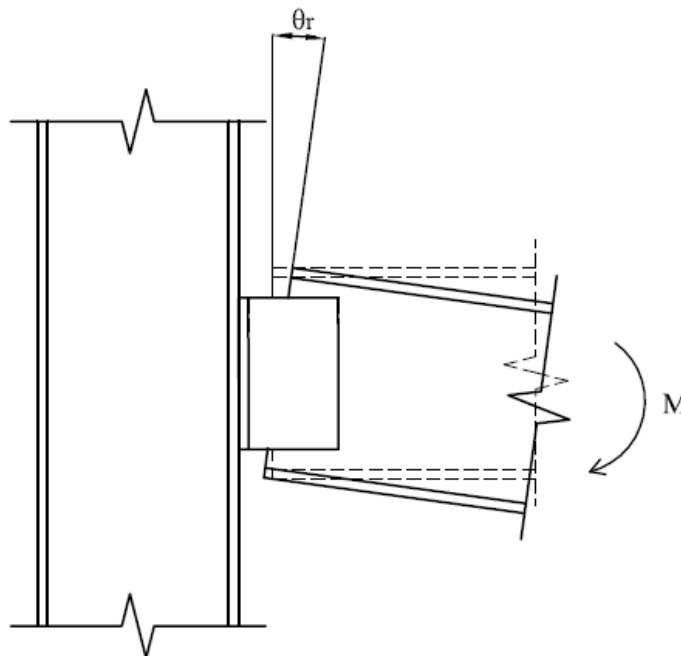


Figura 2: deformação rotacional na conexão (adaptado de MELLO, 1999)

Castro (2006, p. 25-26) afirma que a classificação das ligações quanto à rigidez rotacional leva em conta a rigidez lateral da estrutura, podendo ser rotulada, rígida ou semi-rígida. A figura 3 representa tais classificações.

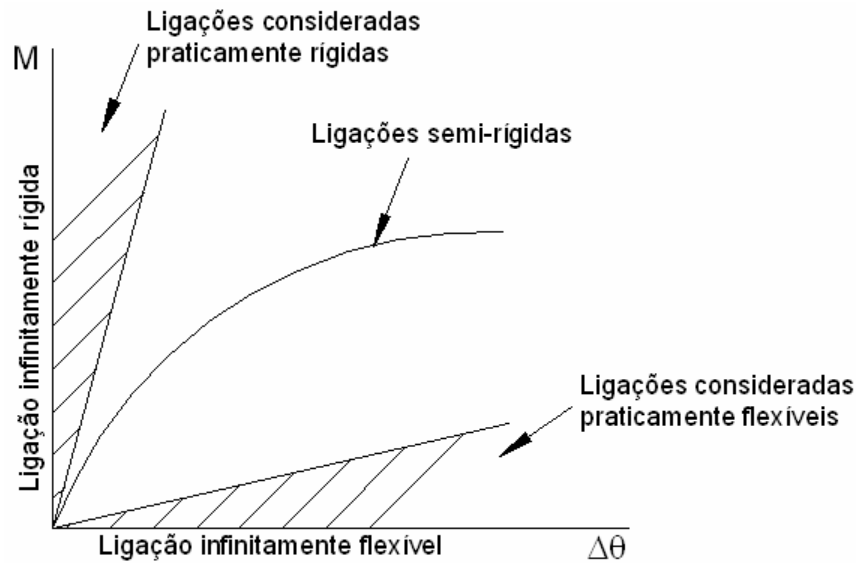


Figura 3: classificação das ligações quanto à rigidez (CASTRO, 2006)

3.1.1.1 Ligações Flexíveis

Uma ligação é tida como flexível quando permite, no mínimo, 80% de rotação teórica esperada (NARDIN et al., 2007, p. 23). Barbosa (2006, p. 30) afirma que “Nas ligações flexíveis a capacidade de rotação deve ser suficiente para capacitar que todas as rótulas plásticas se desenvolvam com cargas abaixo do carregamento de projeto.”. Castro (2006, p. 25) reforça esta afirmação, pois define:

São ligações capazes de transferir as forças cortantes e eventualmente forças normais provenientes da viga e da coluna. Além disso, elas devem ser capazes de se deformarem sem o desenvolvimento de momentos significativos, que possam afetar a resistência das colunas a elas conectadas, [...].

3.1.1.2 Ligações Rígidas

Uma ligação é considerada rígida quando restringe acima de 90% da capacidade de rotação relativa entre os elementos. Sendo assim, a deformação no nó é pequena e não influencia a distribuição dos momentos (NARDIN et al., 2007, p. 23). Barbosa (2006, p. 30) concorda, quando afirma que:

Nas ligações [...] [rígidas], a capacidade de rotação é limitada, devem ser considerados efeitos acima da resistência, dimensionamento em regime plástico.

A rigidez [...] [deste tipo de conexão] deve ser tal que, abaixo das cargas de projeto, as rotações necessárias para as rótulas plásticas não excedam a capacidade de rotação.

Castro (2006, p. 26) complementa que:

Estas ligações transmitem todos os esforços nela impostos com deformações insignificantes, pois estas não influenciam a distribuição de esforços na estrutura e sua deformação total. Estas deformações podem ser desprezadas, [...], pois as mesmas não reduzem a resistência da estrutura mais que 5% [...].

3.1.1.3 Ligações Semi-Rígidas

Uma ligação pode ser classificada como semi-rígida quando a rotação relativa entre os elementos que a compõe varia de 20 a 90% da rotação correspondente à ligação flexível (NARDIN et al., 2007, p. 23). Castro (2006, p. 27) adiciona que:

Quando a ligação não atende nem ao critério de ligação rígida ou de rotulada, deve ser classificada como semi-rígida. Estas ligações devem ser projetadas para um grau intermediário de interação entre os elementos da estrutura baseado em sua curva momento *versus* rotação, [...].

Barbosa (2006, p. 30) concorda, pois afirma que “A capacidade de rotação de uma conexão [...] [semi-rígida], na qual ocorram rótulas plásticas locais, não deve ser menor do que a necessária para que todas as rótulas plásticas se desenvolvam abaixo do carregamento de projeto.”.

3.1.2 Classificação quanto ao momento resistente

A figura 4 apresenta a classificação das ligações entre viga e coluna quanto ao critério de resistência ao momento (CASTRO, 2006, p. 28). Assim, tais ligações podem ser flexíveis (rotuladas), de resistência total e de resistência parcial (BARBOSA, 2006, p. 34).

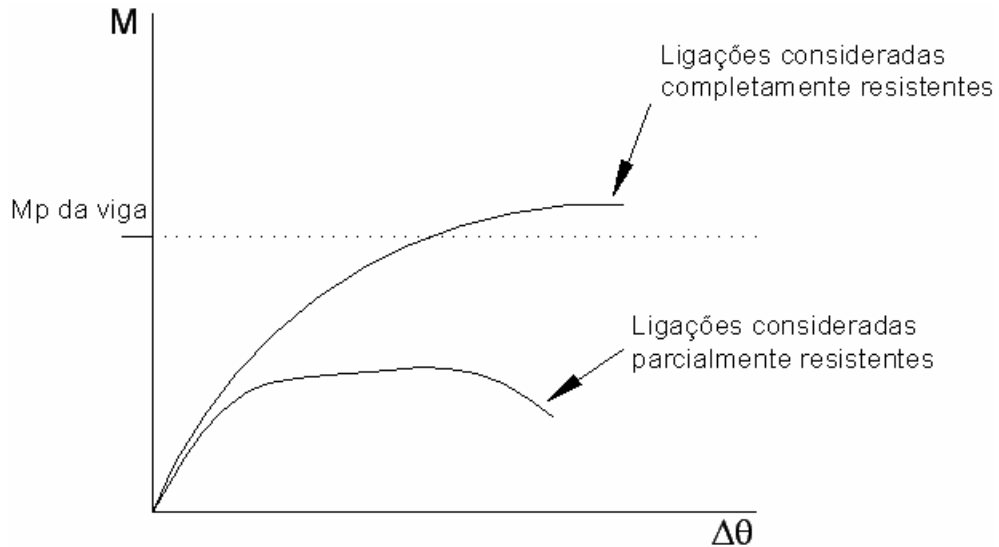


Figura 4: classificação das ligações quanto à resistência (CASTRO, 2006)

3.1.2.1 Ligações Rotuladas

São consideradas ligações nominalmente rotuladas aquelas que transferem para os elementos adjacentes apenas esforços normais e cortantes (NARDIN et al., 2007, p. 23). Castro (2006, p. 27-28) afirma que “Segundo este critério uma ligação deve ter capacidade de transmitir os esforços sem desenvolver momentos significativos [...]. Por outro lado, sua capacidade de rotação deve ser suficiente para o desenvolvimento de todas as rótulas plásticas necessárias.” e as classifica pela seguinte condição:

$$M_{j,Rd} \leq 0,25 \times \text{menor} (M_{b,pl,Rd} ; M_{c,pl,Rd})$$

Onde:

$M_{j,Rd}$ é o momento resistente de cálculo da ligação;

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

$M_{c,pl,Rd}$ é o momento resistente de cálculo da coluna.

Barbosa (2006, p. 29) explica que “As ligações [...] [rotuladas] não são capazes de transmitir momentos significativos. Estas ligações devem ser dimensionadas de forma que as forças atuantes nas componentes da conexão não comprometam a resistência do conjunto.”.

3.1.2.2 Ligações de Resistência Total

As ligações de resistência total são aquelas em que a resistência ao momento fletor é maior que a dos elementos conectados, transferindo as rótulas plásticas para os elementos (NARDIN et al., 2007, p. 23). O Eurocode 3 (COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, 2005, p. 52) sugere que a resistência de cálculo destas ligações seja sempre maior que a resistência de cálculo dos elementos que a compõem, como viga e coluna. Barbosa (2006, p. 29) explica que “As ligações [...] [de resistência total] são capazes de transmitir forças e momentos devendo ser dimensionadas para que as deformações não tenham influência significativa na distribuição das forças internas e momentos na estrutura.”.

3.1.2.3 Ligações de Resistência Parcial

São classificadas como ligações de resistência parcial aquelas em que a resistência de cálculo é menor que a resistência do elemento conectado, levando à formação de rótulas plásticas (NARDIN et al., 2007, p. 23). Eurocode 3 (COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, 2005, p. 52) complementa que são ligações em que a resistência de cálculo da ligação deve ser menor do que a resistência de cálculo da viga ou da coluna, o que leva a rótula plástica a se iniciar na ligação e as condiciona da seguinte forma:

- a) $M_{j,Rd} \geq \text{menor} (M_{b,pl,Rd} ; M_{c,pl,Rd})$ ligações com a coluna enrijecida;
- b) $M_{j,Rd} \geq \text{menor} (M_{b,pl,Rd} ; 2 \cdot M_{c,pl,Rd})$ ligações com a coluna não enrijecida

Barbosa (2006, p. 29) explica que:

As conexões que se enquadram numa faixa intermediária são as ligações [...] [de resistência parcial]. Elas são caracterizadas por suas componentes terem um grau de interação, baseado no dimensionamento da curva momento-rotação característico dos nós. Essa relação entre as componentes é que determina o quão a ligação está mais próxima do comportamento rígido ou totalmente flexível. Estas ligações são capazes de transmitir as forças e parcialmente os momentos.

3.2 TIPOS DE LIGAÇÕES

Castro (2006, p. 30) afirma que:

O comportamento de uma estrutura depende das características dos seus elementos e suas ligações viga-coluna. Desta forma, o detalhamento da ligação deve estar relacionado com as necessidades de rigidez, resistência, ductilidade, facilidade de fabricação e montagem, filosofia de detalhamento da fábrica e criatividade do projetista.

Na figura 5 é possível identificar alguns tipos de ligação frequentemente utilizadas no projeto de estruturas metálicas e suas respectivas curvas momento *versus* rotação, as quais dependem dos seguintes fatores (CASTRO 2006, p. 30-31):

- a) tipo e tamanho dos parafusos;
- b) distância dos parafusos à face da coluna;
- c) espessura das cantoneiras e placas de ligação;
- d) altura da viga e da ligação;
- e) presença ou não de enrijecedores nas colunas;
- f) se a ligação é na mesa ou na alma da coluna;
- g) se a ligação é na mesa ou na alma da viga;
- h) espessura da mesa ou alma da coluna;
- i) tensão de escoamento da viga, da coluna e do material dos componentes da ligação.

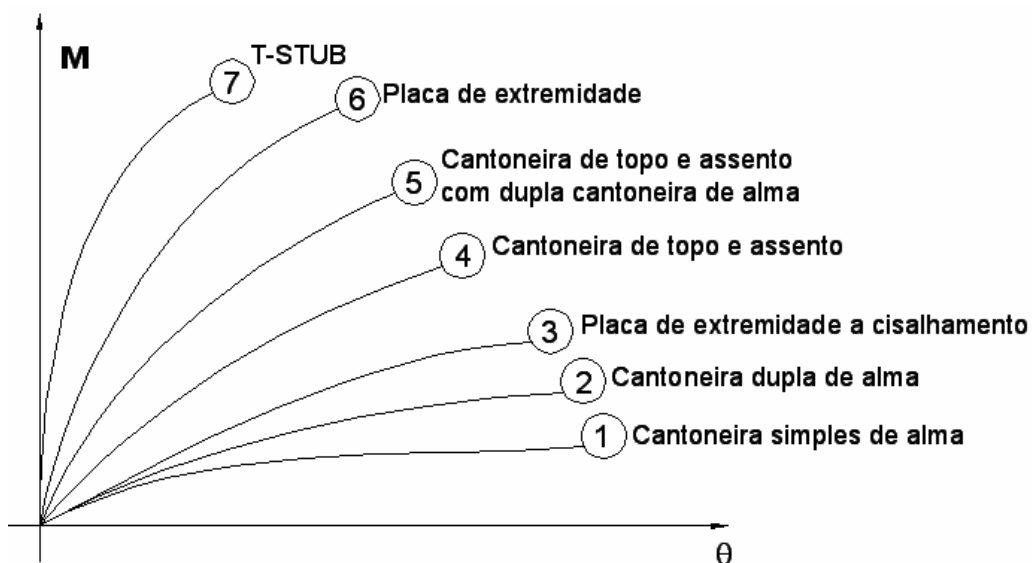


Figura 5: tipos de ligações comuns e curvas momento-rotacionamento (CASTRO, 2006)

3.2.1 Ligação flexível com cantoneira simples na alma

Ligação flexível com cantoneira simples na alma consiste em uma cantoneira soldada ou aparafusada na alma da viga e conectada a mesa da coluna por meio de parafusos, mostrada na figura 6. Esta conexão possui resistência ao momento aproximadamente igual à metade da conexão com duas cantoneiras na alma (MELLO, 1999, p. 60).

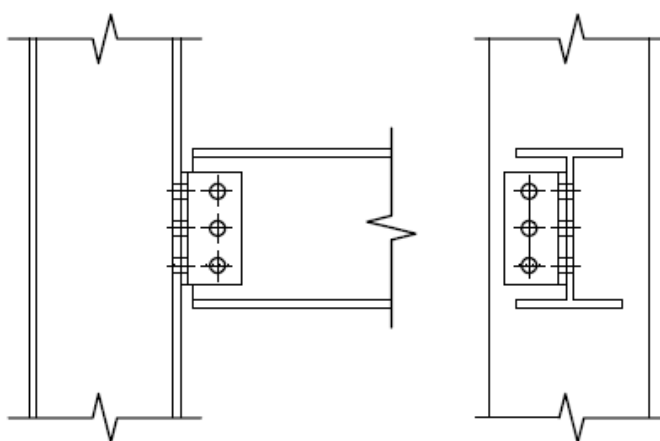


Figura 6: ligação flexível com uma cantoneira aparafusada (adaptado de MELLO, 1999)

3.2.2 Ligação flexível com duas cantoneiras na alma

Ligação flexível com duas cantoneiras na alma trata-se de uma ligação em que a alma da viga é ligada a mesa da coluna através de duas cantoneiras, as quais têm as abas soldadas na viga e aparafusadas na coluna, conforme figura 7. Neste caso, a rótula está localizada na face da coluna, ou seja, no plano da ligação aparafusada, configurando uma ligação flexível. Outra configuração para esta ligação é possível se a cantoneira for aparafusada na alma da viga e também na mesa da coluna, como se pode ver na figura 8, com a rótula também no plano vertical (BAIÃO FILHO; SILVA, 2004, p. 19).

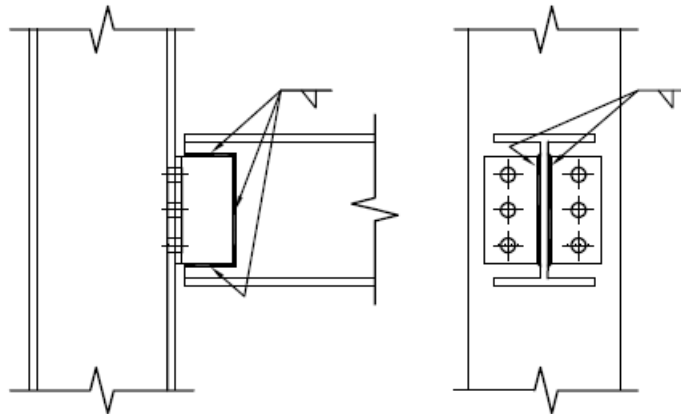


Figura 7: ligação flexível com duas cantoneiras soldadas na alma da viga
(adaptado de MELLO, 1999)

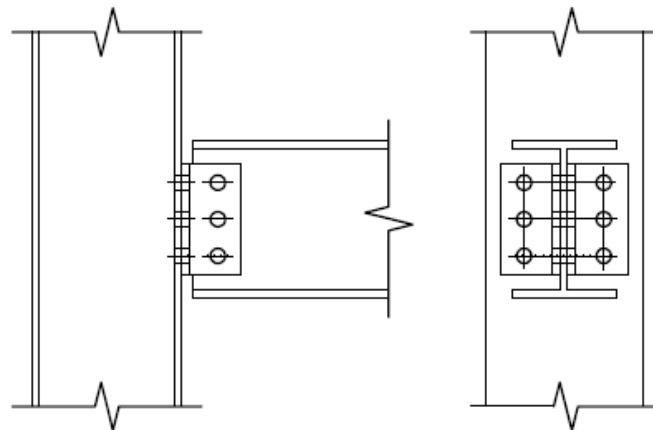


Figura 8: ligação flexível com duas cantoneiras aparafusadas na viga e na coluna
(adaptado de MELLO, 1999)

3.2.3 Ligação flexível com chapa de extremidade

A ligação flexível com chapa de extremidade utiliza uma chapa soldada na extremidade da viga e aparafusada na mesa da coluna, conforme esquematizado na figura 9. A chapa de extremidade deve ter, no máximo, a altura do perfil da viga e mais flexível será a ligação quanto menor for sua espessura (BAIÃO FILHO; SILVA, 2004, p. 65).

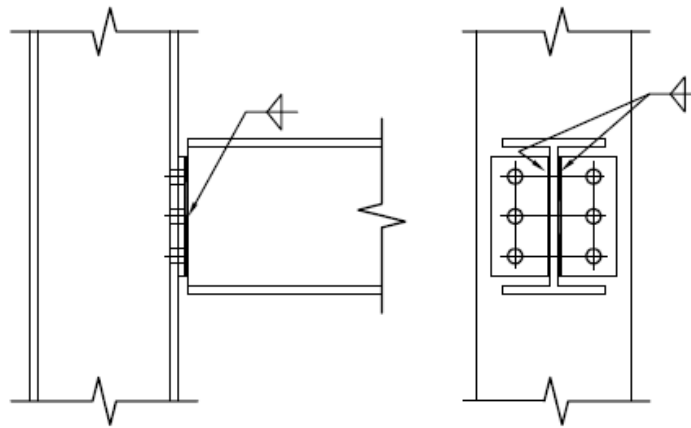


Figura 9: ligação flexível com chapa de extremidade (adaptado de MELLO, 1999)

3.2.4 Ligação semi-rígida com chapa simples

Ligação semi-rígida com chapa simples é composta por chapa vertical soldada na mesa da coluna, com solda filete dupla, e aparafusada na alma da viga, como demonstra a figura 10. Deve existir uma folga de 10 mm entre a extremidade da viga e a face (mesa) da coluna para não impedir a rotação do apoio, garantindo flexibilidade na ligação (BAIÃO FILHO; SILVA, 2004, p. 87).

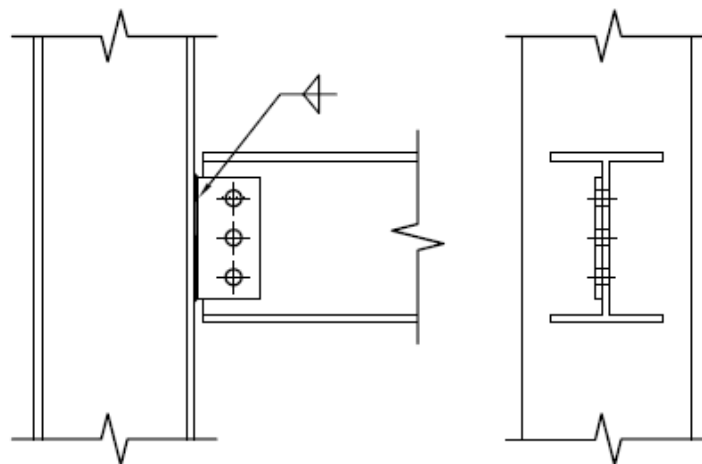


Figura 10: ligação semi-rígida com chapa simples (adaptado de MELLO, 1999)

3.2.5 Ligação semi-rígida com chapa de topo estendida aparafusada

As ligações com chapa de topo estendida aparafusada podem ser assimétricas, com apenas o lado tracionado estendido, ou simétricas, com ambos os lados, de tração e de compressão, estendidos (MELLO, 1999, p. 62). Trata-se de uma chapa soldada assimetricamente na extremidade da viga e aparafusada na alma ou na mesa da coluna, conforme figura 11. Tal assimetria é projetada, pois os momentos atuantes na viga normalmente solicitam com maior intensidade os parafusos superiores, tornando desnecessária a existência destes na parte inferior da chapa. Entretanto, quando o momento for inverso àquele, deve-se projetar uma ligação simétrica, figura 12, repetindo-se na parte inferior a disposição construtiva da superior (BAIÃO FILHO; SILVA, 2004, p. 103).

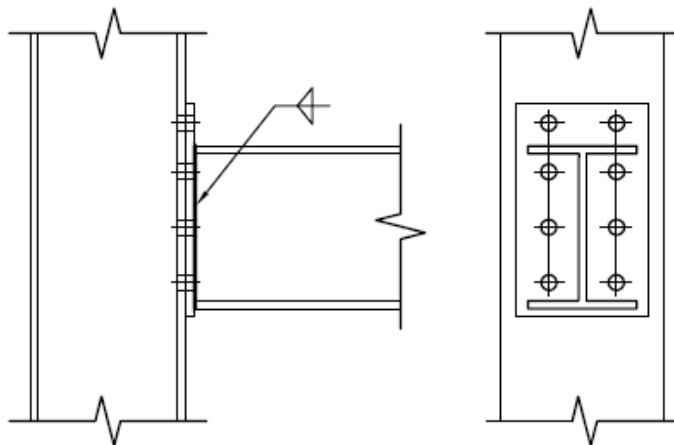


Figura 11: ligação semi-rígida com chapa de topo aparafusada assimétrica (adaptado de MELLO, 1999)

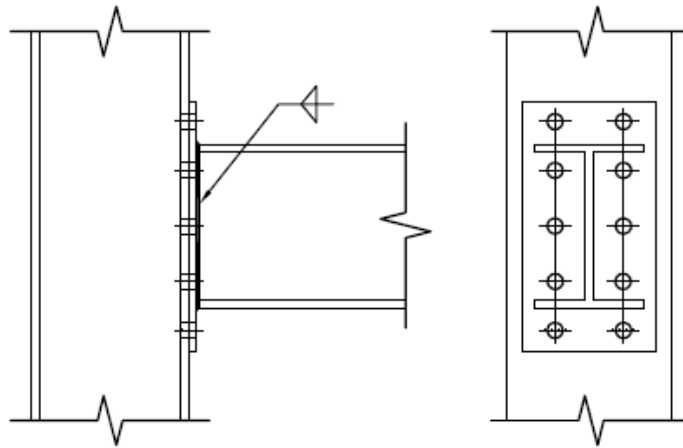


Figura 12: ligação semi-rígida com chapa de topo aparafusada simétrica (adaptado de MELLO, 1999)

3.2.6 Ligação rígida soldada

Ligação rígida soldada é feita através de uma chapa simples aparafusada na alma da viga, soldada na mesa da coluna (com a alma enrijecida) e com solda de penetração total unindo as mesas da viga e da coluna, como mostra a figura 13 (BAIÃO FILHO; SILVA, 2004, p. 129).

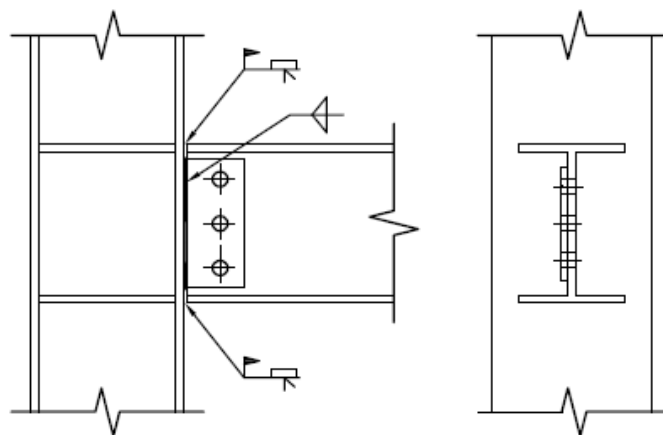


Figura 13: ligação rígida soldada (adaptado de MELLO, 1999)

É possível relacionar, em termos de comportamento momento-relação, os tipos de ligações existentes na figura 5 com as ligações citadas nos itens acima. A relação seria a seguinte:

- a) curva 1 (cantoneira simples de alma) e ligação flexível com cantoneira simples na alma;
- b) curva 2 (cantoneira dupla de alma) e ligação flexível com duas cantoneiras na alma;
- c) curva 3 (placa de extremidade e cisalhamento) e ligação flexível com chapa de extremidade;
- d) curva 4 (cantoneira de topo e assento) e ligação semi-rígidas com chapa simples;
- e) curva 5 (cantoneira de topo e assento com dupla cantoneira de alma) e ligação rígida com chapa de topo estendida aparafusada;
- f) curva 6 (placa de extremidade) e ligação rígida soldada.

3.3 MODELAGEM COMPUTACIONAL DAS LIGAÇÕES SEMI-RÍGIDAS

A modelagem computacional para as ligações semi-rígidas necessita de uma representação matemática da curva momento-rotação para que possa ser usada como dado de entrada no programa de análise estrutural. Conhecer esta curva é imprescindível para que se possa considerar sua influência na análise, portanto, a seguir serão apresentados métodos para modelagem das ligações semi-rígidas (CASTRO, 2006, p. 31-32).

Castro (2006, p. 41) complementa que:

Cada ligação viga-coluna é criada a partir de uma superposição de nós, sendo que um nó é pertencente à coluna e um outro à viga. A ligação entre esses dois elementos se dá através de um acoplamento entre os referidos nós. Nas ligações flexíveis é realizado acoplamento nas direções X e Y. Nas ligações rígidas o acoplamento é efetuado para as coordenadas X, Y e para as rotações em torno do eixo Z. Nas ligações semi-rígidas, além de se efetuar um acoplamento nas direções X e Y é inserido um elemento de mola rotacional, atribuindo rigidez à cada tipo de ligação em estudo. A Figura [...] [14] apresenta desenhos esquemáticos da referida modelagem.

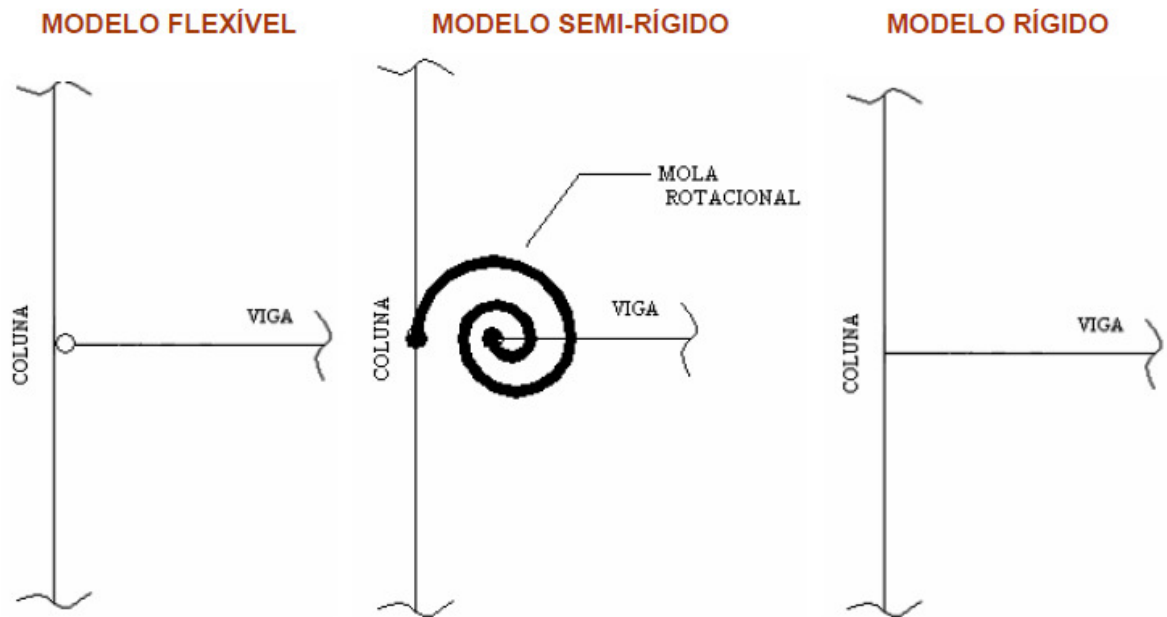


Figura 14: modelagens para ligação viga-coluna (CASTRO, 2006)

3.3.1 Representação matemática

Castro (2006, p. 32) sugere que:

A representação matemática da curva momento *versus* rotação pode ser feita por diferentes relações. O grau de sofisticação da representação depende da capacidade computacional do programa de computador para análise de estruturas com ligações semi-rígidas, os quais frequentemente oferecem uma aproximação bilinear, mas outras representações também podem ser usadas.

Na figura 15 é possível identificar algumas representações matemáticas da curva momento-rotação. O nível de refinamento da análise influencia a escolha da representação da curva e, conseqüentemente, a precisão da resposta da estrutura. Para a representação linear, que é a mais simples, a rigidez da ligação é superestimada para as maiores rotações. Apesar de não representar a rigidez de forma contínua, consegue-se uma melhora significativa com a curva bilinear. Ainda é possível superar esta aproximação quando se utilizam modelos trilineares ou multilineares. Quando se deseja um alto grau de precisão, opta-se por uma curva não linear (CASTRO, 2006, p. 32).

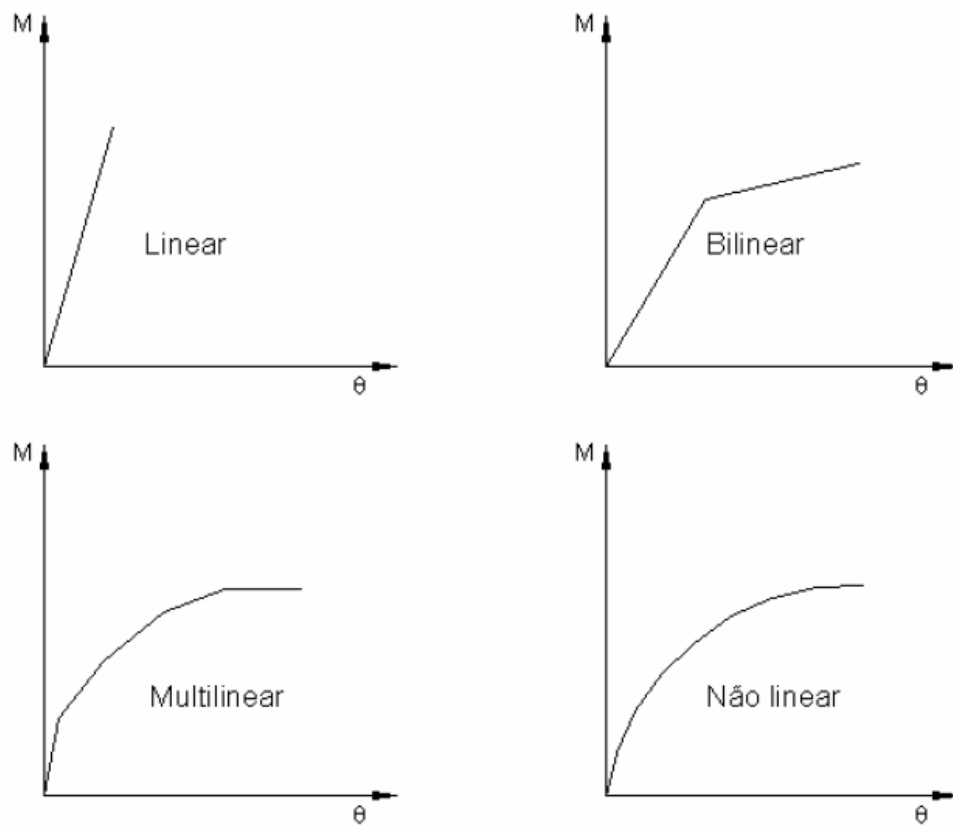


Figura 15: representações matemáticas de curvas momento-rotação
(CASTRO, 2006)

3.3.2 Modelagem numérica

Castro (2006, p. 33) afirma que:

Devido a sua versatilidade, o método dos elementos finitos permite a modelagem de diversos problemas de engenharia. Este método apresenta uma ferramenta adequada para conduzir investigações e realizar a calibração de modelo. Essa técnica parece, em princípio, ser a ferramenta mais satisfatória para avaliar a resposta da ligação. Contudo, tem que ser reconhecido que, apesar do progresso contínuo, algumas das exigências necessárias para uma simulação precisa são ainda hoje insatisfatórias, devido à falta de conhecimento das várias interações complexas entre os diversos elementos da ligação.

4. REFERÊNCIAS NORMATIVAS

A seguir serão apresentados alguns dos preceitos encontrados na Norma brasileira e no Eurocode 3 para o dimensionamento e classificação das ligações entre viga e coluna em estruturas metálicas.

4.1 ABORDAGEM SEGUNDO NBR 8800/2008

A NBR 8800/1986 não menciona a utilização de flexibilidade para dimensionamento de ligações. No entanto, o projeto de revisão da Norma, de setembro de 2006, inclui elementos que consideram o tema. A partir de então, passou-se a classificar as ligações de acordo com sua rigidez secante (BARBOSA, 2006, p. 37). A NBR 8800/2008 inclui bases para o dimensionamento das ligações metálicas semi-rígidas quando apresenta que “Na determinação da resistência de cálculo das ligações rígidas ou semi-rígidas, devem ser considerados os efeitos combinados de todos os esforços solicitantes de cálculo, provenientes da rigidez total ou parcial das ligações [...]” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 63). A nova NBR 8800 ainda admite que (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 63):

[...] uma ligação viga-pilar pode ser considerada rotulada se $S_i \leq 0,5 E I_v/L_v$ e pode ser considerada rígida se $S_i \geq 25 E I_v/L_v$ [...], onde S_i é a rigidez da ligação, correspondente a 2/3 do momento resistente de cálculo da ligação, simplificada e denominada rigidez inicial, e I_v e L_v são o momento de inércia da seção transversal no plano da estrutura e o comprimento da viga conectada à ligação, respectivamente. [...].

O limite $S_i \geq 25 E I_v/L_v$ pode ser usado somente para estruturas nas quais, em cada andar, é satisfeita a relação $K_v/K_p \geq 0,1$, onde K_v é o valor médio de I_v/L_v para todas as vigas no topo do andar e K_p é o valor médio de I_p/L_p para todos os pilares do andar (I_v é o momento de inércia de uma viga no plano da estrutura, I_p é o momento de inércia de um pilar no plano da estrutura, L_v é o vão de uma viga considerado de centro a centro de pilares e L_p é a altura do andar para um pilar). Se $S_i \geq 25 E I_v/L_v$, mas $K_v/K_p < 0,1$, a ligação deve ser considerada semi-rígida.

A NBR 8800 sugere que, na ausência da Norma brasileira aplicável, pode-se determinar a rigidez S_i de acordo com o Eurocode 3 Part 1-8 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 63).

4.2 ABORDAGEM SEGUNDO EUROCODE 3

Maggi e Gonçalves (2005, p. 23) afirmam que:

O método de dimensionamento proposto pelo EUROCODE 3³ [...] apresenta, em seu Anexo J, os procedimentos para dimensionamento de ligações viga-coluna resistentes ao momento fletor, com elementos constituídos por perfis laminados, ou soldados com dimensões similares, e solicitadas por carregamento predominantemente estático, [...].

Barbosa (2006, p. 28) concorda quando afirma que:

O Eurocode 3⁴ [...] propõe métodos para determinar a curva momento-rotação. Esta pode ser utilizada na análise da estrutura em função do detalhe da ligação. A abordagem é direcionada às ligações entre vigas e colunas considerando o efeito da flexibilidade, [...]. O método parte de um modelo que funciona como uma mola rotacional conectando os eixos da coluna e da viga, [...]. Este modelo para dimensionamento busca estabelecer uma relação entre o momento fletor e a rotação relativa da conexão. Esta relação é denominada momento rotação característico da ligação.

Castro (2006, p. 25) complementa que:

[...] na análise estrutural, as ligações entre vigas e colunas são supostas infinitamente rígidas (modelagem rígida) ou perfeitamente rotuladas (modelagem flexível). Uma das inovações do Eurocode 3⁵ [...] é permitir uma modelagem semicontínua segundo a qual uma ligação é modelada por uma mola rotacional caracterizada por uma curva momento versus rotação não-linear. Dependendo das propriedades do nó envolvidas na análise estrutural, o sistema de classificação pode requerer um ou mais critérios.

³ EUROCODE 3 (1993). Design of steel structures: Part 1.1 - General rules and rules for buildings - Revised Annex J: Joints in building frames.

⁴ Eurocode 3. ENV. 1993-1-1:1992, Annex J, Design of Steel Structures. CEN, European Committee for Standardisation, p. 215 . 247.

⁵ EUROCODE 3, prEN 1993-1-8, Design of steel structures – Part 1.8: Design of joints, 2003.

O Eurocode 3⁶ [...] fornece regras para avaliar a rigidez e a resistência de ligações viga-coluna, tomando partido destas características.

Castro (2006, p. 28-29) apresenta critérios para fins de análise e dimensionamento da estrutura metálica, com base no Eurocode 3⁷:

Todas as ligações devem ter uma resistência de cálculo de forma que os elementos estruturais sejam capazes de satisfazer a todos os critérios de projeto. Assim como no projeto de elementos estruturais (vigas e colunas), o projeto de ligações envolve estados limites que devem ser verificados, para os casos de combinações de cargas, obtidos pela análise global da estrutura. Nestes esforços devem estar incluídos todos os efeitos admitidos na análise global, como os efeitos de segunda ordem e plastificação quando for o caso, e os efeitos de flexibilidade da ligação no caso de ligações semi-rígidas.

A resistência de uma ligação deve ser avaliada, entre outros aspectos, pela capacidade de resistência de cada parafuso ou solda.

Com relação às propriedades das ligações envolvidas na análise estrutural, as seguintes observações com relação à modelagem dos nós devem ser consideradas:

- a) a análise elástica deve ser baseada em uma curva momento versus rotação linear;
- b) a análise rígido-plástica deve ser baseada no momento resistente de projeto da ligação, onde esta deve desenvolver uma suficiente capacidade de rotação;
- c) a análise elasto-plástica deve ser baseada em uma análise considerando-se não linear a curva momento *versus* rotação, caracterizada por três propriedades estruturais: resistência à flexão, rigidez à rotação e capacidade de rotação.

Tais observações estão ligadas ao tipo de análise escolhida para toda a estrutura, ou seja, que a hipótese adotada na análise global da estrutura e dos seus membros deve ser consistente com o tipo de comportamento considerado para as ligações.

Dependendo das ligações, os sistemas estruturais podem ser classificados como:

- Simples: os nós são assumidos como incapazes de transmitir momentos, permitindo rotação livre;
- Contínuas: todos os extremos dos membros (vigas, colunas) que convergem em um nó são sujeitos à mesma rotação e aos mesmos deslocamentos, isto é, o comportamento da ligação não é levado em consideração.
- Semicontínuas: o cálculo é baseado na deformação característica dos nós, sendo necessário considerar o comportamento da ligação.

⁶ EUROCODE 3, prEN 1993-1-8, Design of steel structures – Part 1.8: Design of joints, 2003.

⁷ op. cit.

4.2.1 Classificação das ligações segundo Eurocode 3

O Eurocode 3 (COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, 2005, p. 50-51) classifica as ligações pela rigidez rotacional S_j e pelo momento resistente de cálculo da ligação $M_{j,Rd}$. Quanto à rigidez, são divididas em articuladas, rígidas e semi-rígidas e limitadas de acordo com a figura 16.

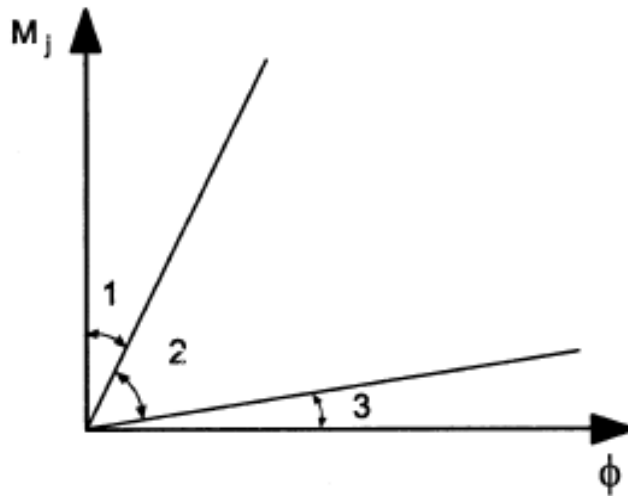


Figura 16: limites de classificação
(COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, 2005)

A Região 1 engloba as ligações rígidas. Quando a estrutura possuir um sistema de contraventamento que reduza até 80% do deslocamento lateral, estas ligações deverão satisfazer a seguinte condição:

$$S_j \geq \frac{8 \cdot E \cdot I_b}{L_b}$$

E quando forem ligações rígidas em estruturas deslocáveis, ou seja, não contraventadas, atenderão a condição:

$$S_j \geq \frac{25 \cdot E \cdot I_b}{L_b}$$

Onde:

S_j : rigidez secante rotacional da conexão;

E: módulo de elasticidade longitudinal;

I_b : é o momento de inércia da seção da viga conectada;

L_b : é o comprimento da viga conectada.

O limite expresso por esta última condição apenas será admitido para pórticos que atenderam à relação $K_b/K_c \geq 0,1$, onde K_b é o valor médio obtido por I_b/L_b , para todas as vigas existentes na parte superior deste andar e K_c , é o valor médio de I_c/L_c , com I_c sendo o momento de inércia da seção transversal do pilar e L_c , o comprimento do pilar no andar, para todos os pilares do andar onde estiver situada a ligação em análise.

A Região 3 compreende as ligações articuladas que devem obedecer a seguinte condição:

$$S_j \leq \frac{0,5 \cdot E \cdot I_b}{L_b}$$

Caso estas condições não sejam atendidas, a ligação deverá ser considerada semi-rígida e inserida na Região 2. Quanto ao momento resistente, são classificadas em rotuladas, totalmente resistentes e parcialmente resistentes, de acordo com os conceitos apresentados no capítulo 3.

4.2.2 Propriedades das ligações

O comportamento global de uma ligação é verificado por uma curva não linear momento-rotação, a partir da qual são definidas as três propriedades fundamentais que caracterizam o comportamento estrutural e mecânico da ligação:

- 1) momento resistente de cálculo $M_{j,Rd}$, que é igual ao momento máximo da curva momento-rotação;
- 2) rigidez rotacional S_j , que é a rigidez secante;
- 3) capacidade de rotação de cálculo de uma ligação θ_{Cd} , que é igual a rotação máxima.

A definição S_j se aplica até o desenvolvimento da rotação θ_{Xd} para a qual o momento de cálculo aplicado, $M_{j,Ed}$, atinge o nível de $M_{j,Rd}$, mas não para rotações superiores. Tal curva, como mostra a figura 17, é obtida pela associação do comportamento individual de diversas componentes, que devem transmitir os esforços diretamente sem que haja concentração de tensões (COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, 2005, p. 55-57).

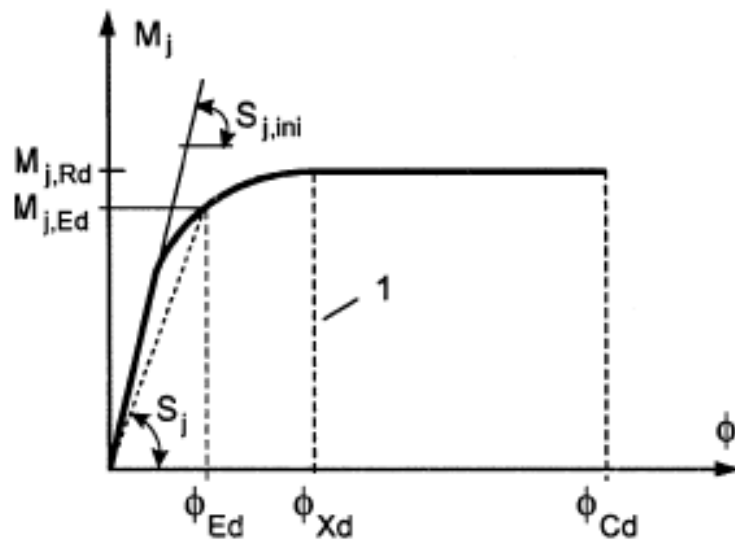


Figura 17: regras de cálculo para a curva momento-rotação (COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, 2005)

4.2.2.1 Resistência da ligação

A avaliação da resistência da ligação decorre do método das componentes em que o momento resistente de cálculo da ligação, $M_{j,Rd}$, corresponde ao momento máximo obtido, que deve ser superior ao momento de cálculo aplicado, $M_{j,Ed}$, satisfazendo a condição de segurança $M_{j,Ed}/M_{j,Rd} \leq 1,0$ (COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, 2005, p. 79). Em

consequência disso, $M_{j,Rd}$ corresponde ao momento máximo obtido com base nos seguintes critérios (SILVA, 2002, p. 44):

- a) equilíbrio dos esforços internos com as forças aplicadas à ligação;
- b) não exceder a resistência de cada componente;
- c) não exceder a capacidade de deformação de cada componente;
- d) ignorar a compatibilidade de deformações entre as várias componentes.

Silva (2002, p. 44) ainda complementa que:

Neste procedimento é necessário avaliar a resistência potencial de cada uma das três zonas de uma ligação (tração, compressão e corte), ajustando-se a distribuição plástica das forças nos parafusos na zona de tração de forma a garantir equilíbrio. O potencial das componentes da zona de tração corresponderá sempre à carga de colapso mínima de todos os mecanismos possíveis (método de limite superior).

O método de cálculo do momento resistente da ligação, $M_{j,Rd}$, não deve levar em conta a coexistência de eventuais forças normais, N_{Ed} , nas barras conectadas. É conveniente que este método não seja utilizado se a força normal exercida na barra conectada exceder 5% da resistência plástica de cálculo, $N_{pl,Rd}$, da sua seção transversal, ou seja, se não verificar a condição $N_{Ed} \leq 5\% N_{pl,Rd}$. Caso esta condição não seja satisfeita, ou seja, o esforço exercido na viga exceda em 5% a resistência plástica de cálculo, $N_{Ed} > 5\% N_{pl,Rd}$, então aplica-se o método $[M_{j,Ed}/M_{j,Rd} + N_{j,Ed} / N_{j,Rd}] \leq 1,0$ (COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, 2005, p. 79-80).

Para o cálculo do momento resistente de um ligação viga-coluna aparafusada com chapa de topo estendida, considerada semi-rígida, tem-se a equação 1 (COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, 2005, p. 82):

$$M_{j,Rd} = \sum_r h_r F_{tr,Rd} \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

$F_{tr,Rd}$ é a resistência de cálculo á tração da fiada de parafusos r ;

h_r é a distância entre a fiada de parafusos r ao centro de compressão;

r é número de fiadas de parafusos.

4.2.2.2 Rigidez da ligação

A rigidez da ligação, S_j , é definida pela razão entre o momento fletor aplicado à ligação, $M_{j,Ed}$, e a rotação que provoca, θ_{Ed} . O aumento da rotação da ligação, θ_{Xd} , faz com que esta atinja seu momento resistente, $M_{j,Ed}$, não se alterando com o posterior aumento de rotação θ_{Cd} . A rigidez rotacional inicial da ligação, $S_{j,ini}$, que é o declive correspondente ao limite elástico máximo da ligação, pode ser determinada a partir das flexibilidades das componente básicas que contribuem para a deformação da ligação, representadas através de coeficientes de rigidez elástica, k_i , e pela associação dos referidos valores de rigidez em série e em paralelo. Tal rigidez rotacional, S_j , pode ser obtida através da equação 2 (COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, 2005, p. 86-87):

$$S_j = \frac{E z^2}{\mu \sum_i \frac{1}{k_i}} \quad (\text{equação 2})$$

Onde:

k_i é o coeficiente de rigidez para cada componente;

z é o braço de alavanca;

μ é a relação de rigidez $S_{j,ini} / S_j$ e vale $\mu=1,0$ se $M_{j,Ed} \leq 2/3 M_{j,Rd}$.

4.2.3 Análise das ligações: método das componentes

O dimensionamento das ligações tradicionalmente é baseado em hipóteses mais simplificadas que resultam divergências significativas no que diz respeito ao seu comportamento real. Entre estas, são mais consideradas as hipóteses relacionadas ao comportamento rígido da chapa de ligação e a de distribuição elástica das forças solicitantes pelos conectores. A necessidade de se aliar uma análise mais rigorosa das ligações, que avalie não apenas a resistência, mas também a deformação, aos procedimentos de dimensionamento simplificados, de utilização rotineira no projeto, conduziu ao chamado **método das componentes**, adotado no Eurocode

3⁸. Este método avalia o comportamento de uma ligação através de modelos mecânicos simples constituídos de molas com deformação axial e barras rígidas. Cada componente da ligação é representado por uma mola, a qual é associada uma relação força-deformação. A figura 18 apresenta como se pode modelar uma ligação aparafusada com chapa de topo estendida a partir da utilização de molas e as componentes mais relevantes: alma do pilar ao corte (1), alma do pilar à compressão (2), alma do pilar à tração (3.1 e 3.2), banzo do pilar à flexão (5.1 e 5.2), chapa de extremidade à flexão (4.1 e 4.2) e parafusos à tração (10.1 e 10.2) (SILVA, 2002, p. 38-40).

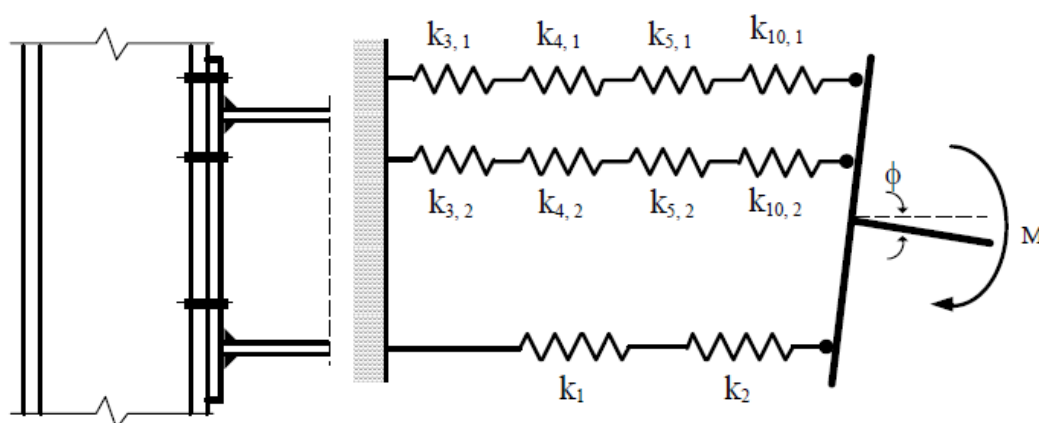


Figura 18: método das componentes aplicado à ligação viga-coluna (SILVA, 2002)

O processo do Método das Componentes, regido pelas hipóteses de cálculo para as ligações, enfatiza a necessidade de se proceder a uma análise realista da transferência de esforços e para tanto, sugere as seguintes recomendações (COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, 2005, p. 19):

- a) as solicitações consideradas para análise devem estar em equilíbrio com as solicitações aplicadas na ligação;
- b) cada elemento da ligação deve ser capaz de resistir às solicitações;
- c) as deformações resultantes desta transferência de esforços não deve exceder a capacidade de deformação dos elementos de fixação ou de soldagem e das diferentes partes conectadas;
- d) é conveniente que a suposta transferência de esforços seja realizada levando-se em conta a rigidez relativa da ligação;

⁸ EUROCODE 3, ENV - 1993-1-1:1992/A2 (1998), "Annex J", Design of Steel Structures – Joints in Building Frames

- e) as deformações consideradas em um modelo de cálculo qualquer fundamentado numa análise elasto-plástica são baseadas na rotação de um corpo rígido e/ou nas deformações num plano que são fisicamente possíveis, e;
- f) todo modelo utilizado deve estar de acordo com os resultados experimentais.

O método empregado no dimensionamento das ligações metálicas, de acordo com o Eurocode 3⁹, propõe 15 verificações específicas distintas de resistência para cada componente da estrutura em função dos esforços solicitantes, como pode ser visto na figura 19, que se restringe ao caso de ligação semi-rígida com chapa de topo assimétrica (MAGGI; GONÇALVES, 2005, p. 23-24).

Região	Ref.	Verificação
Tracionada	a	Tração nos parafusos
	b	Flexão da chapa de topo
	c	Flexão da mesa do pilar
	d	Tração na alma da viga
	e	Tração na alma do pilar
	f	Solda mesa/chapa de topo
	g	Solda alma/chapa de topo
Cisalhamento Horizontal	h	Cisalhamento no painel de alma do pilar
Comprimida	i	Mesa da viga
	j	Solda mesa/chapa de topo
	k	Enrugamento da alma do pilar
Cisalhamento Vertical	l	Flambagem da alma do pilar
	m	Solda alma/chapa de topo
	n	Cisalhamento nos parafusos
	o	Pressão de contato (mesa ou chapa)

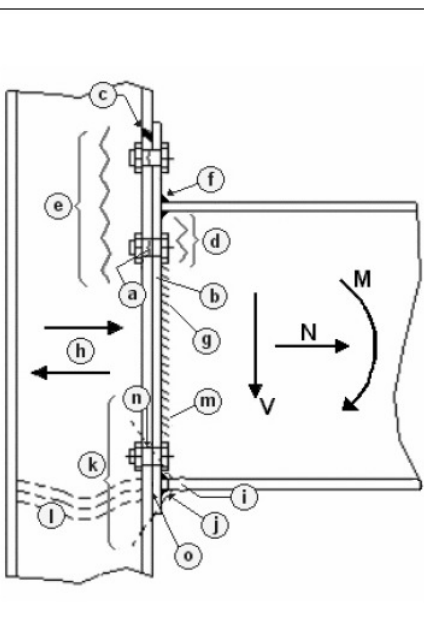


Figura 19: rotina de verificações das ligações (MAGGI; GONÇALVES, 2005)

Maggi e Gonçalves (2005, p. 24-25) afirmam que

[...] a filosofia adotada pelo Anexo J do EUROCODE-3¹⁰ [...], baseia-se na hipótese de que a transmissão do momento fletor é realizada, na ligação, por um binário de forças, cujo braço de alavanca z é determinado pela distância entre o plano médio da mesa comprimida e o ponto médio da distância entre as duas linhas de parafusos mais afastadas daquele plano, na região tracionada, como esquematizado na figura [...] [20]. Levando-se em consideração que as linhas de parafusos mais afastadas da

⁹ EUROCODE 3 (1993). Design of steel structures: Part 1.1 - General rules and rules for buildings - Revised Annex J: Joints in building frames

¹⁰ op. cit.

mesa comprimida, intuitivamente, atrairão maior esforço, o método também considera que há uma distribuição plástica das forças de tração nos parafusos, abandonando a abordagem tradicional, que considera uma distribuição triangular em direção à região comprimida, como esquematizado na figura [...] [21].

A filosofia do método de dimensionamento proposto pelo [...] EUROCODE-3¹¹ [...] assume que a força total permitida para as linhas de parafusos é calculada com base na sua capacidade resistente, e não somente em função de seu braço de alavanca. Essa capacidade resistente é função não só das características dos parafusos, mas também pela consideração de todos os elementos resistentes que interagem na região verificada.

Assim, parafusos próximos a pontos de enrijecimento irão atrair uma parcela maior da força de tração. Essa hipótese pode ser visualizada na figura [...] [21] para a distribuição plástica, onde é atribuída maior força aos parafusos da linha interna, entre as mesas da viga, numa região enrijecida também pela sua alma.

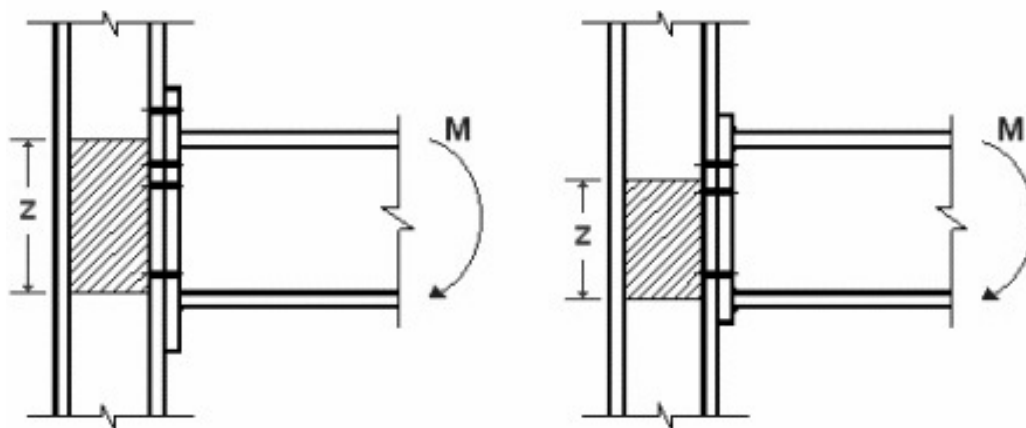


Figura 20: braço de alavanca (tração/compressão) (MAGGI; GONÇALVES, 2005)

¹¹ EUROCODE 3 (1993). Design of steel structures: Part 1.1 - General rules and rules for buildings - Revised Annex J: Joints in building frames

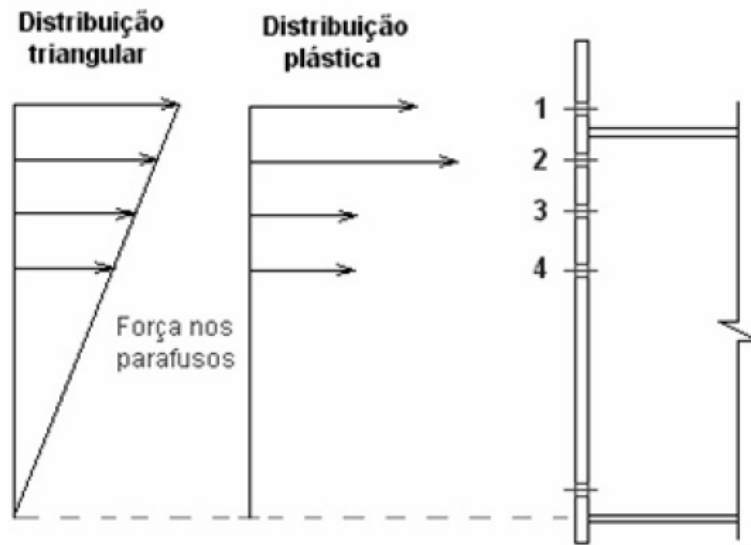


Figura 21: distribuição de forças (MAGGI; GONÇALVES, 2005)

Para o dimensionamento, inicialmente, deve-se verificar isoladamente a capacidade de resistência a tração de cada linha de parafuso pertencente à região tracionada da ligação. A seguir, a verificação considera que a linha faça parte de um grupo. Sendo assim, a resistência da primeira linha de parafusos, ou seja, a linha mais distante do centro de compressão será calculada como se apenas ela existisse. A verificação da resistência da segunda linha considera sua atuação isoladamente e também o grupo que ela forma com a primeira linha. O valor resultante para a segunda linha é obtido diminuindo-se o valor calculado para o grupo formado pelas linhas 1 e 2 da capacidade resistente calculada para a primeira linha isoladamente, como mostra a figura 22 (MAGGI; GONÇALVES, 2005, p. 25).

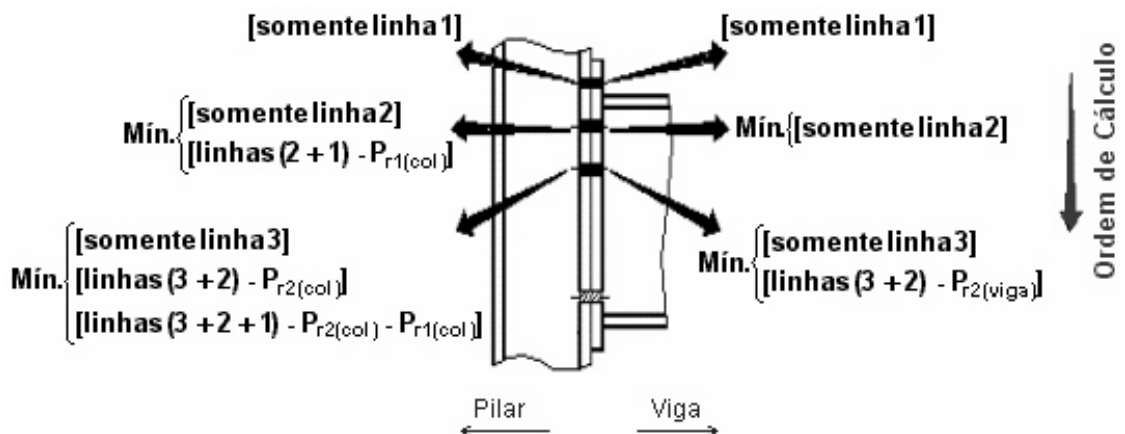


Figura 22: etapas da verificação da resistência a tração das linhas de parafusos (MAGGI; GONÇALVES, 2005)

Castro (2006, p. 35-36) conclui que:

As ligações em estruturas de aço apresentam diversos tipos de detalhamentos alternativos, pelo que os modelos de análise diferem pela geometria da ligação. No entanto todos os modelos de análise compreendem as mesmas características básicas: uma zona tracionada, uma zona de compressão e uma em corte, como mostra a figura [...] [23].

Uma ligação analisada na visão dos métodos das componentes pode ser decomposta em elementos ou componentes que reproduzem o comportamento das suas partes, em termos de resistência e deformabilidade. Um exemplo genérico, de acordo com o Eurocode 3¹² [...], é ilustrado na figura [...] [24]

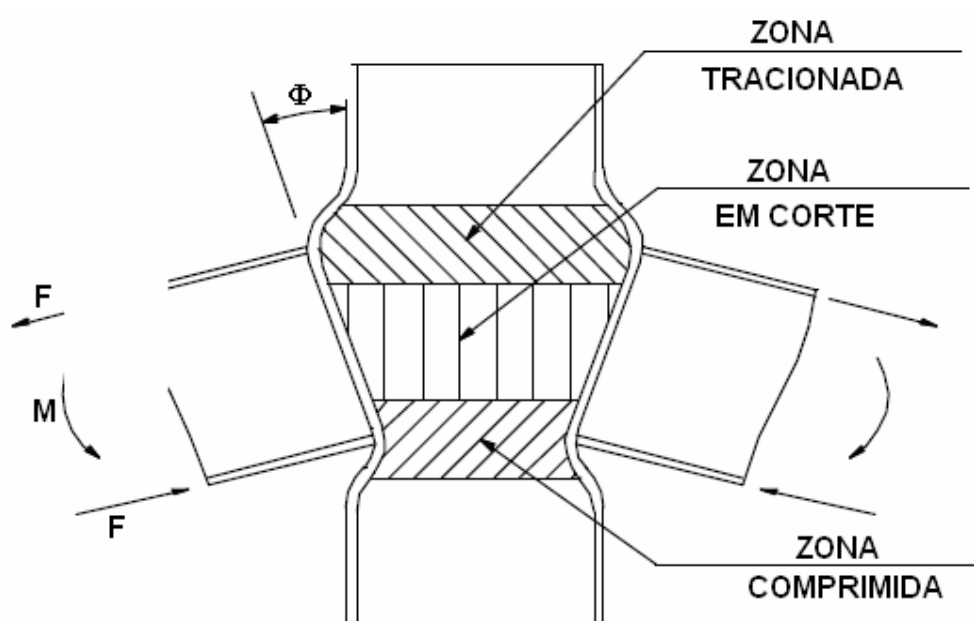


Figura 23: zonas críticas para análise da ligação (CASTRO, 2006)

¹² EUROCODE 3, prEN 1993-1-8, Design of steel structures – Part 1.8: Design of joints, 2003.

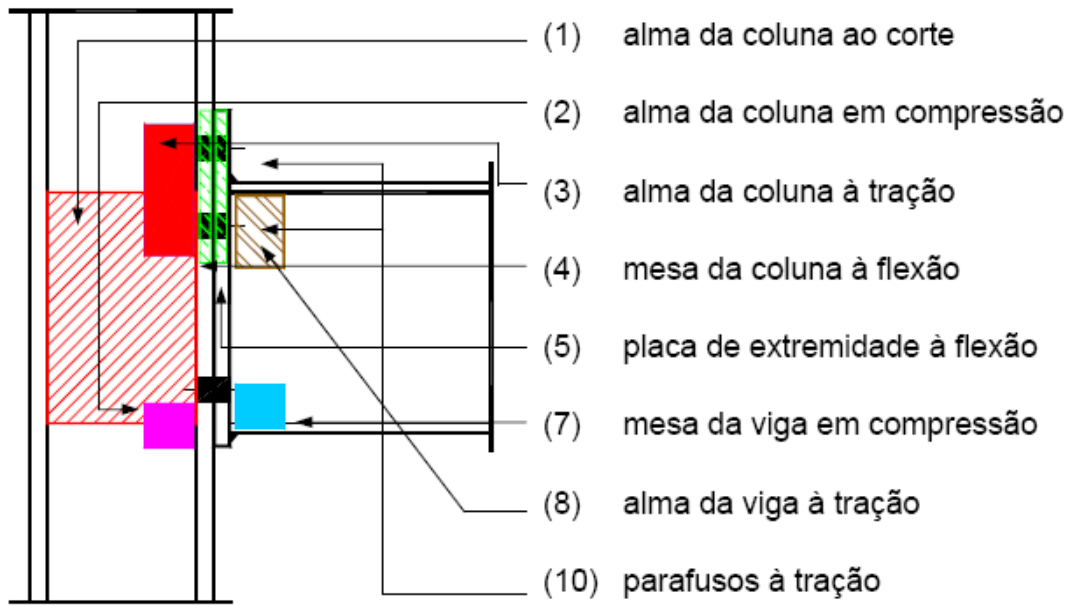


Figura 24: componentes de uma ligação viga-coluna (CASTRO, 2006)

5 ANÁLISE ELEMENTOS ESTRUTURAIS

Neste capítulo serão apresentados os elementos utilizados no processo de análise, bem como as considerações relativas ao efeito causado pela adição da flexibilidade nas ligações entre estes elementos. Para tal análise, foram utilizados métodos tradicionais do cálculo de estruturas metálicas, considerando nós rígidos, flexíveis e semi-rígidos.

5.1 ELEMENTOS UTILIZADOS NO PROCESSO DE ANÁLISE

Para fins de verificar o efeito nos esforços sobre os elementos estruturais consequentes da inserção de flexibilidade nas ligações, foi modelado um pórtico submetido a um carregamento uniformemente distribuído de valor 20 kN/m e a um carregamento horizontal correspondente a 30 kN e 15 kN no topo dos pavimentos um e dois, respectivamente (figura 25).

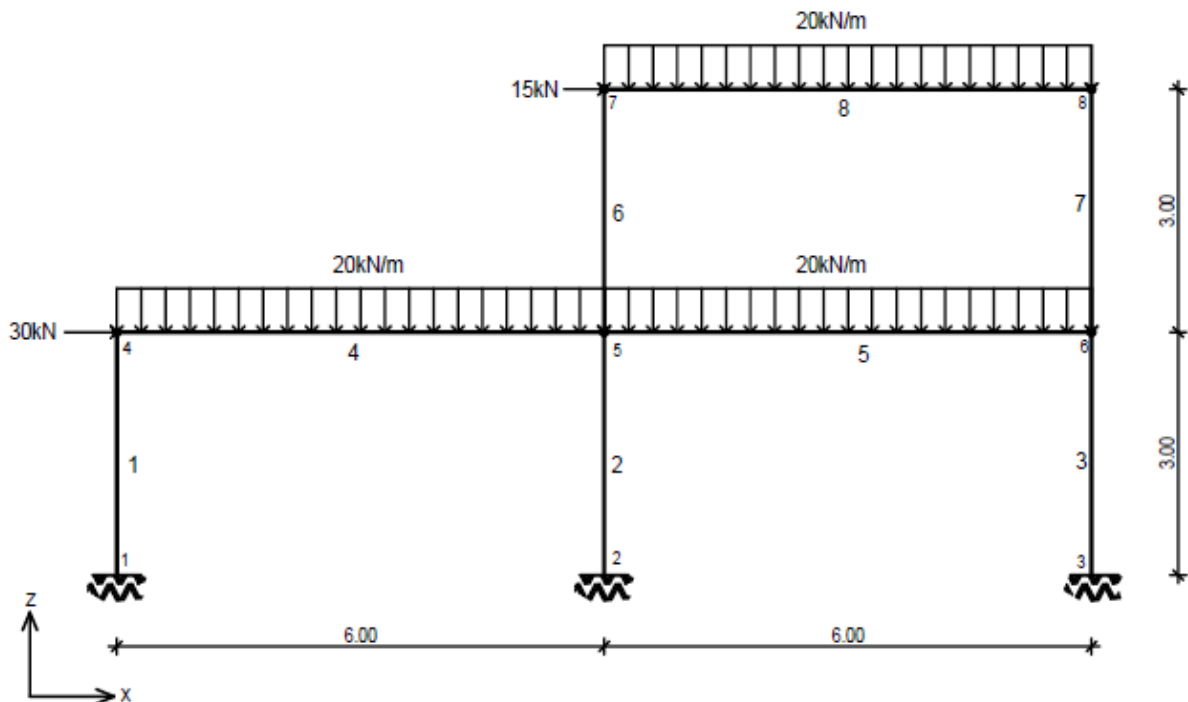


Figura 25: modelo de pórtico analisado

Trata-se de um pórtico plano, cujos dados encontram-se no quadro 1, com vãos de 6 m e com altura de 3 m para cada pavimento. Foi adotado perfil laminado Gerdau Açominas HP 250 x 85,0 para as colunas e perfil laminado Gerdau Açominas W 250 x 44,8 para as vigas, ambos em aço A36 ($f_y=250$ MPa e $f_u=400$ MPa) conforme as dimensões e características apresentadas no quadro 2 e na figura 26.

Barra	Conectividades		Coordenadas dos nós		Propriedades geométricas			
	Nó inicial	Nó final	x [m]	y[m]	Área [cm ²]	I _x [cm ⁴]	E [kN/m ²]	Seção
1	1	4	0,0	0,0	108,5	12.280	205·10 ⁶	1
2	2	5	6,0	0,0	108,5	12.280	205·10 ⁶	1
3	3	6	12,0	0,0	108,5	12.280	205·10 ⁶	1
4	4	5	0,0	3,0	57,6	7.038	205·10 ⁶	2
5	5	6	6,0	3,0	57,6	7.038	205·10 ⁶	2
6	5	7	12,0	3,0	108,5	12.280	205·10 ⁶	1
7	6	8	6,0	6,0	108,5	12.280	205·10 ⁶	1
8	7	8	12,0	6,0	57,6	7.038	205·10 ⁶	2

Quadro 1: dados do pórtico analisado

Bitola	Massa linear	d	b _f	Espessura		h	d'
				t _w	t _f		
[mm·kg/m]	[kg/m]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
W 250 x 44,8	44,8	266	148	7,6	13,0	240	220
HP 250 X 85,0	85,0	254	260	14,4	14,4	225	201

Quadro 2: dimensões e características dos perfis do pórtico analisado

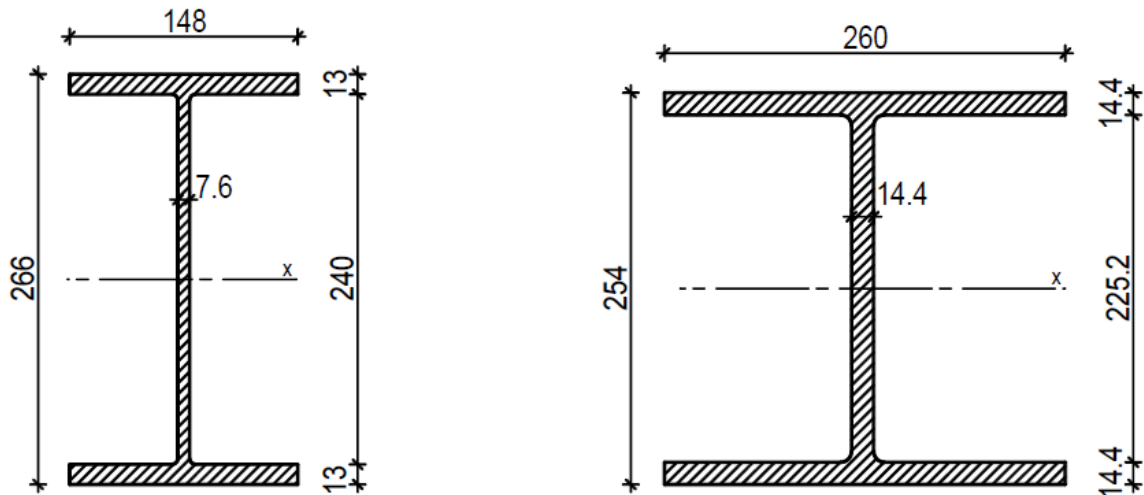


Figura 26: perfis que compõem o pórtico analisado

5.2 DEFINIÇÃO INTERVALOS DE RIGIDEZ

Com a finalidade de classificar as ligações para a análise a partir do modelo de pórtico apresentado, utilizaram-se as condições prescritas pela NBR 8800/2008 e pelo Eurocode 3, vistas no capítulo 4, para definir faixas de rigidez rotacional, nas quais foram enquadradas as ligações:

$$S_j \geq \frac{25 \cdot E \cdot I_b}{L_b} = 59.650 \text{ kN/m.rad}$$

$$S_j \leq \frac{0,5 \cdot E \cdot I_b}{L_b} = 1.193 \text{ kN/m.rad}$$

Sendo assim, para $S_j \geq 59.650 \text{ kN/m.rad}$ tem-se ligações rígidas, para $S_j \leq 1.193 \text{ kN/m.rad}$ tem-se ligações flexíveis e conseqüentemente, para $1.193 < S_j < 59.650 \text{ kN/m.rad}$, tem-se ligações semi-rígidas. Com base nesta definição, escolheram-se valores de rigidez rotacional para os casos de ligações rígidas ($S_j = 70.000 \text{ kN/m.rad}$) e flexíveis ($S_j = 900 \text{ kN/m.rad}$).

5.3 LIGAÇÃO SEMI-RÍGIDA UTILIZADA

Para a análise do pórtico com a hipótese de ligações semi-rígidas, foi utilizada como exemplo uma conexão obtida na literatura. Esta ligação é do tipo chapa de topo assimétrica soldada na viga e aparafusada na mesa da coluna, conforme figura 27. Sua fixação é garantida por seis parafusos do tipo M20, classe 10.9, cujo diâmetro é de 19,05 mm e pela solda filete com 8 mm de espessura, que une a chapa de topo a viga. Os valores para o momento resistente de cálculo da ligação e para a rigidez rotacional, calculados com base na resistência nominal de cada componente, são $M_{Rd} = 118,25 \text{ kN.m}$ e $S_j = 26.335,83 \text{ kN.m/rad}$, respectivamente (BARBOSA, 2006, p. 92).

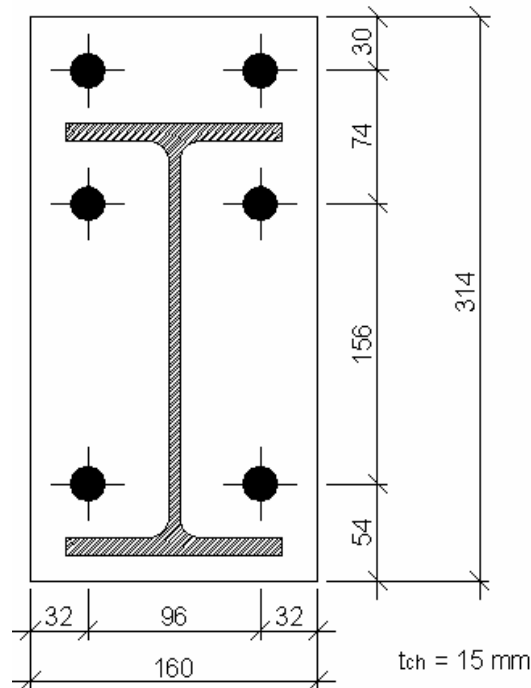


Figura 27: modelo analisado ligação semi-rígida (BARBOSA, 2006)

5.4 ANÁLISE DO MODELO

A análise do modelo de pórtico plano apresentado anteriormente consiste na obtenção dos esforços solicitantes da estrutura (momento fletor, esforço normal e esforço cortante) através do software SAP2000 para análise estrutural. Para tanto, foram consideradas, em diferentes

análises, ligações rígidas, flexíveis e semi-rígidas entre viga e coluna. Para se considerar a flexibilidade na análise das ligações semi-rígidas, foi necessário simular tais conexões a partir da consideração de molas rotacionais nos nós 4, 5, 6, 7 e 8, localizados nos extremos das vigas 4, 5 e 8. Na figura 28 tem-se um esquema representativo para a viga 4 no estado não deformado e na figura 29, no estado deformado, quando surgem os momentos M_4 e M_5 e os giros θ_4 e θ_5 respectivamente nos nós 4 e 5, com a rigidez rotacional S_j .

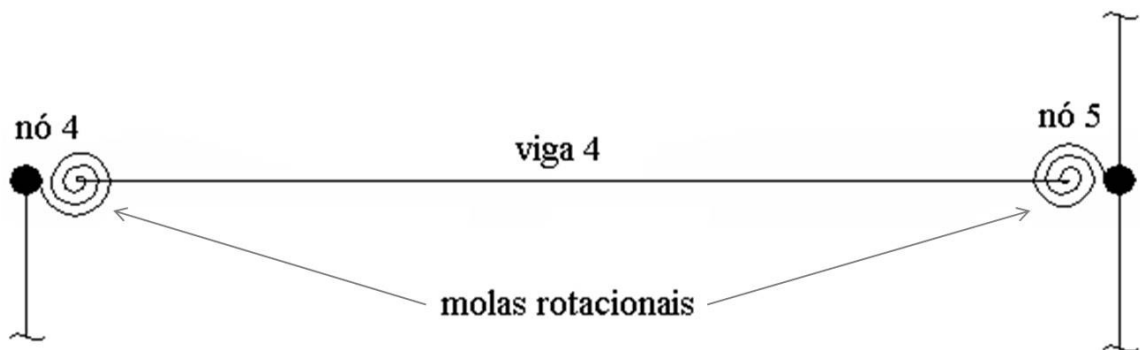


Figura 28: modelo de viga com molas rotacionais (adaptado de BARBOSA, 2006)



Figura 29: modelo de viga deformada com molas rotacionais (adaptado de BARBOSA, 2006)

A ferramenta computacional utilizada no processo de análise do pórtico, SAP2000, considera como configuração padrão a rigidez total dos nós em ambas as extremidades da barra. No entanto, é possível introduzir ligações rotuladas nestas extremidades liberando o momento na direção apropriada, bem como fornecendo ao programa o coeficiente de rigidez rotacional da ligação, para o caso de semi-rigidez. O coeficiente de rigidez trata-se de uma constante de mola (*spring constant*) que, para o caso de uma mola rotacional, tem como unidade momento/radiano, ou seja, kN.m/rad.

No caso em estudo, o momento é liberado para o eixo de maior inércia da seção da viga, figura 30, que para o programa corresponde ao eixo local 3, sendo assim $I_3 = 7.038, \text{ cm}^4$

(*Moment of Inertia about 3 axis*), figura 31, uma vez que o carregamento que solicitará a viga à flexão é vertical.

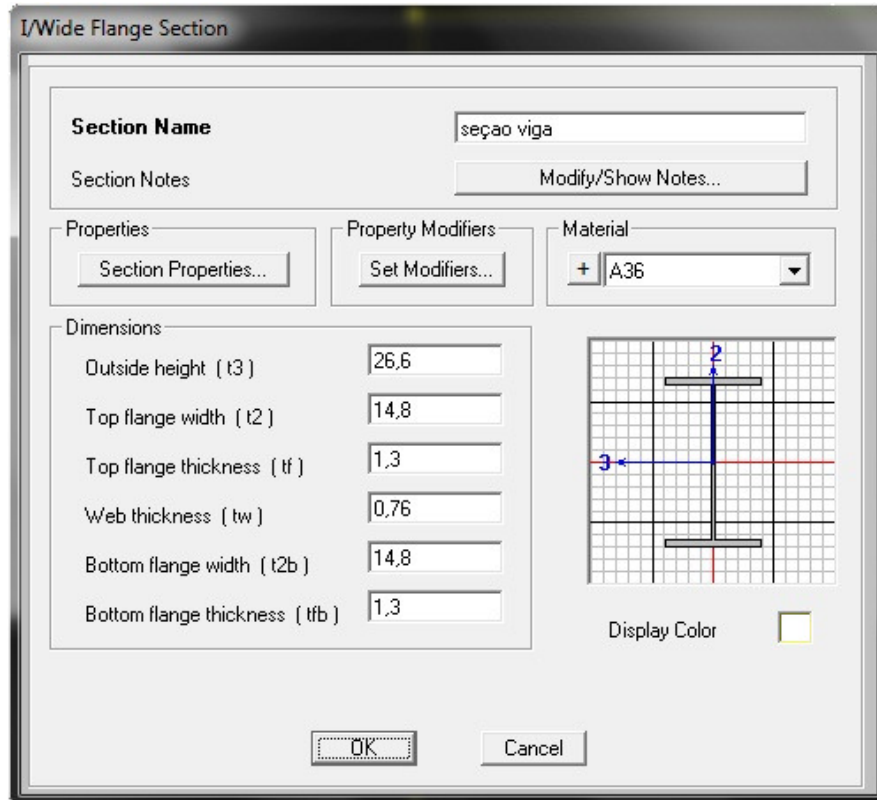


Figura 30: dimensões da seção da viga, em centímetros
(COMPUTERS AND STRUCTURES INCORPORATION, 2008)

Section Name			
secao viga			
Properties			
Cross-section (axial) area	56,72	Section modulus about 3 axis	529,2184
Torsional constant	23,9193	Section modulus about 2 axis	95,036
Moment of Inertia about 3 axis	7038,6051	Plastic modulus about 3 axis	596,212
Moment of Inertia about 2 axis	703,2662	Plastic modulus about 2 axis	145,8416
Shear area in 2 direction	20,216	Radius of Gyration about 3 axis	11,1397
Shear area in 3 direction	32,0667	Radius of Gyration about 2 axis	3,5212

Figura 31: propriedades da seção da viga, em centímetros
(COMPUTERS AND STRUCTURES INCORPORATION, 2008)

É possível alterar as configurações selecionando-se os elementos de barras que terão a rigidez dos nós modificada e após seguir no menu *Assign>Frame>Release/Partial Fixity*, figura 32.

Frame Releases	Release		Frame Partial Fixity Springs	
	Start	End	Start	End
Axial Load	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Shear Force 2 (Major)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Shear Force 3 (Minor)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Torsion	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Moment 22 (Minor)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Moment 33 (Major)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	900	900

No Releases Units: KN, m, C

Figura 32: inserção de coeficientes de rigidez para ligação flexível
(COMPUTERS AND STRUCTURES INCORPORATION, 2008)

5.5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste item serão apresentados os resultados relativos aos esforços solicitantes encontrados por meio da análise do pórtico. Os quadros 3 a 5 mostram as solicitações de esforço normal (N), esforço cortante (V) e momento fletor (M), obtidos na análise com nós rígidos, flexíveis e semi-rígidos, respectivamente. Uma melhor compreensão da dimensão destes valores é obtida na comparação dos diagramas de esforços das figuras de 33 a 41.

Análise ligações rígidas ($S_j = 70.000 \text{ kN.m/rad}$)				
Barra	Nó	N [kN]	V [kN]	M [kN.m]
1	1	-60,731	-5,986	15,127
	4	-55,775	-5,986	33,084
2	2	-198,601	-25,621	43,890
	5	-193,645	-25,621	-32,972
3	3	-141,165	-25,365	43,834
	6	-136,209	-25,365	-32,261
4	4	-35,986	-55,775	-33,084
	2,667 m	-35,986	0,000	41,435
	5	-35,986	69,464	-74,149
5	5	6,462	-59,919	-50,673
	2,667 m	6,462	0,000	34,895
	6	6,462	65,320	-66,878
6	5	-64,263	-16,827	-9,495
	7	-59,307	-16,827	40,987
7	6	-70,888	-31,827	34,617
	8	-65,932	-31,827	-60,865
8	7	-31,827	-59,307	-40,987
	2,667 m	-31,827	0,000	42,948
	8	-31,827	65,932	-60,865

Quadro 3: resultados ligações rígidas

Análise ligações flexíveis ($S_j = 900 \text{ kN.m/rad}$)				
Barra	Nó	N [kN]	V [kN]	M [kN.m]
1	1	-69,733	15,662	54,021
	4	-62,299	15,662	7,036
2	2	-203,586	-14,925	52,918
	5	-196,153	-14,925	8,143
3	3	-143,968	-14,413	52,371
	6	-136,534	-14,413	9,131
4	4	-14,338	-62,299	-7,036
	2,667 m	-14,338	0,000	84,010
	5	-14,338	64,407	-13,360
5	5	-2,262	-62,282	-6,996
	2,667 m	-2,262	0,000	84,005
	6	-2,262	64,420	-13,420
6	5	-69,463	2,849	14,506
	7	-62,029	2,849	5,961
7	6	-72,111	-12,151	22,551
	8	-64,677	-12,151	-13,904
8	7	-12,151	-62,029	-5,961
	2,667 m	-12,151	0,000	84,366
	8	-12,151	64,677	-13,904

Quadro 4: resultados ligações flexíveis

Análise ligações semi-rígidas ($S_j = 26.335,83 \text{ kN.m/rad}$)				
Barra	Nó	N [kN]	V [kN]	M [kN.m]
1	1	-61,695	-4,358	18,191
	4	-56,739	-4,358	31,266
2	2	-197,448	-24,795	44,689
	5	-192,492	-24,795	-29,697
3	3	-141,354	-24,563	44,620
	6	-136,398	-24,563	-29,069
4	4	-34,358	-56,739	-31,266
	2,667 m	-34,358	0,000	45,822
	5	-34,358	68,500	-66,550
5	5	5,259	-59,749	-44,608
	2,667 m	5,259	0,000	40,506
	6	5,259	65,491	-61,834
6	5	-64,244	-14,822	-7,755
	7	-59,288	-14,822	36,712
7	6	-70,907	-29,822	32,764
	8	-65,951	-29,822	-56,703
8	7	-29,822	-59,288	-36,712
	2,667 m	-29,822	0,000	47,173
	8	-29,822	65,951	-56,703

Quadro 5: resultados ligações semi-rígidas

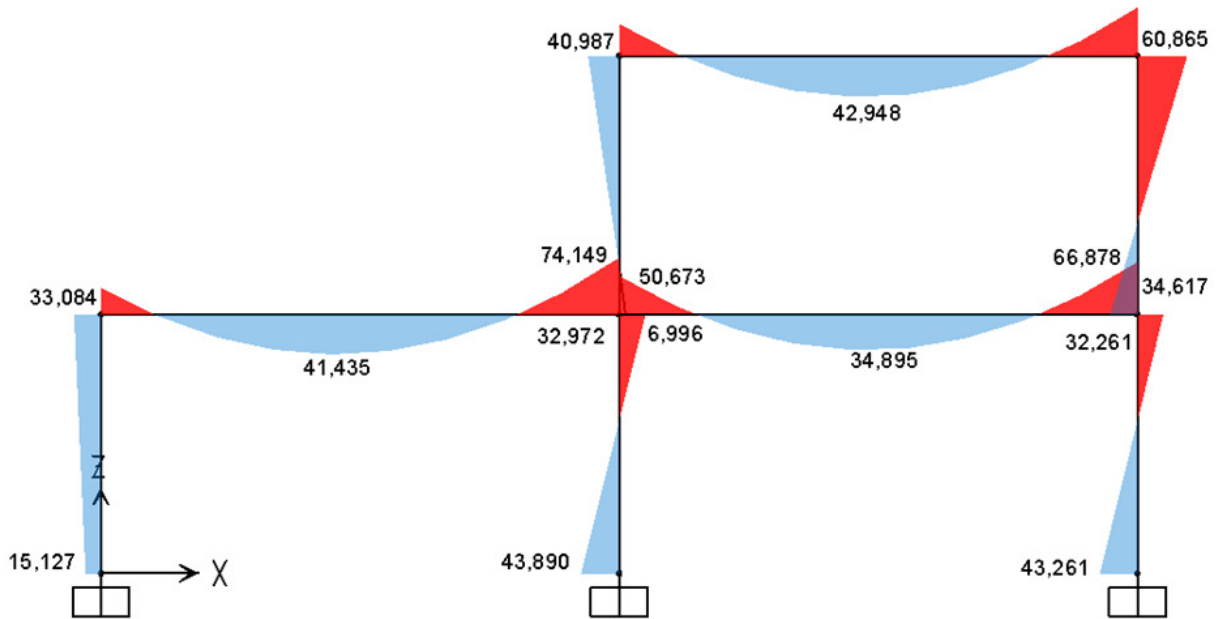


Figura 33: diagrama momento fletor ligações rígidas

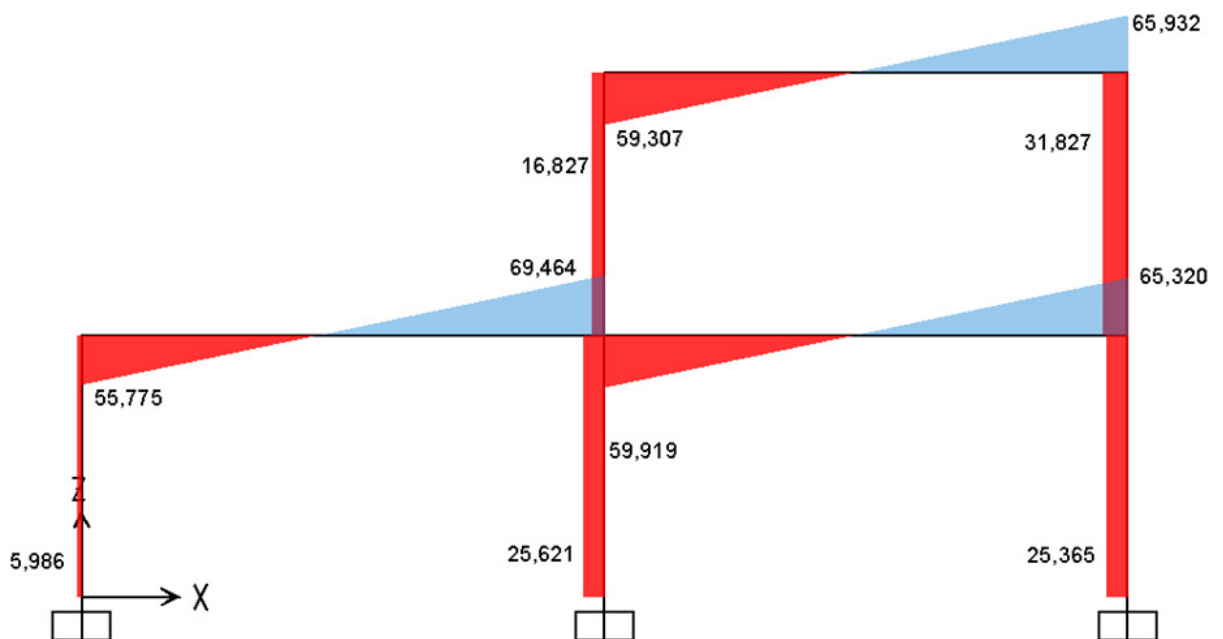


Figura 34: diagrama esforço cortante ligações rígidas

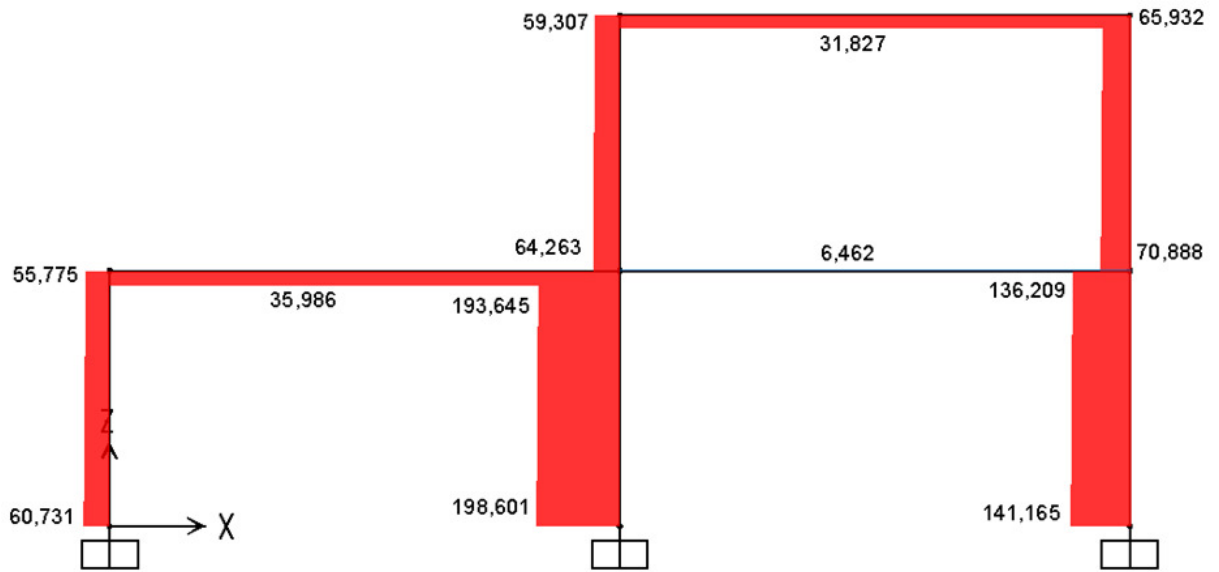


Figura 35: diagrama esforço normal ligações rígidas

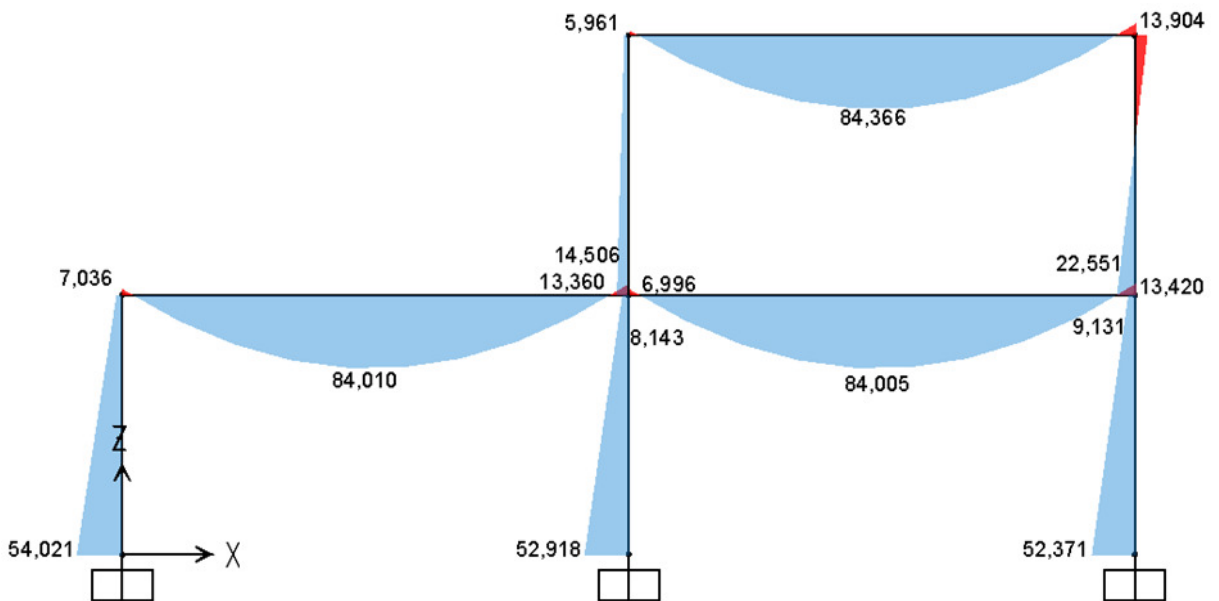


Figura 36: diagrama momento fletor ligações flexíveis

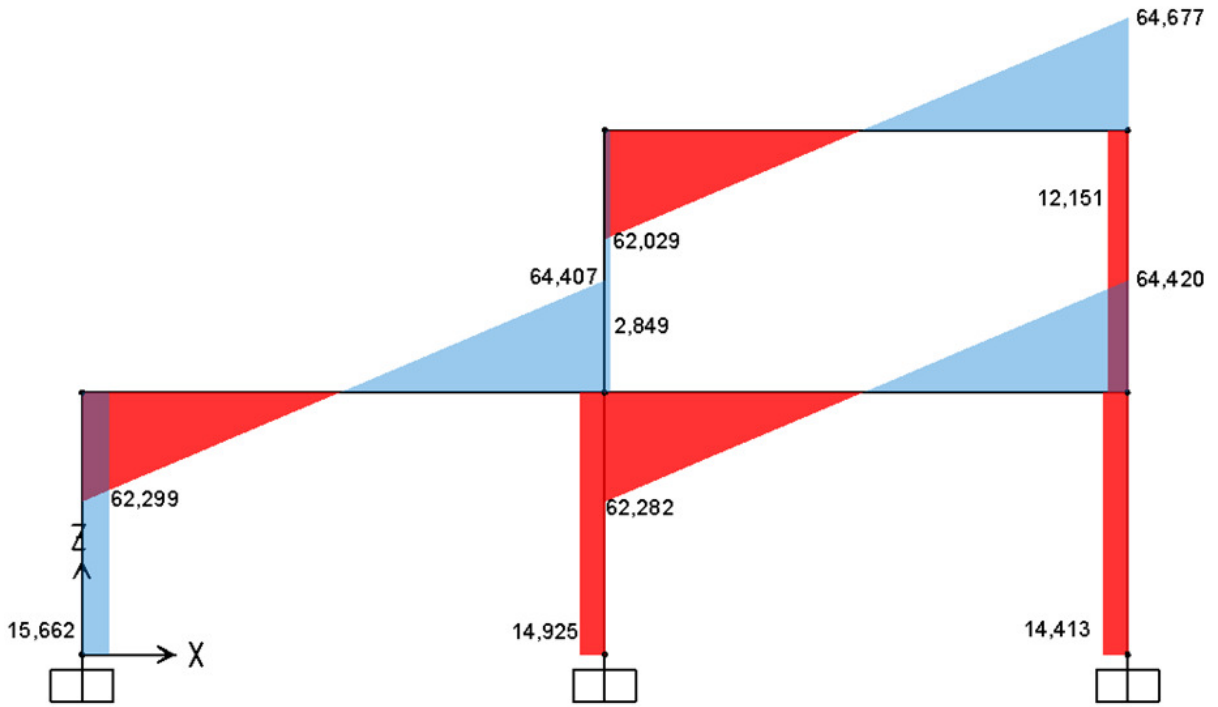


Figura 37: diagrama esforço cortante ligações flexíveis

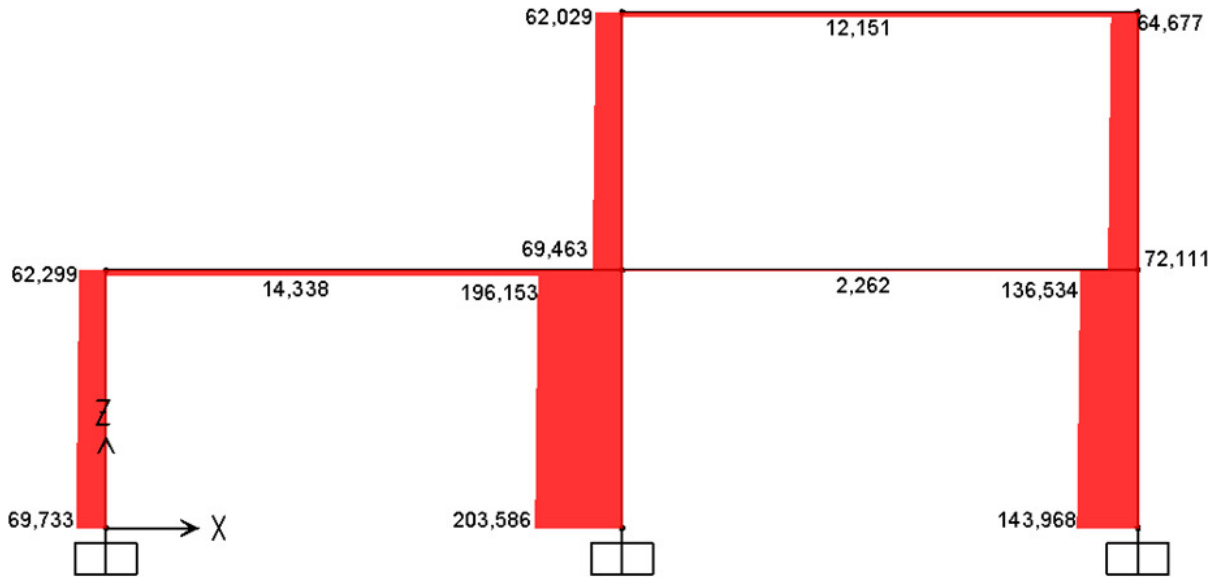


Figura 38: diagrama esforço normal ligações flexíveis

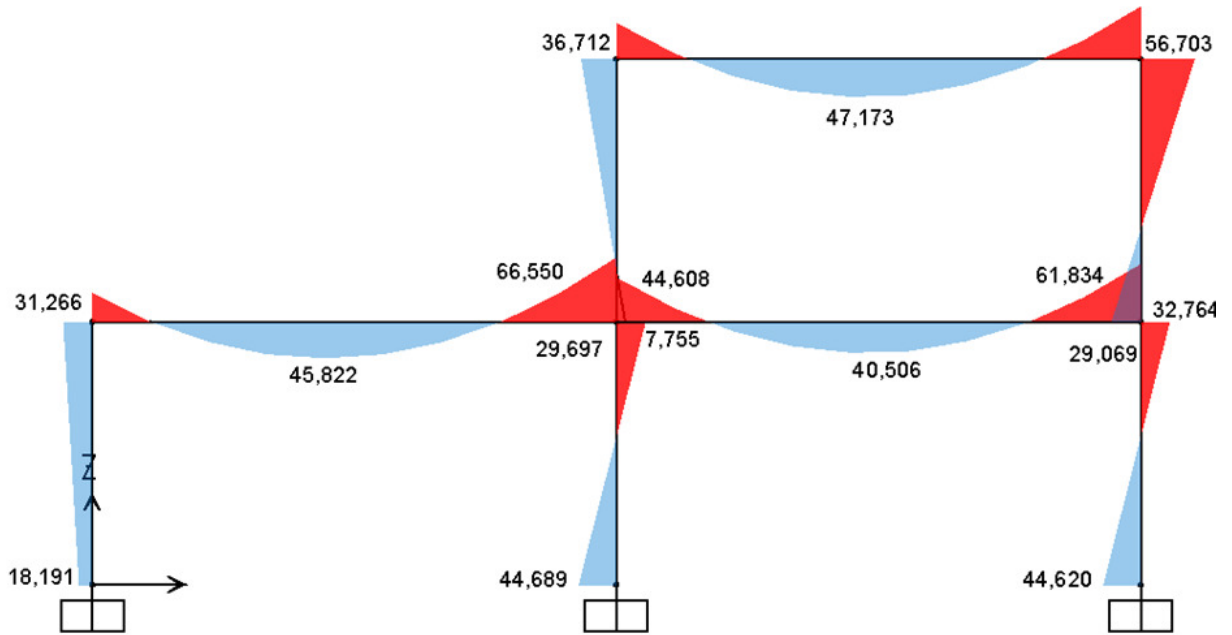


Figura 39: diagrama momento fletor ligações semi-rígidas

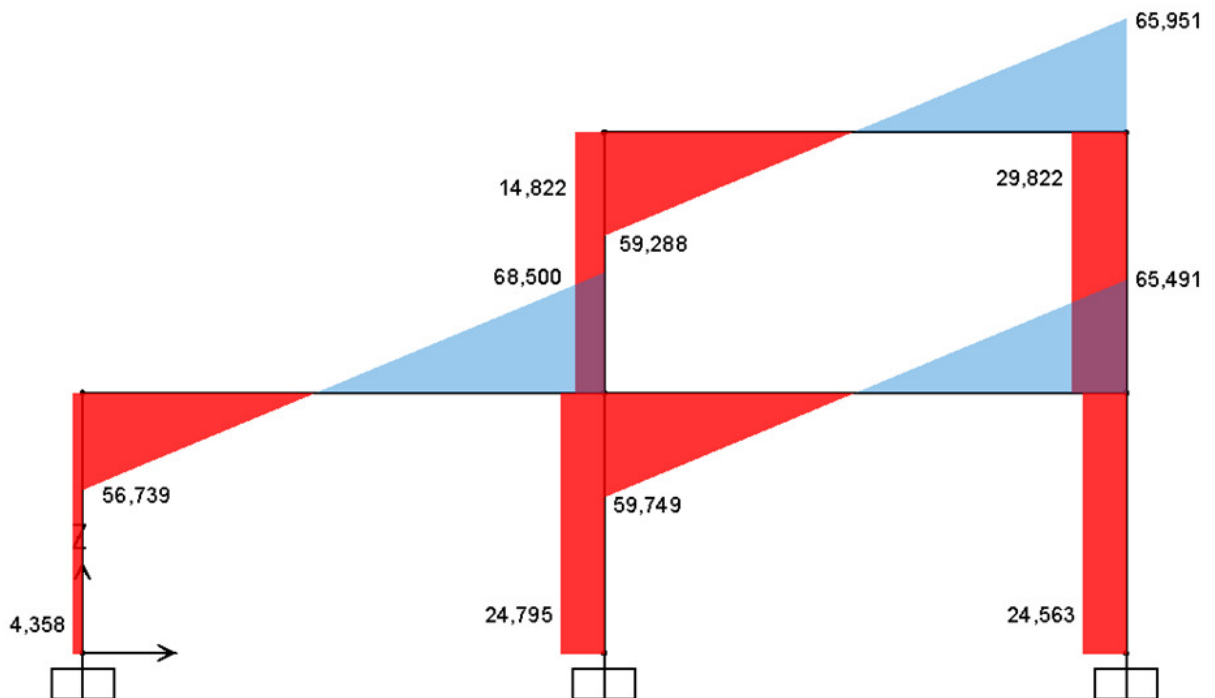


Figura 40: diagrama esforço cortante ligações semi-rígidas

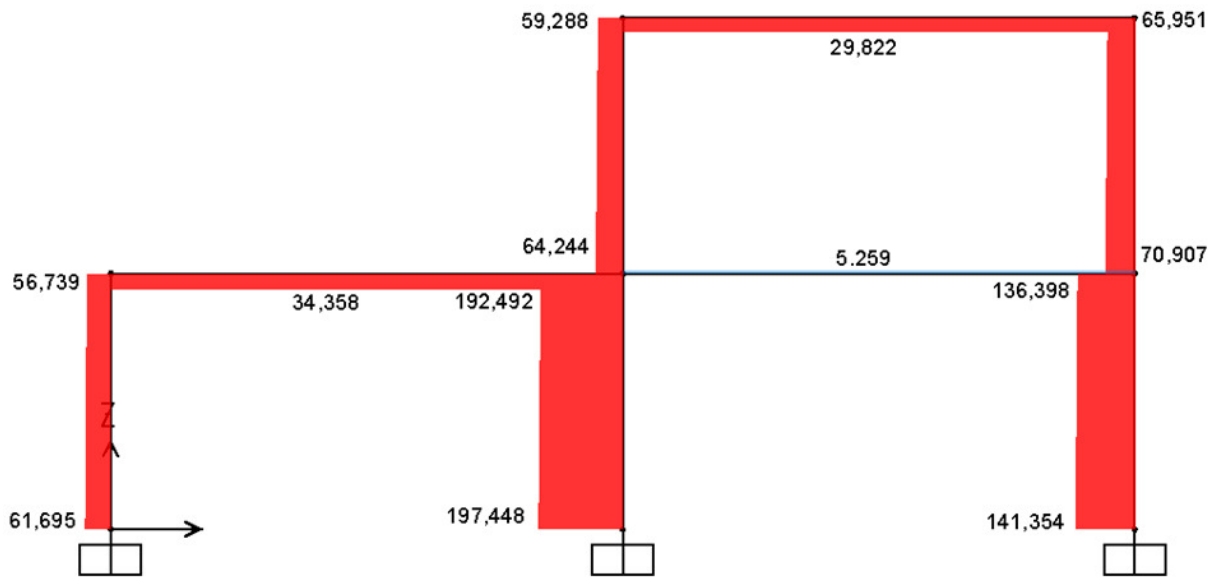


Figura 41: diagrama esforço normal ligações semi-rígidas

5.6 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS

A análise comparativa das solicitações demonstra, percentualmente, os resultados obtidos para as variações das solicitações de esforço normal (N), esforço cortante (V) e momento fletor (M), nas diferentes configurações das ligações, apresentadas nos quadros 6 e 7, em que pode-se relacionar ligações rígidas com semi-rígidas e flexíveis com semi-rígidas, respectivamente. Para esta análise, utilizaram-se valores em módulo, ou seja, foram desconsiderados os sinais, principalmente nos nós em que há variação de sinais positivos para negativos, uma vez que o valor de interesse para fins de dimensionamento da ligação é o valor em módulo.

Barra	N6	Rígidas		Semi-rígidas		Variação de N		Rígidas		Semi-rígidas		Variação de V		Rígidas		Semi-rígidas		Variação de M	
		N [kN]	N [kN]	N [kN]	N [kN]	V [kN]	V [kN]	V [kN]	V [kN]	M [kN.m]	M [kN.m]	M [kN.m]	M [kN.m]	M [kN.m]	M [kN.m]	M [kN.m]	M [kN.m]	M [kN.m]	M [kN.m]
1	1	-60,731	-61,695	(+) 1,59%	-5,986	-4,358	(-) 37,36%	15,127	18,191	(+) 20,25%									
	4	-55,775	-56,739	(+) 1,73%	-5,986	-4,358	(-) 37,36%	33,084	31,266	(-) 5,81%									
2	2	-198,601	-197,448	(-) 0,58%	-25,621	-24,795	(-) 3,33%	43,890	44,689	(+) 1,82%									
	5	-193,645	-192,492	(-) 0,60%	-25,621	-24,795	(-) 3,33%	-32,972	-29,697	(-) 11,03%									
3	3	-141,165	-141,354	(+) 0,13%	-25,365	-24,563	(-) 3,27%	43,834	44,620	(+) 1,79%									
	6	-136,209	-136,398	(+) 0,14%	-25,365	-24,563	(-) 3,27%	-32,261	-29,069	(-) 10,98%									
4	4	-35,986	-34,358	(-) 4,74%	-55,775	-56,739	(-) 1,73%	-33,084	-31,266	(-) 5,81%									
	2,667 m	-35,986	-34,358	(-) 4,74%	0,000	0,000	-	41,435	45,822	(+) 10,59%									
5	5	-35,986	-34,358	(-) 4,74%	69,464	68,500	(-) 1,41%	-74,149	-66,550	(-) 11,42%									
	5	6,462	5,259	(-) 22,88%	-59,919	-59,749	(-) 0,28%	-50,673	-44,608	(-) 13,60%									
5	2,667 m	6,462	5,259	(-) 22,88%	0,000	0,000	-	34,895	40,506	(+) 16,08%									
	6	6,462	5,259	(-) 22,88%	65,320	65,491	(+) 0,26%	-66,878	-61,834	(-) 8,16%									
6	5	-64,263	-64,244	(-) 0,03%	-16,827	-14,822	(-) 13,53%	-9,495	-7,755	(-) 22,44%									
	7	-59,307	-59,288	(-) 0,03%	-16,827	-14,822	(-) 13,53%	40,987	36,712	(-) 11,64%									
7	6	-70,888	-70,907	(+) 0,03%	-31,827	-29,822	(-) 6,72%	34,617	32,764	(-) 5,65%									
	8	-65,932	-65,951	(+) 0,03%	-31,827	-29,822	(-) 6,72%	-60,865	-56,703	(-) 7,34%									
8	7	-31,827	-29,822	(-) 6,72%	-59,307	-59,288	(-) 0,03%	-40,987	-36,712	(-) 11,64%									
	2,667 m	-31,827	-29,822	(-) 6,72%	0,000	0,000	-	42,948	47,173	(+) 9,84%									
8	-31,827	-29,822	(-) 6,72%	65,932	65,951	(+) 0,03%	-60,865	-56,703	(-) 7,34%										

Quadro 6: variação das solicitações para ligações rígidas comparadas às ligações semi-rígidas

Barra	Nó	Variação de N		Variação de V		Variação de M	
		Flexíveis N [kN]	Semi-rígidas N [kN]	Flexíveis V [kN]	Semi-rígidas V [kN]	Flexíveis M [kN.m]	Semi-rígidas M [kN.m]
1	1	-69,733	-61,695	15,662	-4,358	54,021	18,191
	4	-62,299	-56,739	15,662	-4,358	7,036	31,266
2	2	-203,586	-197,448	-14,925	-24,795	52,918	44,689
	5	-196,153	-192,492	-14,925	-24,795	8,143	-29,697
3	3	-143,968	-141,354	-14,413	-24,563	52,371	44,620
	6	-136,534	-136,398	-14,413	-24,563	9,131	-29,069
4	4	-14,338	-34,358	-62,299	-56,739	-7,036	-31,266
	2,667 m	-14,338	-34,358	0,000	0,000	84,010	45,822
5	5	-14,338	-34,358	64,407	68,500	-13,360	-66,550
	5	-2,262	5,259	-62,282	-59,749	-6,996	-44,608
5	2,667 m	-2,262	5,259	0,000	0,000	84,005	40,506
	6	-2,262	5,259	64,420	65,491	-13,420	-61,834
6	5	-69,463	-64,244	2,849	-14,822	14,506	-7,755
	7	-62,029	-59,288	2,849	-14,822	5,961	36,712
7	6	-72,111	-70,907	-12,151	-29,822	22,551	32,764
	8	-64,677	-65,951	-12,151	-29,822	-13,904	-56,703
8	7	-12,151	-29,822	-62,029	-59,288	-5,961	-36,712
	2,667 m	-12,151	-29,822	0,000	0,000	84,366	47,173
8	8	-12,151	-29,822	64,677	65,951	-13,904	-56,703

Quadro 7: variação das solicitações para ligações flexíveis comparadas às ligações semi-rígidas

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise comparativa da distribuição de esforços para o pórtico com ligações rígidas em relação ao pórtico com ligações semi-rígidas indica que nas vigas houve um aumento do momento fletor na região central do vão e uma diminuição nas extremidades. Já para as colunas do pórtico com estas configurações de ligações, foi possível verificar um aumento do momento fletor nos nós inferiores (próximos as fundações) e sua diminuição nos nós superiores (ligações com as vigas) Quanto aos esforços cortantes, houve de um modo geral uma diminuição desta solicitação tanto nas vigas quanto nas colunas, o que ocorreu também para os esforços normais, salvo pequenas exceções como as barras 1 e 7 que apresentaram variações muito pequenas.

Ao se avaliar as variações encontradas na distribuição dos esforços para o pórtico com ligações semi-rígidas se comparadas às obtidas para o pórtico com ligações flexíveis, notou-se uma diminuição para praticamente metade do momento fletor na região central da viga e um aumento significativo desta solicitação nas suas extremidades. As vigas ainda sofreram consideráveis variações na distribuição dos esforços normais e pequenas variações dos esforços cortantes. Em contrapartida, para as colunas nestas mesmas configurações de ligações, verificou-se uma variação significativamente grande dos esforços cortantes e pequena dos esforços normais.

Portanto, a partir destas análises é possível concluir que os resultados obtidos para a redistribuição dos esforços solicitantes de uma estrutura metálica com diferentes configurações de ligações entre viga e coluna estão de acordo com a literatura consultada. Ainda neste contexto, deve-se enfatizar que a metodologia de cálculo que considera ligações semi-rígidas apresenta maior precisão nos resultados, diminuindo, assim, as incertezas quanto às solicitações que agem nas barras. Deste modo, pode-se evitar que no projeto de estruturas metálicas se superestime ou subestime os esforços para o dimensionamento dos elementos de vigas e colunas.

REFERÊNCIAS

- 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.
- BAIÃO FILHO, O. T. B.; SILVA, A. C. V. **Ligações para estruturas de aço**: guia prático para estruturas com perfis laminados. 1.ed. [S.l.: s. n.], 2004. 294 p.
- BARBOSA, G. D. **Influência da flexibilidade das ligações no projeto de estrutura metálica**. 2006. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- CASTRO, R. A. **Modelagem Computacional de Ligações Semi-Rígidas e sua Influência na Resposta Dinâmica Não-Linear de Pórticos de Aço**. 2006. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **EUROCODE 3**, nEN 1993-1-8, Calcul des structures en acier – Partie 1.8: Calcul des assemblages. Bruxelles, 2005.
- COMPUTERS AND STRUCTURES, INCORPORATION. **SAP 2000, Integrated Software for Structural Analysis and Design**, Version 12.0.0. Copyright 1978 – 2008.
- MAGGI, Y. I.; GONÇALVES, R. M. Análise do comportamento de ligações metálicas parafusadas viga-pilar com chapa de topo analisando elementos finitos. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 7, n. 28, p. 21-52, 2005.
- MELLO, W. L. **Análise de pórticos metálicos planos com conexões semi-rígidas considerando a não linearidade física e geométrica**. 1999. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- NARDIN, S.; SOUZA, A. S. C.; EL DEBS, A. L. H. C. Detalhes de ligação entre pilares mistos preenchidos e vigas de aço. **Revista Construção Metálica**, Associação Brasileira da Construção Metálica, São Paulo, n. 79, p. 23-26, 2007.
- SILVA, L. S. Ligações metálicas: métodos avançados de análise e dimensionamento. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, série I, n. 51, p. 37-50, 2002.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Cândida Treméa

**A INFLUÊNCIA DA CONSIDERAÇÃO DA FLEXIBILIDADE
NAS LIGAÇÕES NO PROJETO DE ESTRUTURAS
METÁLICAS**

Porto Alegre
dezembro 2010

CÂNDIDA TREMÉA

**A INFLUÊNCIA DA CONSIDERAÇÃO DA FLEXIBILIDADE
NAS LIGAÇÕES NO PROJETO DE ESTRUTURAS
METÁLICAS**

Trabalho de Diplomação a ser apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Ruy Carlos Ramos de Menezes

Porto Alegre
dezembro 2010

CÂNDIDA TREMÉA

**A INFLUÊNCIA DA CONSIDERAÇÃO DA FLEXIBILIDADE
NAS LIGAÇÕES NO PROJETO DE ESTRUTURAS
METÁLICAS**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, dezembro de 2010

Prof. Ruy Carlos Ramos de Menezes
Dr, University Innsbruck, Áustria
Orientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Profa. Paulete Fridman Schwetz (UFRGS)
Mestre / UFRGS

Eng. Marcelo Marcondes de Carvalho
Engenheiro Civil / UFRGS

Prof. Ruy Carlos Ramos de Menezes (UFRGS)
Dr. pela University Innsbruck/Áustria

Dedico este trabalho a minha mãe, Lourdes, que sempre acreditou em mim e que tanto me ajudou e incentivou.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Ruy, orientador deste trabalho, pelo apoio constante e pela paciência com minha ansiedade.

Agradeço a Prof^ª Carin pela dedicação e atenção.

O que não provoca minha morte faz com que eu fique
mais forte.

Friedrich Nietzsche

RESUMO

TREMÉA, C. **A Influência da Consideração da Flexibilidade nas Ligações no Projeto de Estruturas Metálicas**. 2010. 67 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Este trabalho aborda ligações semi-rígidas entre vigas e colunas, enfatizando a influência da flexibilidade dessas ligações na análise das estruturas metálicas e com o propósito de obter uma avaliação mais realista dos modelos estruturais que representam o comportamento dessas ligações. Este comportamento semi-rígido das ligações provoca diferentes distribuições das solicitações nos elementos que compõem a estrutura, se comparadas aos resultados obtidos com os métodos tradicionais de cálculo, apresentados na NBR 8800/2008, em que estas ligações são consideradas rígidas ou flexíveis. Os métodos utilizados para determinar as propriedades destas conexões são baseados no Eurocode 3, o qual apresenta subsídios para dimensionamento e análise de elementos metálicos que possuam flexibilidade nas conexões. Foi utilizado um software de análise numérica para a obtenção de resultados relativos ao comportamento momento-rotação e ao efeito da flexibilidade na distribuição de esforços que possam ser comparados aos encontrados na bibliografia consultada. Através da análise de um pórtico plano, em cujas ligações empregaram-se molas rotacionais, simulando diferentes graus de flexibilidade, foi possível observar a redistribuição das solicitações de acordo com a configuração da ligação.

Palavras-chave: ligações semi-rígidas; ligações aparafusadas; ligações soldadas; rigidez rotacional, momento resistente.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: diagrama da pesquisa.....	16
Figura 2: deformação rotacional na conexão.....	20
Figura 3: classificação das ligações quanto à rigidez.....	21
Figura 4: classificação das ligações quanto à resistência.....	23
Figura 5: tipos de ligações comuns e curvas momento-rotação.....	25
Figura 6: ligação flexível com uma cantoneira aparafusada.....	26
Figura 7: ligação flexível com duas cantoneira soldadas.....	27
Figura 8: ligação flexível com duas cantoneiras aparafusadas.....	27
Figura 9: ligação flexível com chapa de extremidade.....	28
Figura 10: ligação semi-rígida com chapa simples soldada.....	28
Figura 11: ligação semi-rígida com chapa de topo aparafusada assimétrica.....	29
Figura 12: ligação semi-rígida com chapa de topo aparafusada simétrica.....	30
Figura 13 ligação rígida soldada.....	30
Figura 14: modelagens para ligação viga-coluna.....	32
Figura 15: representações matemáticas de curvas momento-rotação.....	33
Figura 16: limites de classificação.....	37
Figura 17: regras de cálculo para a curva momento-rotação.....	39
Figura 18: método das componentes aplicado à ligação viga-coluna.....	42
Figura 19: rotina de verificações das ligações.....	43
Figura 20: braço de alavanca (tração/compressão).....	44
Figura 21: distribuição de forças.....	45
Figura 22: etapas da verificação da resistência a tração das linhas de parafusos.....	45
Figura 23: zonas críticas para análise da ligação.....	46
Figura 24: componentes de uma ligação viga-coluna.....	47
Figura 25: modelo de pórtico analisado.....	48
Figura 26: perfis que compõem o pórtico analisado.....	50
Figura 27: modelo analisado ligação semi-rígida.....	51
Figura 28: modelo de viga com molas rotacionais.....	52
Figura 29: modelo de viga deformada com molas rotacionais.....	52
Figura 30: dimensões da seção da viga, em centímetros	53
Figura 31: propriedades da seção da viga, em centímetros	54
Figura 32: inserção de coeficientes de rigidez para ligação flexível	54
Figura 33: diagrama momento fletor ligações rígidas.....	59

Figura 34 diagrama esforço cortante ligações rígidas.....	59
Figura 35: diagrama esforço normal ligações rígidas.....	60
Figura 36: diagrama momento fletor ligações flexíveis.....	60
Figura 37: diagrama esforço cortante ligações flexíveis.....	61
Figura 38: diagrama esforço normal ligações flexíveis.....	61
Figura 39: diagrama momento fletor ligações semi-rígidas.....	62
Figura 40: diagrama esforço cortante ligações semi-rígidas.....	62
Figura 41: diagrama esforço normal ligações semi-rígidas.....	63

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: dados do pórtico analisado.....	49
Quadro 2: dimensões e características dos perfis do pórtico analisado.....	49
Quadro 3: resultados ligações rígidas.....	56
Quadro 4: resultados ligações flexíveis.....	57
Quadro 5: resultados ligações semi-rígidas.....	58
Quadro 6: variação das solicitações para ligações rígidas comparadas às ligações semi-rígidas.....	64
Quadro 7: variação das solicitações para ligações flexíveis comparadas às ligações semi-rígidas.....	65

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 MÉTODO DE PESQUISA	14
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA.....	14
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	14
2.2.1 Objetivo principal	14
2.2.2 Objetivos secundários	14
2.3 PRESSUPOSTOS.....	15
2.4 PREMISSAS.....	15
2.5 DELIMITAÇÕES.....	15
2.6 LIMITAÇÕES.....	15
2.7 DELINEAMENTO DA PESQUISA.....	16
3 LIGAÇÕES METÁLICAS VIGA-COLUNA	18
3.1 CLASSIFICAÇÃO DAS LIGAÇÕES.....	19
3.1.1 Classificação quanto à rigidez rotacional	20
3.1.1.1 Ligações Flexíveis.....	21
3.1.1.2 Ligações Rígidas.....	21
3.1.1.3 Ligações Semi-rígidas.....	22
3.1.2 Classificação quanto à resistência ao momento	22
3.1.2.1 Ligações Rotuladas.....	23
3.1.2.2 Ligações de Resistência Total.....	24
3.1.2.3 Ligações de Resistência Parcial.....	24
3.2 TIPOS DE LIGAÇÕES.....	25
3.2.1 Ligação flexível com cantoneira simples na alma	26
3.2.2 Ligação flexível com duas cantoneiras na alma	26
3.2.3 Ligação flexível com chapa de extremidade	27
3.2.4 Ligação semi-flexível com chapa simples	28
3.2.5 Ligação semi-flexível com chapa de topo estendida aparafusada	29
3.2.6 Ligação rígida soldada	30
3.3 MODELAGEM COMPUTACIONAL DAS LIGAÇÕES SEMI-RÍGIDAS.....	31
3.3.1 Representação matemática	32
3.3.2 Modelagem numérica	33
4 REFERÊNCIAS NORMATIVAS	34
4.1 ABORDAGEM SEGUNDO NBR 8800/2008.....	34

4.2 ABORDAGEM SEGUNDO EUROCODE 3.....	35
4.2.1 Classificação das ligações segundo Eurocode 3	37
4.2.2 Propriedades das ligações.....	38
4.2.2.1 Resistência das ligações.....	39
4.2.2.2 Rigidez das ligações.....	41
4.2.3 Análise das ligações: método das componentes.....	41
5 ANÁLISE ELEMENTOS ESTRUTURAIS.....	48
5.1 ELEMENTOS UTILIZADOS NO PROCESSO DE ANÁLISE.....	48
5.2 DEFINIÇÃO DOS INTERVALOS DE RIGIDEZ.....	50
5.3 LIGAÇÃO SEMI-RÍGIDA UTILIZADA.....	51
5.4 ANÁLISE DO MODELO.....	51
5.5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	55
5.6 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS.....	63
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	66
REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

Soluções construtivas com estruturas de aço podem ser significativamente competitivas em relação a outras alternativas quando aspectos relacionados a prazos, produtividade e impacto ambiental são considerados. Comparações mais amplas do que o simples cotejamento de valores dos materiais têm sido cada vez mais adotadas e, assim, o emprego do aço cresce bastante relativamente ao que já foi.

O projeto de estruturas de aço no Brasil segue recomendações da NBR 8800, revisada e publicada em 2008. Mesmo com a recente revisão, esta Norma ainda não considera algumas abordagens, mais avançadas na perspectiva da modelagem, já existentes em normas internacionais. Por exemplo, os códigos de projeto da Comunidade Européia (Eurocodes) consideram a flexibilidade nas ligações como uma forma de melhor avaliar o real comportamento das estruturas. Na Norma brasileira, ligações entre vigas e colunas são consideradas como sendo ou do tipo engastadas (restrição total ao giro), ou do tipo rotuladas (giro totalmente livre). Mesmo assim, fortemente sustentado pela observação, sabe-se que comportamento real de qualquer tipo de ligação é algo intermediário, sendo o grau de flexibilidade associado ao tipo idealizado (mais flexíveis quando idealizadas como rótulas e menos flexíveis quando idealizadas como engastes). Além disso, a resposta da estrutura em termos de distribuição de esforços (por exemplo, de momentos) é dependente da flexibilidade da ligação. Portanto, pode-se inferir que brevemente a abordagem já prevista em normas como nos Eurocodes será contemplada também na Norma brasileira.

Neste contexto, este trabalho objetiva a abordagem dos impactos da consideração da flexibilidade das ligações e seus efeitos sobre a distribuição dos momentos fletores nos elementos estruturais e, com isso, suas implicações no projeto estrutural. Tais considerações são de grande importância para a realização de projetos com modelos matemáticos mais precisos. Adicionalmente, é lícito considerar que a utilização de modelos mais aprimorados também resulte em maior confiabilidade e, conseqüentemente, em maior economia numa perspectiva mais abrangente considerando o custo do risco.

Uma extensa revisão bibliográfica sobre o tema foi realizada com base na prática e em normas de projeto. Foram realizadas análises teóricas e avaliações de estruturas típicas com e sem tais considerações com base em recomendações da bibliografia.

A análise numérica se justifica ao passo que evita extrapolações dos resultados para as situações que não se pode comprovar experimentalmente, seja pela impossibilidade de monitoramento de um protótipo ou pela inacessibilidade dos instrumentos para coleta de dados. Como ferramenta para avaliações, tal estudo utilizou o programa SAP2000 para análise estrutural.

O trabalho é dividido em 6 capítulos. A este primeiro coube introduzir o assunto do trabalho e ao segundo capítulo, tratar do seu método, apresentando a questão de pesquisa, os objetivos primário e secundário, pressupostos, premissas, delimitações, limitações e delineamento da pesquisa, com fluxograma das atividades.

No terceiro capítulo são abordadas as ligações entre vigas e colunas em estruturas metálicas, suas classificações quanto à resistência à rotação e ao momento, tipos mais comuns para projeto. Ainda trata da modelagem de ligações semi-rígidas para a obtenção da curva momento-rotação.

O quarto capítulo trata dos procedimentos previstos pela NBR 8800/2008 no que diz respeito ao dimensionamento dos tipos de ligações que são contempladas por esta Norma, que são rígidas ou flexíveis. Este capítulo ainda aborda ligações semi-rígidas pelos métodos do Eurocode 3.

O quinto capítulo trata da análise dos elementos estruturais. Para tanto, apresentam-se as características desses elementos utilizados no processo de análise, os métodos de cálculos e suas aplicações e a comparação dos resultados dos diferentes métodos.

O sexto capítulo expõe as conclusões que englobam todas as análises realizadas no trabalho, assim como os resultados obtidos a partir dos distintos métodos utilizados.

2 MÉTODO DE PESQUISA

A seguir serão apresentados os elementos que definem esta pesquisa.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa deste trabalho é: quais os efeitos na distribuição dos esforços nos elementos estruturais com ligações semi-rígidas se comparadas às ligações totalmente rígidas ou totalmente flexíveis (ambas vinculações ideais) convencionalmente utilizadas para projeto de estruturas metálicas?

2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos do trabalho estão classificados em principal e secundários e são apresentados nos próximos itens.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é a comparação das respostas da estrutura quanto à distribuição de esforços solicitantes considerando ou não a flexibilidade nas ligações de estruturas metálicas.

2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários deste trabalho são:

- a) identificação dos casos onde os procedimentos de cálculo atualmente utilizados subestimam ou superestimam as solicitações;

- b) verificação dos modelos matemáticos para representar a flexibilidade das ligações.

2.3 PRESSUPOSTOS

São considerados válidos os métodos de dimensionamento de ligações metálicas entre viga e coluna apresentados no capítulo 6 da NBR 8800/2008, para ligações rígidas e flexíveis, e no Eurocode 3, para semi-rígidas, os quais serão utilizados para definir e caracterizar estas ligações.

2.4 PREMISSAS

A análise estrutural considera as ligações como pontos nodais. Quando nos nós não se modifica o ângulo relativo entre os elementos que o compõe após o carregamento, ou seja, é mantida a continuidade rotacional, estes são classificados rígidos e transmitem totalmente o momento fletor. Em contrapartida, são classificados como flexíveis os nós em que há giro livre e a conseqüente descontinuidade rotacional entre os elementos. Neste caso, não há nenhuma transmissão de momento fletor.

2.5 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimitou-se ao estudo de estruturas metálicas formadas por barras, como, por exemplo, pórticos estruturais de edifícios.

2.6 LIMITAÇÕES

O trabalho estará baseado em dados obtidos da literatura e não contemplará pesquisa experimental. Assim, as ligações semi-rígidas serão consideradas pelo método do Eurocode 3 e as ligações totalmente rígidas ou totalmente flexíveis pela NBR 8800/2008.

2.7 DELINEAMENTO DA PESQUISA

O delineamento do trabalho de pesquisa abrangeu os seguintes aspectos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) definição da estrutura utilizada;
- c) aplicação da NBR 8800/2008;
- d) análise numérica a partir do Eurocode 3;
- e) comparação dos resultados;
- f) conclusões.

A representação esquemática do delineamento da pesquisa segue na figura 1.

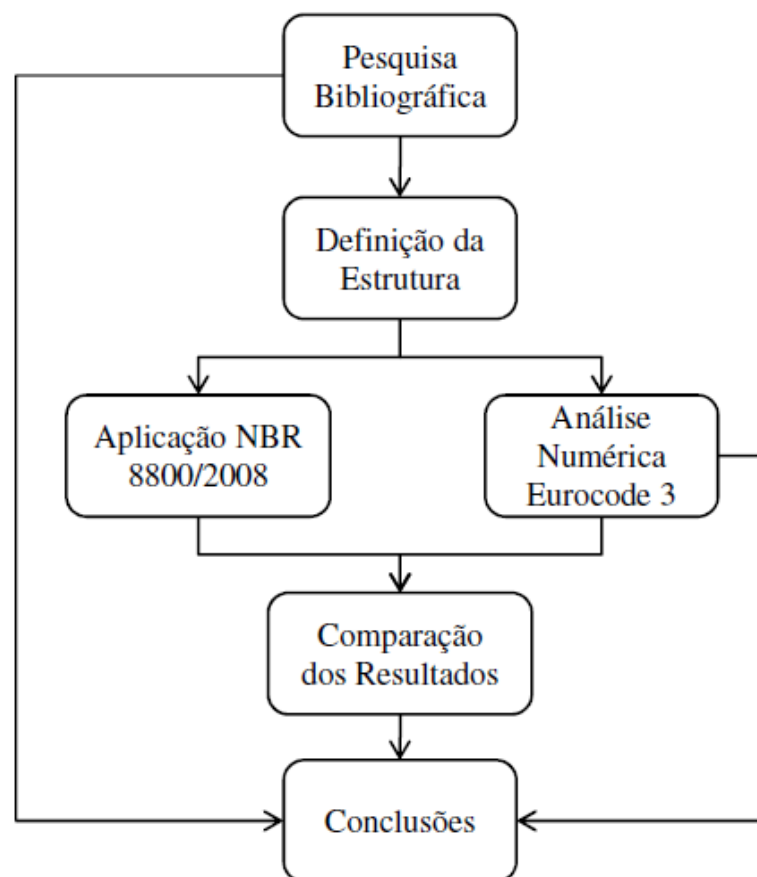


Figura 1: representação esquemática do delineamento da pesquisa

Inicialmente, realiza-se a pesquisa bibliográfica, objetivando o aprofundamento na questão da pesquisa, o conhecimento do método atualmente empregado para análise estrutural de acordo

com a NBR 8800/2008 e com o Eurocode 3 e ainda a verificação da relação momento fletor *versus* rotação nos casos de ligações rígidas, flexíveis ou semi-rígidas. Deve-se salientar que esta etapa estendeu-se ao longo do cronograma da pesquisa, a fim de garantir subsídios para as etapas posteriores.

A seguir, define-se a estrutura que será utilizada na análise numérica. Após, procede-se concomitantemente a aplicação de NBR 8800/2008, para casos em que não se utiliza flexibilidade das ligações, e a análise numérica, de acordo com as orientações do Eurocode 3, para casos em que faz-se uso de tal flexibilidade com a utilização de um software. A seguir, executa-se a etapa de comparação dos resultados obtidos nas etapas anteriores. Finalmente, apresentaram-se as conclusões e considerações finais.

3 LIGAÇÕES METÁLICAS VIGA-COLUNA

Segundo a NBR 8800, ligações metálicas são elementos de ligação, tais como enrijecedores, chapas de ligação, cantoneiras e consolos, ou ainda meios de ligação, como soldas, parafusos, barras redondas rosqueadas e pinos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 62).

Maggi e Gonçalves (2005, p. 21-22) acrescentam que:

As estruturas metálicas em geral, se observadas cuidadosamente, revelam uma característica de essencial importância sob o aspecto de sua concepção, projeto e construção, traduzida na influência do desempenho de suas ligações entre vigas e pilares no comportamento global da estrutura. Tal influência é acentuada pela possibilidade de utilização de uma grande diversidade de configurações e dispositivos para as ligações, o que potencialmente introduzirá descontinuidades geométricas aliadas às descontinuidades mecânicas oriundas do material utilizado, que podem induzir a um comportamento global não linear da estrutura.

Para Maggi e Gonçalves (2005, p. 22), segundo esta afirmação, é impossível apenas se considerar ligações idealizadas como perfeitamente rígidas ou flexíveis. Esta prática, convencionalmente usada em análise estrutural, sugere que as ligações são pontos nodais. Estes nós são classificados como rígidos quando se mantém a continuidade rotacional, sem modificação do ângulo relativo entre os elementos após a ação do carregamento, quando há transmissão total do momento fletor. No entanto, os nós em que não se tem nenhuma transmissão de momentos fletores e, conseqüentemente, apresentam descontinuidade rotacional entre os elementos que o compõe, são classificados como flexíveis. Inclui-se um tipo intermediário de classificação de ligações quanto à continuidade rotacional e à transmissão de momento que é a ligação semi-rígida.

Castro (2006, p. 23) considera que:

O comportamento real (semi-rígido) das ligações permite um dimensionamento mais correto e pode conduzir a economias significativas. Ao considerar este comportamento real nos projetos executados inicialmente com ligações flexíveis uma redução significativa nas flechas das vigas e uma diminuição do comprimento de flambagem das colunas, além de diminuir os deslocamentos laterais da estrutura.

Por outro lado, ao se admitir que as ligações são infinitamente rígidas, introduzem-se erros no cálculo das estruturas, em geral contra a segurança. Aliado a este fato o controle de rigidez de uma ligação semi-rígida permite uma melhor distribuição de momentos na viga gerando com isto uma economia significativa no custo global da estrutura.

O comportamento dos elementos de ligação tem sido objeto de estudo ao longo dos últimos anos, no sentido de se desenvolver modelos capazes de caracterizar completamente a resposta de ligações para vários tipos de solitação [...].

Com a avaliação de novos conceitos de projetos semi-rígidos, tem-se a possibilidade de dimensionar as estruturas de aço de forma mais racional e diminuindo os custos, pois há grande liberdade de detalhamento de ligações dentro dos limites extremos: rígida e flexível. Em geral, qualquer rigidez para uma determinada ligação pode ser conseguida para atender o comportamento estrutural desejado.

Um dos critérios para se ter uma economia nas estruturas é através da otimização do detalhamento de ligações. O Eurocode 3¹ [...] impõe limites para que a ligação seja considerada rígida, de acordo com as características dos elementos constituintes da mesma. Através do Eurocode 3² [...] pode-se classificar a ligação a partir da determinação do momento fletor resistente e da rigidez inicial da ligação. Para se otimizar um nó da estrutura, seu detalhe pode ser modificado passo a passo alterando a sua configuração geométrica sem modificar sua característica de nó.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DAS LIGAÇÕES

Pode-se classificar as ligações metálicas existentes entre viga e coluna de acordo com a rigidez e a resistência. Em função da rigidez, tem-se ligações flexíveis, rígidas e semi-rígidas. Quanto à resistência, as ligações podem ser: nominalmente rotuladas, de resistência total e de resistência parcial (NARDIN et al., 2007, p. 23). Castro (2006, p. 25) afirma que as propriedades de resistência à flexão e de rigidez a rotação caracterizam a curva momento *versus* rotação verificadas nas análises das ligações. Tais classificações serão descritas nos próximos itens.

¹ EUROCODE 3, prEN 1993-1-8, Design of steel structures – Part 1.8: Design of joints, 2003.

² op. cit.

3.1.1 Classificação quanto à rigidez rotacional

Mello (1999, p. 59) explica que:

A deformação nas conexões de aço entre vigas e colunas é dada pelo seu deslocamento rotacional, " θ_r ", causado pela curvatura dada pelo momento " M " no plano [...] [figura 2]. O efeito da deformação angular da conexão pode alterar o efeito da estabilidade das barras desde que a rotação adicional cause como resultado a redução na rigidez efetiva das barras para a qual as conexões são designadas. O acréscimo de rotação nas barras pode aumentar o efeito "P- Δ " e consequentemente, a estabilidade global da estrutura pode ser afetada.

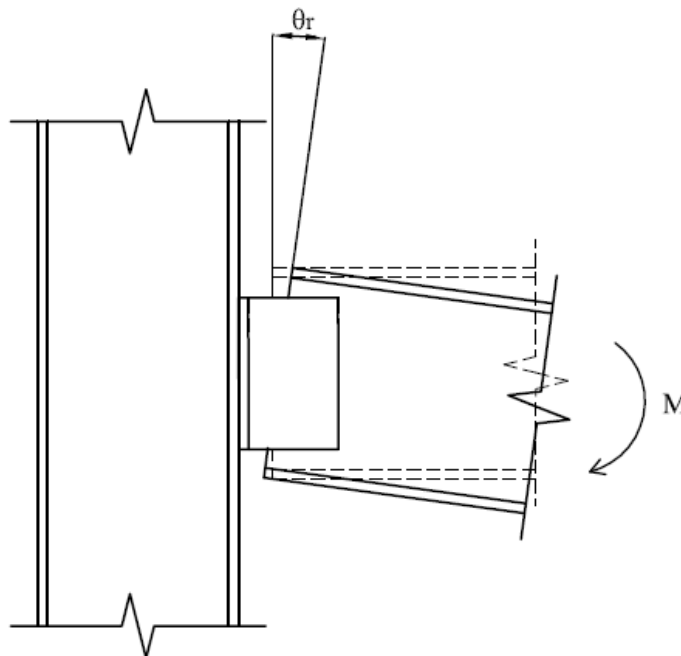


Figura 2: deformação rotacional na conexão (adaptado de MELLO, 1999)

Castro (2006, p. 25-26) afirma que a classificação das ligações quanto à rigidez rotacional leva em conta a rigidez lateral da estrutura, podendo ser rotulada, rígida ou semi-rígida. A figura 3 representa tais classificações.

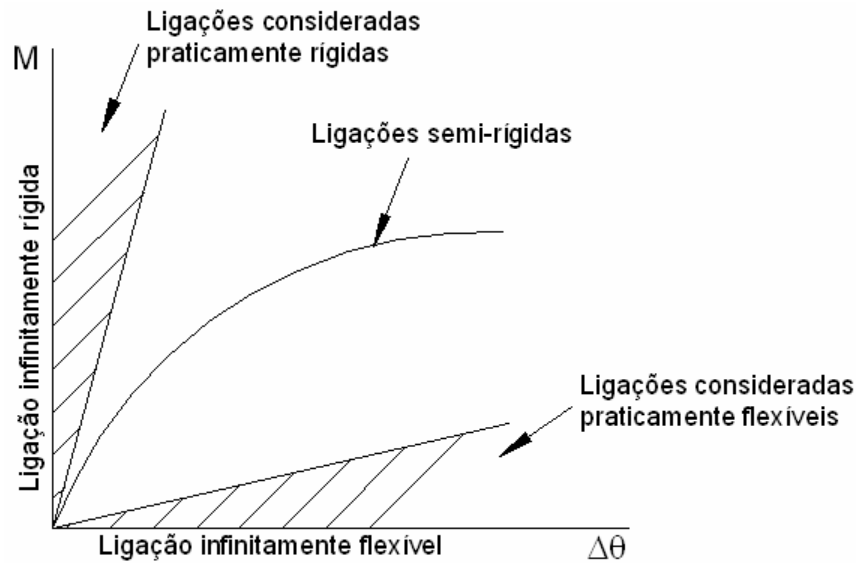


Figura 3: classificação das ligações quanto à rigidez (CASTRO, 2006)

3.1.1.1 Ligações Flexíveis

Uma ligação é tida como flexível quando permite, no mínimo, 80% de rotação teórica esperada (NARDIN et al., 2007, p. 23). Barbosa (2006, p. 30) afirma que “Nas ligações flexíveis a capacidade de rotação deve ser suficiente para capacitar que todas as rótulas plásticas se desenvolvam com cargas abaixo do carregamento de projeto.”. Castro (2006, p. 25) reforça esta afirmação, pois define:

São ligações capazes de transferir as forças cortantes e eventualmente forças normais provenientes da viga e da coluna. Além disso, elas devem ser capazes de se deformarem sem o desenvolvimento de momentos significativos, que possam afetar a resistência das colunas a elas conectadas, [...].

3.1.1.2 Ligações Rígidas

Uma ligação é considerada rígida quando restringe acima de 90% da capacidade de rotação relativa entre os elementos. Sendo assim, a deformação no nó é pequena e não influencia a distribuição dos momentos (NARDIN et al., 2007, p. 23). Barbosa (2006, p. 30) concorda, quando afirma que:

Nas ligações [...] [rígidas], a capacidade de rotação é limitada, devem ser considerados efeitos acima da resistência, dimensionamento em regime plástico.

A rigidez [...] [deste tipo de conexão] deve ser tal que, abaixo das cargas de projeto, as rotações necessárias para as rótulas plásticas não excedam a capacidade de rotação.

Castro (2006, p. 26) complementa que:

Estas ligações transmitem todos os esforços nela impostos com deformações insignificantes, pois estas não influenciam a distribuição de esforços na estrutura e sua deformação total. Estas deformações podem ser desprezadas, [...], pois as mesmas não reduzem a resistência da estrutura mais que 5% [...].

3.1.1.3 Ligações Semi-Rígidas

Uma ligação pode ser classificada como semi-rígida quando a rotação relativa entre os elementos que a compõe varia de 20 a 90% da rotação correspondente à ligação flexível (NARDIN et al., 2007, p. 23). Castro (2006, p. 27) adiciona que:

Quando a ligação não atende nem ao critério de ligação rígida ou de rotulada, deve ser classificada como semi-rígida. Estas ligações devem ser projetadas para um grau intermediário de interação entre os elementos da estrutura baseado em sua curva momento *versus* rotação, [...].

Barbosa (2006, p. 30) concorda, pois afirma que “A capacidade de rotação de uma conexão [...] [semi-rígida], na qual ocorram rótulas plásticas locais, não deve ser menor do que a necessária para que todas as rótulas plásticas se desenvolvam abaixo do carregamento de projeto.”.

3.1.2 Classificação quanto ao momento resistente

A figura 4 apresenta a classificação das ligações entre viga e coluna quanto ao critério de resistência ao momento (CASTRO, 2006, p. 28). Assim, tais ligações podem ser flexíveis (rotuladas), de resistência total e de resistência parcial (BARBOSA, 2006, p. 34).

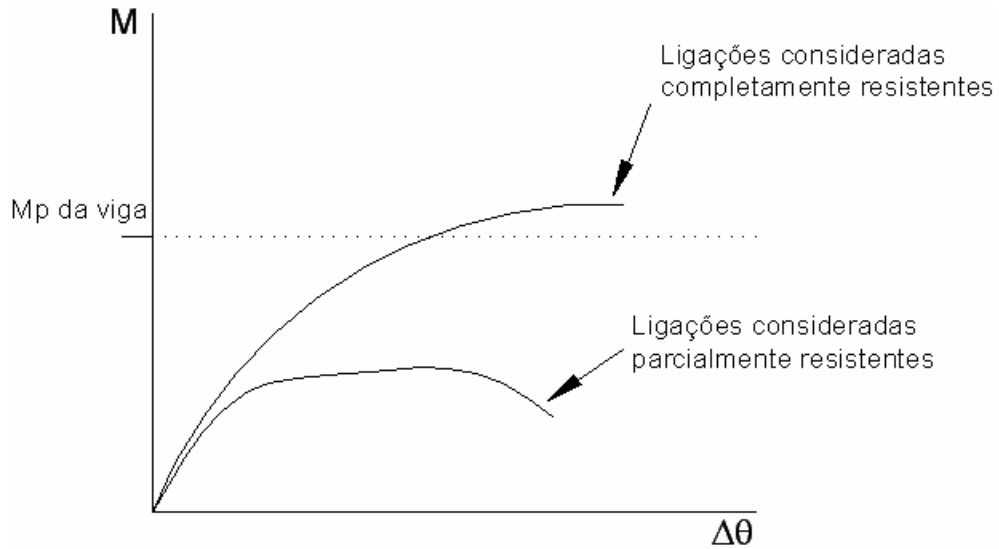


Figura 4: classificação das ligações quanto à resistência (CASTRO, 2006)

3.1.2.1 Ligações Rotuladas

São consideradas ligações nominalmente rotuladas aquelas que transferem para os elementos adjacentes apenas esforços normais e cortantes (NARDIN et al., 2007, p. 23). Castro (2006, p. 27-28) afirma que “Segundo este critério uma ligação deve ter capacidade de transmitir os esforços sem desenvolver momentos significativos [...]. Por outro lado, sua capacidade de rotação deve ser suficiente para o desenvolvimento de todas as rótulas plásticas necessárias.” e as classifica pela seguinte condição:

$$M_{j,Rd} \leq 0,25 \times \text{menor} (M_{b,pl,Rd} ; M_{c,pl,Rd})$$

Onde:

$M_{j,Rd}$ é o momento resistente de cálculo da ligação;

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

$M_{c,pl,Rd}$ é o momento resistente de cálculo da coluna.

Barbosa (2006, p. 29) explica que “As ligações [...] [rotuladas] não são capazes de transmitir momentos significativos. Estas ligações devem ser dimensionadas de forma que as forças atuantes nas componentes da conexão não comprometam a resistência do conjunto.”.

3.1.2.2 Ligações de Resistência Total

As ligações de resistência total são aquelas em que a resistência ao momento fletor é maior que a dos elementos conectados, transferindo as rótulas plásticas para os elementos (NARDIN et al., 2007, p. 23). O Eurocode 3 (COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, 2005, p. 52) sugere que a resistência de cálculo destas ligações seja sempre maior que a resistência de cálculo dos elementos que a compõem, como viga e coluna. Barbosa (2006, p. 29) explica que “As ligações [...] [de resistência total] são capazes de transmitir forças e momentos devendo ser dimensionadas para que as deformações não tenham influência significativa na distribuição das forças internas e momentos na estrutura.”.

3.1.2.3 Ligações de Resistência Parcial

São classificadas como ligações de resistência parcial aquelas em que a resistência de cálculo é menor que a resistência do elemento conectado, levando à formação de rótulas plásticas (NARDIN et al., 2007, p. 23). Eurocode 3 (COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, 2005, p. 52) complementa que são ligações em que a resistência de cálculo da ligação deve ser menor do que a resistência de cálculo da viga ou da coluna, o que leva a rótula plástica a se iniciar na ligação e as condiciona da seguinte forma:

- a) $M_{j,Rd} \geq \text{menor} (M_{b,pl,Rd} ; M_{c,pl,Rd})$ ligações com a coluna enrijecida;
- b) $M_{j,Rd} \geq \text{menor} (M_{b,pl,Rd} ; 2 \cdot M_{c,pl,Rd})$ ligações com a coluna não enrijecida

Barbosa (2006, p. 29) explica que:

As conexões que se enquadram numa faixa intermediária são as ligações [...] [de resistência parcial]. Elas são caracterizadas por suas componentes terem um grau de interação, baseado no dimensionamento da curva momento-rotação característico dos nós. Essa relação entre as componentes é que determina o quão a ligação está mais próxima do comportamento rígido ou totalmente flexível. Estas ligações são capazes de transmitir as forças e parcialmente os momentos.

3.2 TIPOS DE LIGAÇÕES

Castro (2006, p. 30) afirma que:

O comportamento de uma estrutura depende das características dos seus elementos e suas ligações viga-coluna. Desta forma, o detalhamento da ligação deve estar relacionado com as necessidades de rigidez, resistência, ductilidade, facilidade de fabricação e montagem, filosofia de detalhamento da fábrica e criatividade do projetista.

Na figura 5 é possível identificar alguns tipos de ligação frequentemente utilizadas no projeto de estruturas metálicas e suas respectivas curvas momento *versus* rotação, as quais dependem dos seguintes fatores (CASTRO 2006, p. 30-31):

- a) tipo e tamanho dos parafusos;
- b) distância dos parafusos à face da coluna;
- c) espessura das cantoneiras e placas de ligação;
- d) altura da viga e da ligação;
- e) presença ou não de enrijecedores nas colunas;
- f) se a ligação é na mesa ou na alma da coluna;
- g) se a ligação é na mesa ou na alma da viga;
- h) espessura da mesa ou alma da coluna;
- i) tensão de escoamento da viga, da coluna e do material dos componentes da ligação.

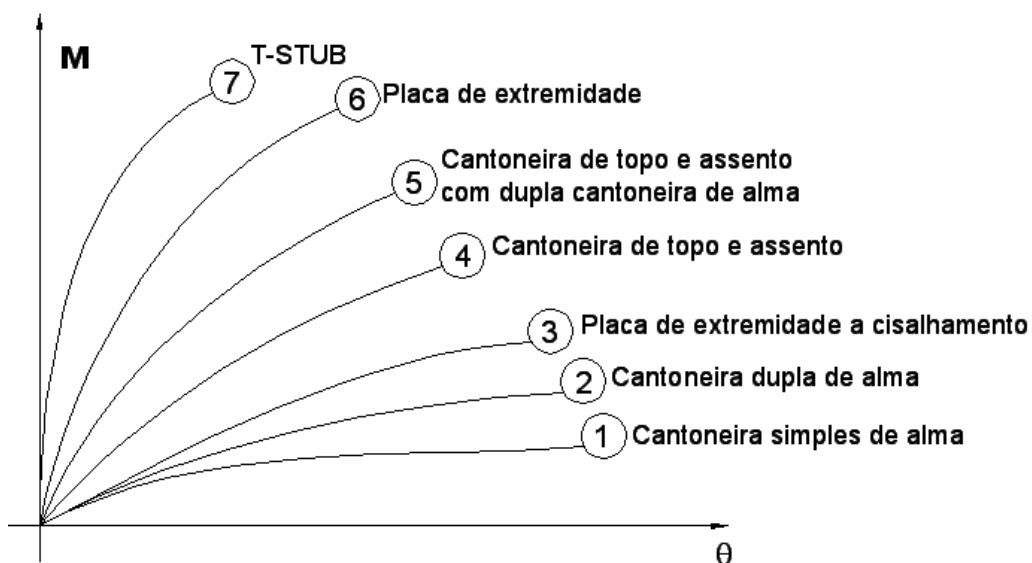


Figura 5: tipos de ligações comuns e curvas momento-rotação (CASTRO, 2006)

3.2.1 Ligação flexível com cantoneira simples na alma

Ligação flexível com cantoneira simples na alma consiste em uma cantoneira soldada ou aparafusada na alma da viga e conectada a mesa da coluna por meio de parafusos, mostrada na figura 6. Esta conexão possui resistência ao momento aproximadamente igual à metade da conexão com duas cantoneiras na alma (MELLO, 1999, p. 60).

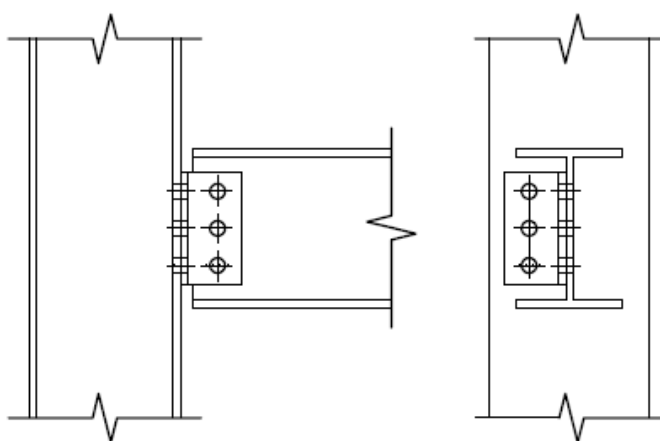


Figura 6: ligação flexível com uma cantoneira aparafusada
(adaptado de MELLO, 1999)

3.2.2 Ligação flexível com duas cantoneiras na alma

Ligação flexível com duas cantoneiras na alma trata-se de uma ligação em que a alma da viga é ligada a mesa da coluna através de duas cantoneiras, as quais têm as abas soldadas na viga e aparafusadas na coluna, conforme figura 7. Neste caso, a rótula está localizada na face da coluna, ou seja, no plano da ligação aparafusada, configurando uma ligação flexível. Outra configuração para esta ligação é possível se a cantoneira for aparafusada na alma da viga e também na mesa da coluna, como se pode ver na figura 8, com a rótula também no plano vertical (BAIÃO FILHO; SILVA, 2004, p. 19).

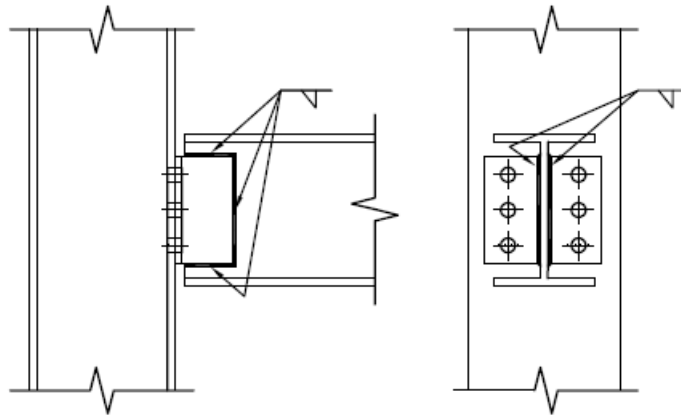


Figura 7: ligação flexível com duas cantoneiras soldadas na alma da viga
(adaptado de MELLO, 1999)

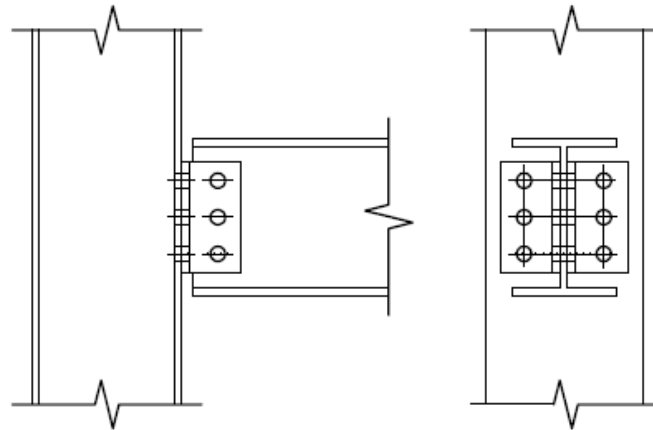


Figura 8: ligação flexível com duas cantoneiras aparafusadas na viga e na coluna
(adaptado de MELLO, 1999)

3.2.3 Ligação flexível com chapa de extremidade

A ligação flexível com chapa de extremidade utiliza uma chapa soldada na extremidade da viga e aparafusada na mesa da coluna, conforme esquematizado na figura 9. A chapa de extremidade deve ter, no máximo, a altura do perfil da viga e mais flexível será a ligação quanto menor for sua espessura (BAIÃO FILHO; SILVA, 2004, p. 65).

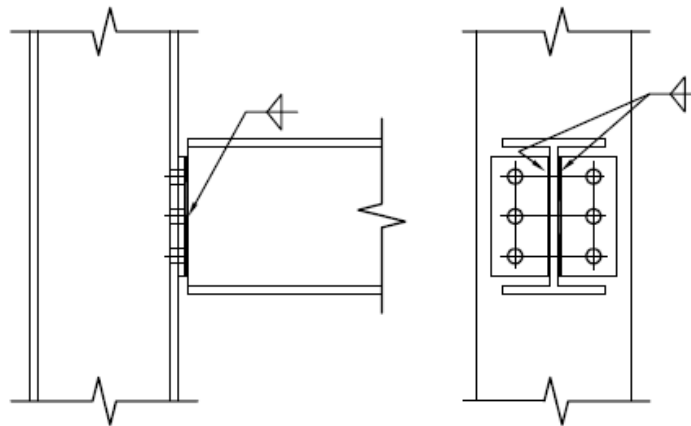


Figura 9: ligação flexível com chapa de extremidade (adaptado de MELLO, 1999)

3.2.4 Ligação semi-rígida com chapa simples

Ligação semi-rígida com chapa simples é composta por chapa vertical soldada na mesa da coluna, com solda filete dupla, e aparafusada na alma da viga, como demonstra a figura 10. Deve existir uma folga de 10 mm entre a extremidade da viga e a face (mesa) da coluna para não impedir a rotação do apoio, garantindo flexibilidade na ligação (BAIÃO FILHO; SILVA, 2004, p. 87).

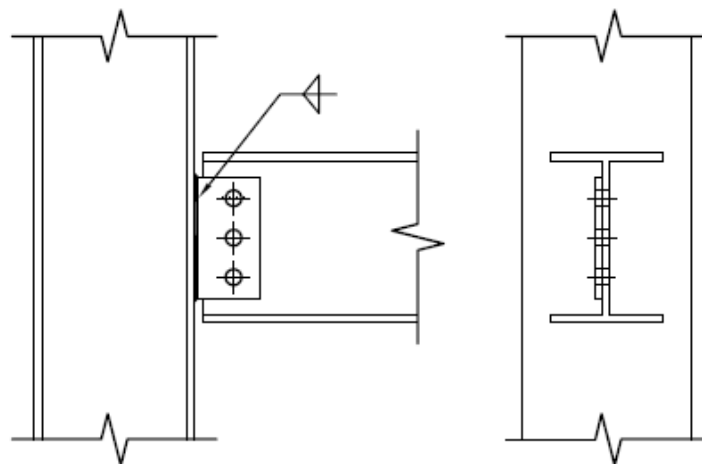


Figura 10: ligação semi-rígida com chapa simples (adaptado de MELLO, 1999)

3.2.5 Ligação semi-rígida com chapa de topo estendida aparafusada

As ligações com chapa de topo estendida aparafusada podem ser assimétricas, com apenas o lado tracionado estendido, ou simétricas, com ambos os lados, de tração e de compressão, estendidos (MELLO, 1999, p. 62). Trata-se de uma chapa soldada assimetricamente na extremidade da viga e aparafusada na alma ou na mesa da coluna, conforme figura 11. Tal assimetria é projetada, pois os momentos atuantes na viga normalmente solicitam com maior intensidade os parafusos superiores, tornando desnecessária a existência destes na parte inferior da chapa. Entretanto, quando o momento for inverso àquele, deve-se projetar uma ligação simétrica, figura 12, repetindo-se na parte inferior a disposição construtiva da superior (BAIÃO FILHO; SILVA, 2004, p. 103).

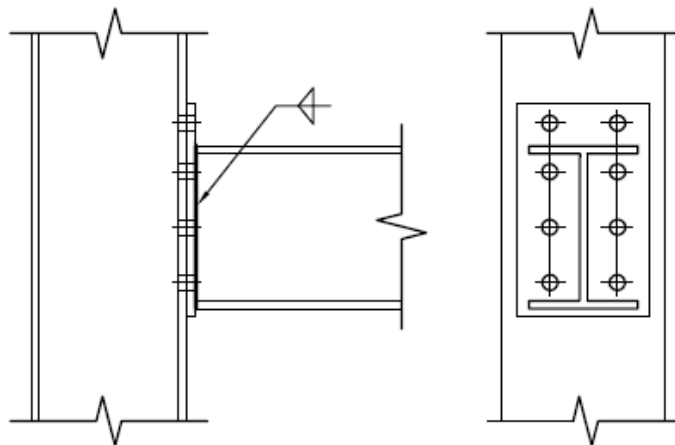


Figura 11: ligação semi-rígida com chapa de topo aparafusada assimétrica (adaptado de MELLO, 1999)

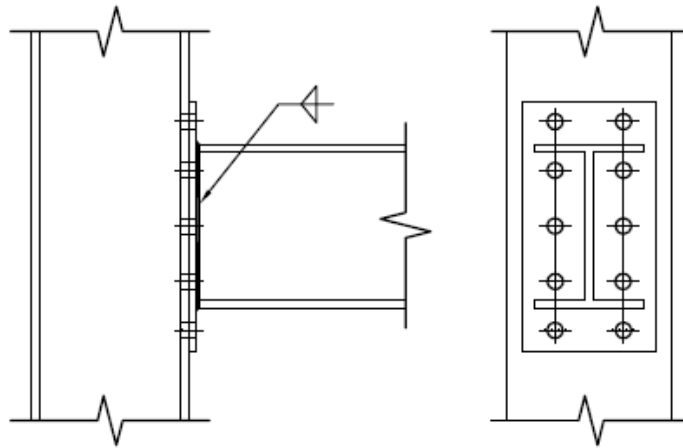


Figura 12: ligação semi-rígida com chapa de topo aparafusada simétrica (adaptado de MELLO, 1999)

3.2.6 Ligação rígida soldada

Ligação rígida soldada é feita através de uma chapa simples aparafusada na alma da viga, soldada na mesa da coluna (com a alma enrijecida) e com solda de penetração total unindo as mesas da viga e da coluna, como mostra a figura 13 (BAIÃO FILHO; SILVA, 2004, p. 129).

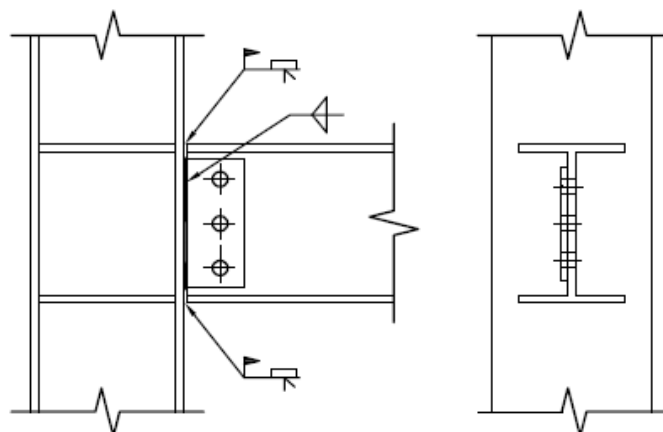


Figura 13: ligação rígida soldada (adaptado de MELLO, 1999)

É possível relacionar, em termos de comportamento momento-relação, os tipos de ligações existentes na figura 5 com as ligações citadas nos itens acima. A relação seria a seguinte:

- a) curva 1 (cantoneira simples de alma) e ligação flexível com cantoneira simples na alma;
- b) curva 2 (cantoneira dupla de alma) e ligação flexível com duas cantoneiras na alma;
- c) curva 3 (placa de extremidade e cisalhamento) e ligação flexível com chapa de extremidade;
- d) curva 4 (cantoneira de topo e assento) e ligação semi-rígidas com chapa simples;
- e) curva 5 (cantoneira de topo e assento com dupla cantoneira de alma) e ligação rígida com chapa de topo estendida aparafusada;
- f) curva 6 (placa de extremidade) e ligação rígida soldada.

3.3 MODELAGEM COMPUTACIONAL DAS LIGAÇÕES SEMI-RÍGIDAS

A modelagem computacional para as ligações semi-rígidas necessita de uma representação matemática da curva momento-rotação para que possa ser usada como dado de entrada no programa de análise estrutural. Conhecer esta curva é imprescindível para que se possa considerar sua influência na análise, portanto, a seguir serão apresentados métodos para modelagem das ligações semi-rígidas (CASTRO, 2006, p. 31-32).

Castro (2006, p. 41) complementa que:

Cada ligação viga-coluna é criada a partir de uma superposição de nós, sendo que um nó é pertencente à coluna e um outro à viga. A ligação entre esses dois elementos se dá através de um acoplamento entre os referidos nós. Nas ligações flexíveis é realizado acoplamento nas direções X e Y. Nas ligações rígidas o acoplamento é efetuado para as coordenadas X, Y e para as rotações em torno do eixo Z. Nas ligações semi-rígidas, além de se efetuar um acoplamento nas direções X e Y é inserido um elemento de mola rotacional, atribuindo rigidez à cada tipo de ligação em estudo. A Figura [...] [14] apresenta desenhos esquemáticos da referida modelagem.

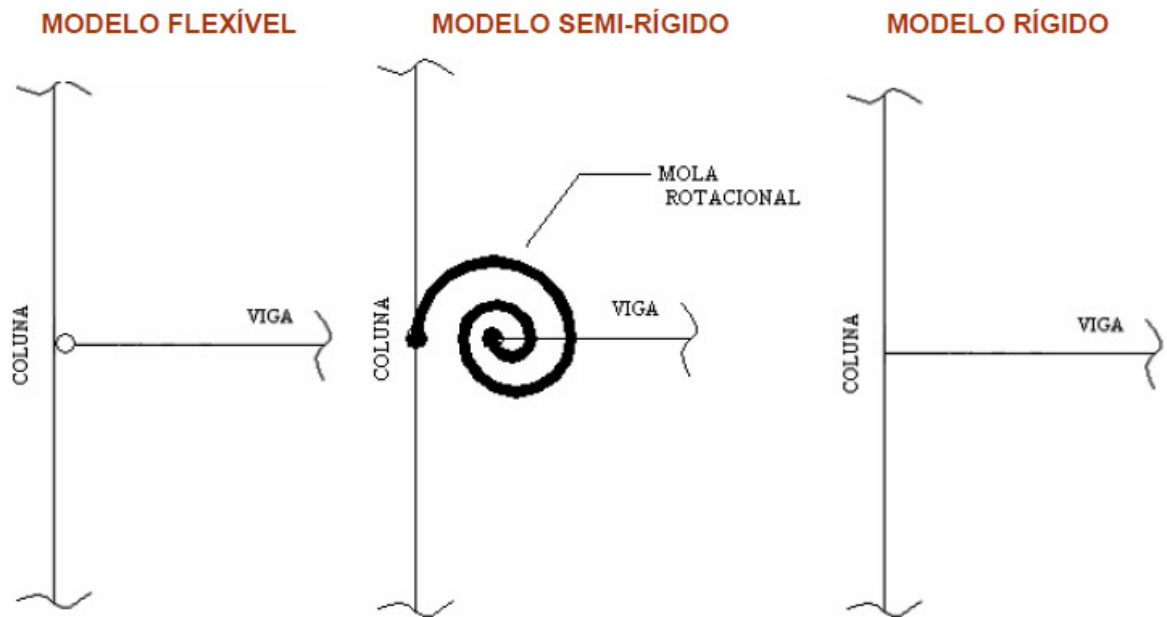


Figura 14: modelagens para ligação viga-coluna (CASTRO, 2006)

3.3.1 Representação matemática

Castro (2006, p. 32) sugere que:

A representação matemática da curva momento *versus* rotação pode ser feita por diferentes relações. O grau de sofisticação da representação depende da capacidade computacional do programa de computador para análise de estruturas com ligações semi-rígidas, os quais frequentemente oferecem uma aproximação bilinear, mas outras representações também podem ser usadas.

Na figura 15 é possível identificar algumas representações matemáticas da curva momento-rotação. O nível de refinamento da análise influencia a escolha da representação da curva e, conseqüentemente, a precisão da resposta da estrutura. Para a representação linear, que é a mais simples, a rigidez da ligação é superestimada para as maiores rotações. Apesar de não representar a rigidez de forma contínua, consegue-se uma melhora significativa com a curva bilinear. Ainda é possível superar esta aproximação quando se utilizam modelos trilineares ou multilineares. Quando se deseja um alto grau de precisão, opta-se por uma curva não linear (CASTRO, 2006, p. 32).

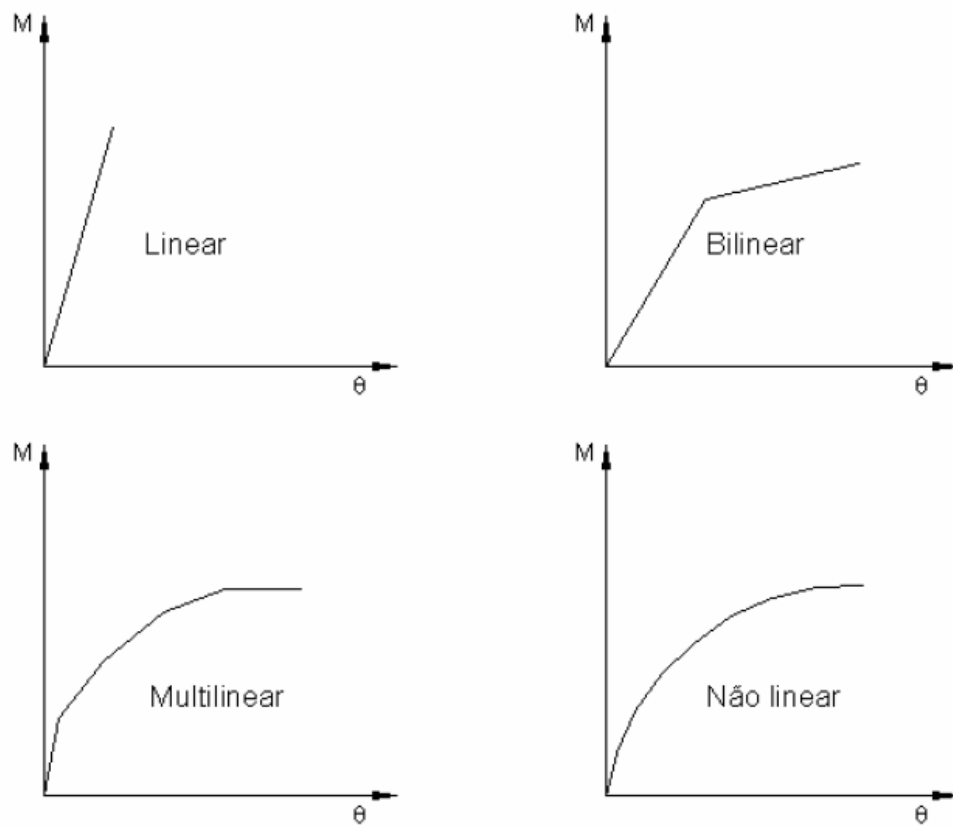


Figura 15: representações matemáticas de curvas momento-rotação
(CASTRO, 2006)

3.3.2 Modelagem numérica

Castro (2006, p. 33) afirma que:

Devido a sua versatilidade, o método dos elementos finitos permite a modelagem de diversos problemas de engenharia. Este método apresenta uma ferramenta adequada para conduzir investigações e realizar a calibração de modelo. Essa técnica parece, em princípio, ser a ferramenta mais satisfatória para avaliar a resposta da ligação. Contudo, tem que ser reconhecido que, apesar do progresso contínuo, algumas das exigências necessárias para uma simulação precisa são ainda hoje insatisfatórias, devido à falta de conhecimento das várias interações complexas entre os diversos elementos da ligação.

4. REFERÊNCIAS NORMATIVAS

A seguir serão apresentados alguns dos preceitos encontrados na Norma brasileira e no Eurocode 3 para o dimensionamento e classificação das ligações entre viga e coluna em estruturas metálicas.

4.1 ABORDAGEM SEGUNDO NBR 8800/2008

A NBR 8800/1986 não menciona a utilização de flexibilidade para dimensionamento de ligações. No entanto, o projeto de revisão da Norma, de setembro de 2006, inclui elementos que consideram o tema. A partir de então, passou-se a classificar as ligações de acordo com sua rigidez secante (BARBOSA, 2006, p. 37). A NBR 8800/2008 inclui bases para o dimensionamento das ligações metálicas semi-rígidas quando apresenta que “Na determinação da resistência de cálculo das ligações rígidas ou semi-rígidas, devem ser considerados os efeitos combinados de todos os esforços solicitantes de cálculo, provenientes da rigidez total ou parcial das ligações [...]” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 63). A nova NBR 8800 ainda admite que (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 63):

[...] uma ligação viga-pilar pode ser considerada rotulada se $S_i \leq 0,5 E I_v/L_v$ e pode ser considerada rígida se $S_i \geq 25 E I_v/L_v$ [...], onde S_i é a rigidez da ligação, correspondente a 2/3 do momento resistente de cálculo da ligação, simplificada denominada rigidez inicial, e I_v e L_v são o momento de inércia da seção transversal no plano da estrutura e o comprimento da viga conectada à ligação, respectivamente. [...].

O limite $S_i \geq 25 E I_v/L_v$ pode ser usado somente para estruturas nas quais, em cada andar, é satisfeita a relação $K_v/K_p \geq 0,1$, onde K_v é o valor médio de I_v/L_v para todas as vigas no topo do andar e K_p é o valor médio de I_p/L_p para todos os pilares do andar (I_v é o momento de inércia de uma viga no plano da estrutura, I_p é o momento de inércia de um pilar no plano da estrutura, L_v é o vão de uma viga considerado de centro a centro de pilares e L_p é a altura do andar para um pilar). Se $S_i \geq 25 E I_v/L_v$, mas $K_v/K_p < 0,1$, a ligação deve ser considerada semi-rígida.

A NBR 8800 sugere que, na ausência da Norma brasileira aplicável, pode-se determinar a rigidez S_i de acordo com o Eurocode 3 Part 1-8 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 63).

4.2 ABORDAGEM SEGUNDO EUROCODE 3

Maggi e Gonçalves (2005, p. 23) afirmam que:

O método de dimensionamento proposto pelo EUROCODE 3³ [...] apresenta, em seu Anexo J, os procedimentos para dimensionamento de ligações viga-coluna resistentes ao momento fletor, com elementos constituídos por perfis laminados, ou soldados com dimensões similares, e solicitadas por carregamento predominantemente estático, [...].

Barbosa (2006, p. 28) concorda quando afirma que:

O Eurocode 3⁴ [...] propõe métodos para determinar a curva momento-rotação. Esta pode ser utilizada na análise da estrutura em função do detalhe da ligação. A abordagem é direcionada às ligações entre vigas e colunas considerando o efeito da flexibilidade, [...]. O método parte de um modelo que funciona como uma mola rotacional conectando os eixos da coluna e da viga, [...]. Este modelo para dimensionamento busca estabelecer uma relação entre o momento fletor e a rotação relativa da conexão. Esta relação é denominada momento rotação característico da ligação.

Castro (2006, p. 25) complementa que:

[...] na análise estrutural, as ligações entre vigas e colunas são supostas infinitamente rígidas (modelagem rígida) ou perfeitamente rotuladas (modelagem flexível). Uma das inovações do Eurocode 3⁵ [...] é permitir uma modelagem semicontínua segundo a qual uma ligação é modelada por uma mola rotacional caracterizada por uma curva momento versus rotação não-linear. Dependendo das propriedades do nó envolvidas na análise estrutural, o sistema de classificação pode requerer um ou mais critérios.

³ EUROCODE 3 (1993). Design of steel structures: Part 1.1 - General rules and rules for buildings - Revised Annex J: Joints in building frames.

⁴ Eurocode 3. ENV. 1993-1-1:1992, Annex J, Design of Steel Structures. CEN, European Committee for Standardisation, p. 215 . 247.

⁵ EUROCODE 3, prEN 1993-1-8, Design of steel structures – Part 1.8: Design of joints, 2003.

O Eurocode 3⁶ [...] fornece regras para avaliar a rigidez e a resistência de ligações viga-coluna, tomando partido destas características.

Castro (2006, p. 28-29) apresenta critérios para fins de análise e dimensionamento da estrutura metálica, com base no Eurocode 3⁷:

Todas as ligações devem ter uma resistência de cálculo de forma que os elementos estruturais sejam capazes de satisfazer a todos os critérios de projeto. Assim como no projeto de elementos estruturais (vigas e colunas), o projeto de ligações envolve estados limites que devem ser verificados, para os casos de combinações de cargas, obtidos pela análise global da estrutura. Nestes esforços devem estar incluídos todos os efeitos admitidos na análise global, como os efeitos de segunda ordem e plastificação quando for o caso, e os efeitos de flexibilidade da ligação no caso de ligações semi-rígidas.

A resistência de uma ligação deve ser avaliada, entre outros aspectos, pela capacidade de resistência de cada parafuso ou solda.

Com relação às propriedades das ligações envolvidas na análise estrutural, as seguintes observações com relação à modelagem dos nós devem ser consideradas:

- a) a análise elástica deve ser baseada em uma curva momento versus rotação linear;
- b) a análise rígido-plástica deve ser baseada no momento resistente de projeto da ligação, onde esta deve desenvolver uma suficiente capacidade de rotação;
- c) a análise elasto-plástica deve ser baseada em uma análise considerando-se não linear a curva momento *versus* rotação, caracterizada por três propriedades estruturais: resistência à flexão, rigidez à rotação e capacidade de rotação.

Tais observações estão ligadas ao tipo de análise escolhida para toda a estrutura, ou seja, que a hipótese adotada na análise global da estrutura e dos seus membros deve ser consistente com o tipo de comportamento considerado para as ligações.

Dependendo das ligações, os sistemas estruturais podem ser classificados como:

- Simples: os nós são assumidos como incapazes de transmitir momentos, permitindo rotação livre;
- Contínuas: todos os extremos dos membros (vigas, colunas) que convergem em um nó são sujeitos à mesma rotação e aos mesmos deslocamentos, isto é, o comportamento da ligação não é levado em consideração.
- Semicontínuas: o cálculo é baseado na deformação característica dos nós, sendo necessário considerar o comportamento da ligação.

⁶ EUROCODE 3, prEN 1993-1-8, Design of steel structures – Part 1.8: Design of joints, 2003.

⁷ op. cit.

4.2.1 Classificação das ligações segundo Eurocode 3

O Eurocode 3 (COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, 2005, p. 50-51) classifica as ligações pela rigidez rotacional S_j e pelo momento resistente de cálculo da ligação $M_{j,Rd}$. Quanto à rigidez, são divididas em articuladas, rígidas e semi-rígidas e limitadas de acordo com a figura 16.

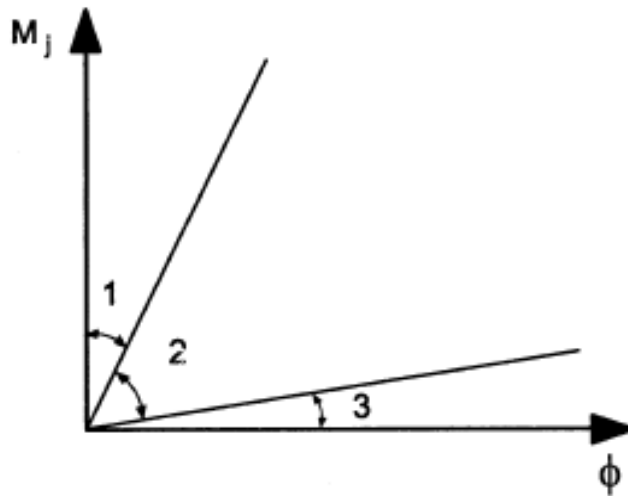


Figura 16: limites de classificação
(COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, 2005)

A Região 1 engloba as ligações rígidas. Quando a estrutura possuir um sistema de contraventamento que reduza até 80% do deslocamento lateral, estas ligações deverão satisfazer a seguinte condição:

$$S_j \geq \frac{8 \cdot E \cdot I_b}{L_b}$$

E quando forem ligações rígidas em estruturas deslocáveis, ou seja, não contraventadas, atenderão a condição:

$$S_j \geq \frac{25 \cdot E \cdot I_b}{L_b}$$

Onde:

S_j : rigidez secante rotacional da conexão;

E : módulo de elasticidade longitudinal;

I_b : é o momento de inércia da seção da viga conectada;

L_b : é o comprimento da viga conectada.

O limite expresso por esta última condição apenas será admitido para pórticos que atenderam à relação $K_b/K_c \geq 0,1$, onde K_b é o valor médio obtido por I_b/L_b , para todas as vigas existentes na parte superior deste andar e K_c , é o valor médio de I_c/L_c , com I_c sendo o momento de inércia da seção transversal do pilar e L_c , o comprimento do pilar no andar, para todos os pilares do andar onde estiver situada a ligação em análise.

A Região 3 compreende as ligações articuladas que devem obedecer a seguinte condição:

$$S_j \leq \frac{0,5 \cdot E \cdot I_b}{L_b}$$

Caso estas condições não sejam atendidas, a ligação deverá ser considerada semi-rígida e inserida na Região 2. Quanto ao momento resistente, são classificadas em rotuladas, totalmente resistentes e parcialmente resistentes, de acordo com os conceitos apresentados no capítulo 3.

4.2.2 Propriedades das ligações

O comportamento global de uma ligação é verificado por uma curva não linear momento-rotação, a partir da qual são definidas as três propriedades fundamentais que caracterizam o comportamento estrutural e mecânico da ligação:

- 1) momento resistente de cálculo $M_{j,Rd}$, que é igual ao momento máximo da curva momento-rotação;
- 2) rigidez rotacional S_j , que é a rigidez secante;
- 3) capacidade de rotação de cálculo de uma ligação θ_{Cd} , que é igual a rotação máxima.

A definição S_j se aplica até o desenvolvimento da rotação θ_{Xd} para a qual o momento de cálculo aplicado, $M_{j,Ed}$, atinge o nível de $M_{j,Rd}$, mas não para rotações superiores. Tal curva, como mostra a figura 17, é obtida pela associação do comportamento individual de diversas componentes, que devem transmitir os esforços diretamente sem que haja concentração de tensões (COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, 2005, p. 55-57).

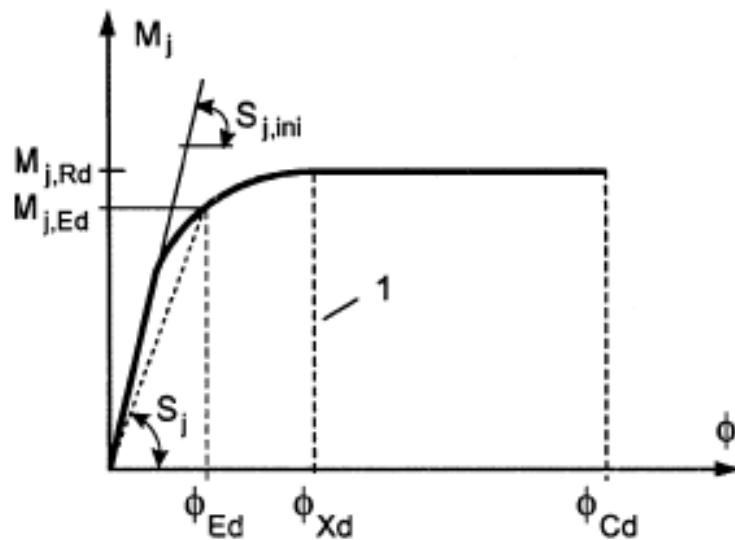


Figura 17: regras de cálculo para a curva momento-rotação (COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, 2005)

4.2.2.1 Resistência da ligação

A avaliação da resistência da ligação decorre do método das componentes em que o momento resistente de cálculo da ligação, $M_{j,Rd}$, corresponde ao momento máximo obtido, que deve ser superior ao momento de cálculo aplicado, $M_{j,Ed}$, satisfazendo a condição de segurança $M_{j,Ed}/M_{j,Rd} \leq 1,0$ (COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, 2005, p. 79). Em

consequência disso, $M_{j,Rd}$ corresponde ao momento máximo obtido com base nos seguintes critérios (SILVA, 2002, p. 44):

- a) equilíbrio dos esforços internos com as forças aplicadas à ligação;
- b) não exceder a resistência de cada componente;
- c) não exceder a capacidade de deformação de cada componente;
- d) ignorar a compatibilidade de deformações entre as várias componentes.

Silva (2002, p. 44) ainda complementa que:

Neste procedimento é necessário avaliar a resistência potencial de cada uma das três zonas de uma ligação (tração, compressão e corte), ajustando-se a distribuição plástica das forças nos parafusos na zona de tração de forma a garantir equilíbrio. O potencial das componentes da zona de tração corresponderá sempre à carga de colapso mínima de todos os mecanismos possíveis (método de limite superior).

O método de cálculo do momento resistente da ligação, $M_{j,Rd}$, não deve levar em conta a coexistência de eventuais forças normais, N_{Ed} , nas barras conectadas. É conveniente que este método não seja utilizado se a força normal exercida na barra conectada exceder 5% da resistência plástica de cálculo, $N_{pl,Rd}$, da sua seção transversal, ou seja, se não verificar a condição $N_{Ed} \leq 5\% N_{pl,Rd}$. Caso esta condição não seja satisfeita, ou seja, o esforço exercido na viga exceda em 5% a resistência plástica de cálculo, $N_{Ed} > 5\% N_{pl,Rd}$, então aplica-se o método $[M_{j,Ed}/M_{j,Rd} + N_{j,Ed} / N_{j,Rd}] \leq 1,0$ (COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, 2005, p. 79-80).

Para o cálculo do momento resistente de um ligação viga-coluna aparafusada com chapa de topo estendida, considerada semi-rígida, tem-se a equação 1 (COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, 2005, p. 82):

$$M_{j,Rd} = \sum_r h_r F_{tr,Rd} \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

$F_{tr,Rd}$ é a resistência de cálculo á tração da fiada de parafusos r ;

h_r é a distância entre a fiada de parafusos r ao centro de compressão;

r é número de fiadas de parafusos.

4.2.2.2 Rigidez da ligação

A rigidez da ligação, S_j , é definida pela razão entre o momento fletor aplicado à ligação, $M_{j,Ed}$, e a rotação que provoca, θ_{Ed} . O aumento da rotação da ligação, θ_{Xd} , faz com que esta atinja seu momento resistente, $M_{j,Ed}$, não se alterando com o posterior aumento de rotação θ_{Cd} . A rigidez rotacional inicial da ligação, $S_{j,ini}$, que é o declive correspondente ao limite elástico máximo da ligação, pode ser determinada a partir das flexibilidades das componente básicas que contribuem para a deformação da ligação, representadas através de coeficientes de rigidez elástica, k_i , e pela associação dos referidos valores de rigidez em série e em paralelo. Tal rigidez rotacional, S_j , pode ser obtida através da equação 2 (COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, 2005, p. 86-87):

$$S_j = \frac{E z^2}{\mu \sum_i \frac{1}{k_i}} \quad (\text{equação 2})$$

Onde:

k_i é o coeficiente de rigidez para cada componente;

z é o braço de alavanca;

μ é a relação de rigidez $S_{j,ini} / S_j$ e vale $\mu=1,0$ se $M_{j,Ed} \leq 2/3 M_{j,Rd}$.

4.2.3 Análise das ligações: método das componentes

O dimensionamento das ligações tradicionalmente é baseado em hipóteses mais simplificadas que resultam divergências significativas no que diz respeito ao seu comportamento real. Entre estas, são mais consideradas as hipóteses relacionadas ao comportamento rígido da chapa de ligação e a de distribuição elástica das forças solicitantes pelos conectores. A necessidade de se aliar uma análise mais rigorosa das ligações, que avalie não apenas a resistência, mas também a deformação, aos procedimentos de dimensionamento simplificados, de utilização rotineira no projeto, conduziu ao chamado **método das componentes**, adotado no Eurocode

3⁸. Este método avalia o comportamento de uma ligação através de modelos mecânicos simples constituídos de molas com deformação axial e barras rígidas. Cada componente da ligação é representado por uma mola, a qual é associada uma relação força-deformação. A figura 18 apresenta como se pode modelar uma ligação aparafusada com chapa de topo estendida a partir da utilização de molas e as componentes mais relevantes: alma do pilar ao corte (1), alma do pilar à compressão (2), alma do pilar à tração (3.1 e 3.2), banzo do pilar à flexão (5.1 e 5.2), chapa de extremidade à flexão (4.1 e 4.2) e parafusos à tração (10.1 e 10.2) (SILVA, 2002, p. 38-40).

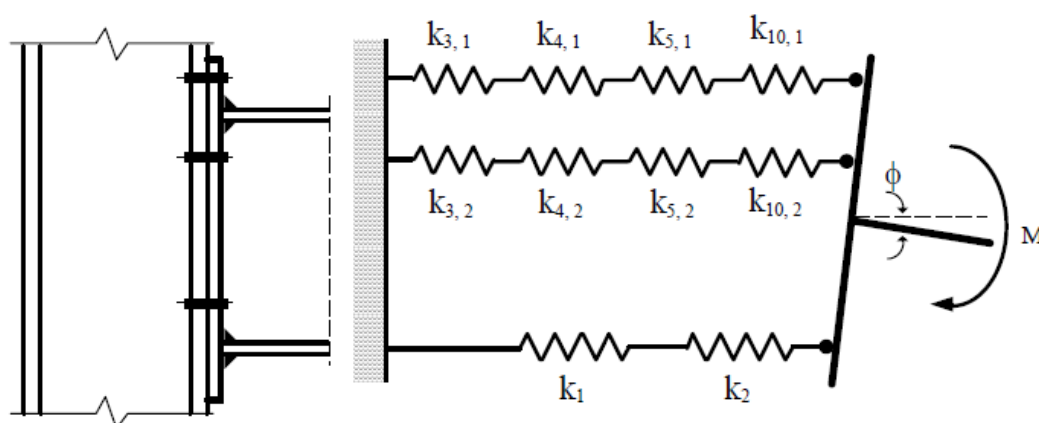


Figura 18: método das componentes aplicado à ligação viga-coluna (SILVA, 2002)

O processo do Método das Componentes, regido pelas hipóteses de cálculo para as ligações, enfatiza a necessidade de se proceder a uma análise realista da transferência de esforços e para tanto, sugere as seguintes recomendações (COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, 2005, p. 19):

- a) as solicitações consideradas para análise devem estar em equilíbrio com as solicitações aplicadas na ligação;
- b) cada elemento da ligação deve ser capaz de resistir às solicitações;
- c) as deformações resultantes desta transferência de esforços não deve exceder a capacidade de deformação dos elementos de fixação ou de soldagem e das diferentes partes conectadas;
- d) é conveniente que a suposta transferência de esforços seja realizada levando-se em conta a rigidez relativa da ligação;

⁸ EUROCODE 3, ENV - 1993-1-1:1992/A2 (1998), “Annex J”, Design of Steel Structures – Joints in Building Frames

- e) as deformações consideradas em um modelo de cálculo qualquer fundamentado numa análise elasto-plástica são baseadas na rotação de um corpo rígido e/ou nas deformações num plano que são fisicamente possíveis, e;
- f) todo modelo utilizado deve estar de acordo com os resultados experimentais.

O método empregado no dimensionamento das ligações metálicas, de acordo com o Eurocode 3⁹, propõe 15 verificações específicas distintas de resistência para cada componente da estrutura em função dos esforços solicitantes, como pode ser visto na figura 19, que se restringe ao caso de ligação semi-rígida com chapa de topo assimétrica (MAGGI; GONÇALVES, 2005, p. 23-24).

Região	Ref.	Verificação
Tracionada	a	Tração nos parafusos
	b	Flexão da chapa de topo
	c	Flexão da mesa do pilar
	d	Tração na alma da viga
	e	Tração na alma do pilar
	f	Solda mesa/chapa de topo
	g	Solda alma/chapa de topo
Cisalhamento Horizontal	h	Cisalhamento no painel de alma do pilar
Comprimida	i	Mesa da viga
	j	Solda mesa/chapa de topo
	k	Enrugamento da alma do pilar
Cisalhamento Vertical	l	Flambagem da alma do pilar
	m	Solda alma/chapa de topo
	n	Cisalhamento nos parafusos
	o	Pressão de contato (mesa ou chapa)

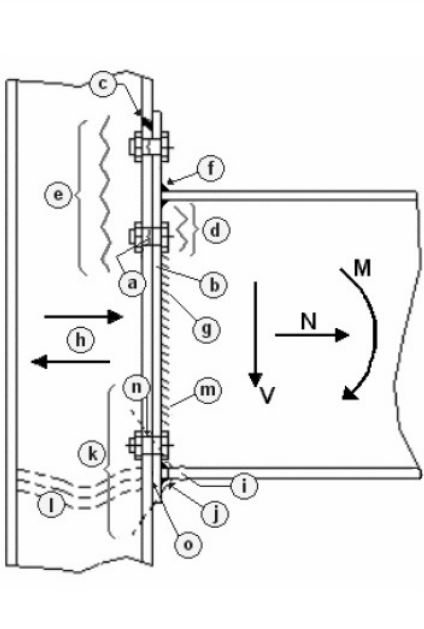


Figura 19: rotina de verificações das ligações (MAGGI; GONÇALVES, 2005)

Maggi e Gonçalves (2005, p. 24-25) afirmam que

[...] a filosofia adotada pelo Anexo J do EUROCODE-3¹⁰ [...], baseia-se na hipótese de que a transmissão do momento fletor é realizada, na ligação, por um binário de forças, cujo braço de alavanca z é determinado pela distância entre o plano médio da mesa comprimida e o ponto médio da distância entre as duas linhas de parafusos mais afastadas daquele plano, na região tracionada, como esquematizado na figura [...] [20]. Levando-se em consideração que as linhas de parafusos mais afastadas da

⁹ EUROCODE 3 (1993). Design of steel structures: Part 1.1 - General rules and rules for buildings - Revised Annex J: Joints in building frames

¹⁰ op. cit.

mesa comprimida, intuitivamente, atrairão maior esforço, o método também considera que há uma distribuição plástica das forças de tração nos parafusos, abandonando a abordagem tradicional, que considera uma distribuição triangular em direção à região comprimida, como esquematizado na figura [...] [21].

A filosofia do método de dimensionamento proposto pelo [...] EUROCODE-3¹¹ [...] assume que a força total permitida para as linhas de parafusos é calculada com base na sua capacidade resistente, e não somente em função de seu braço de alavanca. Essa capacidade resistente é função não só das características dos parafusos, mas também pela consideração de todos os elementos resistentes que interagem na região verificada.

Assim, parafusos próximos a pontos de enrijecimento irão atrair uma parcela maior da força de tração. Essa hipótese pode ser visualizada na figura [...] [21] para a distribuição plástica, onde é atribuída maior força aos parafusos da linha interna, entre as mesas da viga, numa região enrijecida também pela sua alma.

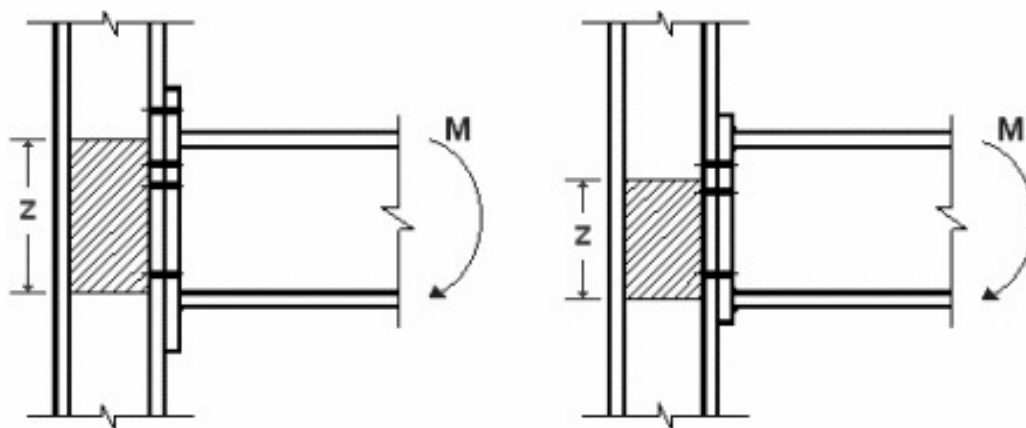


Figura 20: braço de alavanca (tração/compressão) (MAGGI; GONÇALVES, 2005)

¹¹ EUROCODE 3 (1993). Design of steel structures: Part 1.1 - General rules and rules for buildings - Revised Annex J: Joints in building frames

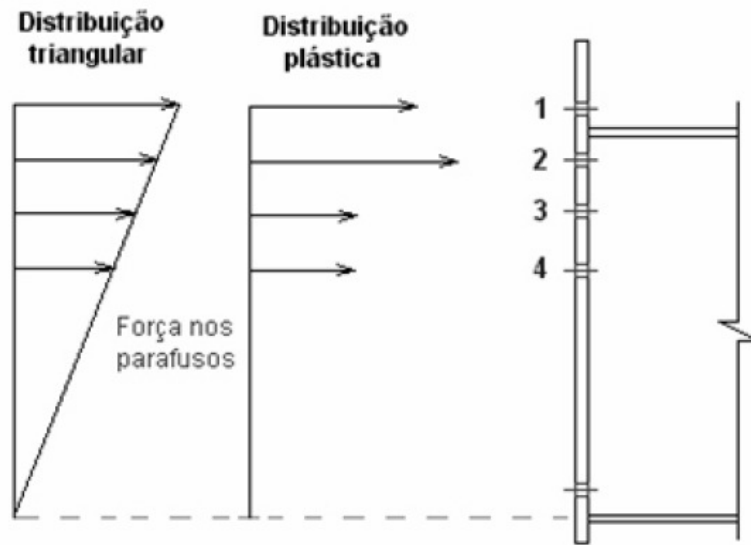


Figura 21: distribuição de forças (MAGGI; GONÇALVES, 2005)

Para o dimensionamento, inicialmente, deve-se verificar isoladamente a capacidade de resistência a tração de cada linha de parafuso pertencente à região tracionada da ligação. A seguir, a verificação considera que a linha faça parte de um grupo. Sendo assim, a resistência da primeira linha de parafusos, ou seja, a linha mais distante do centro de compressão será calculada como se apenas ela existisse. A verificação da resistência da segunda linha considera sua atuação isoladamente e também o grupo que ela forma com a primeira linha. O valor resultante para a segunda linha é obtido diminuindo-se o valor calculado para o grupo formado pelas linhas 1 e 2 da capacidade resistente calculada para a primeira linha isoladamente, como mostra a figura 22 (MAGGI; GONÇALVES, 2005, p. 25).

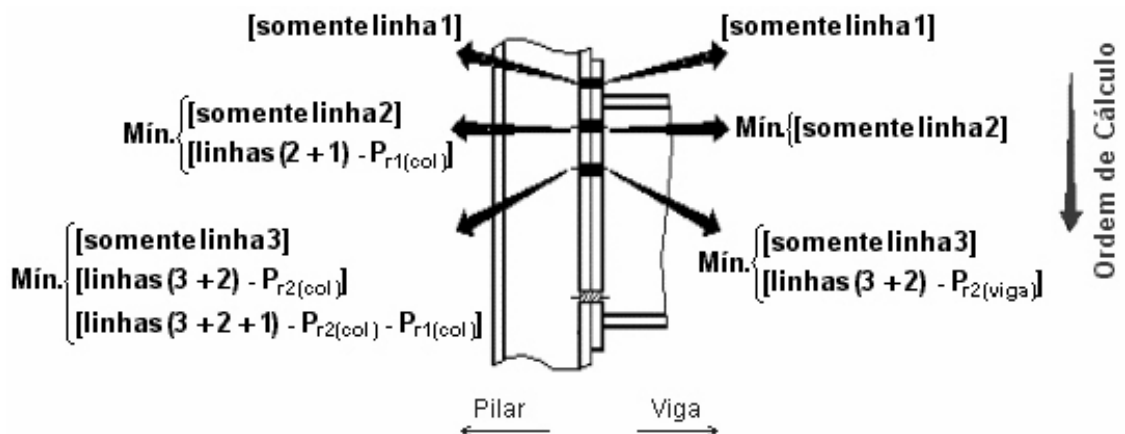


Figura 22: etapas da verificação da resistência a tração das linhas de parafusos (MAGGI; GONÇALVES, 2005)

Castro (2006, p. 35-36) conclui que:

As ligações em estruturas de aço apresentam diversos tipos de detalhamentos alternativos, pelo que os modelos de análise diferem pela geometria da ligação. No entanto todos os modelos de análise compreendem as mesmas características básicas: uma zona tracionada, uma zona de compressão e uma em corte, como mostra a figura [...] [23].

Uma ligação analisada na visão dos métodos das componentes pode ser decomposta em elementos ou componentes que reproduzem o comportamento das suas partes, em termos de resistência e deformabilidade. Um exemplo genérico, de acordo com o Eurocode 3¹² [...], é ilustrado na figura [...] [24]

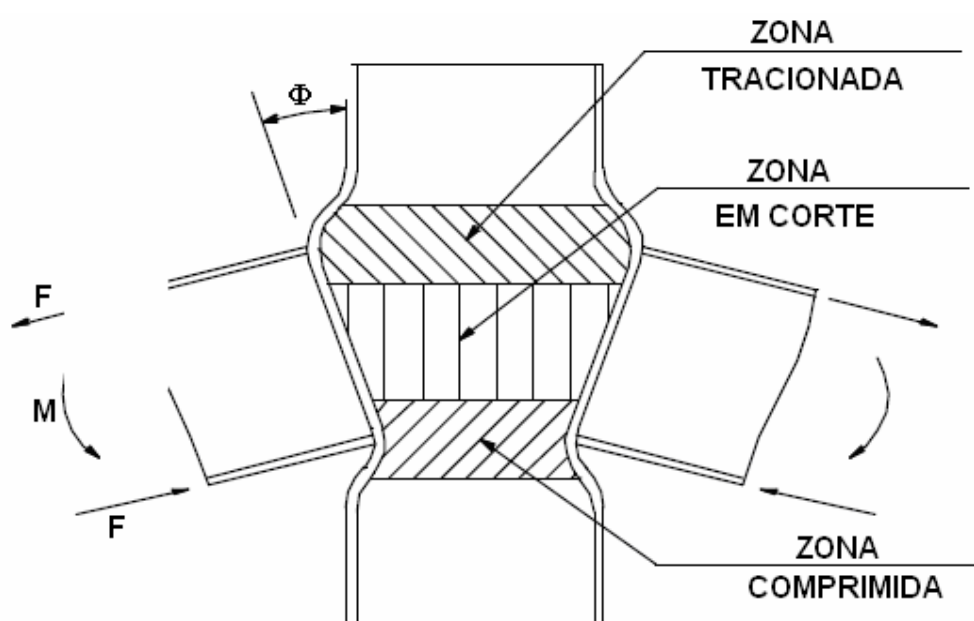


Figura 23: zonas críticas para análise da ligação (CASTRO, 2006)

¹² EUROCODE 3, prEN 1993-1-8, Design of steel structures – Part 1.8: Design of joints, 2003.

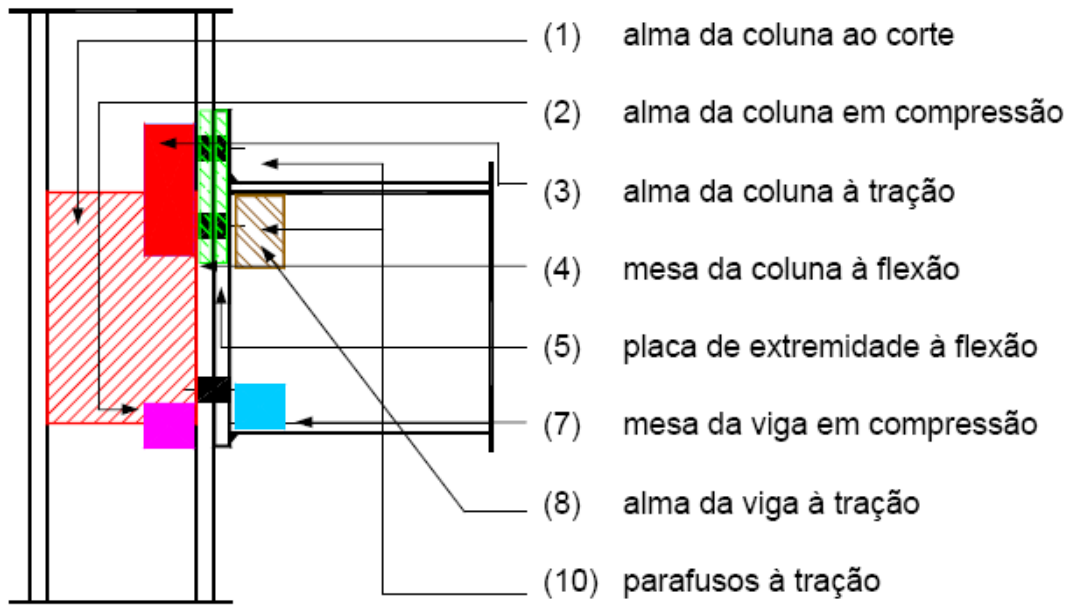


Figura 24: componentes de uma ligação viga-coluna (CASTRO, 2006)

5 ANÁLISE ELEMENTOS ESTRUTURAIS

Neste capítulo serão apresentados os elementos utilizados no processo de análise, bem como as considerações relativas ao efeito causado pela adição da flexibilidade nas ligações entre estes elementos. Para tal análise, foram utilizados métodos tradicionais do cálculo de estruturas metálicas, considerando nós rígidos, flexíveis e semi-rígidos.

5.1 ELEMENTOS UTILIZADOS NO PROCESSO DE ANÁLISE

Para fins de verificar o efeito nos esforços sobre os elementos estruturais consequentes da inserção de flexibilidade nas ligações, foi modelado um pórtico submetido a um carregamento uniformemente distribuído de valor 20 kN/m e a um carregamento horizontal correspondente a 30 kN e 15 kN no topo dos pavimentos um e dois, respectivamente (figura 25).

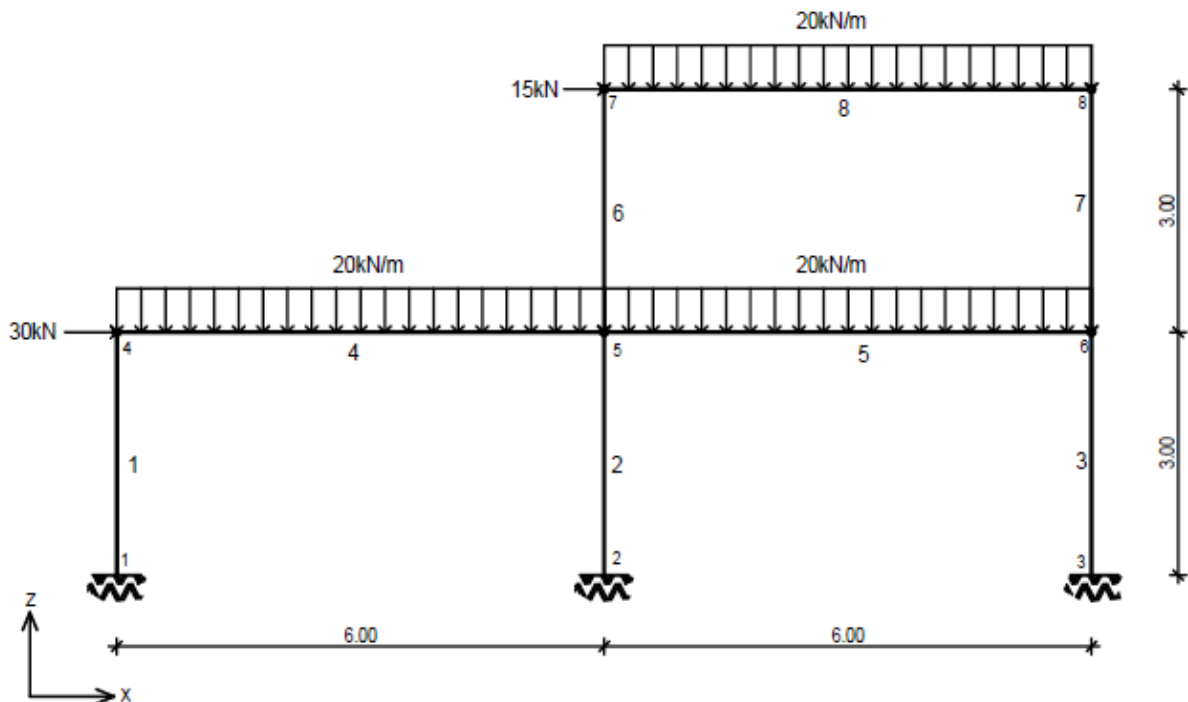


Figura 25: modelo de pórtico analisado

Trata-se de um pórtico plano, cujos dados encontram-se no quadro 1, com vãos de 6 m e com altura de 3 m para cada pavimento. Foi adotado perfil laminado Gerdau Açominas HP 250 x 85,0 para as colunas e perfil laminado Gerdau Açominas W 250 x 44,8 para as vigas, ambos em aço A36 ($f_y=250$ MPa e $f_u=400$ MPa) conforme as dimensões e características apresentadas no quadro 2 e na figura 26.

Barra	Conectividades		Coordenadas dos nós		Propriedades geométricas			
	Nó inicial	Nó final	x [m]	y[m]	Área [cm ²]	I _x [cm ⁴]	E [kN/m ²]	Seção
1	1	4	0,0	0,0	108,5	12.280	205·10 ⁶	1
2	2	5	6,0	0,0	108,5	12.280	205·10 ⁶	1
3	3	6	12,0	0,0	108,5	12.280	205·10 ⁶	1
4	4	5	0,0	3,0	57,6	7.038	205·10 ⁶	2
5	5	6	6,0	3,0	57,6	7.038	205·10 ⁶	2
6	5	7	12,0	3,0	108,5	12.280	205·10 ⁶	1
7	6	8	6,0	6,0	108,5	12.280	205·10 ⁶	1
8	7	8	12,0	6,0	57,6	7.038	205·10 ⁶	2

Quadro 1: dados do pórtico analisado

Bitola	Massa linear	d	b _f	Espessura		h	d'
				t _w	t _f		
[mm·kg/m]	[kg/m]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
W 250 x 44,8	44,8	266	148	7,6	13,0	240	220
HP 250 X 85,0	85,0	254	260	14,4	14,4	225	201

Quadro 2: dimensões e características dos perfis do pórtico analisado

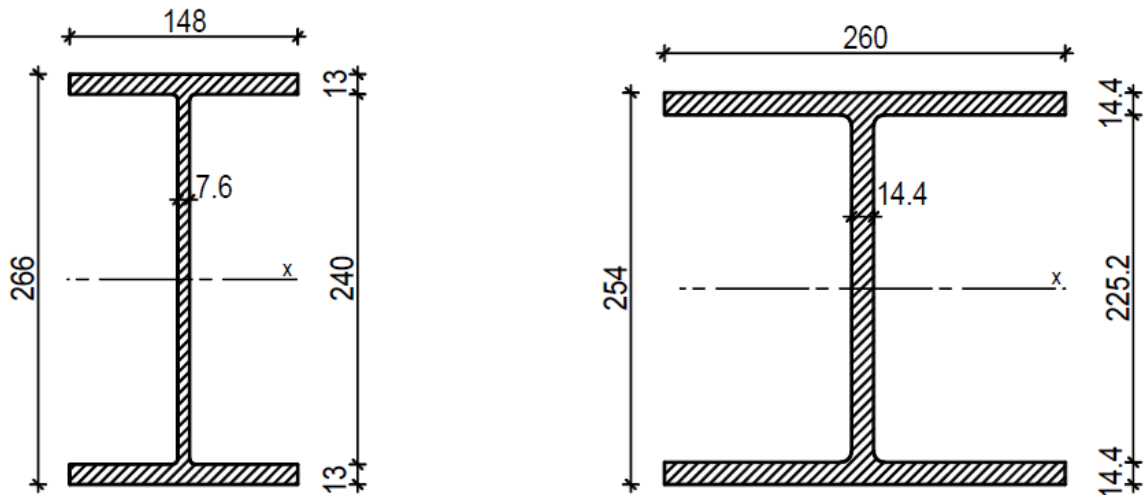


Figura 26: perfis que compõem o pórtico analisado

5.2 DEFINIÇÃO INTERVALOS DE RIGIDEZ

Com a finalidade de classificar as ligações para a análise a partir do modelo de pórtico apresentado, utilizaram-se as condições prescritas pela NBR 8800/2008 e pelo Eurocode 3, vistas no capítulo 4, para definir faixas de rigidez rotacional, nas quais foram enquadradas as ligações:

$$S_j \geq \frac{25 \cdot E \cdot I_b}{L_b} = 59.650 \text{ kN/m.rad}$$

$$S_j \leq \frac{0,5 \cdot E \cdot I_b}{L_b} = 1.193 \text{ kN/m.rad}$$

Sendo assim, para $S_j \geq 59.650 \text{ kN/m.rad}$ tem-se ligações rígidas, para $S_j \leq 1.193 \text{ kN/m.rad}$ tem-se ligações flexíveis e conseqüentemente, para $1.193 < S_j < 59.650 \text{ kN/m.rad}$, tem-se ligações semi-rígidas. Com base nesta definição, escolheram-se valores de rigidez rotacional para os casos de ligações rígidas ($S_j = 70.000 \text{ kN/m.rad}$) e flexíveis ($S_j = 900 \text{ kN/m.rad}$).

5.3 LIGAÇÃO SEMI-RÍGIDA UTILIZADA

Para a análise do pórtico com a hipótese de ligações semi-rígidas, foi utilizada como exemplo uma conexão obtida na literatura. Esta ligação é do tipo chapa de topo assimétrica soldada na viga e aparafusada na mesa da coluna, conforme figura 27. Sua fixação é garantida por seis parafusos do tipo M20, classe 10.9, cujo diâmetro é de 19,05 mm e pela solda filete com 8 mm de espessura, que une a chapa de topo a viga. Os valores para o momento resistente de cálculo da ligação e para a rigidez rotacional, calculados com base na resistência nominal de cada componente, são $M_{Rd} = 118,25 \text{ kN.m}$ e $S_j = 26.335,83 \text{ kN.m/rad}$, respectivamente (BARBOSA, 2006, p. 92).

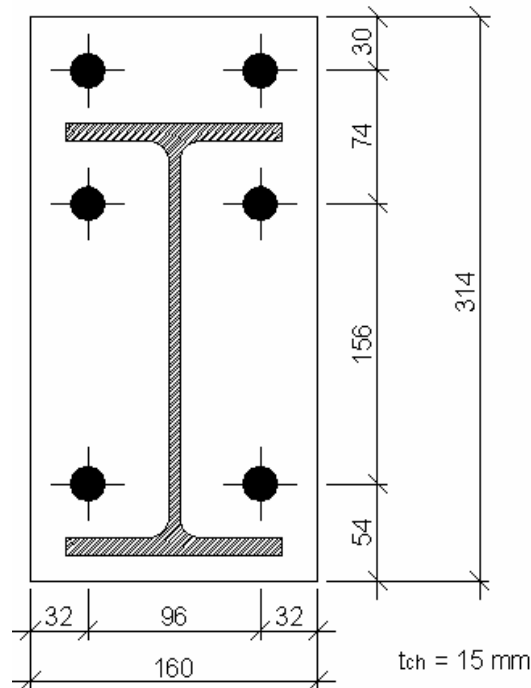


Figura 27: modelo analisado ligação semi-rígida (BARBOSA, 2006)

5.4 ANÁLISE DO MODELO

A análise do modelo de pórtico plano apresentado anteriormente consiste na obtenção dos esforços solicitantes da estrutura (momento fletor, esforço normal e esforço cortante) através do software SAP2000 para análise estrutural. Para tanto, foram consideradas, em diferentes

análises, ligações rígidas, flexíveis e semi-rígidas entre viga e coluna. Para se considerar a flexibilidade na análise das ligações semi-rígidas, foi necessário simular tais conexões a partir da consideração de molas rotacionais nos nós 4, 5, 6, 7 e 8, localizados nos extremos das vigas 4, 5 e 8. Na figura 28 tem-se um esquema representativo para a viga 4 no estado não deformado e na figura 29, no estado deformado, quando surgem os momentos M_4 e M_5 e os giros θ_4 e θ_5 respectivamente nos nós 4 e 5, com a rigidez rotacional S_j .

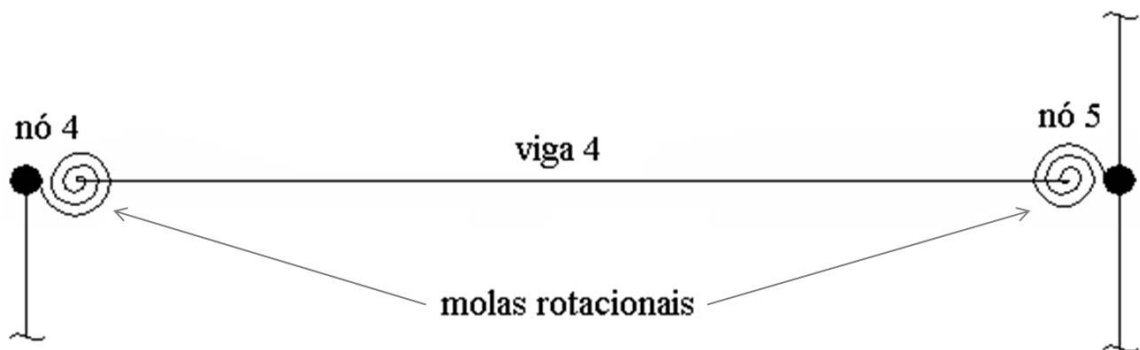


Figura 28: modelo de viga com molas rotacionais (adaptado de BARBOSA, 2006)



Figura 29: modelo de viga deformada com molas rotacionais (adaptado de BARBOSA, 2006)

A ferramenta computacional utilizada no processo de análise do pórtico, SAP2000, considera como configuração padrão a rigidez total dos nós em ambas as extremidades da barra. No entanto, é possível introduzir ligações rotuladas nestas extremidades liberando o momento na direção apropriada, bem como fornecendo ao programa o coeficiente de rigidez rotacional da ligação, para o caso de semi-rigidez. O coeficiente de rigidez trata-se de uma constante de mola (*spring constant*) que, para o caso de uma mola rotacional, tem como unidade momento/radiano, ou seja, kN.m/rad.

No caso em estudo, o momento é liberado para o eixo de maior inércia da seção da viga, figura 30, que para o programa corresponde ao eixo local 3, sendo assim $I_3 = 7.038, \text{ cm}^4$

(*Moment of Inertia about 3 axis*), figura 31, uma vez que o carregamento que solicitará a viga à flexão é vertical.

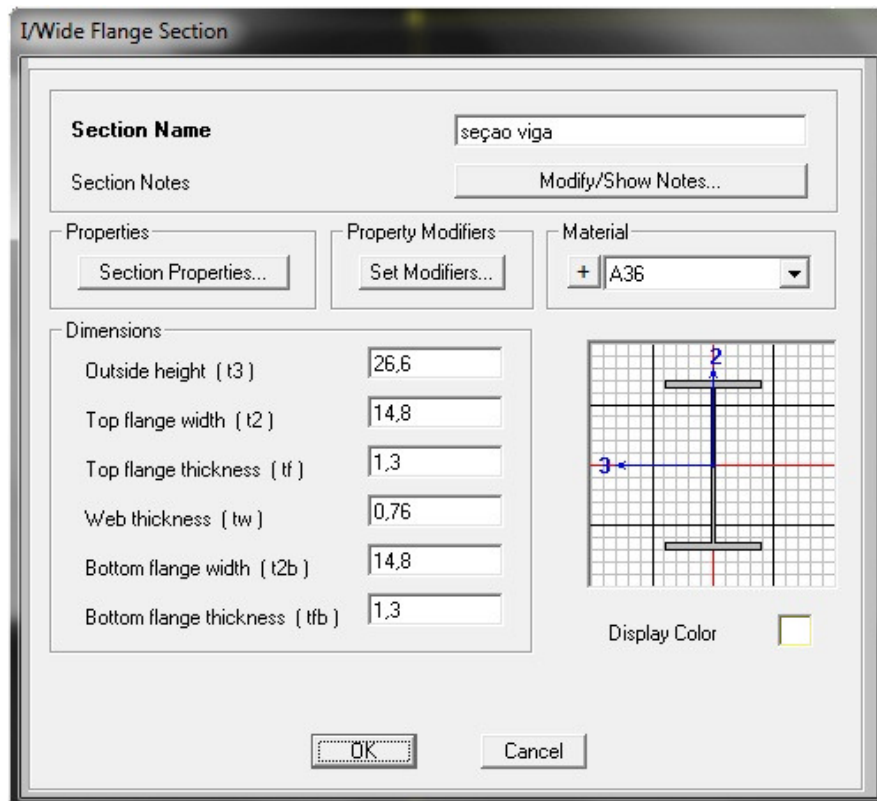


Figura 30: dimensões da seção da viga, em centímetros
(COMPUTERS AND STRUCTURES INCORPORATION, 2008)

Property Data

Section Name

Properties

Cross-section (axial) area	<input type="text" value="56,72"/>	Section modulus about 3 axis	<input type="text" value="529,2184"/>
Torsional constant	<input type="text" value="23,9193"/>	Section modulus about 2 axis	<input type="text" value="95,036"/>
Moment of Inertia about 3 axis	<input type="text" value="7038,6051"/>	Plastic modulus about 3 axis	<input type="text" value="596,212"/>
Moment of Inertia about 2 axis	<input type="text" value="703,2662"/>	Plastic modulus about 2 axis	<input type="text" value="145,8416"/>
Shear area in 2 direction	<input type="text" value="20,216"/>	Radius of Gyration about 3 axis	<input type="text" value="11,1397"/>
Shear area in 3 direction	<input type="text" value="32,0667"/>	Radius of Gyration about 2 axis	<input type="text" value="3,5212"/>

Figura 31: propriedades da seção da viga, em centímetros
(COMPUTERS AND STRUCTURES INCORPORATION, 2008)

É possível alterar as configurações selecionando-se os elementos de barras que terão a rigidez dos nós modificada e após seguir no menu *Assign>Frame>Release/Partial Fixity*, figura 32.

Assign Frame Releases

Frame Releases

	Release		Frame Partial Fixity Springs	
	Start	End	Start	End
Axial Load	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Shear Force 2 (Major)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Shear Force 3 (Minor)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Torsion	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Moment 22 (Minor)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Moment 33 (Major)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text" value="900"/>	<input type="text" value="900"/>

No Releases

Units

Figura 32: inserção de coeficientes de rigidez para ligação flexível
(COMPUTERS AND STRUCTURES INCORPORATION, 2008)

5.5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste item serão apresentados os resultados relativos aos esforços solicitantes encontrados por meio da análise do pórtico. Os quadros 3 a 5 mostram as solicitações de esforço normal (N), esforço cortante (V) e momento fletor (M), obtidos na análise com nós rígidos, flexíveis e semi-rígidos, respectivamente. Uma melhor compreensão da dimensão destes valores é obtida na comparação dos diagramas de esforços das figuras de 33 a 41.

Análise ligações rígidas ($S_j = 70.000 \text{ kN.m/rad}$)				
Barra	Nó	N [kN]	V [kN]	M [kN.m]
1	1	-60,731	-5,986	15,127
	4	-55,775	-5,986	33,084
2	2	-198,601	-25,621	43,890
	5	-193,645	-25,621	-32,972
3	3	-141,165	-25,365	43,834
	6	-136,209	-25,365	-32,261
4	4	-35,986	-55,775	-33,084
	2,667 m	-35,986	0,000	41,435
	5	-35,986	69,464	-74,149
5	5	6,462	-59,919	-50,673
	2,667 m	6,462	0,000	34,895
	6	6,462	65,320	-66,878
6	5	-64,263	-16,827	-9,495
	7	-59,307	-16,827	40,987
7	6	-70,888	-31,827	34,617
	8	-65,932	-31,827	-60,865
8	7	-31,827	-59,307	-40,987
	2,667 m	-31,827	0,000	42,948
	8	-31,827	65,932	-60,865

Quadro 3: resultados ligações rígidas

Análise ligações flexíveis ($S_j = 900 \text{ kN.m/rad}$)				
Barra	Nó	N [kN]	V [kN]	M [kN.m]
1	1	-69,733	15,662	54,021
	4	-62,299	15,662	7,036
2	2	-203,586	-14,925	52,918
	5	-196,153	-14,925	8,143
3	3	-143,968	-14,413	52,371
	6	-136,534	-14,413	9,131
4	4	-14,338	-62,299	-7,036
	2,667 m	-14,338	0,000	84,010
	5	-14,338	64,407	-13,360
5	5	-2,262	-62,282	-6,996
	2,667 m	-2,262	0,000	84,005
	6	-2,262	64,420	-13,420
6	5	-69,463	2,849	14,506
	7	-62,029	2,849	5,961
7	6	-72,111	-12,151	22,551
	8	-64,677	-12,151	-13,904
8	7	-12,151	-62,029	-5,961
	2,667 m	-12,151	0,000	84,366
	8	-12,151	64,677	-13,904

Quadro 4: resultados ligações flexíveis

Análise ligações semi-rígidas ($S_j = 26.335,83 \text{ kN.m/rad}$)				
Barra	Nó	N [kN]	V [kN]	M [kN.m]
1	1	-61,695	-4,358	18,191
	4	-56,739	-4,358	31,266
2	2	-197,448	-24,795	44,689
	5	-192,492	-24,795	-29,697
3	3	-141,354	-24,563	44,620
	6	-136,398	-24,563	-29,069
4	4	-34,358	-56,739	-31,266
	2,667 m	-34,358	0,000	45,822
	5	-34,358	68,500	-66,550
5	5	5,259	-59,749	-44,608
	2,667 m	5,259	0,000	40,506
	6	5,259	65,491	-61,834
6	5	-64,244	-14,822	-7,755
	7	-59,288	-14,822	36,712
7	6	-70,907	-29,822	32,764
	8	-65,951	-29,822	-56,703
8	7	-29,822	-59,288	-36,712
	2,667 m	-29,822	0,000	47,173
	8	-29,822	65,951	-56,703

Quadro 5: resultados ligações semi-rígidas

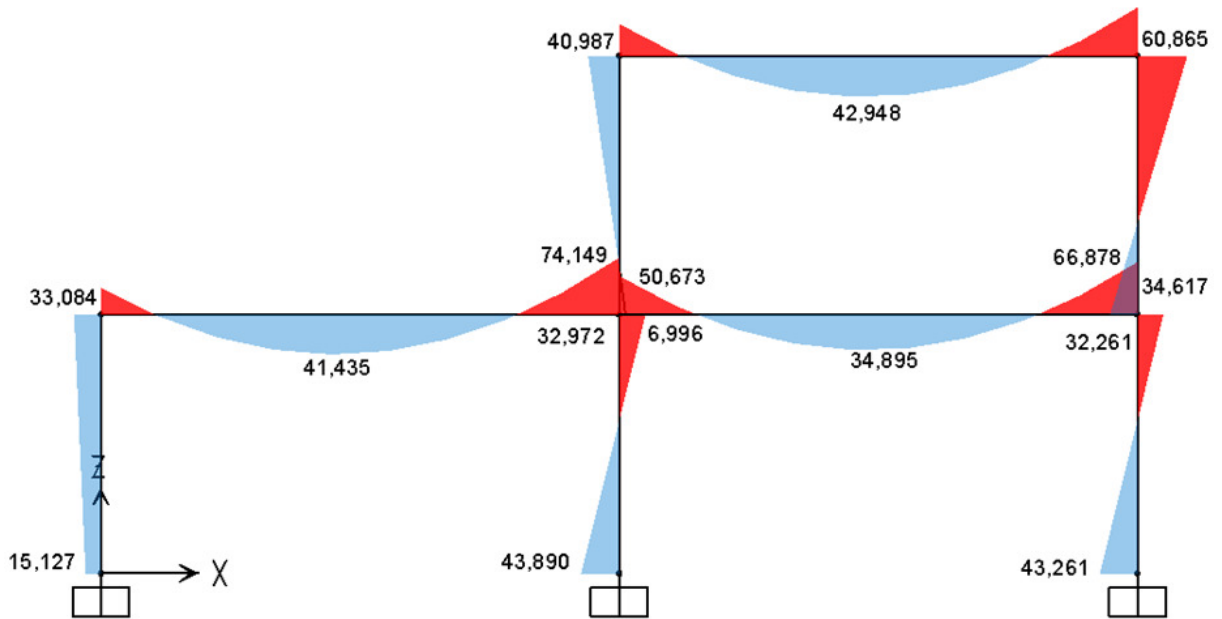


Figura 33: diagrama momento fletor ligações rígidas

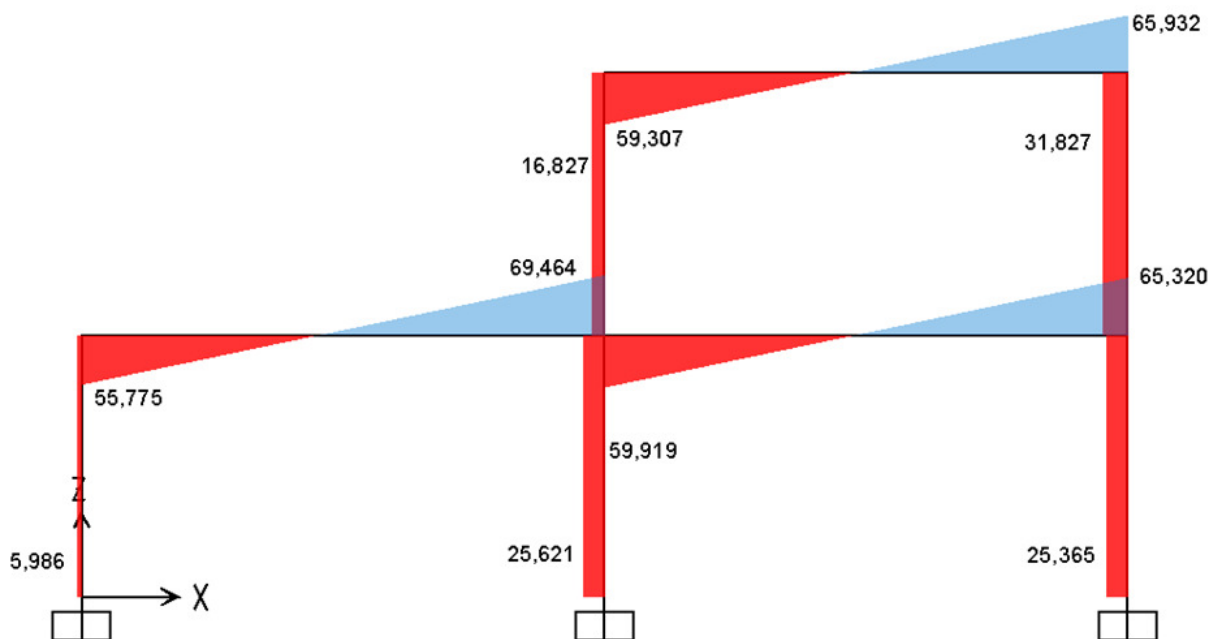


Figura 34: diagrama esforço cortante ligações rígidas

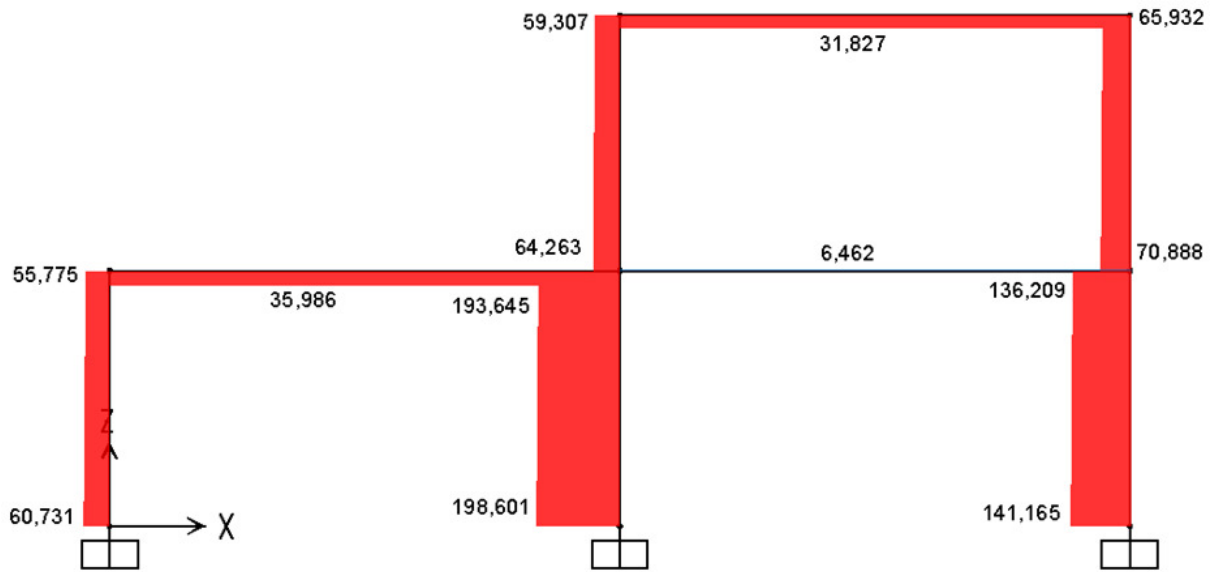


Figura 35: diagrama esforço normal ligações rígidas

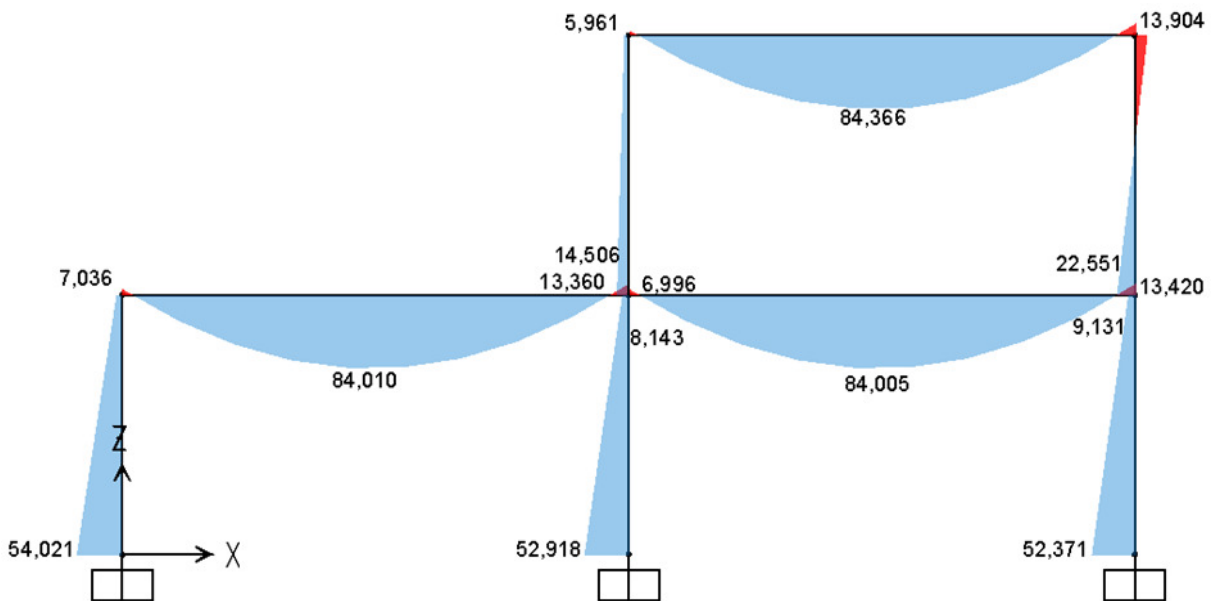


Figura 36: diagrama momento fletor ligações flexíveis

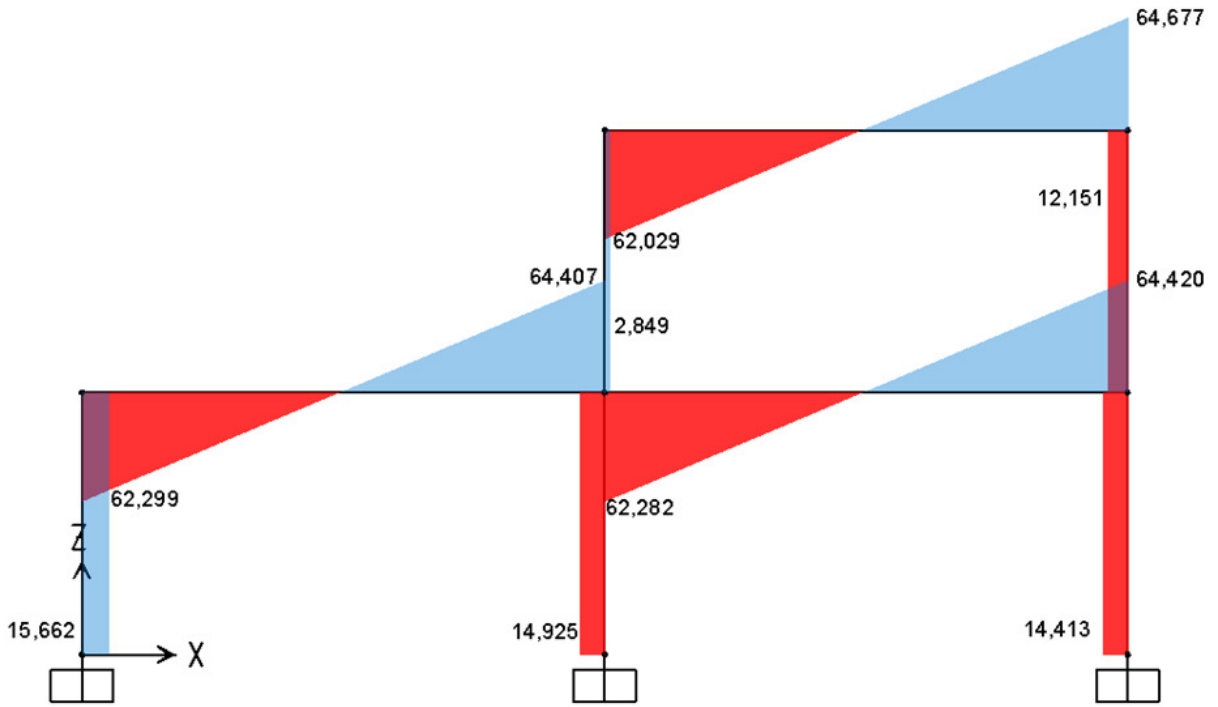


Figura 37: diagrama esforço cortante ligações flexíveis

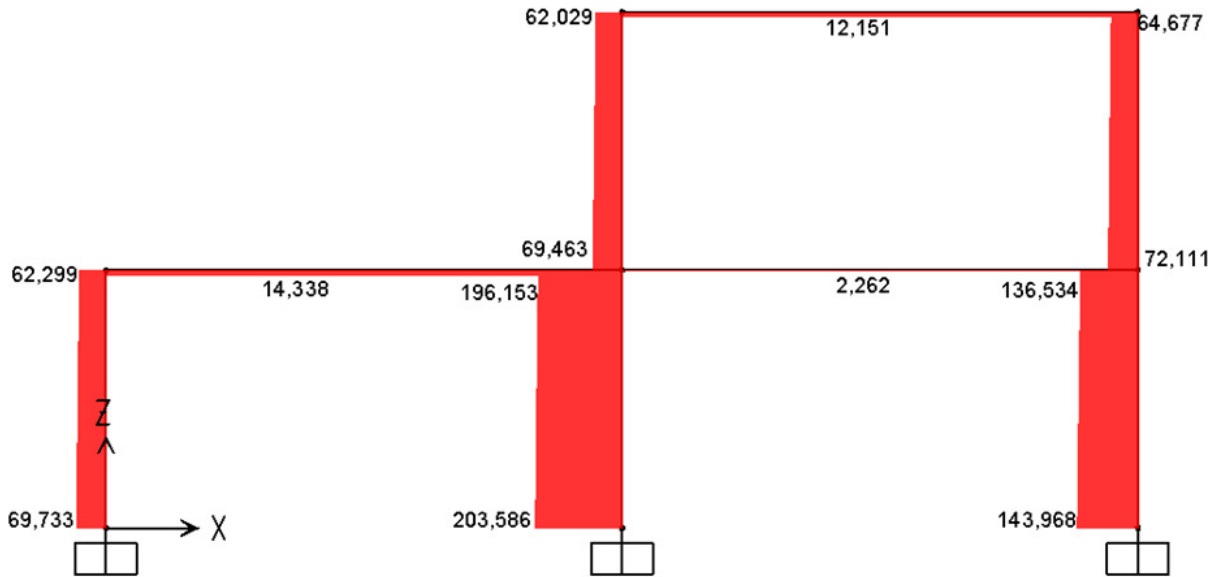


Figura 38: diagrama esforço normal ligações flexíveis

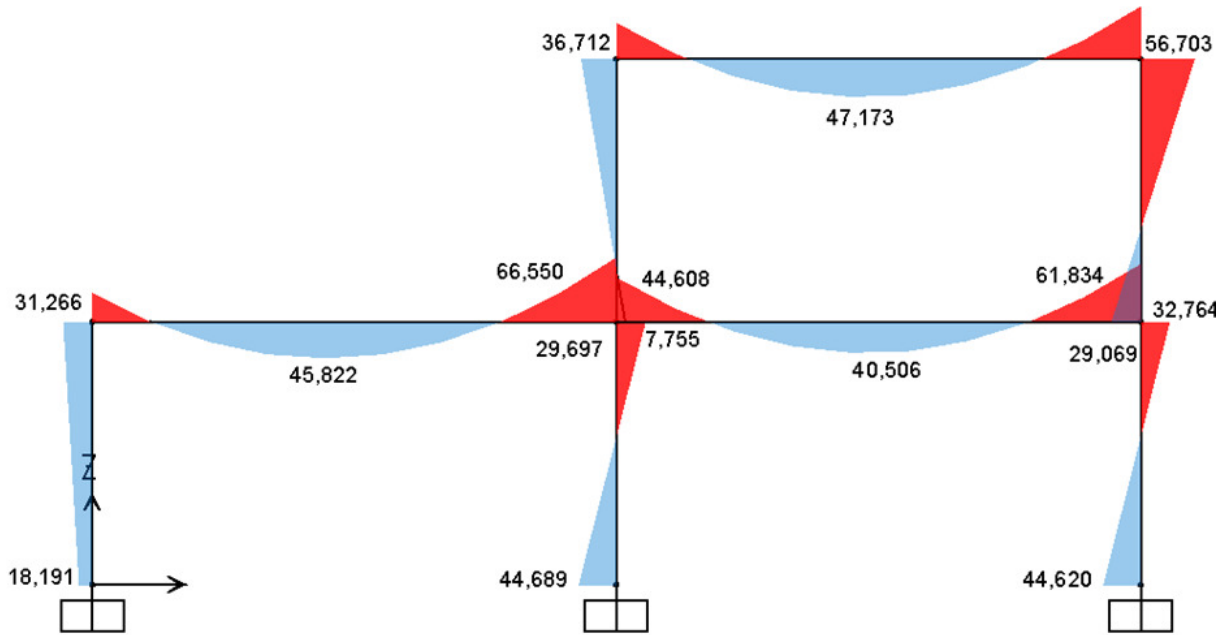


Figura 39: diagrama momento fletor ligações semi-rígidas

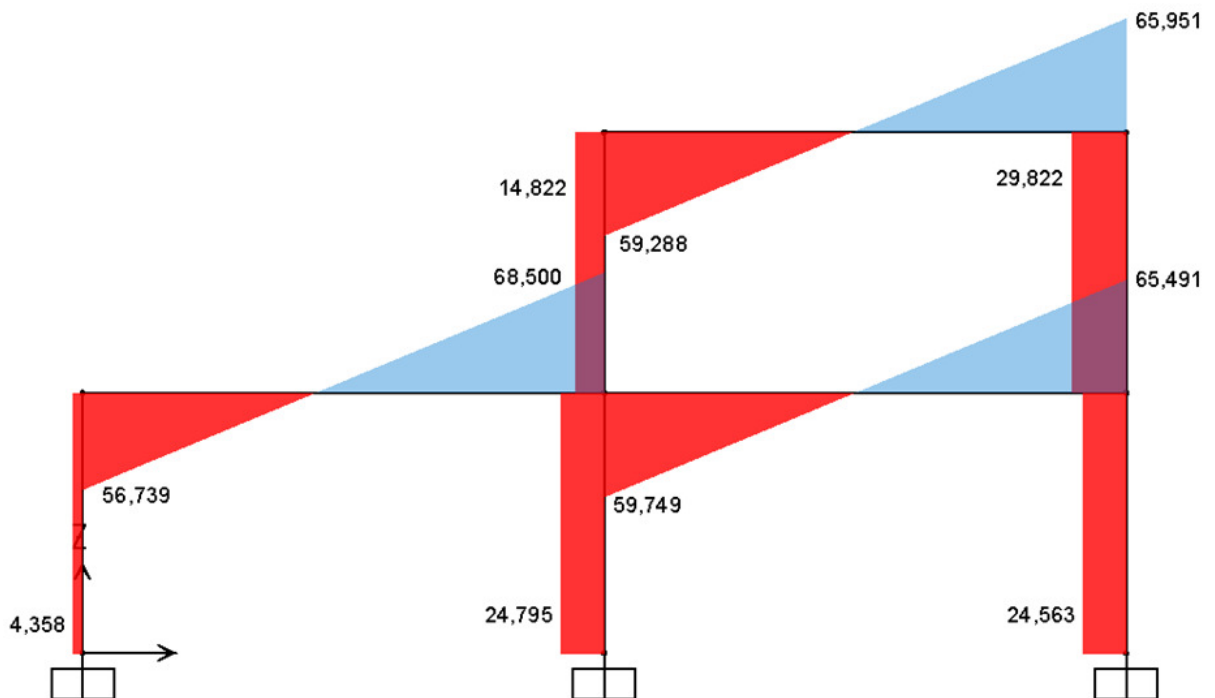


Figura 40: diagrama esforço cortante ligações semi-rígidas

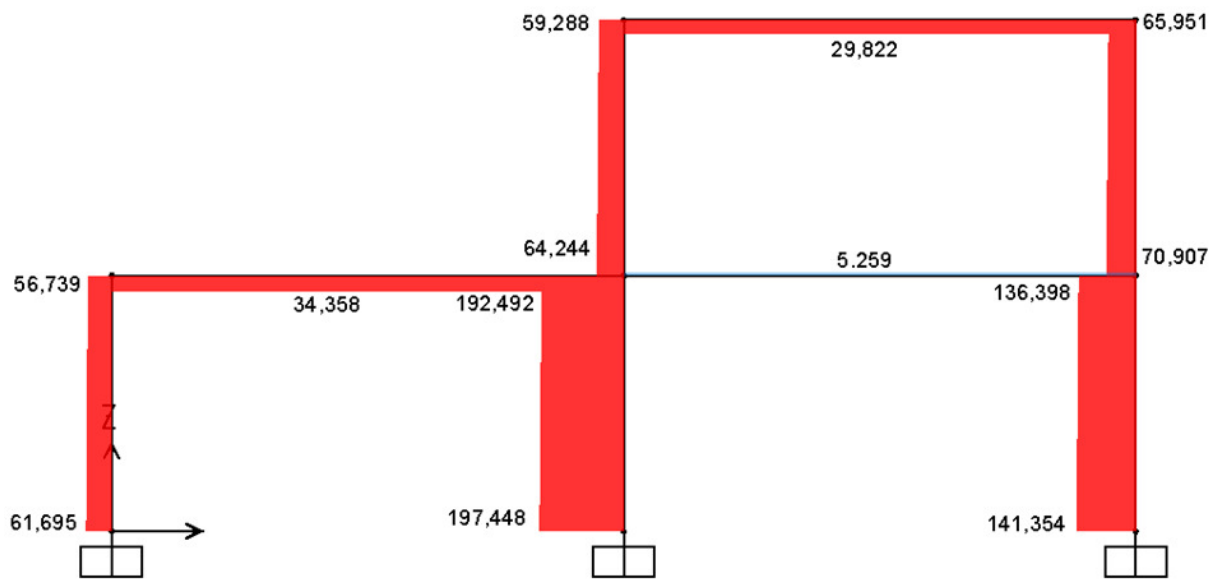


Figura 41: diagrama esforço normal ligações semi-rígidas

5.6 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS

A análise comparativa das solicitações demonstra, percentualmente, os resultados obtidos para as variações das solicitações de esforço normal (N), esforço cortante (V) e momento fletor (M), nas diferentes configurações das ligações, apresentadas nos quadros 6 e 7, em que pode-se relacionar ligações rígidas com semi-rígidas e flexíveis com semi-rígidas, respectivamente. Para esta análise, utilizaram-se valores em módulo, ou seja, foram desconsiderados os sinais, principalmente nos nós em que há variação de sinais positivos para negativos, uma vez que o valor de interesse para fins de dimensionamento da ligação é o valor em módulo.

Barra	N6	Rígidas		Semi-rígidas		Variação de N		Rígidas		Semi-rígidas		Variação de V		Rígidas		Semi-rígidas		Variação de M	
		N [kN]	N [kN]	N [kN]	N [kN]	V [kN]	V [kN]	V [kN]	V [kN]	M [kN.m]	M [kN.m]	M [kN.m]	M [kN.m]	M [kN.m]	M [kN.m]	M [kN.m]	M [kN.m]	M [kN.m]	M [kN.m]
1	1	-60,731	-61,695	(+) 1,59%	-5,986	-4,358	(-) 37,36%	15,127	18,191	(+) 20,25%									
	4	-55,775	-56,739	(+) 1,73%	-5,986	-4,358	(-) 37,36%	33,084	31,266	(-) 5,81%									
2	2	-198,601	-197,448	(-) 0,58%	-25,621	-24,795	(-) 3,33%	43,890	44,689	(+) 1,82%									
	5	-193,645	-192,492	(-) 0,60%	-25,621	-24,795	(-) 3,33%	-32,972	-29,697	(-) 11,03%									
3	3	-141,165	-141,354	(+) 0,13%	-25,365	-24,563	(-) 3,27%	43,834	44,620	(+) 1,79%									
	6	-136,209	-136,398	(+) 0,14%	-25,365	-24,563	(-) 3,27%	-32,261	-29,069	(-) 10,98%									
4	4	-35,986	-34,358	(-) 4,74%	-55,775	-56,739	(-) 1,73%	-33,084	-31,266	(-) 5,81%									
	2,667 m	-35,986	-34,358	(-) 4,74%	0,000	0,000	-	41,435	45,822	(+) 10,59%									
5	5	-35,986	-34,358	(-) 4,74%	69,464	68,500	(-) 1,41%	-74,149	-66,550	(-) 11,42%									
	5	6,462	5,259	(-) 22,88%	-59,919	-59,749	(-) 0,28%	-50,673	-44,608	(-) 13,60%									
6	2,667 m	6,462	5,259	(-) 22,88%	0,000	0,000	-	34,895	40,506	(+) 16,08%									
	6	6,462	5,259	(-) 22,88%	65,320	65,491	(+) 0,26%	-66,878	-61,834	(-) 8,16%									
7	5	-64,263	-64,244	(-) 0,03%	-16,827	-14,822	(-) 13,53%	-9,495	-7,755	(-) 22,44%									
	7	-59,307	-59,288	(-) 0,03%	-16,827	-14,822	(-) 13,53%	40,987	36,712	(-) 11,64%									
8	6	-70,888	-70,907	(+) 0,03%	-31,827	-29,822	(-) 6,72%	34,617	32,764	(-) 5,65%									
	8	-65,932	-65,951	(+) 0,03%	-31,827	-29,822	(-) 6,72%	-60,865	-56,703	(-) 7,34%									
8	7	-31,827	-29,822	(-) 6,72%	-59,307	-59,288	(-) 0,03%	-40,987	-36,712	(-) 11,64%									
	2,667 m	-31,827	-29,822	(-) 6,72%	0,000	0,000	-	42,948	47,173	(+) 9,84%									
	8	-31,827	-29,822	(-) 6,72%	65,932	65,951	(+) 0,03%	-60,865	-56,703	(-) 7,34%									

Quadro 6: variação das solicitações para ligações rígidas comparadas às ligações semi-rígidas

Barra	Nó	Variação de N		Variação de V		Variação de M	
		Flexíveis N [kN]	Semi-rígidas N [kN]	Flexíveis V [kN]	Semi-rígidas V [kN]	Flexíveis M [kN.m]	Semi-rígidas M [kN.m]
1	1	-69,733	-61,695	15,662	-4,358	54,021	18,191
	4	-62,299	-56,739	15,662	-4,358	7,036	31,266
2	2	-203,586	-197,448	-14,925	-24,795	52,918	44,689
	5	-196,153	-192,492	-14,925	-24,795	8,143	-29,697
3	3	-143,968	-141,354	-14,413	-24,563	52,371	44,620
	6	-136,534	-136,398	-14,413	-24,563	9,131	-29,069
4	4	-14,338	-34,358	-62,299	-56,739	-7,036	-31,266
	2,667 m	-14,338	-34,358	0,000	0,000	84,010	45,822
5	5	-14,338	-34,358	64,407	68,500	-13,360	-66,550
	5	-2,262	5,259	-62,282	-59,749	-6,996	-44,608
5	2,667 m	-2,262	5,259	0,000	0,000	84,005	40,506
	6	-2,262	5,259	64,420	65,491	-13,420	-61,834
6	5	-69,463	-64,244	2,849	-14,822	14,506	-7,755
	7	-62,029	-59,288	2,849	-14,822	5,961	36,712
7	6	-72,111	-70,907	-12,151	-29,822	22,551	32,764
	8	-64,677	-65,951	-12,151	-29,822	-13,904	-56,703
8	7	-12,151	-29,822	-62,029	-59,288	-5,961	-36,712
	2,667 m	-12,151	-29,822	0,000	0,000	84,366	47,173
8	8	-12,151	-29,822	64,677	65,951	-13,904	-56,703

Quadro 7: variação das solicitações para ligações flexíveis comparadas às ligações semi-rígidas

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise comparativa da distribuição de esforços para o pórtico com ligações rígidas em relação ao pórtico com ligações semi-rígidas indica que nas vigas houve um aumento do momento fletor na região central do vão e uma diminuição nas extremidades. Já para as colunas do pórtico com estas configurações de ligações, foi possível verificar um aumento do momento fletor nos nós inferiores (próximos as fundações) e sua diminuição nos nós superiores (ligações com as vigas) Quanto aos esforços cortantes, houve de um modo geral uma diminuição desta solicitação tanto nas vigas quanto nas colunas, o que ocorreu também para os esforços normais, salvo pequenas exceções como as barras 1 e 7 que apresentaram variações muito pequenas.

Ao se avaliar as variações encontradas na distribuição dos esforços para o pórtico com ligações semi-rígidas se comparadas às obtidas para o pórtico com ligações flexíveis, notou-se uma diminuição para praticamente metade do momento fletor na região central da viga e um aumento significativo desta solicitação nas suas extremidades. As vigas ainda sofreram consideráveis variações na distribuição dos esforços normais e pequenas variações dos esforços cortantes. Em contrapartida, para as colunas nestas mesmas configurações de ligações, verificou-se uma variação significativamente grande dos esforços cortantes e pequena dos esforços normais.

Portanto, a partir destas análises é possível concluir que os resultados obtidos para a redistribuição dos esforços solicitantes de uma estrutura metálica com diferentes configurações de ligações entre viga e coluna estão de acordo com a literatura consultada. Ainda neste contexto, deve-se enfatizar que a metodologia de cálculo que considera ligações semi-rígidas apresenta maior precisão nos resultados, diminuindo, assim, as incertezas quanto às solicitações que agem nas barras. Deste modo, pode-se evitar que no projeto de estruturas metálicas se superestime ou subestime os esforços para o dimensionamento dos elementos de vigas e colunas.

REFERÊNCIAS

- 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.
- BAIÃO FILHO, O. T. B.; SILVA, A. C. V. **Ligações para estruturas de aço**: guia prático para estruturas com perfis laminados. 1.ed. [S.l.: s. n.], 2004. 294 p.
- BARBOSA, G. D. **Influência da flexibilidade das ligações no projeto de estrutura metálica**. 2006. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- CASTRO, R. A. **Modelagem Computacional de Ligações Semi-Rígidas e sua Influência na Resposta Dinâmica Não-Linear de Pórticos de Aço**. 2006. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **EUROCODE 3**, nEN 1993-1-8, Calcul des structures en acier – Partie 1.8: Calcul des assemblages. Bruxelles, 2005.
- COMPUTERS AND STRUCTURES, INCORPORATION. **SAP 2000, Integrated Software for Structural Analysis and Design**, Version 12.0.0. Copyright 1978 – 2008.
- MAGGI, Y. I.; GONÇALVES, R. M. Análise do comportamento de ligações metálicas parafusadas viga-pilar com chapa de topo analisando elementos finitos. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 7, n. 28, p. 21-52, 2005.
- MELLO, W. L. **Análise de pórticos metálicos planos com conexões semi-rígidas considerando a não linearidade física e geométrica**. 1999. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- NARDIN, S.; SOUZA, A. S. C.; EL DEBS, A. L. H. C. Detalhes de ligação entre pilares mistos preenchidos e vigas de aço. **Revista Construção Metálica**, Associação Brasileira da Construção Metálica, São Paulo, n. 79, p. 23-26, 2007.
- SILVA, L. S. Ligações metálicas: métodos avançados de análise e dimensionamento. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, série I, n. 51, p. 37-50, 2002.