

Calil Zumerle Masioli

**Análise Teórica e Experimental de Ligações em Aço entre
Pilar Tubular de Seção Circular e Viga de Seção I**

VERSÃO CORRIGIDA

(A Versão Original se Encontra na Unidade que Aloja o Programa)

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Engenharia de Estruturas.

Orientador: Prof. Associado Roberto Martins Gonçalves

São Carlos
2011

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

M397s Masioli, Calil Zumerle
Análise teórica e experimental de ligações em aço
entre pilar tubular de seção circular e viga de seção I /
Calil Zumerle Masioli ; orientador Roberto Martins
Gonçalves. -- São Carlos, 2011.

Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação e Área
de Concentração em Engenharia de Estruturas) -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2011.

1. Estruturas tubulares. 2. Ligação viga-coluna.
3. Diafragmas externos. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

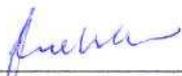
Candidato(a): Engenheiro **CALIL ZUMERLE MASIOLI**.

Dissertação defendida e julgada em 15/04/2011 perante a Comissão Julgadora:



Prof. Associado **ROBERTO MARTINS GONÇALVES – (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO



Prof. Dr. **JULIO FRUCHTENGARTEN – (Aposentado)**
(Escola Politécnica/USP)

APROVADO



Prof. Dr. **ALEX SANDER CLEMENTE DE SOUZA**
(Universidade Federal de São Carlos/USFCar)

APROVADO



Prof. Assoc. **ANA LÚCIA HOMCE DE CRESCER EL DEBS**
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas)



Prof. Associado **PAULO CÉSAR LIMA SEGANTINE**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me proporcionar desafios e felicidade.

Aos meus pais, Severino e Rita, meus irmãos, Cássio e Karla, pela fortaleza que me permitiu essa conquista.

À Larissa, por toda compreensão, amor, dedicação e amizade.

Ao Professor Roberto Martins Gonçalves, pela confiança, doação de conhecimentos e orientação na realização desse mestrado.

À Capes pela bolsa concedida e à FAPESP pelo financiamento do programa experimental.

Aos amigos Pedro Freitas, William Bessa, Bruno Higaki e Fábio Sawazaki pela fundamental colaboração no desenvolvimento desse trabalho.

À Ellen Kellen, pela amizade e parceria.

À turma de 2008: André, Andreilton, Bianca, Carlos, Cátia, Danielle, Dênis, Fernando, Francisco, Gabriela, Hidelbrando, Higor, Hugo, Jonas, Marliane, Raphael, Rodolfo, Valmiro, Wagner, e Wellison, pelos bons momentos e amizades construídas.

Aos professores do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, em especial ao professor José Luiz Rangel, quem muito me incentivou e direcionou-me ao estudo das construções metálicas.

À Construtora Camargo Corrêa e ao amigo Décio Lourenço, pela confiança, colaboração, e incentivo na realização do mestrado.

RESUMO

MASIOLI, C. Z. (2011). **Análise teórica e experimental de ligações em aço entre pilar tubular de seção circular e viga de seção I**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

O atrativo estético proporcionado pela forma arredondada é o fator que na maioria das vezes determina a utilização de estruturas tubulares circulares. É crescente a concepção de pórticos formados por colunas tubulares e as tradicionais vigas de seção I. Esse tipo de ligação ainda é pouco estudado no Brasil, e esse trabalho busca avançar no entendimento do comportamento estrutural dessas ligações. Foram realizados estudos analíticos, numéricos e experimentais em quatro configurações de ligação, com diafragmas externos transversais, chapa de alma, soldas, parafusos e enrijecedor. Avaliou-se a relação $M-\Phi$ (momento-rotação) das ligações estudadas e os parâmetros envolvidos como resistência, rigidez e ductilidade, evidenciando-se o modo de colapso das ligações. O estudo analítico foi desenvolvido baseado nas recomendações do Eurocode 3 (2005), com a utilização do Método das Componentes. A análise numérica, através do Método dos Elementos Finitos, foi realizada por meio dos programas computacionais TRUEGRID® e ANSYS®. Os modelos numéricos consideram as características mecânicas do aço, como plastificação, encruamento e não-linearidades geométricas e de contato. As formulações do Eurocode 3 (2005), adaptadas para a determinação da resistência das ligações viga-coluna, apresentaram resultados coerentes e a análise numérica foi representativa frente aos resultados experimentais. A utilização de diafragmas externos conectados à viga apresentou boa funcionalidade, ajudando na distribuição das tensões na região da ligação, melhorando o comportamento da coluna.

Palavras-chave: Estruturas tubulares; ligação viga-coluna, diafragmas externos.

ABSTRACT

MASIOLI, C. Z. (2011). **Theoretical and experimental analysis of steel connections between circular hollow section column and I section beam.** M.Sc. Dissertation – School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos.

The aesthetic appeal provided by the round shape is the factor that mostly determines the use of circular tubular structures. There is an increasing conception of structures formed by hollow columns and traditional beams of section I. This type of connection hasn't been sufficiently studied in Brazil, and this paper tries to advance the comprehension of the structural behavior of these connections. Analytical, numerical, and experimental study were performed in four connections configurations, with transverse external diaphragms, web plate, welds, bolts and stiffener. The relation $M-\Phi$ (moment-rotation) of the studied connections and the parameters involved such as strength, stiffness and ductility were evaluated, evidencing the failure mode of connections. The analytical study was developed based on recommendations of Eurocode 3 (2005) using the Method of Components. The numerical analysis using the Finite Element Method was performed with the computer programs TRUEGRID[®] and ANSYS[®]. The numerical models consider the mechanical characteristics of steel, such as yielding and hardening, and also the geometric and contact nonlinearity. The formulations of Eurocode 3 (2005), adapted for determining the strength of beam-column connections, showed coherent results and the numerical analysis was representative compared to experimental results. The use of external diaphragm connected to the beam showed good functionality, helping in the distribution of stress in the region of connection, improving the behavior of the column.

Palavras-chave: Tubular Structures; beam-to-column connection; external diaphragms.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	APRESENTAÇÃO.....	15
1.2	OBJETIVOS.....	16
1.3	DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS.....	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	19
2.2	LIGAÇÃO ENTRE VIGA DE SEÇÃO I E COLUNA TUBULAR CIRCULAR.....	20
2.3	COMPORTAMENTO MOMENTO-ROTAÇÃO.....	29
2.4	CLASSIFICAÇÃO DAS LIGAÇÕES VIGA-PILAR.....	32
2.4.1	Quanto à rigidez.....	32
2.4.2	Quanto à resistência.....	34
2.5	DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES VIGA-PILAR ENTRE PERFIS I OU H.....	35
2.5.1	Esforços atuantes na ligação.....	35
2.5.2	O método das componentes.....	36
2.6	LIGAÇÕES TUBULARES.....	57
2.7	MODO DE FALHA EM LIGAÇÕES TUBULARES.....	57
2.8	DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES ENTRE PILAR TUBULAR CIRCULAR E VIGA COM SEÇÃO DO TIPO I.....	58
2.9	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	65
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	67
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	67
3.2	GEOMETRIA DOS MODELOS ENSAIADOS.....	67
3.3	METODOLOGIA E SISTEMA DE ENSAIO.....	73
3.4	INSTRUMENTAÇÃO.....	74
3.5	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	77
3.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	79

4	MODELAGEM NUMÉRICA	81
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	81
4.2	GEOMETRIA DOS MODELOS.....	82
4.3	ELEMENTOS FINITOS UTILIZADOS	82
4.3.1	Elemento volumétrico.....	83
4.3.2	Elemento de barra	84
4.3.3	Elementos de contato	85
4.4	DISCRETIZAÇÃO (CONSTRUÇÃO DAS MALHAS DE ELEMENTOS FINITOS).....	86
4.5	MODELOS CONSTITUTIVOS DOS MATERIAIS.....	89
4.6	CONDIÇÕES DE CONTORNO E CARREGAMENTO	91
4.6.1	Protensão nos parafusos.....	92
4.6.2	Aplicação das ações.....	93
4.7	SOLUÇÃO INCREMENTAL- ITERATIVA.....	93
4.8	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	94
5	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	95
5.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	95
5.2	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	95
5.2.1	Força <i>vs</i> deslocamento (<i>F-D</i>) e momento <i>vs</i> rotação (<i>M-Φ</i>).....	95
5.2.2	Deformações longitudinais na alma da viga	99
5.2.3	Discussão dos resultados experimentais.....	100
5.3	RESULTADOS NUMÉRICOS.....	105
5.3.1	Força <i>vs</i> deslocamento (<i>F-D</i>) e momento <i>vs</i> rotação (<i>M-Φ</i>)	105
5.3.2	Tensões longitudinais na alma da viga	107
5.3.3	Evolução das tensões de Von Mises na face da coluna.....	110
5.4	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS, NUMÉRICOS E DO EUROCODE 3 (2005)	112
5.5	CLASSIFICAÇÃO DAS LIGAÇÕES ESTUDADAS	116
5.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	117

6	ESTUDO NUMÉRICO PARA DIFERENTES RELAÇÕES GEOMÉTRICAS	121
6.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	121
6.2	RELAÇÕES GEOMÉTRICAS DOS MODELOS	121
6.3	RESULTADOS DO MODELO TCR-W	122
6.4	RESULTADOS DO MODELO TCRS-B	125
6.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	128
7	CONCLUSÕES.....	129
7.1	CONCLUSÕES FINAIS.....	129
7.2	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	130
	REFERÊNCIAS.....	133

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

As ligações viga-pilar em estruturas de aço comumente são tratadas de forma idealizada a fim de facilitar a análise estrutural. Nesse contexto, a análise pressupõe um conjunto de barras unidimensionais, cujas ligações são representadas por nós. Os nós são idealizados como rígidos ou articulados, em termos de rotações relativas e da transmissão de momento fletor entre as barras.

O nó rígido é tal que as rotações relativas entre as extremidades das barras concorrentes são nulas após as deformações provenientes do carregamento, assumindo integral transmissão do momento fletor. Já os nós articulados, de maneira oposta, não oferecem restrições às rotações relativas e, portanto, não transmitem momento fletor.

Ao observar os mais diversos tipos de ligações, fica evidenciado que classificar as ligações apenas como rígidas ou articuladas não é suficiente. É preciso introduzir uma classificação intermediária, ou seja, o conceito de semi-rigidez.

As variedades de configurações geométricas e dispositivos utilizados nas ligações viga-pilar introduzem descontinuidades, que associadas às não linearidades físicas, conduzem a estrutura ao comportamento não linear, tornando ainda mais precária a classificação convencional da ligação como rígida ou articulada.

Essas revisões de conceitos e procedimentos empregados em projetos de estruturas de aço puderam ser vistas na introdução, pelo AISC - American Institute of Steel Construction (1980), do comportamento semi-rígido das ligações em seus procedimentos de cálculo, seguido mais tarde pelo Eurocode 3 (1993). A partir de

então, a semi-rigidez das ligações tornou-se tema essencial à análise estrutural e ao entendimento do comportamento global da estrutura.

Também é importante destacar, que a utilização do conceito de semi-rigidez permite o entendimento mais realístico do comportamento global das estruturas, tornando as ligações variáveis capazes de influenciar no dimensionamento, gerando economia.

As ligações entre coluna tubular e viga de seção tipo I, objeto de estudo desse trabalho, apresentam os mais variados comportamentos rotacionais, uma vez que apresentam grande variedade de configurações e dispositivos de ligação (anéis ou diafragmas externos, enrijecedores, soldas, parafusos) e, dessa forma, são bons exemplos da importância da consideração dos conceitos de semi-rigidez.

Esse trabalho é um avanço nas investigações, do comportamento de ligações viga-coluna, desenvolvidas por Freitas (2009). Foi realizado um programa experimental que busca avaliar os resultados conseguidos através de formulações do Eurocode 3 (2005) e os resultados numéricos obtidos com metodologia desenvolvida nos trabalhos de Maggi (2000), Maggi (2004) e Freitas (2009).

1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é a investigação teórica e experimental do comportamento de ligação em aço, entre pilar tubular circular e viga com seção do tipo I. Tal análise será possível por meio de ensaios experimentais e modelagem numérica, via Método dos Elementos Finitos.

Busca-se conhecer o comportamento momento-rotação ($M-\Phi$) das ligações e os parâmetros de resistência, rigidez e ductilidade que o caracteriza.

Também se pretende observar os modos de ruína dos protótipos, que servirão de subsídios para a definição dos estados limites últimos.

Os resultados numéricos e experimentais serão comparados entre si, e com os obtidos por meio do Eurocode 3 (2005), a fim de avaliar a metodologia numérica e a formulação disponível.

Para tais objetivos, serão estudadas quatro configurações de ligações, onde o diferencial consiste na tipologia (soldada ou parafusada) ou nas peças componentes como chapas de alma, enrijecedores e anéis ou diafragmas externos.

1.3 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

Este trabalho está organizado em sete capítulos, sendo que o capítulo 1 é dedicado a introdução.

O capítulo 2 traz da bibliografia conceitos importantes para o estudo das ligações semi-rígidas. Também contém procedimentos normativos segundo o Eurocode 3 (2005) para classificação e dimensionamento das ligações viga-coluna.

O capítulo 3 apresenta o detalhamento dos protótipos estudados, bem como a metodologia e os dispositivos de ensaios do programa experimental.

O capítulo 4 descreve a modelagem numérica. São apresentados todos os elementos finitos utilizados bem como os demais passos da análise: geração de malhas, modelo constitutivo dos materiais, condições de contorno e aplicação de força.

O capítulo 5 é dedicado a apresentação e comparação dos resultados teóricos e experimentais. A partir desse capítulo é possível avaliar os procedimentos normativos do Eurocode 3 (2005) e a representatividade da modelagem numérica.

O capítulo 6 traz um estudo numérico para diferentes relações geométricas de ligações, avaliando o comportamento momento-rotação à medida que variam relações de rigidez da coluna e da viga.

Finalizando, o capítulo 7 reúne as conclusões do trabalho e traz sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O atrativo estético proporcionado pela forma arredondada é o fator que na maioria das vezes determina a utilização de barras tubulares circulares. Do ponto de vista estrutural, tais barras apresentam melhor desempenho quando solicitadas axialmente à compressão, justificando a utilização das mesmas como colunas.

É crescente a concepção de pórticos formados por colunas tubulares e as tradicionais vigas de seção I, tornando essencial o conhecimento do comportamento da ligação entre os dois elementos.

O entendimento do comportamento estrutural das ligações semi-rígidas requer a determinação da relação momento-rotação ($M-\Phi$). Este diagrama permite a interpretação correta do comportamento local da ligação, subsídio para a análise global da estrutura.

A relação momento-rotação é caracterizada por parâmetros de resistência, rigidez e ductilidade que podem ser determinados de forma analítica, experimental e numérica. Essas propriedades estruturais também são importantes para a classificação das ligações.

Conhecer o comportamento da ligação e quais estados limites podem ocorrer são fundamentais para o desenvolvimento das equações de dimensionamento. O modo com que cada ligação se comporta durante a ruptura é função da distribuição de tensão na região de conexão, que depende das características geométricas dos elementos conectados.

Em ligação viga-coluna, geralmente a coluna está submetida às ações de compressão, que associadas às tensões oriundas da ligação, podem gerar pontos de

plastificação e instabilidades locais, o que acrescenta dificuldade para prever o comportamento da ligação.

O avanço das investigações experimentais e numéricas ocorridas em ligações semi-rígidas proporcionou modelos analíticos mais consistentes, e esses passaram a ser boa alternativa para a análise estrutural.

Este capítulo apresenta o modelo mecânico proposto pelo Eurocode 3 (2005) para análise de ligação viga-coluna. Em Freitas (2009) é possível encontrar considerações sobre o modelo proposto pela norma norte-americana ANSI/AISC (2005). A norma brasileira NBR - 8800 (ABNT, 2008) não traz informações referentes à análise de ligações que envolvem elementos tubulares.

Aspectos da revisão bibliográfica referente ao histórico das investigações sobre ligações envolvendo estruturas tubulares foram amplamente relatados por Freitas (2009), portanto, são pouco discutidos nesse trabalho.

2.2 LIGAÇÃO ENTRE VIGA DE SEÇÃO I E COLUNA TUBULAR CIRCULAR

Não são muitas as pesquisas realizadas envolvendo viga de seção I e coluna tubular. A falta de conhecimento do comportamento estrutural dessa ligação - principalmente quando adicionados elementos auxiliares como diafragmas externos e enrijecedores - dificulta sua aplicação, ou conduz à subutilização desse sistema estrutural.

Contribuições ao tema foram dadas por Winkel et al. (1993). Na ocasião foi realizado um estudo numérico e experimental de ligações soldadas entre viga I e coluna tubular. As ligações foram solicitadas em planos diferentes visando observar parâmetros de rigidez e resistência, além de analisar o comportamento momento-rotação depois de atingido o momento máximo.

A figura 2.1 mostra as três combinações de carregamento aplicadas nos estudos de Winkel et al. (1993). Para a configuração de carregamento mostrado em (a) também foi simulado a presença de *steel deck* que resultou em aumento de rigidez e

resistência da ligação. O protótipo (b) mostrou-se mais rígido e com pequeno aumento de resistência comparado ao protótipo (a). Já protótipo (c), com carregamento multiplano em sentidos opostos, apresentou redução de rigidez e resistência, mais uma vez tomando o protótipo (a) como referência.

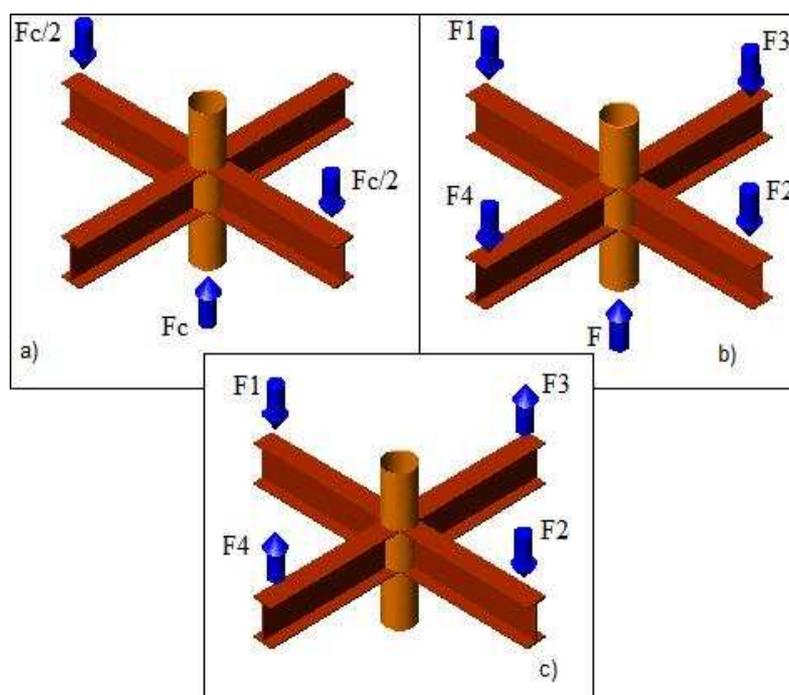


Figura 2.1 - Modelos estudados por Winkel et al. (1993). Fonte: Winkel et al (1993).

Winkel et al. (1993) mostrou que o comportamento das ligações soldadas entre viga de seção I e coluna tubular pode ser consideravelmente influenciado pelo carregamento quando aplicado em mais de um plano.

No Brasil, Carvalho (2005) desenvolveu modelos numéricos, via elementos finitos, para representar o comportamento das ligações por chapa simples entre viga I e pilar tubular de seção circular. A metodologia da modelagem utilizada foi baseada nos trabalhos de Maggi (2000), Maggi e Gonçalves (2003) e Bessa (2004). A figura 2.2 ilustra o modelo desenvolvido.



Figura 2.2 - Modelo numérico desenvolvido por Carvalho (2005). Fonte: Carvalho (2005).

Carvalho (2005) investigou, além da chapa de topo, a influência de diafragmas externos na região de ligação, sendo esses soldados ou não nas mesas da viga. A figura 2.3 mostra as malhas das três configurações geométricas estudadas.

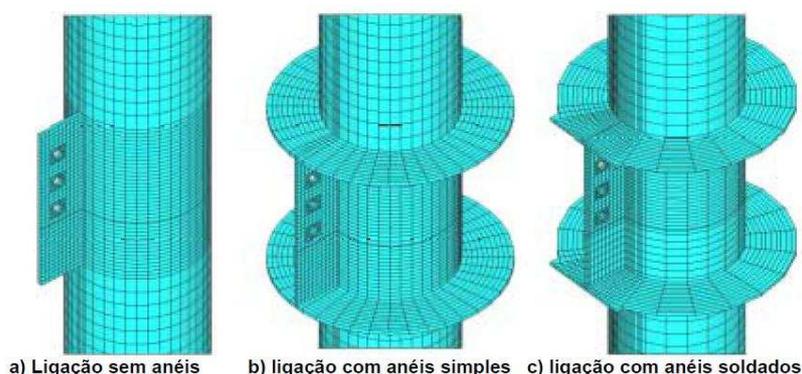


Figura 2.3 - Malha de elementos finitos dos pilares, chapas e anéis. Fonte: Carvalho (2005).

Os estudos de Carvalho (2005) mostraram que o comportamento da ligação por chapa simples se aproxima de uma articulação e que a inclusão do diafragma externo, não soldado à viga, não altera o comportamento da ligação na configuração proposta. Para o caso onde o diafragma externo é soldado à viga, obteve-se aumento significativo da rigidez da ligação, se aproximando ao caso de ligação dita rígida.

Freitas (2009) analisou numericamente o comportamento da ligação cruciforme (duas vigas conectadas) entre viga de seção I e coluna tubular, para tanto foram consideradas configurações usuais de ligações com anéis externos transversais, chapa

de alma e soldas. O estudo teve como variáveis a altura da viga, o diâmetro e a espessura da coluna.

A figura 2.4 mostra o modelo numérico de aplicação de força utilizado por Freitas (2009). A força nas vigas foi introduzida por meio da aplicação de deslocamentos no último nó do trecho representado por elemento de viga. A simulação de compressão na coluna se deu pela aplicação de deslocamentos em uma das suas extremidades.

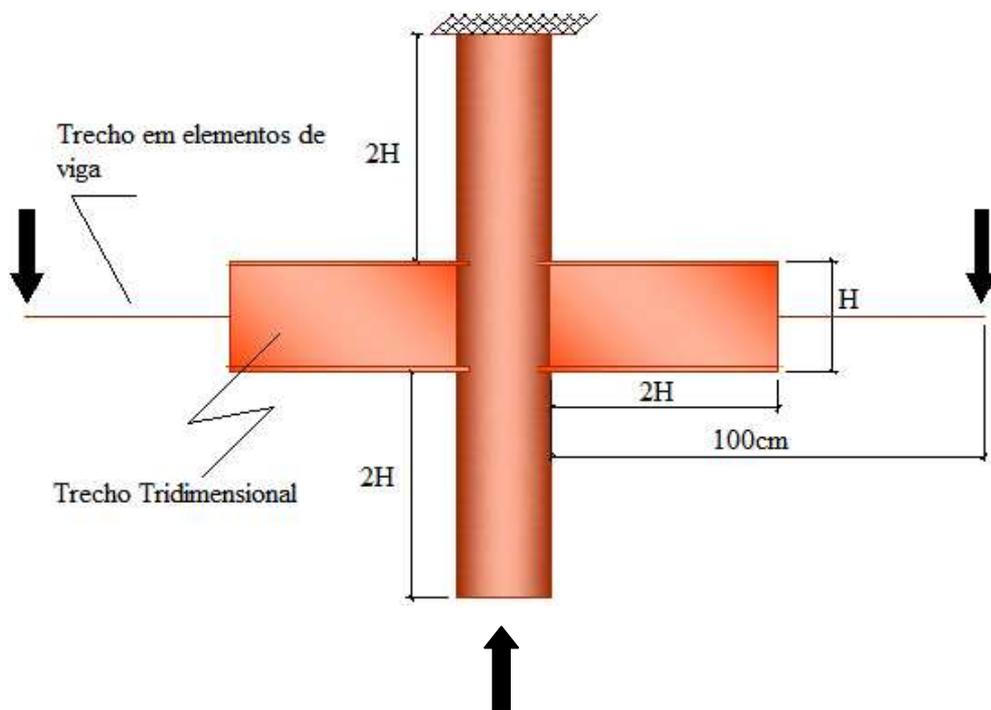


Figura 2.4 - Esquema de aplicação de força no modelo numérico. Fonte: Freitas (2009).

As figuras de 2.5 a 2.8 trazem parte dos resultados obtidos pela análise numérica de Freitas (2009). As figuras também explicitam o principal modo de falha de cada uma das ligações mostradas. É importante observar que a fim de obter maior velocidade de processamento não foi considerada a compressão axial da coluna. Freitas (2009) mostrou que, numericamente quando o modelo da ligação é simulado apenas com um pequeno trecho de coluna, a influência da flexão da coluna e os efeitos de segunda ordem são insignificantes para a resistência da ligação e o resultado do momento resistente M_n não sofre alteração.

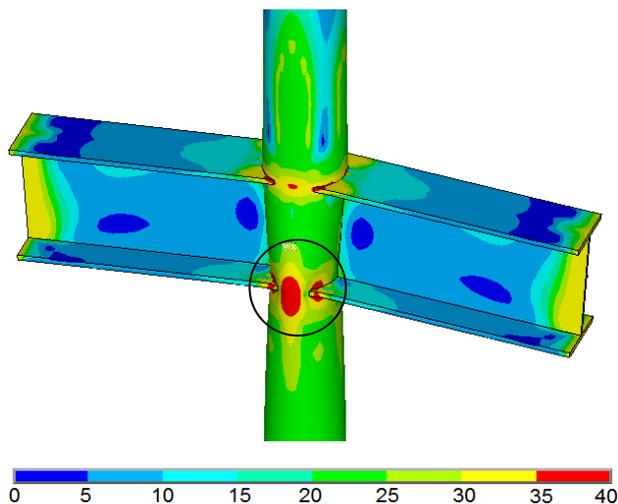


Figura 2.5 - Ligação soldada: Plastificação da coluna, lateral à ligação (kN/cm²). Fonte: Freitas (2009).

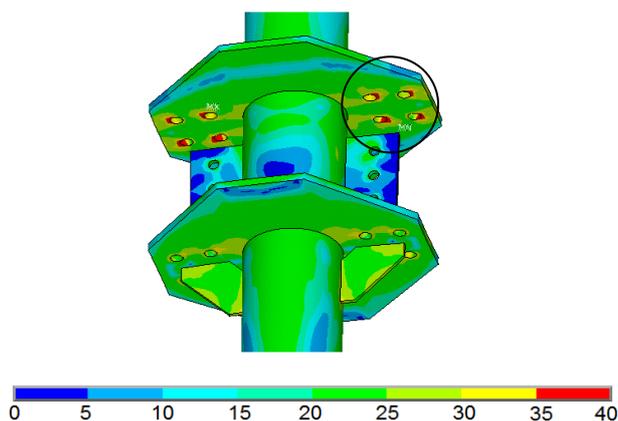


Figura 2.6 - Ligação parafusada na alma e mesa da viga - com enrijecedor no diafragma inferior: Pressão de contato dos parafusos nos diafragmas externos (kN/cm²). Fonte: Freitas (2009).

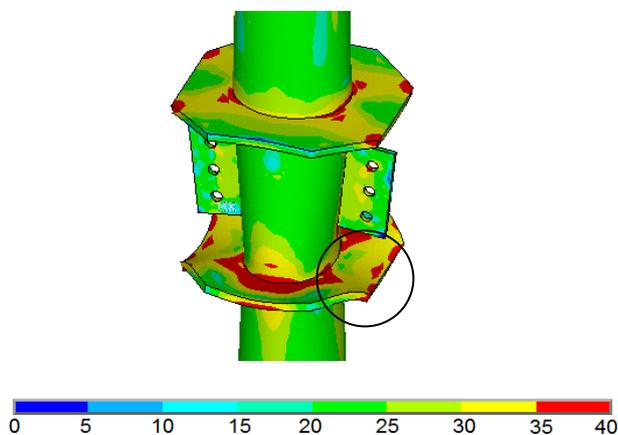


Figura 2.7 - Ligação parafusada na alma: Instabilidades localizadas no diafragma comprimido (kN/cm²). Fonte: Freitas (2009).

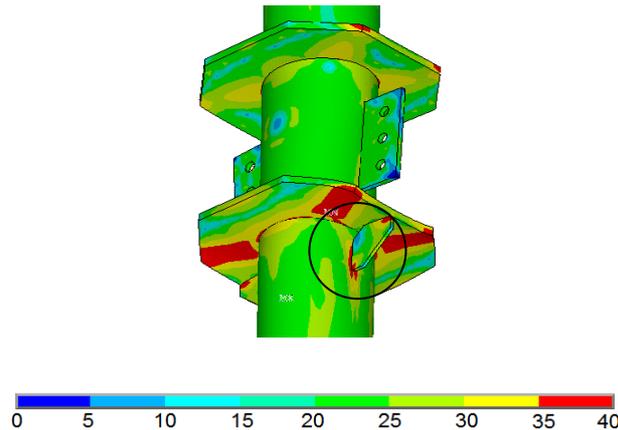


Figura 2.8 – Ligação parafusada na alma - com enrijecedor no diafragma inferior: Plastificação da parede da coluna (kN/cm²). Fonte: Freitas (2009).

Freitas (2009) concluiu que ao aumentar a altura da seção transversal da viga, é perceptível o acréscimo de resistência da ligação, devido ao aumento do binário resistente. Já quando se aumenta o diâmetro da coluna tubular, os valores de resistência apresentaram pequenas variações, podendo ser considerados aproximadamente iguais.

A capacidade de rotação das ligações cai à medida que se incrementa a altura da seção transversal da viga, e aumenta quando há acréscimo do diâmetro da coluna.

Quanto aos diafragmas externos, Freitas (2009) relata que estes tiveram um papel estrutural significativo devido à rigidez às forças aplicadas no seu plano, uma vez que os diafragmas absorvem parte da carga oriunda do binário exercido pelas mesas, aliviando a coluna. A figura 2.9 ilustra tal situação.

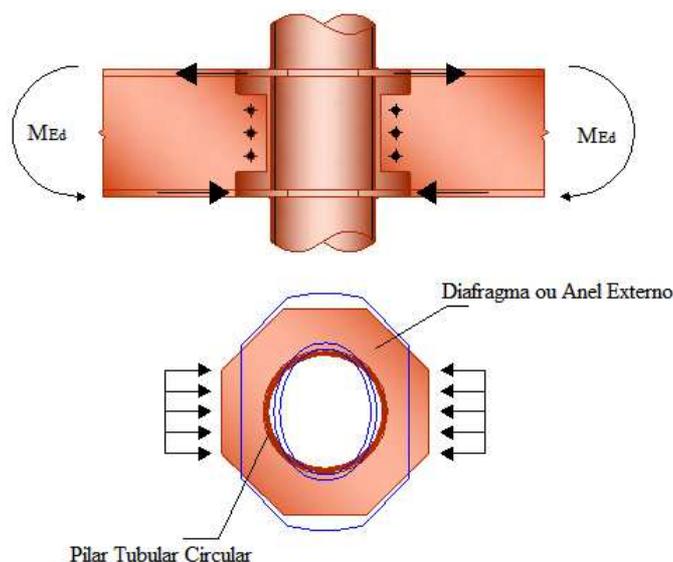


Figura 2.9 – Influência do diafragma externo no comportamento da ligação. Fonte: Freitas (2009).

Também é mostrado em Freitas (2009) que os enrijecedores soldados aos anéis externos ajudam a evitar o desenvolvimento de instabilidades localizadas no anel comprimido. Por outro lado, parte da força absorvida pelo enrijecedor é transferida à coluna, gerando uma região de plastificação da parede da coluna, o que acaba por limitar a resistência da ligação.

Esse trabalho, com a proposta de dar continuidade ao trabalho desenvolvido por Freitas (2009), aborda quatro configurações geométricas de ligações viga-pilar de extremidade, ditas em “T”. As Figuras de 2.10 até 2.13 apresentam tais ligações, bem como a nomenclatura adotada para os modelos. Maiores detalhes dimensionais são apresentados no capítulo 3.

De fácil de execução, a ligação por chapa simples - figura 2.10 - é caracterizada pela pequena capacidade de restringir as rotações, não transmitindo momentos significativos para o pilar.

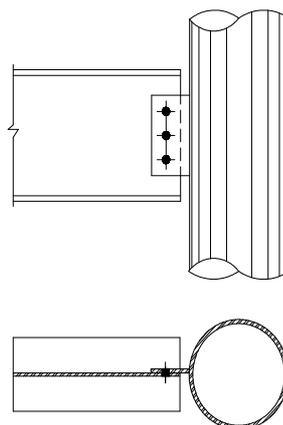


Figura 2.10 – Modelo TCF-B¹. Ligação viga-coluna com chapa simples.

A ligação soldada – figura 2.11 - requer grande esforço executivo. Cortar a mesa da viga de maneira a promover a ligação com o pilar na maioria das vezes só é viável quando esse procedimento pode ser feito na fábrica. Esse tipo de ligação se caracteriza por dar continuidade entre viga e pilar, ou seja, por transmitir momento fletor.

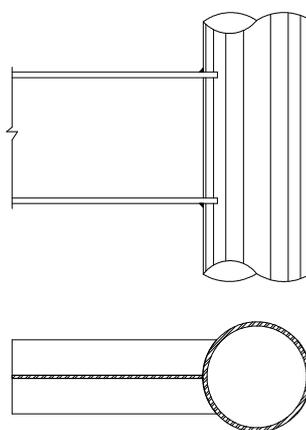


Figura 2.11 – Modelo TCR-W². Ligação viga-coluna soldada.

As ligações apresentadas nas figuras 2.12 e 2.13 são constituídas por diafragmas externos retangulares, sem e com enrijecedor respectivamente. Os diafragmas

¹ TCF-B: T Circular Flexible - Bolted

² TCR-W: T Circular Rigid - Welded

também podem assumir a forma circular, necessitando serem chanfrados na direção de ligação da viga.

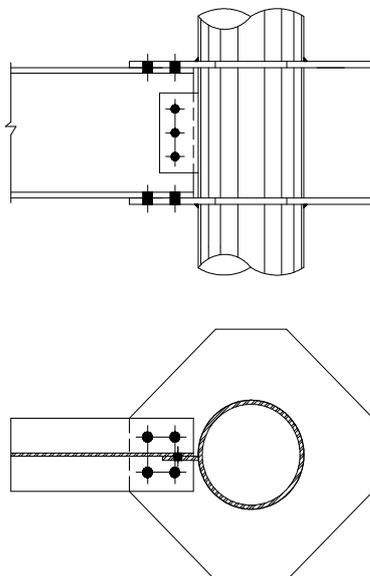


Figura 2.12 – Modelo TCR-B³. Ligação viga-coluna com mesas e diafragmas externos conectados por parafusos.

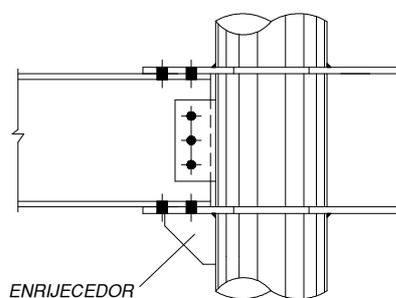


Figura 2.13 – Modelo TCRS-B⁴. Ligação viga-coluna com mesas e diafragmas externos conectados por parafusos e enrijecedor.

É importante ressaltar, que os diafragmas externos podem desempenhar diferentes funções no comportamento da ligação. Caso os diafragmas estejam devidamente soldados às mesas da viga, eles serão responsáveis pela transmissão de momento fletor para o pilar. Se os diafragmas não estiverem soldados à viga, eles

³ TCR-B: T Circular Rigid - Bolted

⁴ TCRS-B: T Circular Rigid Stiffened - Bolted

contribuem para melhor distribuir as tensões que a chapa simples exerce no pilar ao absorver o esforço cortante oriundo da viga.

Os diafragmas externos também têm importância fundamental em ligações viga-pilar de extremidade, uma vez que aumentam a extensão de conexão da mesa com a coluna, contribuindo na distribuição circunferencial das tensões.

2.3 COMPORTAMENTO MOMENTO-ROTAÇÃO

O comportamento de uma ligação pode ser representado pela relação entre o momento fletor a que está solicitada com a rotação relativa entre os elementos conectados. A determinação do diagrama momento-rotação pode ocorrer basicamente de quatro maneiras. São elas: investigação experimental; utilização do método das componentes, introduzido pelo Eurocode 3 (1993); calibração de curvas com base em resultados experimentais conhecidos; e simulação numérica.

No diagrama momento-rotação, figura 2.14, o eixo das ordenadas M representa uma ligação completamente rígida, enquanto o eixo das abscissas Φ representa uma ligação perfeitamente articulada. Nesse diagrama podem ser identificados genericamente: a rigidez inicial K_i , o momento de início de plastificação da ligação M_y e o momento último M_n , a partir do qual é esgotada a capacidade resistente da ligação.

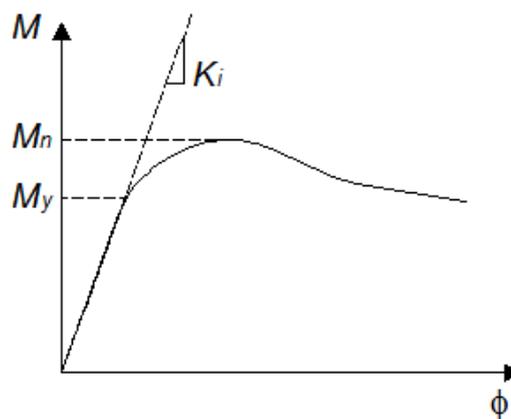


Figura 2.14 - Diagrama momento-rotação genérico.

O momento resistente M_n é definido pelo Eurocode 3 (2005) como o momento correspondente ao pico do diagrama $M-\Phi$. Para as situações onde o diagrama não apresenta ponto de máximo, M_n é tomado como o momento correspondente à rotação de 20mrad.

Dessa maneira, para a análise estrutural, uma ligação pode ser representada por uma mola rotacional que faz a ligação entre as linhas médias dos membros que se encontram em um ponto (nó) da estrutura conforme apresentado na figura 2.15 (a) e (b). O projeto de uma ligação deve definir três propriedades básicas identificadas na figura 2.15 (c):

- Momento resistente: $M_{j,Rd}$;
- Rigidez inicial rotacional: $S_{j,ini}$;
- Capacidade de rotação: Φ_{Cd} .

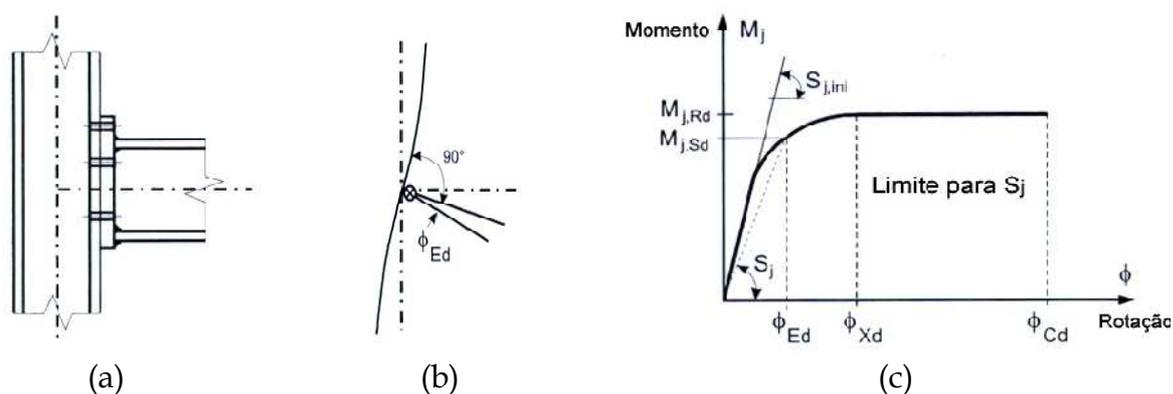


Figura 2.15 - Propriedades relevantes ao dimensionamento de uma ligação.

O nível de sofisticação da análise do comportamento das ligações depende do tipo de análise estrutural global a ser executada. Apesar da não-linearidade do comportamento $M-\Phi$ da maioria das ligações, o Eurocode 3 (2005) de modo a simplificar procedimentos, permite três tipos de análises: a análise linear, rígido-plástica e elasto-plástica.

Na análise linear, o diagrama $M-\Phi$ é definido por uma reta cujo coeficiente angular é a rigidez rotacional, que pode ser adotada como a rigidez inicial, se o momento fletor solicitante não exceder 2/3 do momento resistente. Porém, para todas as situações, o Eurocode 3 (2005) sugere a adoção da rigidez inicial reduzida

pelo parâmetro η , que é função do tipo de ligação e pode variar entre 2,0 para ligações viga-pilar e 3,5 para outros tipos de ligações. A figura 2.16 ilustra a análise elástica.

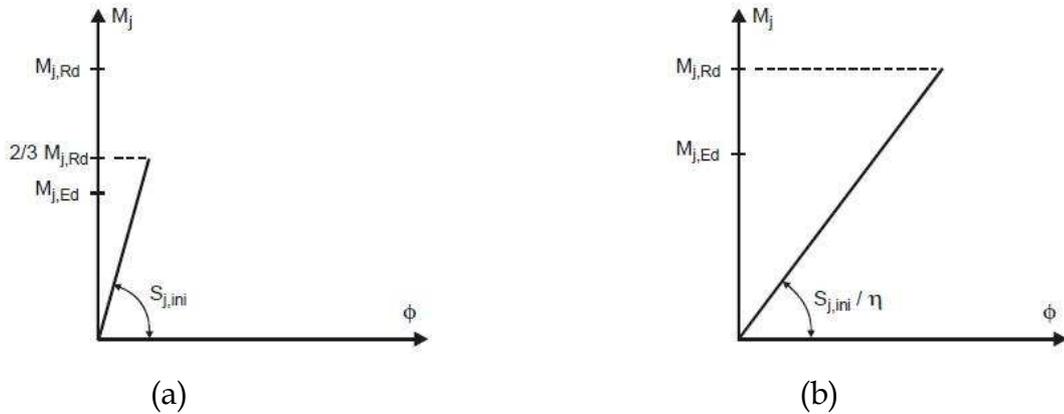


Figura 2.16 - Diagrama $M-\Phi$ linearizado para análise elástica linear com rigidez inicial (a) e rigidez inicial penalizada (b).

Para as análises rígido-plástica e elasto-plástica, o Eurocode 3 (2005) permite a adoção de diagrama bi-linear. Na análise elasto-plástica, a correção da rigidez, assim como na análise elástica, continua sendo necessária. A figura 2.17 mostra tais análises.

Quando se utilizam métodos plásticos de análise, além da rigidez, é fundamental o conhecimento da resistência e da capacidade de rotação das ligações.

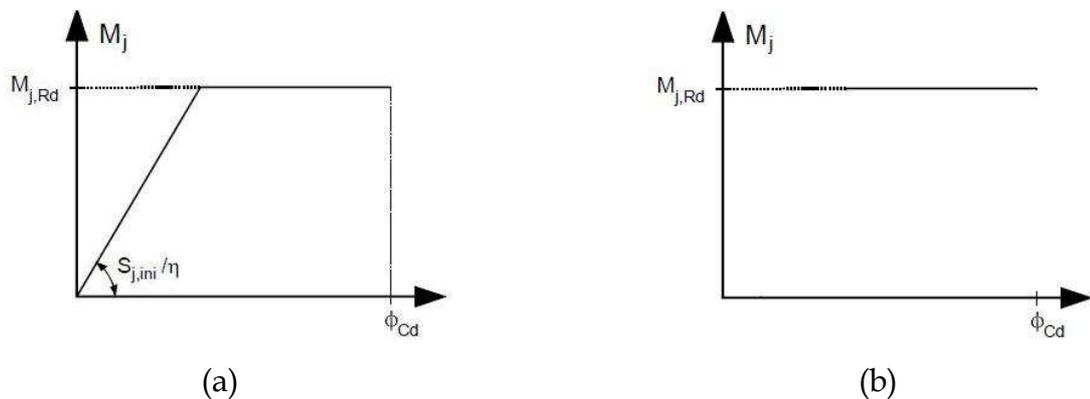


Figura 2.17- Relação $M-\Phi$ bi-linear para análises elasto-plástica (a) e rígido-plástica (b).

Alguns autores adotam diagramas multilineares. Dentre os modelos que utilizam regressões com base em resultados experimentais pode-se citar: o modelo

exponencial proposto por Sommer (1969) apud Jones et al. (1983), o modelo polinomial de Frye & Morris (1975) apud Jones et al. (1983), o modelo proposto por Ramberg-Osgood (1941), o modelo proposto por Ricahrd-Abbot (1975) e mais recente, os modelos propostos por Kishi & Chen (1990) e Ghobarah et al. (1996). Kamei (2001) apresenta a descrição e dá exemplos de aplicação de vários modelos encontrados na literatura.

2.4 CLASSIFICAÇÃO DAS LIGAÇÕES VIGA-PILAR

O Eurocode 3 (2005) classifica as ligações quanto à rigidez e quanto à resistência. Os dois critérios são abordados a seguir.

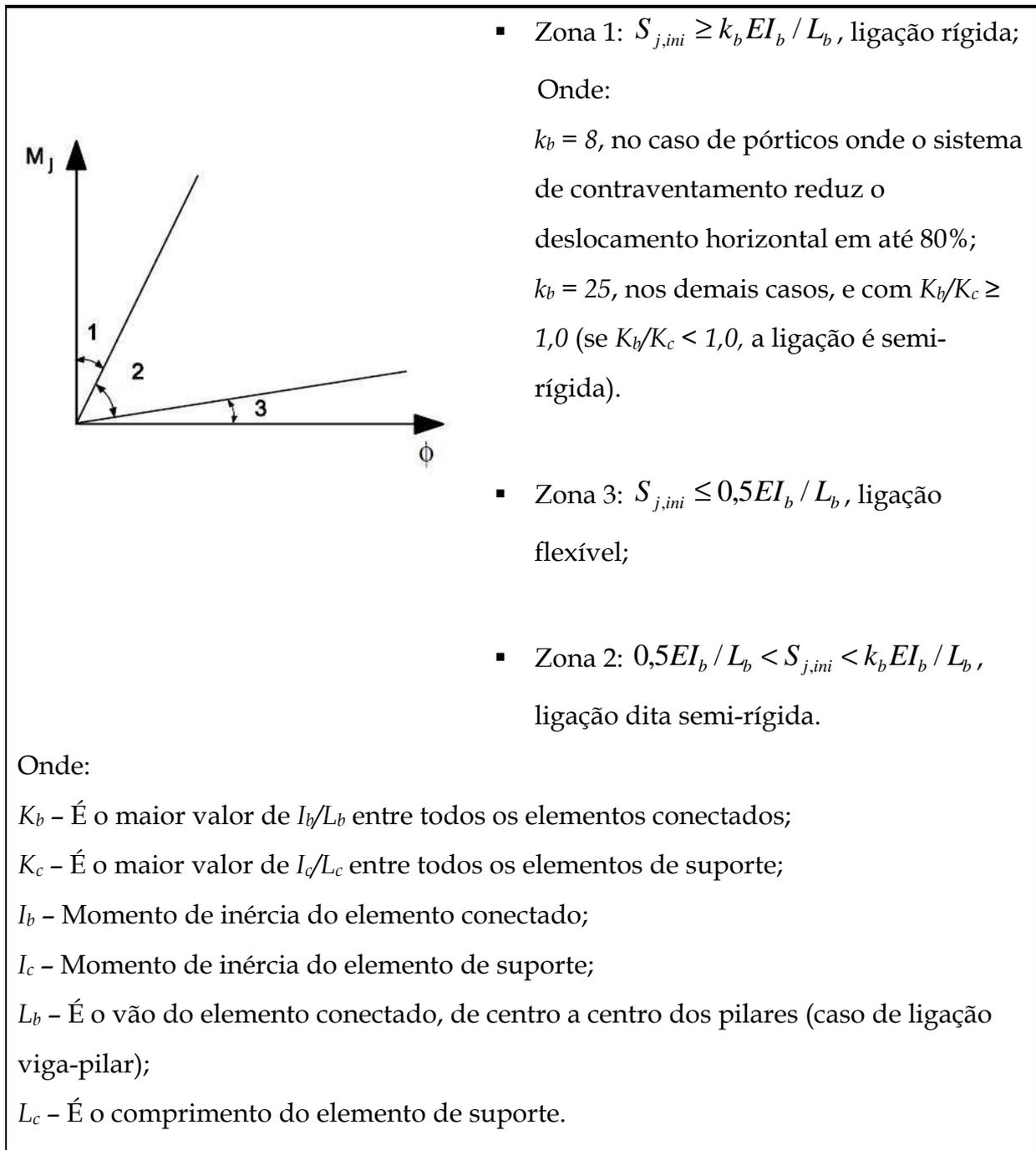
2.4.1 Quanto à rigidez

As ligações podem ser classificadas conforme sua rigidez rotacional em três categorias:

- Flexíveis: São ligações capazes de transferir esforços internos sem desenvolver momentos significativos nos membros da ligação. Também são capazes de absorver a rotação proveniente da carga de projeto.
- Rígidas: São ligações que apresentam rigidez rotacional suficiente para justificar uma análise baseada na continuidade geométrica entre os elementos conectados, ou seja, considerando engastamento perfeito.
- Semi-rígidas: São ligações que sugerem uma situação intermediária entre as ligações flexíveis e as rígidas, observando um determinado grau de interação entre os elementos baseado nas características $M-\Phi$. São capazes de transferir esforços internos e momentos fletores.

As fronteiras de classificação dadas pelo Eurocode 3 (2005) são função da rigidez inicial da ligação $S_{j,ini}$, conforme mostra a tabela 2.1.

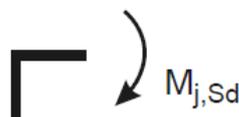
Tabela 2.1 - Fronteiras para classificação das ligações pela rigidez.



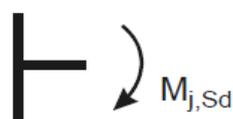
2.4.2 Quanto à resistência

A norma europeia também classifica as ligações quanto à resistência. Tal procedimento é feito pela comparação entre o momento resistente da ligação com o momento resistente dos elementos conectados, tomado na região do elemento adjacente à ligação. As classificações possíveis são:

- Flexíveis: São ligações cujo momento resistente não ultrapassa 25% do momento de plastificação total necessário para classificar uma ligação como completamente resistente;
- Completamente resistentes: São ligações em que o seu momento resistente não pode ser menor que o momento resistente dos elementos conectados. Duas considerações são citadas pela norma:
 - a. Em ligações viga-pilar, onde não há continuidade do pilar, o momento resistente da ligação deve ser maior do que o momento de plastificação total da viga e do pilar.



- b. Em ligações viga-pilar, onde há continuidade do pilar, o momento resistente deve ser maior do que o momento de plastificação total da viga, e maior do que o dobro do momento de plastificação do pilar.



- Parcialmente resistentes: São ligações que não se enquadram nos critérios de classificação das ligações flexíveis e completamente resistentes.

2.5 DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES VIGA-PILAR ENTRE PERFIS I OU H

2.5.1 Esforços atuantes na ligação

Uma ligação viga-pilar deve ser dimensionada para resistir aos esforços provenientes das vigas conectadas (momento fletor, força normal e esforço de cisalhamento vertical). No entanto, os esforços provenientes do pilar (momento fletor, esforço de cisalhamento, e esforço axial) exercem influência no comportamento da ligação e devem ser considerados.

Outra situação a ser observada é a introdução de esforços no painel da alma do pilar provenientes dos momentos fletores das vigas. Esses esforços são tratados como cisalhamento horizontal.

A figura 2.18 mostra os esforços envolvidos em ligação viga-pilar para duas situações. Na situação da figura 2.18 (a), o pilar é interno e, portanto, existem duas vigas conectadas ao pilar. Na figura 2.18 (b), a ligação acontece entre viga e pilar de extremidade (ligação em “T”), onde somente uma viga é conectada ao pilar.

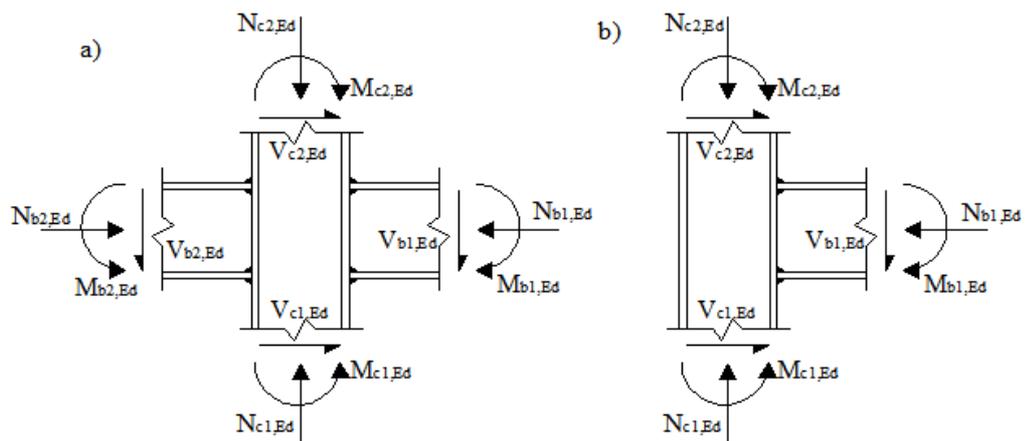


Figura 2.18 - Esforços nas ligações viga-pilar com pilar interno (a) e de extremidade (b).

2.5.2 O método das componentes

Idealizado por Zoitermeijer & Deback (1972), o método das componentes foi incorporado ao Eurocode 3 (1993). Sua metodologia se baseia no conceito de que uma ligação entre dois ou mais elementos estruturais é formada por componentes e as características mecânicas dessas componentes determinam as propriedades estruturais da ligação (resistência, rigidez e ductilidade).

A aplicação do método obedece às seguintes etapas:

- a) Identificação das componentes individuais de compressão, tração e cisalhamento capazes de influenciar o comportamento da ligação;
- b) Avaliação da resistência e rigidez de cada componente individual;
- c) Estudo das características mecânicas do conjunto de componentes individuais para determinação das características da ligação (momento resistente, rigidez inicial e capacidade de rotação).

Deve-se enfatizar que as forças internas e momentos fletores devem estar em equilíbrio com as forças e momentos aplicados à ligação e que a distribuição das forças internas deve ser definida com base na rigidez dos elementos da ligação.

Até o momento, apenas três tipos de ligações viga-pilar são consideradas pelo método: ligações completamente soldadas, ligações com placa de extremidade e ligações com cantoneiras de topo e de apoio. Contudo, a aproximação feita por este método é suficientemente geral, permitindo que qualquer ligação viga-pilar seja decomposta em várias componentes relevantes ao seu dimensionamento.

2.5.2.1 Descrição e equacionamento das componentes

A tabela 2.3 identifica, de acordo com o Eurocode 3 (2005), as componentes básicas de uma ligação viga-pilar. Também são mostrados os tipos de ligações em que as respectivas componentes devem ser consideradas, bem como o equacionamento para determinação das suas propriedades estruturais.

Tabela 2.2 - Descrição e Equacionamento das componentes

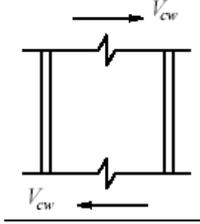
<u>Esforço</u>	<u>Ilustração</u>	<u>Tipo de Ligação</u>
Cisalhamento no painel da alma do pilar		Ligação viga-pilar de seção I
Resistência		Rigidez
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sem enrijecedor: $V_{wp,Rd} = \frac{0,9 f_{y,wc} A_{vc}}{\sqrt{3} \gamma_{M0}}$ <ul style="list-style-type: none"> ▪ Com enrijecedor: $V_{wp,add,Rd} = \frac{4M_{pl,fc,Rd}}{d_s}$ <p>De maneira que:</p> $V_{wp,add,Rd} \leq \frac{2M_{pl,fc,Rd} + 2M_{pl,st,Rd}}{d_s}$ <p>$f_{y,wc}$ - tensão de escoamento do aço da alma do pilar; A_{vc} - área submetida à cortante; $M_{pl,fc,Rd}$ - momento de plastificação da mesa do pilar; $M_{pl,st,Rd}$ - momento de plastificação do enrijecedor; d_s - distancia entre os enrijecedores.</p>		$k_1 = \frac{0,38 A_{vc}}{\beta z}$ <p>Onde: z - é a distancia entre os centros de compressão e tração; β - parâmetro de transformação, tabela 5.4 do Eurocode 3 (2003) - Part 1-8.</p>

Tabela 2.3 - Descrição e Equacionamento das componentes. Continuação.

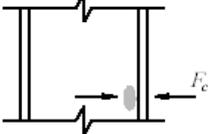
<u>Esforço</u>	<u>Ilustração</u>	<u>Tipo de Ligação</u>
Compressão transversal na alma do pilar		Ligação viga-pilar de seção I
Resistência		Rigidez
$F_{c,wc,Rd} = \frac{\omega k_{wc} b_{eff,c,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M0}}$ <p>De maneira que:</p> $F_{c,wc,Rd} \leq \frac{\omega k_{wc} \rho b_{eff,c,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M1}}$ <p>Onde:</p> <p>ω - fator de redução para interação entre compressão e cisalhamento da alma, tabela 6.3 do Eurocode 3(2003);</p> <p>$b_{eff,c,wc} = t_{fb} + 2\sqrt{2}a_b + 5(t_{fc} + s)$, para ligações soldadas;</p> <p>$b_{eff,c,wc} = t_{fb} + 2\sqrt{2}a_p + 5(t_{fc} + s) + s_p$, para ligações com chapa de topo parafusadas;</p> <p>$b_{eff,c,wc} = 2t_a + 0,6r_a + 5(t_{fc} + s)$, para ligações parafusadas com cantoneiras de mesa;</p> <p>$s = r_c$, para perfis formados a quente;</p> <p>$s = \sqrt{2}a_c$, para perfis de chapas soldadas;</p> <p>$\rho = 1,0$, se $\bar{\lambda}_p \leq 0,72$</p> <p>$\rho = (\bar{\lambda}_p - 0,2) / \bar{\lambda}_p^2$, se $\bar{\lambda}_p > 0,72$</p>		$k_2 = \frac{0,70 b_{eff,c,wc} t_{wc}}{d_c}$ <p>Onde:</p> <p>$b_{eff,c,wc} = t_{fb} + 2\sqrt{2}a_b + 5(t_{fc} + s)$</p> <p>$t_{fb}$ - espessura da mesa da viga;</p> <p>a_b - espessura da solda em ligações soldadas;</p> <p>t_{fc} - espessura da mesa do pilar;</p> <p>$s = r_c$, para perfis formados a quente;</p> <p>$s = \sqrt{2}a_c$, para perfis de chapas soldadas;</p> <p>a_c - espessura da solda entre alma e mesa do pilar (perfil soldado);</p> <p>r_c - raio entre alma e mesa do pilar (perfil formado a quente).</p>

Tabela 2.3 - Descrição e Equacionamento das componentes. Continuação.

Resistência	Rigidez
$\bar{\lambda}_p = 0,932 \sqrt{\frac{b_{eff,c,wc} d_{wc} f_{y,wc}}{Et_{wc}}}$ <p> $d_{wc} = h_c - 2(t_{fc} + r_c)$, para perfis formados a quente; $d_{wc} = h_c - 2(t_{fc} + \sqrt{2}a)$, para perfis de chapas soldadas; $k_{wc} = 1,0$, se $\sigma_{com,Ed} \leq 0,7 f_{y,wc}$; $k_{wc} = 1,7 - \sigma_{comp,Ed} / f_{y,wc}$, se $\sigma_{com,Ed} > 0,7 f_{y,wc}$; $\sigma_{comp,Ed}$ - máxima tensão axial que solicita a alma do pilar. t_{wc} - espessura da alma do pilar; t_{fb} - espessura da mesa da viga; t_{fc} - espessura da mesa do pilar; a_b - espessura da solda em ligações soldadas; a_p - espessura da solda entre viga e chapa de topo; a_c - espessura da solda entre alma e mesa do pilar (perfil soldado); r_c - raio entre alma e mesa do pilar (perfil formado a quente). </p>	

Tabela 2.3 - Descrição e Equacionamento das componentes. Continuação.

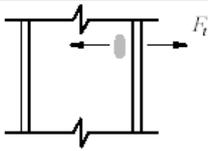
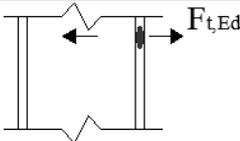
<u>Esforço</u>	<u>Ilustração</u>	<u>Tipo de Ligação</u>
Tração transversal da alma do pilar		Ligação viga-pilar de seção I
Resistência		Rigidez
$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega b_{eff,c,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M0}}$ <p>Onde:</p> $b_{eff,c,wc} = t_{fb} + 2\sqrt{2}a_b + 5(t_{fc} + s)$ <p>$s = r_c$, para perfis formados a quente; $s = \sqrt{2}a_c$, para perfis de chapas soldadas.</p>		$k_3 = \frac{0,70 b_{eff,t,wc} t_{wc}}{d_c}$ <p>$b_{eff,t,wc}$ - largura efetiva da alma do pilar.</p>
<u>Esforço</u>	<u>Ilustração</u>	<u>Tipo de Ligação</u>
Flexão da mesa do pilar		Ligação viga-pilar de seção I
Resistência		Rigidez
<ul style="list-style-type: none"> Ligações parafusadas: Método "T-stub" equiv., ver seção 2.6.2.2. Ligações soldadas: $F_{fc,Rd} = b_{eff,b,fc} t_{fb} f_{y,fb} / \gamma_{M0}$ $b_{eff,b,fc} = b_{eff}$ $b_{eff} \geq (f_{y,b} / f_{u,b}) b_b$ $f_{y,b}$ - tensão de escoam. da mesa da viga; $f_{u,b}$ - tensão de ultima da mesa da viga; b_b - largura da mesa da viga; $f_{y,fb}$ - tensão de escoam. da mesa do pilar; t_{fb} - espessura da mesa do pilar. 		$k_4 = \frac{0,90 \ell_{eff} t_{fc}^3}{m^3}$ <p>m - é definido na figura 2.16; ℓ_{eff} - menor dos comprimentos efetivos; das linhas de parafusos em ligações com chapa de topo, tabelas 6.4 e 6.5 do Eurocode 3 (2003) - Part 1-8; t_{fc} - espessura da mesa do pilar.</p>

Tabela 2.3 - Descrição e Equacionamento das componentes. Continuação.

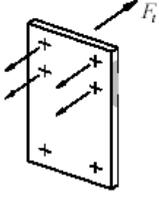
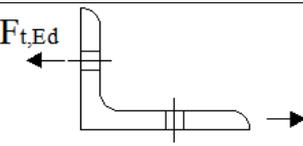
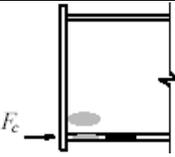
<u>Esforço</u>	<u>Ilustração</u>	<u>Tipo de Ligação</u>
Flexão da chapa de topo		Ligação viga-pilar de chapa de topo
Resistência		Rigidez
Método "T-stub" equivalente. Ver seção 2.6.2.2.	$k_5 = 0,90 \ell_{eff} t_p^3 / m^3$ <p>t_p - espessura da chapa de topo; ℓ_{eff} - menor dos comprimentos efetivos das linhas de parafusos (ligações com chapa de topo), tabela 6.6 do Eurocode 3 (2003) - Part 1-8.</p>	
<u>Esforço</u>	<u>Ilustração</u>	<u>Tipo de Ligação</u>
Flexão da cantoneira de mesa		Ligação viga-pilar com cantoneira de mesa
Resistência		Rigidez
Método "T-stub" equivalente. Ver seção 2.6.2.2.	$k_6 = \frac{0,90 \ell_{eff} t_a^3}{m^3}, \text{ onde:}$ <p>t_a - espessura da cantoneira; $\ell_{eff} = 0,5 b_a$ b_a - largura da cantoneira.</p>	
<u>Esforço</u>	<u>Ilustração</u>	<u>Tipo de Ligação</u>
Compressão da mesa e alma da Viga		Ligação viga-pilar de seção I
Resistência		Rigidez
$F_{c,fb,Rd} = M_{c,Rd} / (h - t_{fb})$ <p>h - altura da viga; t_{fb} - espessura da mesa da viga; $M_{c,Rd}$ - momento resistente da viga.</p>		-

Tabela 2.3 - Descrição e Equacionamento das componentes. Continuação.

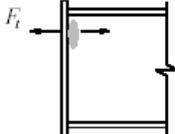
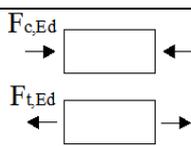
<u>Esforço</u>	<u>Ilustração</u>	<u>Tipo de Ligação</u>
Tração da alma da viga		Ligação viga-pilar de seção I
Resistência		Rigidez
$F_{t,wb,Rd} = \frac{b_{eff,t,wb} t_{wb} f_{y,wb}}{\gamma_{M0}}$ <p>t_{wb} - espessura da alma da viga; $f_{y,wb}$ - tensão de escoam. da alma da viga.</p>		-
<u>Esforço</u>	<u>Ilustração</u>	<u>Tipo de Ligação</u>
Tração ou compressão de chapas		Diversos tipos de ligações
Resistência		Rigidez
<ul style="list-style-type: none"> Tração: $\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1,0$ <p>$N_{t,Rd}$ é o menor valor entre:</p> $N_{p1,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} \text{ e } N_{u,Rd} = \frac{0,9A_{net}f_u}{\gamma_{M2}}$ <p>A_{net} é a menor área transversal de ruptura considerando furos.</p> $\gamma_{M2} = 1,25$ Compressão: $\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0$ <p>Classes 1, 2 ou 3: $N_{c,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}}$</p> 		-

Tabela 2.3 - Descrição e Equacionamento das componentes. Continuação.

Resistência	Rigidez
<p>Classe 4: $N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} f_y}{\gamma_{M0}}$</p> <p>$A_{eff}$ é a área efetiva a compressão da seção transversal;</p> <p>$\gamma_{M0} = 1,0$.</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Flambagem: $\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0$ <p>Classes 1, 2 ou 3: $N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}}$</p> <p>Classe 4: $N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}}$</p> $\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1,0$ $\Phi = 0,5 [1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$ <p>Classes 1, 2 ou 3: $\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}}$</p> <p>Classe 4: $\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}}$</p> <p>$a = 0,21$, é o fator de imperfeição;</p> <p>$\bar{\lambda}$ é a esbeltez reduzida;</p> <p>N_{cr} é a força normal crítica de flambagem elástica;</p> <p>$\gamma_{M1} = 1,0$;</p> <p>Nota: Se $\bar{\lambda} \leq 0,2$ ou $N_{Ed} / N_{cr} \leq 0,04$ a verificação da resistência à flambagem pode ser ignorada.</p>	

Tabela 2.3 - Descrição e Equacionamento das componentes. Continuação.

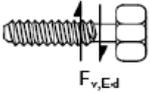
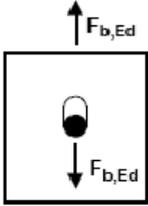
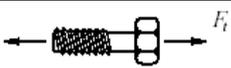
<u>Esforço</u>	<u>Ilustração</u>	<u>Tipo de Ligação</u>
Cisalhamento dos parafusos		Ligação parafusada
Resistência		Rigidez
$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}}$ <ul style="list-style-type: none"> ▪ Plano de cisalhamento na parte rosqueada: $A = A_s$ $a_v = 0,5$ ▪ Plano de cisalhamento na parte íntegra: A - área da seção transversal do parafuso na parte íntegra; $a_v = 0,6$ 	$k_{11} = \frac{16n_b d^2 f_{ub}}{Ed_{M16}}$ <p>Onde: n_b - número de linhas de parafusos em cisalhamento; $d_{M16} = 16mm$</p> <p>Obs.: No caso de parafusos protendidos: $k_{11} = \infty$</p>	
<u>Esforço</u>	<u>Ilustração</u>	<u>Tipo de Ligação</u>
Pressão de contato		Ligação parafusada
Resistência		Rigidez
$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_u d t}{\gamma_{M2}}$ <p>Onde: a_b é o menor valor entre a_d, f_{ub}/f_u e 1,0;</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Na direção de transferência de força: $a_d = e_1/3d_0$, para parafusos de extremidade; $a_d = p_1/3d_0 - 1/4$, para parafusos internos; 	$k_{12} = \frac{24n_b k_b k_t d f_u}{E}$ <p>Onde: $k_b = k_{b1} \leq k_{b2}$ $k_{b1} = 0,25e_b/d + 0,5 \leq 1,25$ $k_{b2} = 0,25p_b/d + 0,375 \leq 1,25$ $k_t = 1,5t_j/d_{M16} \leq 2,5$ e_b - distancia do parafuso para a</p>	

Tabela 2.3 - Descrição e Equacionamento das componentes. Continuação e conclusão.

Resistência		Rigidez	
<p>▪ Na direção perpendicular a transferência de força:</p> <p>k_1 é o menor entre: $2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7$ ou 2,5 (parafusos laterais)</p> <p>k_1 é o menor entre: $1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7$ ou 2,5 (parafusos intermediários).</p>		<p>extremidade livre da chapa na direção da força;</p> <p>f_u - tensão ultima do aço da chapa;</p> <p>p_b - espaço entre as linhas de parafusos na direção da solda;</p> <p>t_j - espessura da chapa.</p>	
Esforço	Ilustração	Tipo de Ligação	
Tração dos parafusos		Ligação parafusada	
Resistência		Rigidez	
<p>$F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}}$</p> <p>$k_2 = 0,9$</p> <p>$A_s$ - área transversal do fuste na parte rosqueada;</p> <p>f_{ub} - tensão ultima do aço do parafuso.</p>		<p>$k_{10} = \frac{1,6 A_s}{L_b}$</p> <p>$L_b$ é a espessura da chapa de topo mais a espessura da mesa do pilar somada à metade da altura da cabeça e altura da porca.</p>	
Esforço	Ilustração	Tipo de Ligação	
Soldas	-	Ligações com soldas	
Resistência		Rigidez	
<p>Uma ligação deve ser dimensionada de tal maneira que a resistência da solda não limite sua resistência.</p>		<p>As soldas exibem modo de ruptura frágil, portanto, não contribuem para a rigidez rotacional da ligação.</p>	

2.5.2.2 Método “T-stub” equivalente

O “*T-stub*” equivalente é um procedimento proposto pelo Eurocode 3 (2005) no qual permite simular o comportamento das seguintes componentes de ligações parafusadas:

- Flexão da mesa do pilar;
- Flexão da chapa de topo;
- Flexão da cantoneira de mesa.

Estudando o comportamento das ligações que utilizavam o perfil “T” para conectar as mesas da viga com a mesa do pilar, Zoetemeijer & Deback (1972) concluíram a existência de três modos de colapso, figura 2.19: o primeiro supõe que a ruptura se dá por plastificação total da mesa, o segundo supõe ruptura do parafuso com plastificação da mesa, e o terceiro supõe a ruptura do parafuso.

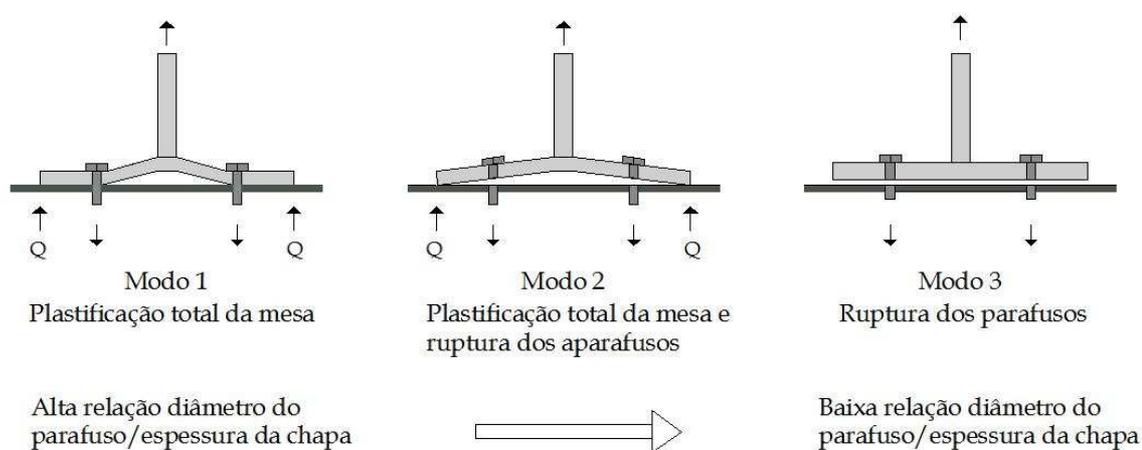


Figura 2.19 – Modos de ruptura do “T-stub”.

A capacidade resistente do “T-stub” equivalente para cada modo de colapso é apresentada na tabela 2.4:

Tabela 2.3 - Equacionamento do método “T-stub”.

Quando há desenvolvimento de Forças de Alavanca Q, $L_b \leq L_b^*$		Método 1	Método 2
Modo 1 (plastificação da mesa)	Sem chapa cobrejunte	$F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd}}{m}$	$F_{T,1,Rd} = \frac{(8n - 2e_w)M_{pl,1,Rd}}{2mn - e_w(m+n)}$
Modo 1 (plastificação da mesa)	Com chapa cobrejunte	$F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd} + 2M_{bp,Rd}}{m}$	$F_{T,1,Rd} = \frac{(8n - 2e_w)M_{pl,1,Rd} + 4nM_{bp,Rd}}{2mn - e_w(m+n)}$
Modo 2 (plastificação da mesa e ruptura dos parafusos)		$F_{T,2,Rd} = \frac{2M_{pl,2,Rd} + n \sum F_{t,Rd}}{m+n}$	
Modo 3 (ruptura dos parafusos)		$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd}$	
Quando não há desenvolvimento de Forças de Alavanca Q			
Modos 1 e 2		$F_{t,1-2,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m}$	
Modo 3		$F_{t,3,Rd} = \sum F_{t,Rd}$	
<p>L_b é a espessura da chapa de topo mais a espessura da mesa do pilar somada à metade da altura da cabeça e altura da porca;</p> $L_b^* = \frac{8,8 \cdot m^3 \cdot 0,75 \cdot A_b}{t_f^3 \cdot \sum l_{eff,1}}$ <p>A_b é área bruta do fuste;</p> <p>$F_{T,Rd}$ é a resistência à tração;</p> $M_{pl,1,Rd} = 0,25 \sum \ell_{eff,1} t_f^2 f_y / \gamma_{M0} ;$ $M_{pl,2,Rd} = 0,25 \sum \ell_{eff,2} t_f^2 f_y / \gamma_{M0} ;$			

Tabela 2.4 - Equacionamento do método "T-stub". Continuação e conclusão.

$$M_{bp,Rd} = 0,25 \sum \ell_{eff,1} t_{bp}^2 f_{y,bp} / \gamma_{M0};$$

$$n = e_{min} \leq 1,25m \text{ (figura 2.17);}$$

$F_{t,Rd}$ é a resistência de cálculo do parafuso;

$\sum \ell_{eff,1}$ é o valor $\sum \ell_{eff}$ para o modo 1;

$\sum \ell_{eff,2}$ é o valor $\sum \ell_{eff}$ para o modo 2;

$\sum \ell_{eff}$ é o somatório das larguras efetivas das linhas de parafusos. Cada ℓ_{eff} depende da sua localização, do modo correspondente e da aplicação específica;

e_{min} é o menor valor de e (no caso de ligação com chapa de topo, corresponde ao menor valor de e da chapa de topo e da mesa do pilar) (figura 2.20);

m é ilustrado na Figura 2.16;

t_f é a espessura da mesa do "T-stub" (figura 2.20);

$f_{y,bp}$ é a tensão de escoamento do aço das chapas de fundo;

t_{bp} é a espessura das chapas de fundo;

$$e_w = d_w/4;$$

d_w é ilustrado na figura 2.20.

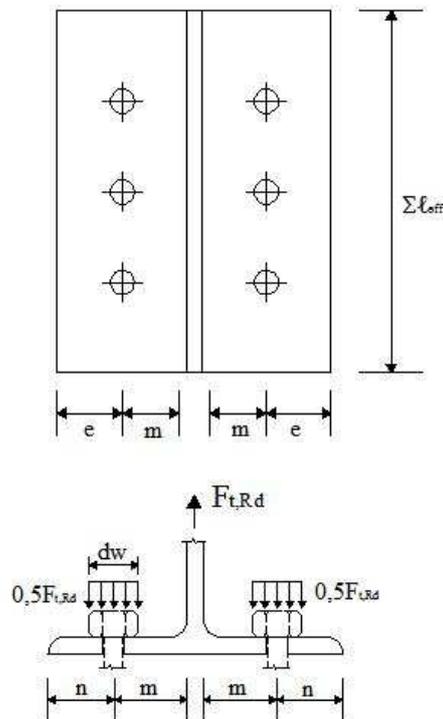


Figura 2.20 - Esquema para "T-stub" equivalent.

Informações mais detalhadas a respeito do “*T-stub*” equivalente podem ser encontradas em Maggi (2004).

2.5.2.3 Momento resistente

Definidas as resistências de cada componente envolvida, pode-se calcular o momento resistente da ligação. O procedimento aqui descrito por meio da equação 2.11, não considera a influência do esforço normal proveniente da viga. Tal consideração deve ser feita quando esse esforço exceder 5% da força normal de plastificação da seção transversal da viga, para esse caso a equação 2.12 considera a interação entre os esforços.

$$\frac{M_{j,Ed}}{M_{j,Rd}} \leq 1,0 \quad (2.11)$$

$$\frac{M_{j,Ed}}{M_{j,Rd}} + \frac{N_{j,Ed}}{N_{j,Rd}} \leq 1,0 \quad (2.12)$$

Onde:

$M_{j,Ed}$ é o momento fletor solicitante da ligação;

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

$N_{j,Ed}$ é o esforço normal solicitante proveniente da viga;

$N_{j,Rd}$ é o esforço normal de plastificação da seção transversal da viga.

A tabela 2.5 traz a determinação do momento resistente $M_{j,Rd}$ para as ligações contempladas pelo Eurocode 3 (2005). Nota-se que o braço de alavanca z é a distância do centro de compressão ao centro de tração da ligação.

Tabela 2.4 - Determinação de $M_{j,Rd}$.

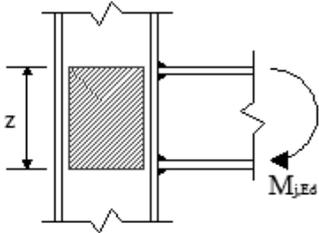
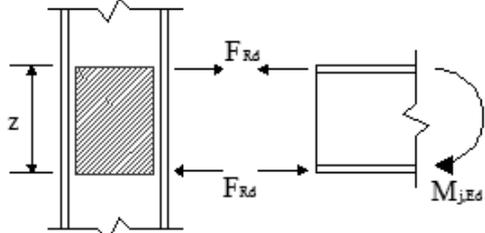
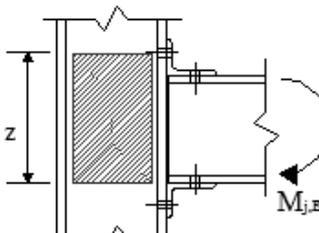
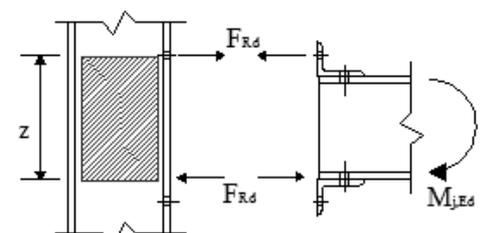
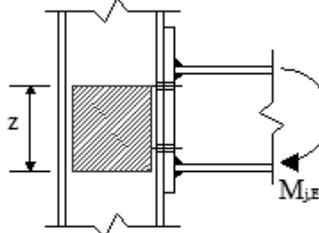
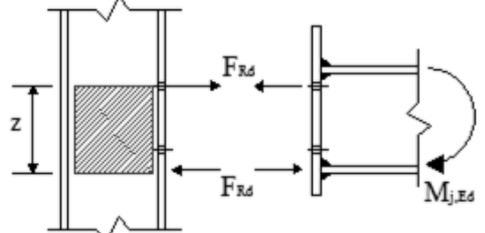
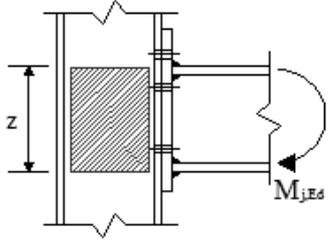
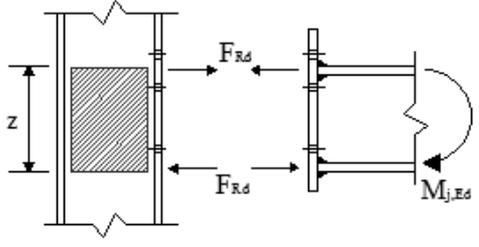
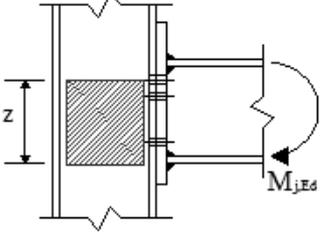
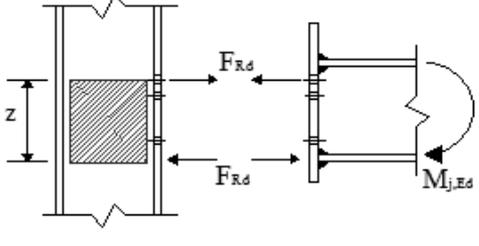
Ligação Soldada		
Tipo de Ligação	Determinação de $M_{j,Rd}$	Distribuição das Forças
	$z = h - t_{fb}$ $M_{j,Rd} = zF_{Rd}$ <p>Onde:</p> <p>h - altura da seção transversal da viga; t_{fb} - espessura da mesa da viga; z - braço de alavanca;</p>	
Ligação com cantoneiras de mesa		
Tipo de Ligação	Determinação de $M_{j,Rd}$	Distribuição das Forças
	$z = h - t_{fb}$ $M_{j,Rd} = zF_{Rd}$ <p>Onde:</p> <p>h - altura da seção transversal da viga; t_{fb} - espessura da mesa da viga; z - braço de alavanca.</p>	
Ligação com chapa de topo com apenas uma linha de parafusos sob tração		
Tipo de Ligação	Determinação de $M_{j,Rd}$	Distribuição das Forças
	$z = h - t_{fb}$ $M_{j,Rd} = zF_{Rd}$ <p>Onde:</p> <p>h - altura da seção transversal da viga; t_{fb} - espessura da mesa da viga; z - braço de alavanca.</p>	

Tabela 2.5 – Determinação de $M_{j,Rd}$. Continuação e conclusão.

Ligação com chapa de topo com duas linhas de parafusos sob tração		
Tipo de Ligação	Determinação de $M_{j,Rd}$	Distribuição das Forças
	<p>z equivale à distância do centro de compressão ao ponto médio entre as linhas de parafusos sob tração.</p> $M_{j,Rd} = zF_{Rd}$	
Ligação com chapa de topo com duas linhas de parafusos sob tração abaixo da mesa		
Tipo de Ligação	Determinação de $M_{j,Rd}$	Distribuição das Forças
	$M_{j,Rd} = \sum_r h_r F_{tr,Rd}$ <p>Onde: $F_{tr,Rd}$ – resistência à tração da linha de parafuso r; h_r – distância da linha de parafusos r ao centro de compressão; r – número da linha de parafuso.</p>	

2.5.2.4 Rigidez rotacional

A rigidez rotacional de uma ligação pode ser determinada em função da rigidez elástica de suas componentes. O Eurocode 3 (2005) determina que para os casos em que a força axial proveniente da viga $N_{j,Ed}$ não ultrapassa 5% da sua força axial de plastificação $N_{j,Rd}$, e que o momento fletor solicitante $M_{j,Ed}$ seja menor que o momento fletor resistente $M_{j,Rd}$, a rigidez rotacional S_j pode ser obtida pela expressão:

$$S_j = \frac{Ez^2}{\mu \sum_i \frac{1}{k_i}} \quad (2.13)$$

Onde:

k_i é o coeficiente de rigidez da componente i ;

z é o braço de alavanca;

μ é a razão $S_{j,ini}/S_j$ determinado conforme tabela 2.6:

Tabela 2.5 - Determinação de μ .

se $M_{j,Ed} \leq 2/3M_{j,Rd}$:	se $2/3M_{j,Rd} < M_{j,Ed} \leq M_{j,Rd}$:
$\mu = 1$	$\mu = \left(\frac{1,5M_{j,Ed}}{M_{j,Rd}} \right)^\psi$
Onde:	
$S_{j,ini}$ é a rigidez inicial;	
$\psi = 3,1$ para ligações soldadas;	
$\psi = 2,7$ para ligações soldadas e de chapa de topo;	
$\psi = 3,1$ para ligações com cantoneiras conectando as mesas da e viga e pilar;	
$\psi = 3,1$ para ligações com chapa de base.	

A tabela 2.7 identifica, para diferentes configurações de solicitações, os coeficientes necessários ao cálculo da rigidez rotacional para alguns dos tipos de ligações apresentados no Eurocode 3 (2005).

Tabela 2.6 - Coeficientes de rigidez k_i para o cálculo da rigidez da ligação.

Ligação soldada	Coeficientes k_i considerados	
1 viga conectada	k_1, k_2, k_3	
2 vigas conectadas - Momentos iguais e opostos	k_2, k_3	
2 vigas conectadas - Momentos desiguais	k_1, k_2, k_3	
Ligação com cantoneiras de mesa	Coeficientes k_i considerados	
1 viga conectada	$k_1, k_2, k_3, k_4, k_6, k_{10}, k_{11}, k_{12}$	
2 vigas conectadas - Momentos iguais e opostos	$k_2, k_3, k_4, k_6, k_{10}, k_{11}, k_{12}$	
2 vigas conectadas - Momentos desiguais	$k_1, k_2, k_3, k_4, k_6, k_{10}, k_{11}, k_{12}$	
Ligações com chapa de topo	Número de linhas de parafusos sob tração	Coeficientes k_i considerados
1 viga conectada	1 linha	$k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_{10}$
	2 ou mais linhas	k_1, k_2, k_{eq}
2 vigas conectadas - Momentos iguais e opostos	1 linha de	$k_2, k_3, k_4, k_5, k_{10}$
	2 ou mais linhas	k_2, k_{eq}
2 vigas conectadas - Momentos desiguais	1 linha	$k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_{10}$
	2 ou mais linhas	k_1, k_2, k_{eq}
<p>Uma viga conectada Momentos desiguais Momentos iguais e opostos</p>		

As expressões necessárias ao cálculo dos coeficientes k_i das componentes das ligações citadas no Eurocode 3 (2005) estão listadas na tabela 2.3. Para ligações com chapa de topo, com duas ou mais linhas de parafusos sob tração, os coeficientes k_i

das componentes podem ser representados por um coeficiente de rigidez equivalente dado por:

$$k_{eq} = \frac{\sum_r k_{eff,r} h_r}{z_{eq}} \quad (2.14)$$

Onde:

h_r é a distância da linha de parafuso r ao centro de compressão;

$k_{eff,r}$ é o coeficiente de rigidez efetivo da linha r de parafusos, seu valor pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$k_{eff,r} = \frac{1}{\sum_i \frac{1}{k_{i,r}}} \quad (2.15)$$

Onde:

$K_{i,r}$ é o coeficiente que representa a componente i em relação a linha de parafuso sob tração. As componentes a serem consideradas são:

- Tração transversal da alma do pilar (k_3);
- Flexão da mesa do pilar (k_4);
- Flexão da chapa de topo (k_5);
- Tração dos parafusos (k_{10}).

z_{eq} é o braço de alavanca equivalente, dado por:

$$z_{eq} = \frac{\sum_r k_{eff,r} h_r^2}{\sum_r k_{eff,r} h_r} \quad (2.16)$$

2.5.2.5 Capacidade de rotação

Quando se utilizam métodos plásticos de análise, além da resistência e rigidez, é fundamental conhecer a capacidade de rotação das ligações.

A formulação proposta pelo Eurocode 3 (2005) para a determinação da capacidade de rotação das ligações é válida apenas para os casos onde a força normal solicitante $N_{j,Ed}$ proveniente da viga não ultrapassa 5% de sua força axial de plastificação $N_{j,Rd}$.

O Eurocode 3 (2005) exclui a necessidade desta verificação quando o momento fletor resistente da ligação é 20% maior que o momento de plastificação da viga.

2.5.2.5.1 Ligações parafusadas

O Eurocode 3 (2005), no trato da capacidade de rotação das ligações, traz as seguintes considerações para as ligações parafusadas:

- Ligações viga-pilar com momento resistente $M_{j,Rd}$ limitado pelo cisalhamento da alma do pilar podem ser assumidas como ligações que apresentam capacidade rotacional adequada para a consideração da análise plástica global, desde que $d/t_w \leq 69\varepsilon$;

Onde:

$$\varepsilon = \sqrt{235/f_y};$$

d é a distância entre as mesas do pilar sem os raios de concordância (altura livre da alma);

t_w é a espessura da alma do pilar.

- Ligações com chapa de topo ou cantoneiras de mesa podem ser assumidas como ligações que apresentam capacidade de rotação suficiente para análise plástica global uma vez que ambas obedeçam às seguintes considerações:

- a) O momento resistente $M_{j,Rd}$ deve ser limitado pela flexão da mesa do pilar ou pela flexão da chapa de topo ou cantoneira;
- b) A espessura t da mesa do pilar, ou chapa de topo ou cantoneira satisfaz:

$$t \leq 0,36d \sqrt{f_{ub} / f_y} \quad (2.17)$$

Onde:

d é a distância entre as mesas do pilar sem os raios de concordância (altura livre da alma);

f_{ub} é a tensão última do aço da mesa da viga;

f_{yb} é a tensão de escoamento do aço da componente em questão.

- Ligação parafusadas, cujo momento resistente $M_{j,Rd}$ é limitado pelo cisalhamento dos parafusos, não pode ser assumida como uma ligação que apresenta capacidade de rotação suficiente para uma análise plástica global.

2.5.2.5.2 Ligações soldadas

Da mesma forma que para as ligações parafusadas, o Eurocode 3 (2005), no trato da capacidade de rotação das ligações, traz as seguintes considerações para as ligações soldadas:

- A capacidade rotacional de ligações soldadas pode ser calculada por meio da equação 2.18, desde que a alma do pilar não seja enrijecida na região tracionada transversalmente e que o momento resistente $M_{j,Rd}$ não seja governado pelo cisalhamento da alma do pilar.

$$\phi_{Cd} = 0,025h_c / h_b \quad (2.18)$$

Onde:

h_b é a altura da seção transversal da viga;

h_c é a altura da seção transversal do pilar.

- A capacidade rotacional de ligações soldadas em conformidade com o pressuposto acima deve ser maior que 0,015rad.

2.6 LIGAÇÕES TUBULARES

O Eurocode 3 (2005) contempla o dimensionamento de diversos tipos de ligações envolvendo elementos tubulares de seção circular, retangular ou quadrada, associados entre si ou à chapas e elementos como perfis de seção tipo I ou H. Abaixo estão listados os tipos de ligações contempladas pelo Eurocode 3 (2005):

- Ligações entre barras tubulares de seção circular;
- Ligações entre barras tubulares de seção retangular;
- Ligações entre barras tubulares de seção circular e retangular;
- Ligações entre barras tubulares circulares e chapas;
- Ligações entre barras tubulares retangulares e chapas;
- Ligações entre barras tubulares circulares e perfis de seção tipo I ou H;
- Ligações entre barras tubulares retangulares e perfil I ou H.

2.7 MODO DE FALHA EM LIGAÇÕES TUBULARES

Para o entendimento desse item, é necessário associar ao termo elemento principal ou de conexão a barra concorrente à ligação que absorve os esforços envolvidos. Da mesma maneira associa-se ao termo elemento secundário ou conectado a barra que esta conectada ao elemento principal. No caso de ligação viga-pilar, a viga é o elemento secundário e o pilar é o elemento principal.

Segundo o Eurocode 3 (2005) o dimensionamento de ligações envolvendo perfis tubulares e perfis de seção aberta deve basear-se em seis modos de falhas. A fim de

padronizar as nomenclaturas do Eurocode esse trabalho transcreve a tradução e comentários presentes em Freitas (2009):

- a) Plastificação do elemento principal (“Chord Face Failure”): A ruptura é caracterizada pela plastificação da parede do elemento principal, ou de sua seção;
- b) Plastificação da parede lateral (“Side Wall Failure”): Ocorre ruptura por plastificação, fraturamento ou instabilidade da parede lateral do elemento principal ou secundário;
- c) Cisalhamento na seção do elemento principal (“Chord Shear Failure”): A ruptura é manifestada por meio do cisalhamento do elemento principal;
- d) Cisalhamento na parede do elemento principal (“Punching Shear”): As tensões de cisalhamento na região de ligação levam ao desligamento entre elemento secundário e principal, por fissuração na parede do elemento principal;
- e) Ruptura do elemento secundário (“Brace Failure”): Modo de falha caracterizado pela ruptura por fraturamento do elemento secundário ou fraturamento na solda;
- f) Ruptura por flambagem local (“Local Buckling”): Flambagem local dos elementos na região de conexão.

Destaca-se que cada modo de falha citado descreve diferentes situações de colapso à medida que a configuração geométrica da ligação é modificada.

2.8 DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES ENTRE PILAR TUBULAR CIRCULAR E VIGA COM SEÇÃO DO TIPO I

Quando as ligações entre barras tubulares circulares e perfis de seção tipo I ou H são promovidas pela soldagem da viga diretamente à face da coluna, o Eurocode 3 (2005) fornece caminhos para uma análise direta, sem a necessidade da utilização do método das componentes. De maneira oposta, quando essas ligações são promovidas por intermédio de elementos auxiliares (chapas, anéis ou diafragmas, dentre outros)

é necessária a decomposição do comportamento da ligação em ações localizadas (componentes).

A utilização do método das componentes para ligações viga-pilar tubular pode ser realizada em analogia ao que foi feito para ligações viga-pilar de seção tipo I ou H.

O Eurocode 3 (2005) apresenta uma série de equações de resistência para os diferentes tipos de ações atuando em estruturas tubulares. Para as ligações viga-pilar tubular as ações a serem consideradas são decorrentes de chapas soldadas à coluna, tais como chapas de alma, enrijecedores, diafragmas, dentre outros. A tabela 2.8 traz uma compilação de equações que contemplam dois modos de ruptura: plastificação da parede da coluna por forças de compressão e cisalhamento da face da coluna por forças de tração.

Tabela 2.7 - Equações de resistência para ligações com colunas tubulares.

<p>a)</p>	<ul style="list-style-type: none"> Plastificação da parede da coluna: $N_{i,Rd} = k_p f_{yo} t_o^2 (4 + 20\beta^2) / \gamma_{M5}$ $M_{ip,i,Rd} = 0$ $M_{op,i,Rd} = 0,5 b_i N_{i,Rd}$ Cisalhamento da face da coluna: $\sigma_{\max} t_1 \leq 2 t_o (f_{yo} / \sqrt{3}) / \gamma_{M5}$
<p>b)</p>	<ul style="list-style-type: none"> Plastificação da parede da coluna: $N_{i,Rd} = \left(\frac{5 k_p f_{yo} t_o^2}{1 - 0,81\beta} \right) \frac{1}{\gamma_{M5}}$ $M_{ip,i,Rd} = 0$ $M_{op,i,Rd} = 0,5 b_i N_{i,Rd}$ Cisalhamento da face da coluna: $\sigma_{\max} t_1 \leq 2 t_o (f_{yo} / \sqrt{3}) / \gamma_{M5}$
<p>c)</p>	<ul style="list-style-type: none"> Plastificação da parede da coluna: $N_{i,Rd} = 5 k_p f_{yo} t_o^2 (1 + 0,25\eta) / \gamma_{M5}$ $M_{ip,i,Rd} = h_i N_{i,Rd}$ $M_{op,i,Rd} = 0$ Cisalhamento da face da coluna: $\sigma_{\max} t_1 \leq 2 t_o (f_{yo} / \sqrt{3}) / \gamma_{M5}$

Tabela 2.8 - Equações de resistência para ligações com colunas tubulares. Continuação.

<p>d)</p>	<ul style="list-style-type: none"> Plastificação da parede da coluna: $N_{i,Rd} = 5k_p f_{yo} t_o^2 (1 + 0,25\eta) / \gamma_{M5}$ $M_{ip,i,Rd} = h_i N_{i,Rd}$ $M_{op,i,Rd} = 0$ Cisalhamento da face da coluna: $\sigma_{\max} t_1 \leq 2t_o (f_{yo} / \sqrt{3}) / \gamma_{M5}$
<p>e)</p>	<ul style="list-style-type: none"> Plastificação da parede da coluna: $N_{i,Rd} = k_p f_{yo} t_o^2 (4 + 20\beta^2) (1 + 0,25\eta) / \gamma_{M5}$ $M_{ip,1,Rd} = \frac{h_1 N_{1,Rd}}{(1 + 0,25\eta)}$ $M_{op,1,Rd} = 0,5b_1 N_{1,Rd}$ Cisalhamento da face da coluna: $\sigma_{\max} t_1 \leq 2t_o (f_{yo} / \sqrt{3}) / \gamma_{M5}$ <p>Onde t_1 é a espessura da mesa</p>
<p>f)</p>	<ul style="list-style-type: none"> Plastificação da parede da coluna: $N_{1,Rd} = \left(\frac{5k_p f_{yo} t_o^2}{1 - 0,81\beta} \right) \frac{(1 + 0,25\eta)}{\gamma_{M5}}$ $M_{ip,1,Rd} = \frac{h_1 N_{1,Rd}}{(1 + 0,25\eta)}$ $M_{op,1,Rd} = 0,5b_1 N_{1,Rd}$ Cisalhamento da face da coluna: $\sigma_{\max} t_1 \leq 2t_o (f_{yo} / \sqrt{3}) / \gamma_{M5}$ <p>Onde t_1 é a espessura da mesa</p>

Tabela 2.8 – Equações de resistência para ligações com colunas tubulares. Continuação e conclusão.

Onde:

$N_{i,Rd}$ é a força normal resistente de cálculo;

$M_{ip,i,Rd}$ é o momento fletor resistente de cálculo no plano da ligação;

$M_{op,i,Rd}$ é o momento fletor resistente de cálculo fora do plano da ligação;

k_p é um coeficiente para a consideração do efeito da compressão axial da coluna, dado por:

$k_p = 1 - 0,3n_p(1 + n_p)$, para $n_p \geq 0$ (compressão);

$k_p = 1,0$, para $n_p \leq 0$ (tração);

$$n_p = \frac{1}{\gamma_{M5}} \left(\frac{\sigma_{p,Ed}}{f_{yo}} \right)$$

$\sigma_{p,Ed}$ é a tensão axial solicitante na coluna;

f_{yo} é a tensão de escoamento do aço da coluna;

$$\gamma_{M5} = 1,0$$

$$\beta = b_i / d_o \geq 0,4$$

$$\eta = h_i / d_o \leq 0,4$$

σ_{max} é a máxima tensão de sollicitação proveniente do elemento conectado, dada por:

$$\sigma_{max} = \frac{N_{Ed}}{A} + \frac{M_{Ed}}{W}$$

N_{Ed} é a força normal solicitante proveniente do elemento conectado;

M_{Ed} é o momento fletor solicitante proveniente do elemento conectado.

Para os casos onde existam combinação de esforços normais e momento fletores solicitantes na ligação, a seguinte equação deve ser satisfeita:

$$\frac{N_{i,Ed}}{N_{i,Rd}} + \left(\frac{M_{ip,i,Ed}}{M_{ip,i,Rd}} \right)^2 + \frac{M_{op,i,Ed}}{M_{op,i,Rd}} \leq 1,0$$

As demais propriedades estruturais das ligações tubulares, tais como rigidez e ductilidade não são contempladas pelo Eurocode 3 (2005), não sendo possível a aplicação do método das componentes para determinação destas propriedades.

A tabela 2.9 apresenta composição das situações descritas nas tabelas 2.3 e 2.8 aplicadas aos tipos de ligações estudadas nesse trabalho. O resultado é a definição das componentes a serem verificadas em cada uma das ligações.

Tabela 2.8 – Componentes para verificação de ligações entre viga de seção I e coluna tubular.

Fonte: Freitas (2009).

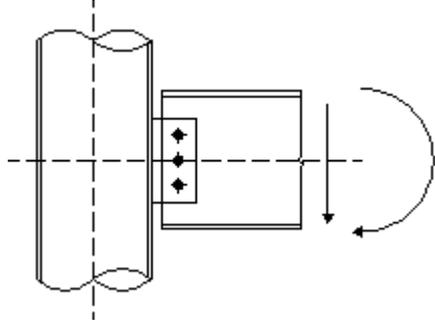
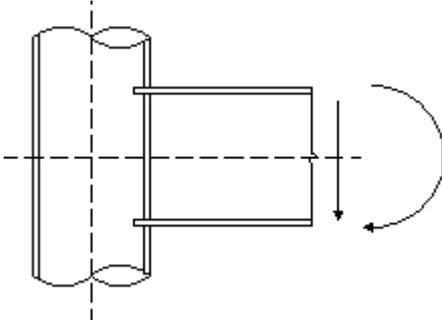
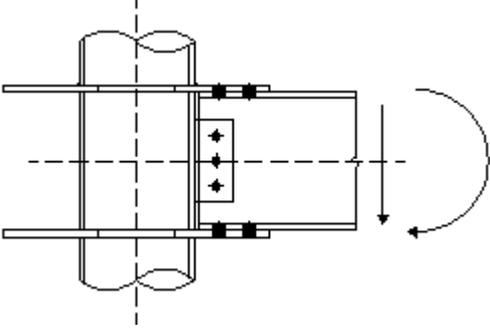
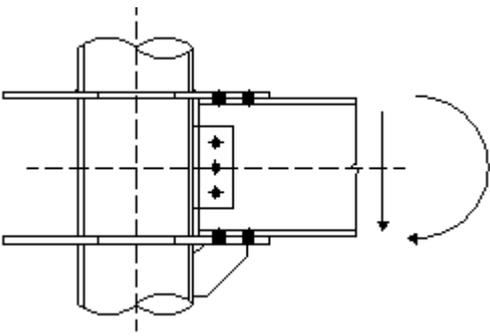
Tipo de Ligação	Componentes a verificar
<p>a) TCF-B - Ligação com chapa de alma:</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Cisalhamento dos parafusos; • Pressão de apoio e rasgamento na chapa de alma e alma da viga; • Soldas.
<p>b) TCR-W - Ligação soldada:</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Cisalhamento na face da coluna na região tracionada devido à força de tração transversal exercida pela mesa superior da viga; • Plastificação da parede da coluna na região comprimida devido à força de compressão transversal exercida pela mesa inferior da viga; • Compressão da alma e mesa da viga (região comprimida); • Tração da alma da viga (região tracionada); • Soldas.

Tabela 2.9 - Componentes para verificação de ligações entre viga de seção I e coluna tubular.
 Fonte: Freitas (2009). Continuação e Conclusão.

Tipo de Ligação	Componentes a verificar
<p>c) TCR-B - Ligação com diafragmas externos parafusados não enrijecidos:</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Cisalhamento na face da coluna na região tracionada devido à força de tração transversal exercida pelo diafragma superior; • Plastificação da parede da coluna na região comprimida devido à força de compressão transversal exercida pelo diafragma inferior; • Compressão da alma e mesa da viga (região comprimida);
<p>d) TCRS-B - Ligação com diafragmas externos parafusados enrijecidos:</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Tração da alma da viga (região tracionada); • Cisalhamento dos parafusos; • Pressão de apoio e rasgamento na chapa de alma e na alma da viga; • Pressão de apoio e rasgamento na mesa da viga e diafragma externo; • Plastificação do diafragma externo; • Flambagem do diafragma externo comprimido; • Soldas.

Conforme tratado anteriormente, para o caso da ligação soldada, tabela 2.9 (b), o Eurocode 3 (2005) fornece equações para determinação direta da sua resistência, tabela 2.8 (e). Para as outras configurações de ligações, é possível identificar os esforços atuantes, estabelecendo assim uma analogia ao método das componentes.

2.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse capítulo se observa que não são muitas as pesquisas realizadas envolvendo viga de seção I e coluna tubular e que as lacunas de conhecimento do comportamento desse tipo de ligação dificultam sua aplicação ou conduzem à subutilização desse sistema estrutural.

Foram apresentados os protótipos estudados nesse trabalho e discutidas as características estruturais dos mesmos. Destacou-se a importância de conhecer o comportamento momento-rotação das ligações, bem como a obtenção dos parâmetros que caracterizam tal comportamento (rigidez, resistência e capacidade de rotação).

Também foram apresentados, procedimentos de classificação e de dimensionamento de ligações tubulares segundo o Eurocode 3 (2005), discutindo-se o método das componentes.

Evidenciou-se que para utilizar o método das componentes em ligações entre viga de seção tipo I e coluna tubular é necessário adaptá-lo, caracterizando as ações de chapas soldadas na parede da coluna como componentes adicionais. Tal procedimento somente é possível para a determinação da resistência das ligações. Rigidez e ductilidade de chapas ligadas a elementos tubulares não são contempladas pelo método. Deve-se considerar também, que a aplicação do método se mostra confusa para algumas situações.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este trabalho experimental foi desenvolvido no Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos com o objetivo de avaliar o comportamento das ligações em aço entre viga e coluna tubular em sistemas isolados.

Os ensaios foram realizados em escala natural em modelos que representam ligações de extremidade, denominados “T”. Os resultados dizem respeito principalmente às relações momento-rotação, e a observação dos modos de ruína dos protótipos, que fornecerão subsídios para a definição dos estados limites últimos.

O programa Experimental consistiu da análise de quatro protótipos. Esses serviram de base para a modelagem numérica. Observa-se que o programa experimental tem caráter exploratório em função do número reduzido de modelos ensaiados.

3.2 GEOMETRIA DOS MODELOS ENSAIADOS

Vigas do tipo *PS 258x32* foram utilizadas em todos os protótipos. Em cada modelo a extremidade da viga foi ligada ao pilar circular do tipo $\Phi 219,1x8,2$, formando a configuração denominada “T”. As propriedades geométricas dos perfis da viga e da coluna estão apresentadas nas tabelas 3.1 e 3.2 respectivamente.

Tabela 3.1 – Propriedades geométricas do perfil da viga.

Perfil PS	Massa Linear (kg/m)	Área (cm ²)	d (mm)	tw (mm)	h (mm)	tf (mm)	bf (mm)	I _x (cm ⁴)	W _x (cm ³)
258x32	32,34	41,20	258	6,1	239,8	9,1	146	4.818	374

Tabela 3.2 – Propriedades geométricas do perfil da coluna.

Perfil Tubular	Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Massa Linear (kg/m)	Área (cm ²)	I (cm ⁴)	W (cm ³)
219,1x8,2	219,1	8,2	42,5	54,2	3.020	276

O aço dos perfis é o ASTM A36 e as soldas empregadas são do tipo filete (*Fillet Weld*).

Os protótipos ensaiados diferenciam-se entre si pela modalidade de ligação - soldada ou parafusada - pela existência de diafragmas externos e pela inclusão de enrijecedor no diafragma inferior.

Os parafusos utilizados são do tipo *ASTM-A325*, de 16 mm quando utilizados na alma da viga e de 19 mm quando utilizados na mesa da viga. Todas as vigas possuem enrijecedores na região de aplicação do carregamento.

As figuras de 3.1 a 3.3 detalham a geometria e as dimensões dos protótipos ensaiados. Os protótipos TCR-B e TCRS-B, apresentados na figura 3.3, diferenciam-se apenas pela inclusão do enrijecedor no diafragma inferior no modelo TCRS-B.

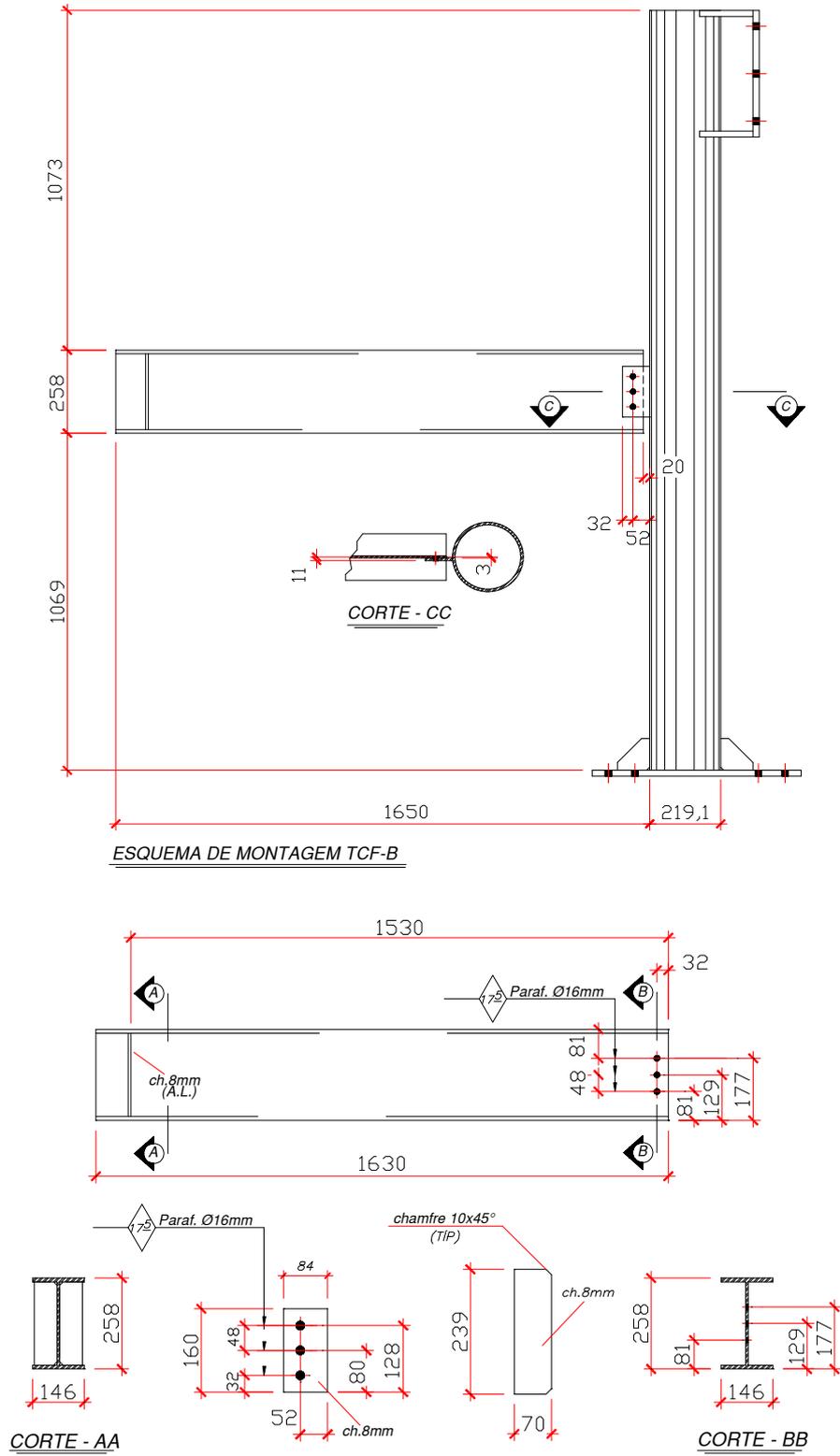


Figura 3.1 - Protótipo TCF-B: Ligação viga-pilar com chapa simples.

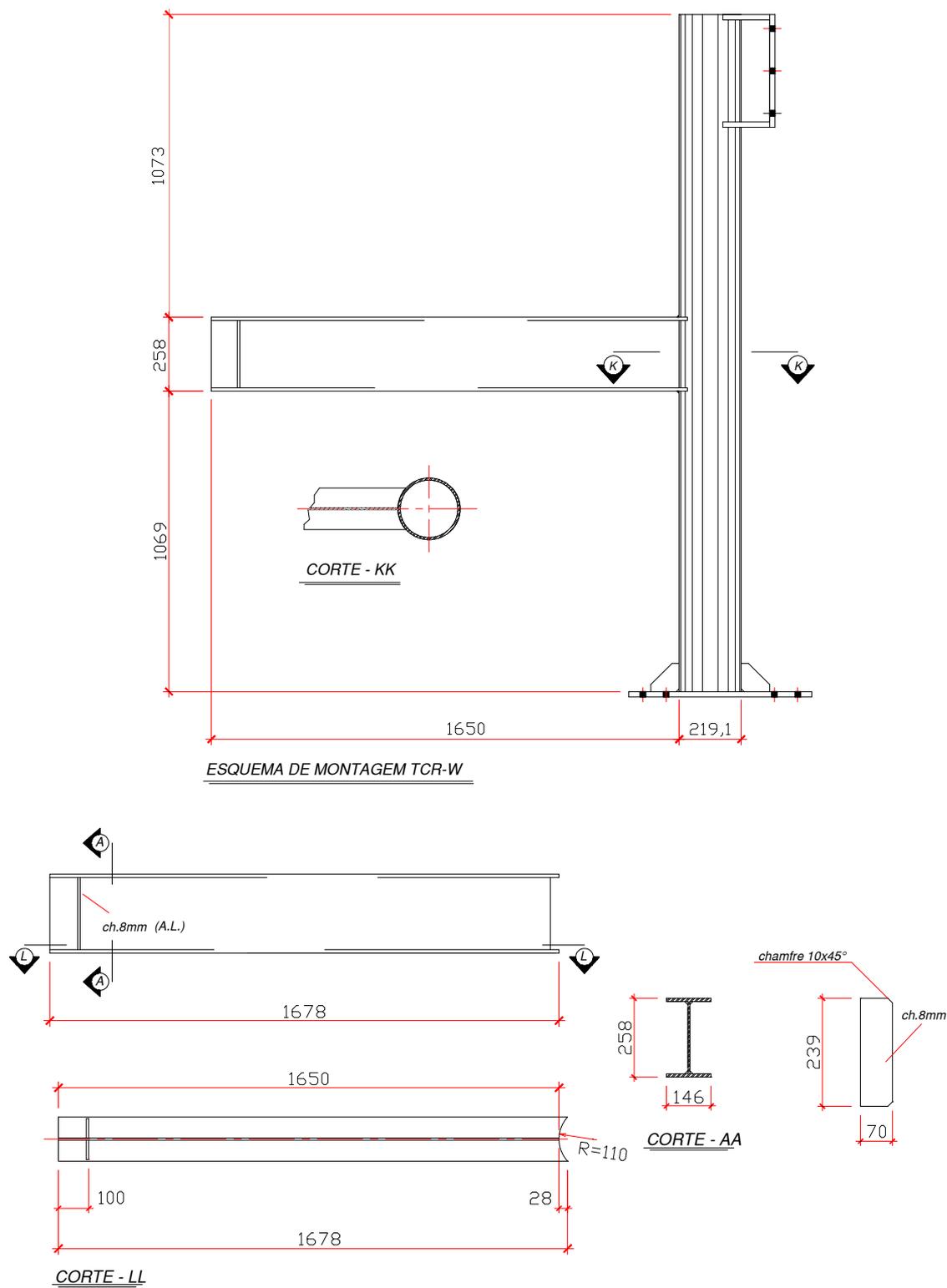


Figura 3.2 - Protótipo TCRW: Ligação viga-pilar soldada.

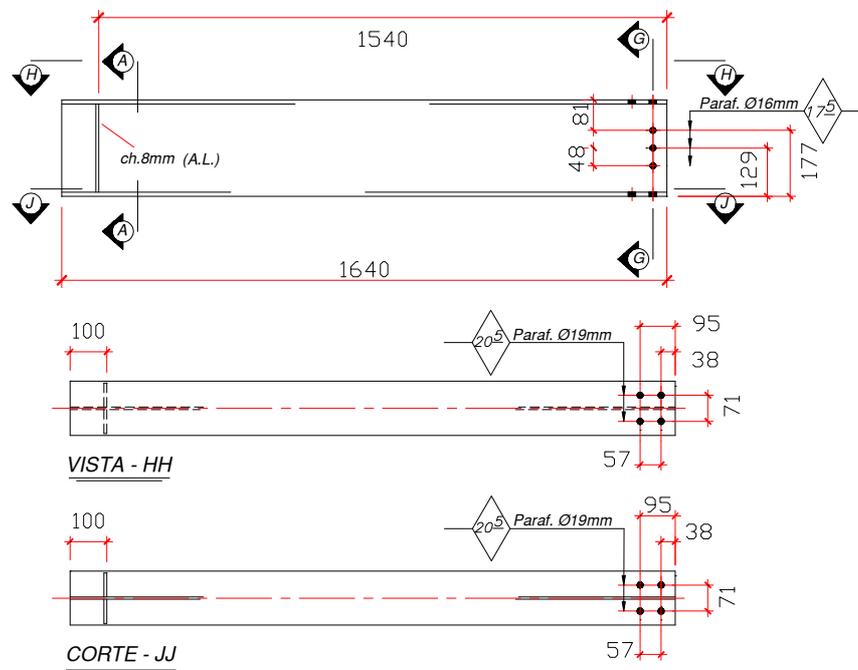
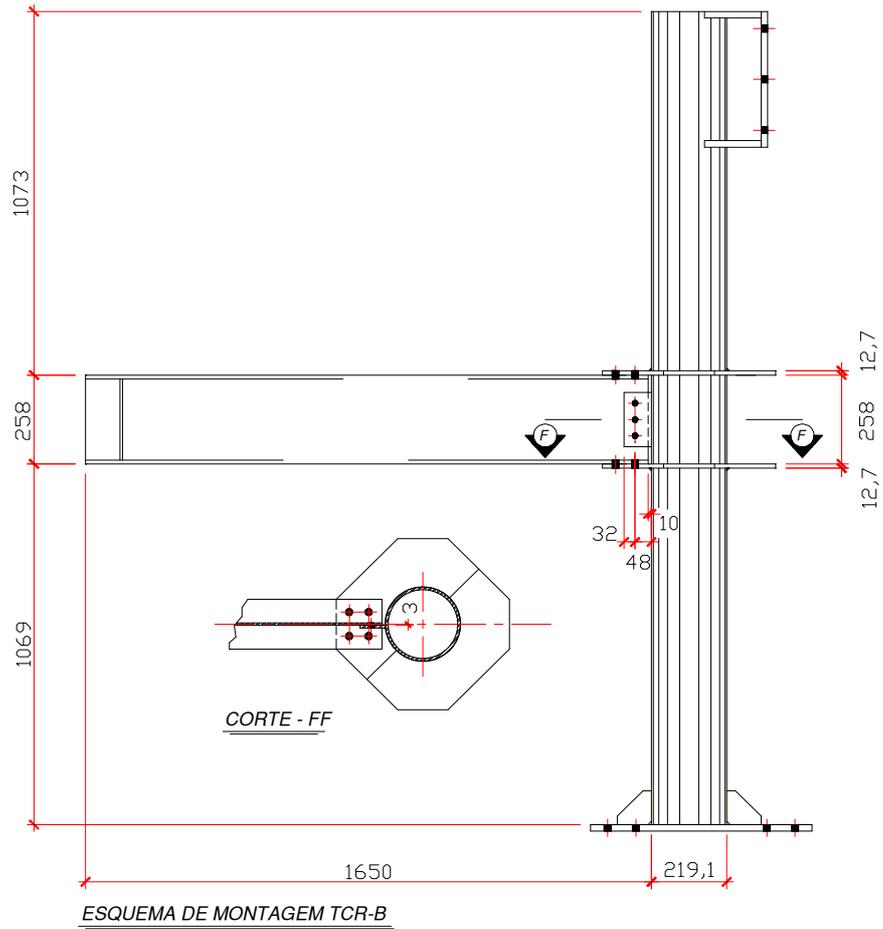


Figura 3.3 - Protótipos TCR-B e TCRS-B: Ligação viga-pilar com anel externo retangular sem e com enrijecedor respectivamente - ligação parafusada na mesa. Continua.

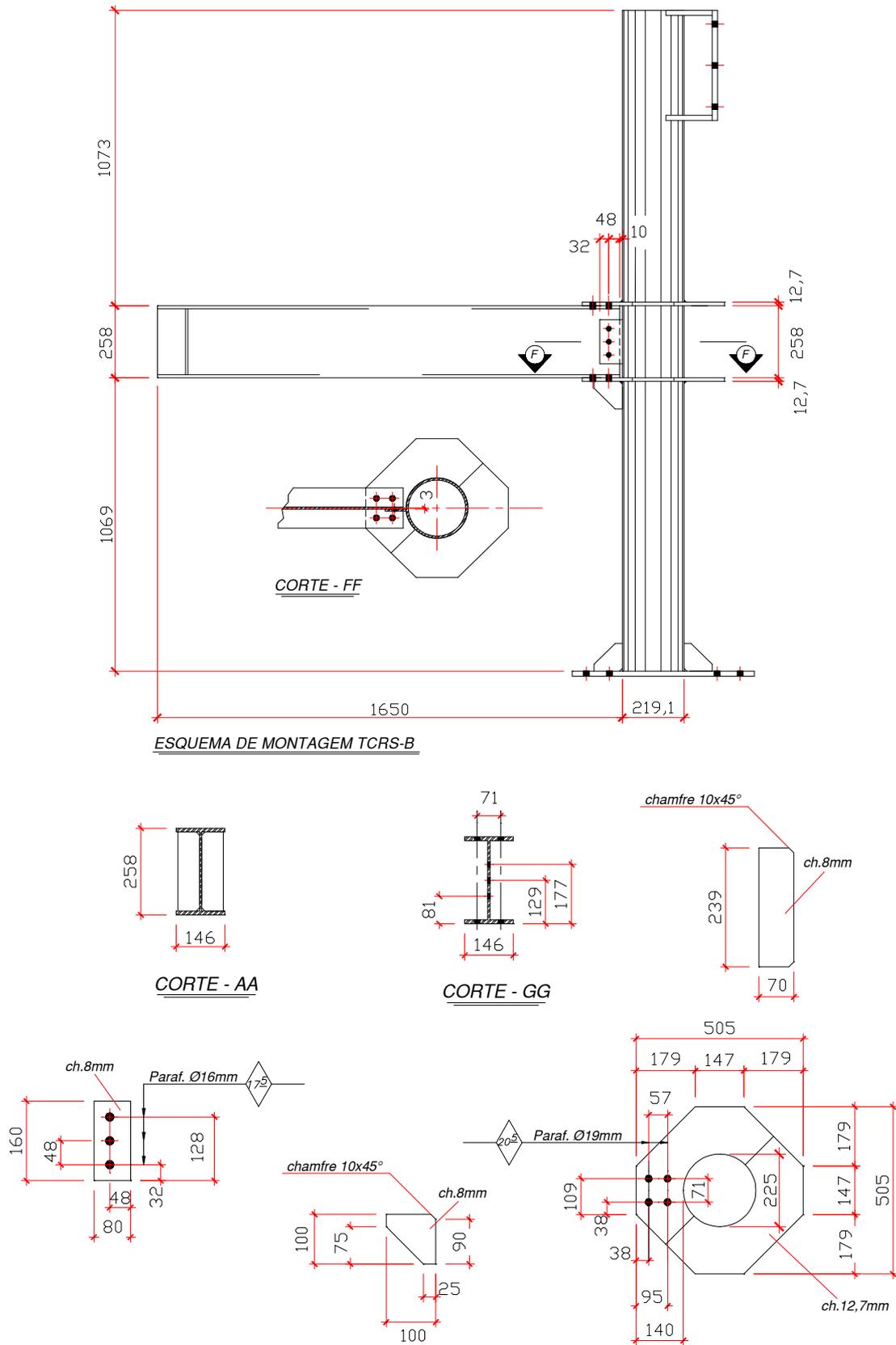


Figura 3.3 - Protótipos TCR-B e TCRS-B: Ligação viga-pilar com anel externo retangular sem e com enrijecedor respectivamente - ligação parafusada na mesa. Conclusão.

3.3 METODOLOGIA E SISTEMA DE ENSAIO

A figura 3.4 ilustra o esquema de ensaio utilizado. A força foi aplicada na extremidade da viga por um atuador hidráulico, com capacidade de carga de 300 kN, posicionado em um pórtico de reação. Não foram aplicadas forças de compressão diretamente no pilar.

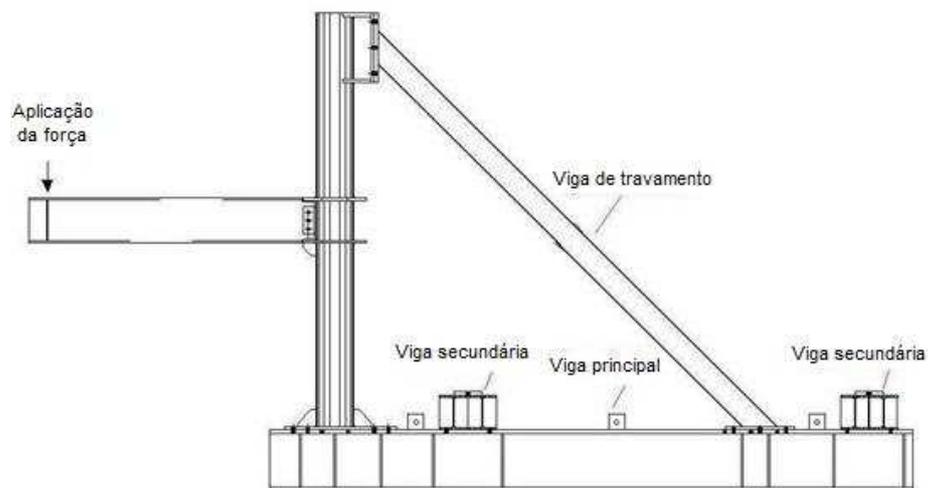


Figura 3.4 – Esquema de ensaio para os modelos de ligação viga-pilar de borda.

Uma trave diagonal, ligando o topo do pilar a uma viga base, foi concebida com o objetivo de restringir os deslocamentos horizontais na extremidade superior do pilar.

A base do pilar foi conectada a uma viga base, que por sua vez, foi conectada às canaletas da laje de reação por meio de vigas de contenção (denominadas de vigas secundárias), perpendiculares à viga base. As vigas secundárias foram constituídas por dois perfis I soldados pelas mesas, o conjunto foi parafusado na viga base e conectado na laje de reação por chumbadores. As fotos na figura 3.5 trazem a visão geral e os detalhes do esquema de ensaio montado.



Esquema geral de ensaio



Visão geral antes do ensaio

Ligação da viga base
com a colunaLigação da viga base
com a viga de travamentoLigação da viga de
travamento com a coluna

Figura 3.5 – Fotos do esquema de ensaio e detalhes.

3.4 INSTRUMENTAÇÃO

A instrumentação dos protótipos foi realizada com base na obtenção do comportamento momento-rotação das ligações, deformações e deslocamentos. Os principais resultados a serem obtidos são:

- a) Deslocamentos verticais da viga para observação da rigidez do conjunto viga-pilar por meio de curvas força-deslocamento e momento-rotação da ligação;
- b) Deslocamentos horizontais do pilar na região de ligação e no topo para interpretação correta da rotação da ligação;

- c) Deformações nas mesas comprimida e tracionada das vigas e no pilar para observação das tensões geradas;
- d) Deformações na alma da viga, ao longo da altura, para observação da mudança de posição da linha neutra.

As figuras de 3.6 a 3.8 indicam a localização e a respectiva numeração dos extensômetros das vigas de cada modelo ensaiado. Também foram utilizadas rosetas na lateral e na face oposta do pilar, na região da ligação, conforme figura 3.9.

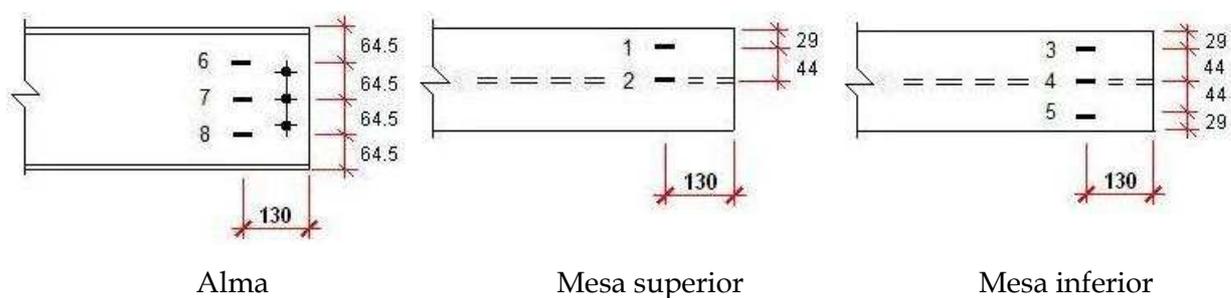


Figura 3.6 - Modelo TCF-B: Posição e numeração dos extensômetros na viga.

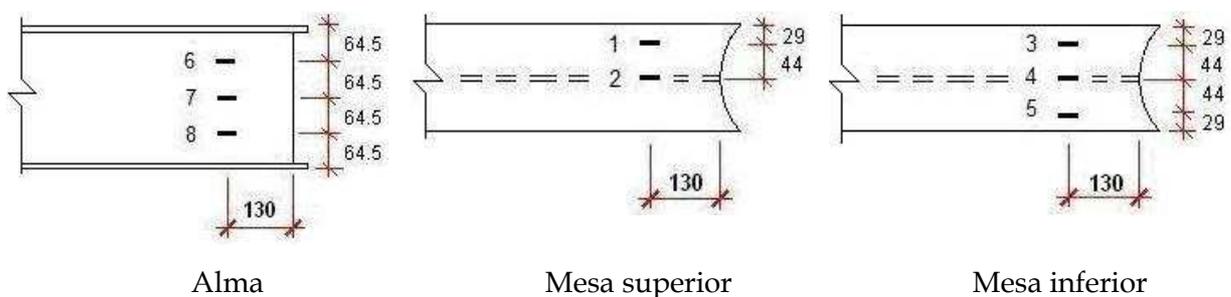


Figura 3.7 - Modelo TCR-W: Posição e numeração dos extensômetros na viga.

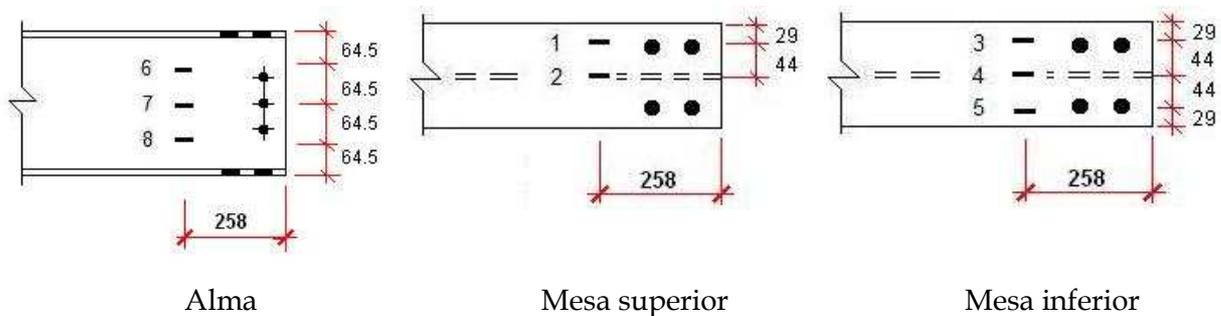


Figura 3.8 - Modelos TCR-B e TCRS-B: Posição e numeração dos extensômetros na viga.

Para medir os deslocamentos horizontais foram posicionados três transdutores no pilar. Os deslocamentos verticais foram obtidos por meio de cinco transdutores de deslocamentos posicionados na mesa inferior da viga. O transdutor da viga posicionado próximo a região da ligação cumpre a função de medir a rotação da ligação. A instrumentação mencionada está indicada na figura 3.9.

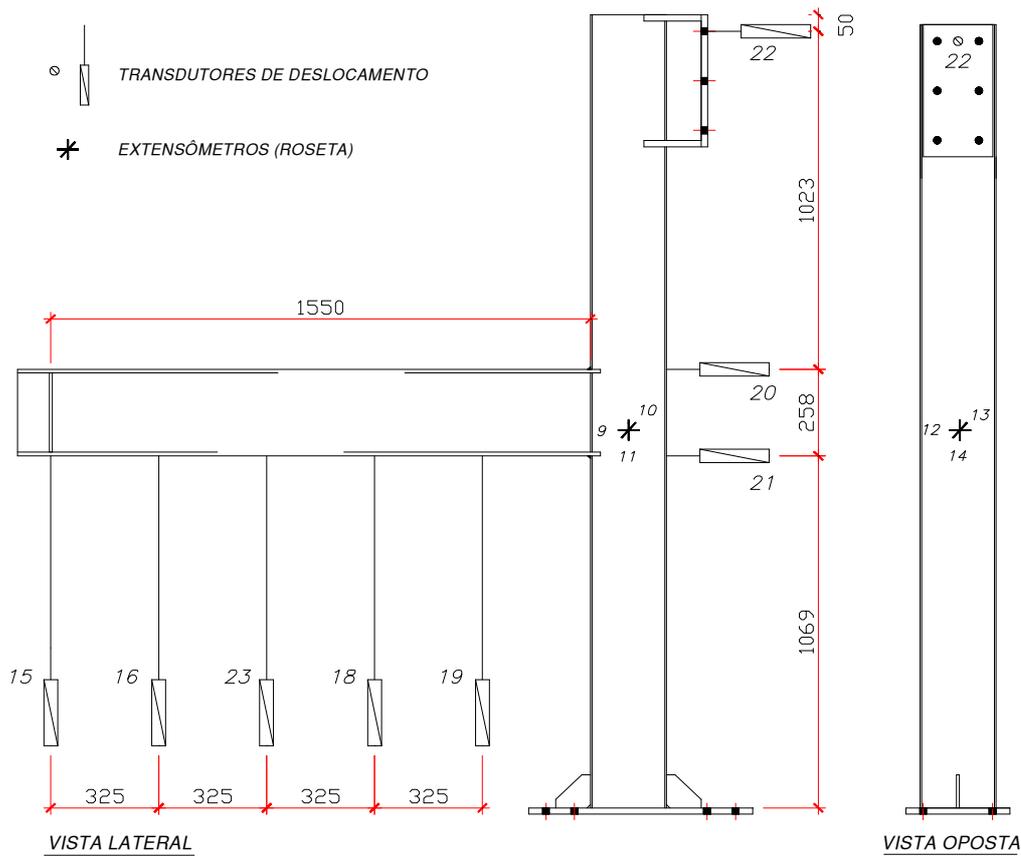


Figura 3.9 - Posição e numeração das rosetas e dos transdutores nos protótipos isolados.

As fotos dos detalhes da extensometria e dos transdutores de deslocamentos podem ser vistos em suas posições finais na figura 3.10. A malha pintada em um dos protótipos mostrado na figura 3.10 tem o objetivo de ajudar na visualização das deformações impostas pelo carregamento à região da alma da viga.



Figura 3.10 – Fotos dos detalhes da instrumentação dos protótipos.

3.5 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

As propriedades mecânicas do aço estrutural são bem definidas e foram obtidas por meio de ensaios de tração.

A caracterização dos aços dos perfis foi realizada em máquina de ensaio universal INSTRON, do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos. Foram ensaiados três corpos de prova de cada elemento, viga, pilar e chapa. A figura 3.11 indica os corpos de provas antes e depois dos ensaios, e a figura 3.12, indica as curvas tensão-deformação para o aço dos perfis. Um dos corpos de prova do pilar não se mostrou representativo e foi excluído da análise.



Figura 3.11 - Fotos dos corpos de prova antes e depois dos ensaios de caracterização.

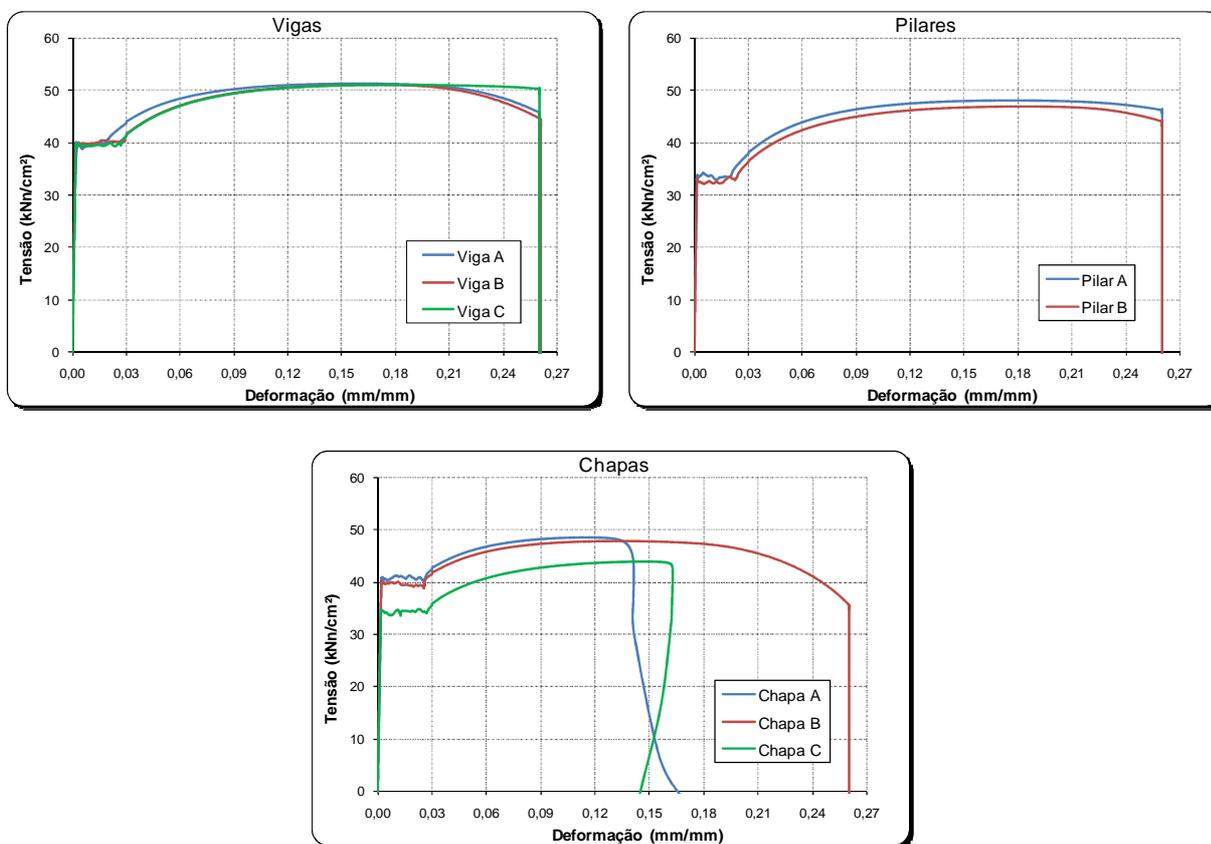


Figura 3.12 - Relação tensão-deformação do aço dos perfis.

O resumo dos resultados médios da caracterização dos aços dos perfis está apresentado na tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Resumo das características dos aços ensaiados (médias).

Corpo de prova	f_y (kN/cm ²)	$F_{m\acute{a}x}$ (kN/cm ²)	F_r (kN/cm ²)	ϵ_r (%)
Viga	40,0	51,3	47,0	26,0
Pilar	33,0	47,3	45,4	26,0
Chapas	38,5	46,8	41,2	18,8
F_y - Tensão de escoamento		F_r - Tensão na ruptura		
$F_{m\acute{a}x}$ - Tensão máxima		ϵ_r (%) - Deformação na ruptura		

3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O programa experimental objetivou a reprodução das ligações viga-pilar tubular de extremidade conhecidas como ligações "T". Toda instrumentação foi concebida de maneira a obter comparações com os modelos numéricos desenvolvidos.

Para estabelecer comparações, os resultados da caracterização dos aços dos perfis foram utilizados no modelo constitutivo dos modelos numéricos.

Os resultados mais relevantes dos ensaios experimentais, bem como as comparações com os modelos numéricos e analíticos do Eurocode 3 (2005), estão apresentados no capítulo 5.

4 MODELAGEM NUMÉRICA

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo apresenta a descrição da modelagem numérica em elementos finitos a qual busca representação realista do comportamento de ligações entre viga de seção tipo I e coluna tubular. A comparação com os resultados experimentais permitirá avaliar as premissas adotadas nesse capítulo.

Nesse trabalho foram desenvolvidos modelos numéricos tridimensionais com considerações de não-linearidade física dos materiais e não-linearidade geométrica. O regime de grandes deslocamentos foi considerado afim de melhor representar os fenômenos de instabilidades geométricas localizadas. A metodologia adotada segue as recomendações dos trabalhos desenvolvidos por Maggi (2000), Maggi (2004) e Freitas (2009).

As análises numéricas foram realizadas utilizando o *software Ansys®*. A geração da malha de elementos finitos foi realizada por meio de um *software* específico de pré-processamento, denominado de *TrueGrid®*.

No *software TrueGrid®* foram realizadas as seguintes etapas:

- a) Definição da geometria;
- b) Construção da malha de elementos finitos;

Posteriormente, no *software Ansys®*, as etapas listadas abaixo foram realizadas:

- c) Importação da malha produzida no *TrueGrid®*;
- d) Adoção dos elementos finitos utilizados no modelo;
- e) Definição dos modelos constitutivos dos materiais envolvidos;

- f) Aplicação das condições de contorno;
- g) Aplicação da força de protensão nos parafusos (se houver);
- h) Aplicação do carregamento na viga;
- i) Processamento;
- j) Visualização dos resultados.

Toda análise se deu por meio de arquivos parametrizados que possibilitaram grande produtividade e liberdade para alteração das variáveis envolvidas.

4.2 GEOMETRIA DOS MODELOS

A geometria dos modelos numéricos foi definida com base nos modelos apresentados no capítulo 3, figuras de 3.1 a 3.3. Procurou-se manter as características geométricas das vigas, pilares e chapas conforme exemplo da figura 4.1.

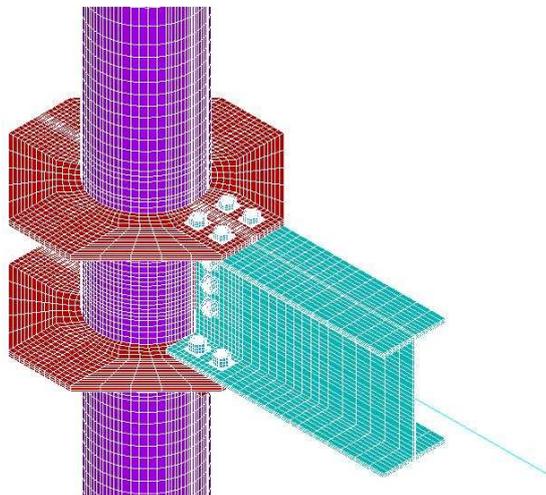


Figura 4.1 - Geometria de um dos modelos numéricos construídos.

4.3 ELEMENTOS FINITOS UTILIZADOS

Para obter respostas numéricas satisfatórias é necessário adequar o tipo de elemento finito à região da ligação estudada, isso é feito em função da solicitação ao

qual a região está submetida. Aspectos relacionados à geometria e as considerações feitas na representação do modelo também são importantes.

Foram utilizados três tipos de elementos finitos. O primeiro tipo, elemento volumétrico, foi escolhido para representar a geometria do modelo; o segundo tipo, elemento de contato, foi escolhido para representar as descontinuidades geométricas; o terceiro e último tipo, elemento de barra, foi escolhido para representação do prolongamento da região central da viga, procedimento proposto por Maggi (2004) para minimizar esforços computacionais.

4.3.1 Elemento volumétrico

O elemento volumétrico denominado pelo *Ansys*® de *SOLID45* foi utilizado para modelar os componentes da ligação (coluna, viga, chapa e parafuso). Esse elemento possui oito nós, cada um com três graus de liberdade, sendo eles translação nas direções X, Y e Z (figura 4.2). Ainda permite considerar plasticidade, fluência, grandes deformações e deslocamentos, além de admitir a utilização de diagrama multilinear para representação do comportamento tensão-deformação.

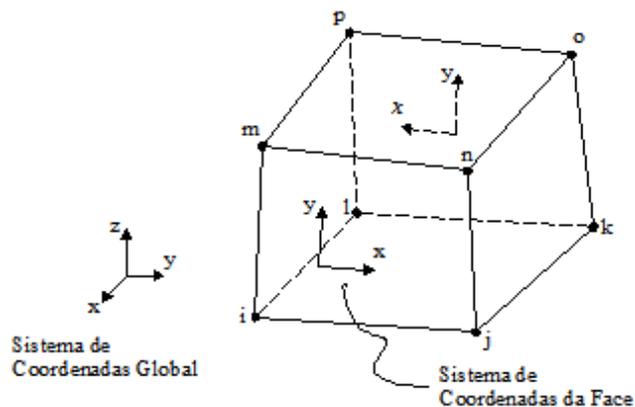


Figura 4.2 - Elemento sólido tridimensional. Fonte: Ansys®.

Alguns autores relatam que esse tipo de elemento linear pode apresentar uma resposta desfavorável para esforços de flexão devido a um efeito numérico denominado de “*shear locking*”, que provoca o aumento da rigidez do elemento finito.

Para minimizar esse efeito foram considerados os modos incompatíveis de deslocamento, possibilitando graus de liberdade adicionais, e fictícios, que utilizam campos mistos de deslocamento de maneira minimizar o aumento de rigidez do elemento.

Maggi (2004) relata que esse efeito também pode ser minimizado pela utilização de elementos com funções de interpolação quadráticas, o que levaria a um aumento significativo do número de nós por elemento.

Contudo, para problemas de plasticidade, Maggi (2004) relata que elementos com interpolação linear apresentam melhores resultados quando comparados a elementos de ordem mais alta. Isso acontece devido ao fato dos elementos de interpolação linear permitirem descontinuidades no campo dos deslocamentos.

4.3.2 Elemento de barra

Objetivando a diminuição dos graus de liberdade do modelo, a viga foi discretizada em dois seguimentos. O primeiro seguimento, próximo a região da ligação, foi discretizado com elementos volumétricos. O segundo seguimento, que complementa o comprimento da viga em região sem grande influência da ligação, foi discretizado com elementos de barra - unidimensionais - uma vez que a região mais afastada da ligação tende a permanecer em regime elástico linear.

Para garantir a continuidade entre os elementos volumétricos e os de barra é realizado o acoplamento dos graus de liberdade nos nós de interseção dos dois tipos de elementos (figura 4.6).

O elemento escolhido - *BEAM3* - apresenta dois nós, sendo três graus de liberdade por nó (translações em x e y , e rotação em torno do eixo z), figura 4.3. Este elemento não permite deformações axiais plásticas, portanto todas as tensões se desenvolvem no regime elástico.

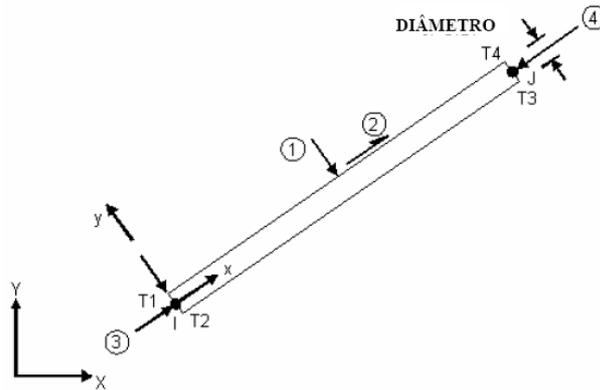


Figura 4.3- Elemento uniaxial elástico. Fonte: Ansys®.

4.3.3 Elementos de contato

Para representar as descontinuidades geométricas foram utilizados elementos de contato. Esses elementos introduzem novos termos na matriz de rigidez, possibilitando a geração de esforços quando uma superfície é comprimida à outra - tendência de penetração - e possibilitando a separação das superfícies quando houver solicitações de tração.

Para estabelecer as superfícies de contato na análise numérica desse trabalho foram escolhidos na biblioteca do *Ansys*® dois elementos de contato denominados de *TARGE170* e *CONTA173*.

O elemento *TARGE170* define as superfícies deformáveis do corpo (alvo) enquanto o elemento *CONTA173* define as superfícies que exercem ação de penetração nas superfícies alvo, figura 4.4.

Esses elementos representam a formulação de contato denominado superfície-superfície que permite a inclusão de funções de penalidade, além da utilização conjunta de multiplicadores de Lagrange, melhorando a convergência da solução numérica.

Foram definidos para cada par de contatos características quanto à rigidez normal e tangencial, atrito e tolerância de penetração.

A resistência à penetração é dada pela rigidez normal ($FKN = 1,0$). No *Ansys*® esse fator pode variar de 0,01 a 10. Segundo Tristão (2006), a rigidez normal pode

variar em função da discretização da malha. Valores menores desse coeficiente implicam em maior facilidade de convergência, porém com maior penetração.

A rigidez tangencial é proporcional a rigidez normal e ao coeficiente de atrito ($\mu = 0,3$), portanto dado pelo *Ansys*® de forma automática. Esse fator é importante para que se considerem os efeitos de escorregamento entre as superfícies.

A tolerância de penetração é fornecida pelo coeficiente ($FTOLN = 0,1$). Esse fator deve ser menor que 1,0 e segundo Carvalho (2005) geralmente menor que 0,2.

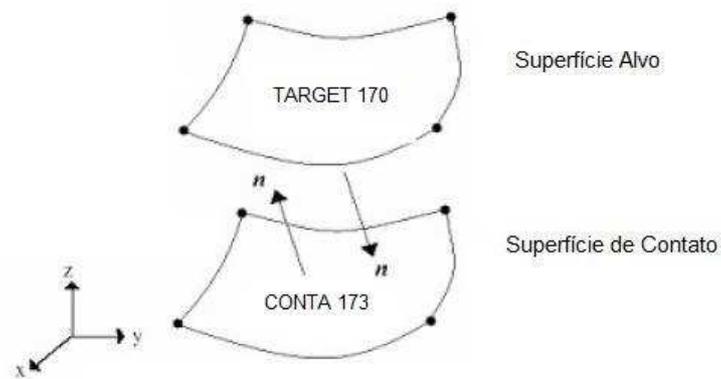


Figura 4.4 - Par de contatos: TARGE170 e CONTA173.

4.4 DISCRETIZAÇÃO (CONSTRUÇÃO DAS MALHAS DE ELEMENTOS FINITOS)

A construção das malhas de elementos finitos é fator de grande relevância sobre o sucesso da análise numérica. Toda construção das malhas foi realizada no software *TrueGrid*®, o qual permitiu a utilização de uma malha regular para a representação das características físicas reais dos modelos.

Vigas e colunas foram discretizadas de maneira a obter maior concentração de elementos nas regiões próximas à ligação, uma vez que esta é a região de interesse para o estudo. A figura 4.5 apresenta a malha de elementos finitos da coluna.

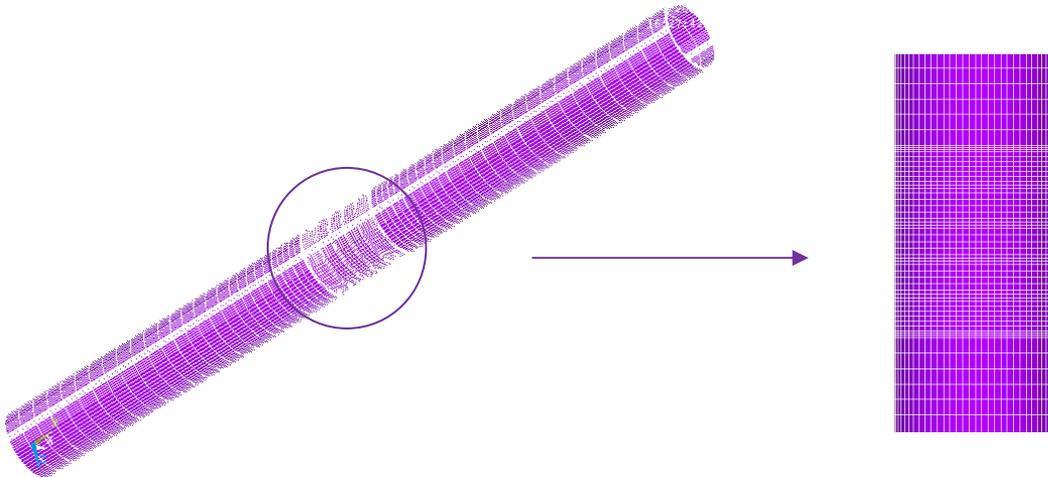


Figura 4.5 - Discretização da coluna.

Conforme exposto anteriormente, para a construção da malha da viga foram utilizados elementos finitos volumétricos - na região de influência da ligação - e elementos de barra, na extremidade livre da viga. Devido aos bons resultados alcançados por Maggi (2004) e Freitas (2009) a região da viga sob influência da ligação foi admitida com duas vezes a altura da viga.

A transmissão dos deslocamentos e rotações dos elementos de barra para os elementos volumétricos foi garantida através do acoplamento dos graus de liberdade do primeiro nó do trecho com elementos de barra com todos os nós presentes na última seção do trecho com elementos volumétricos. A figura 4.6 traz a discretização da viga e o acoplamento realizado.

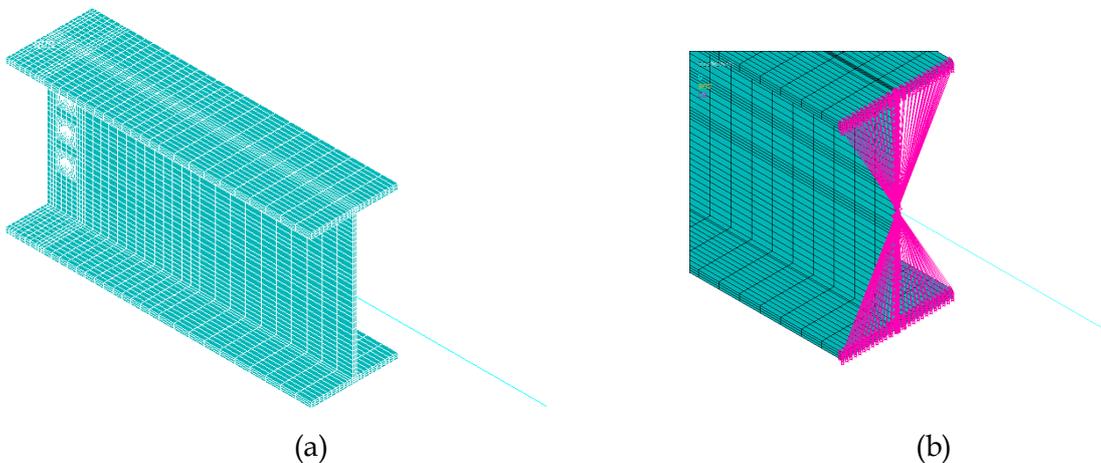


Figura 4.6 - Discretização da viga (a) e compatibilização dos deslocamentos dos nós na seção de interface dos elementos sólidos (b).

A compatibilização citada pode ser entendida pela definição do nó, na qual o primeiro elemento de barra está ligado aos elementos volumétricos, como nó “mestre” e os demais nós dos elementos volumétricos situados na mesma seção, como nós “escravos”. Assim, por meio das equações de compatibilidade (eqs. 4.1 e 4.2), defini-se os deslocamentos e rotações dos nós escravos.

$$u_S = u_M - y \cdot \theta_M \quad (4.1)$$

$$v_S = v_M \quad (4.2)$$

Onde:

u_S é o deslocamento dos nós escravos, na direção do eixo longitudinal da viga;

u_M é o deslocamento do nó mestre na direção do eixo longitudinal da viga;

y é a distância vertical entre o eixo longitudinal da viga e o nó em questão;

θ_M é a rotação do nó máster, em torno do eixo perpendicular ao plano da ligação;

v_S é o deslocamento vertical dos nós escravos;

v_M é o deslocamento vertical do nó mestre.

A consideração de simetria não foi utilizada uma vez que existe excentricidade entre a chapa de alma e a coluna, figura 4.7. Tal excentricidade pode influenciar o comportamento global do modelo e induzir perturbações localizadas na face da coluna.

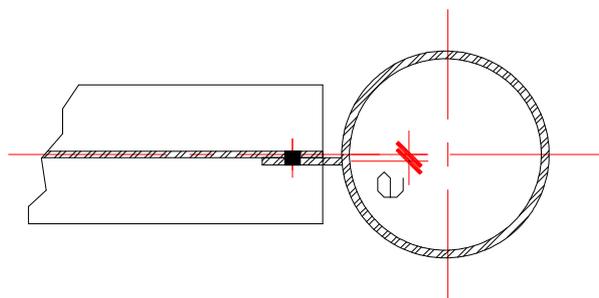
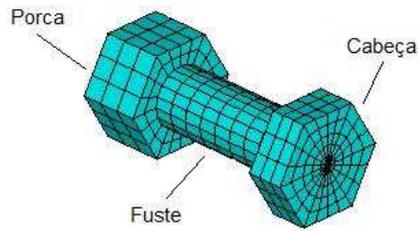


Figura 4.7 - Excentricidade da chapa de alma em relação ao eixo da coluna.

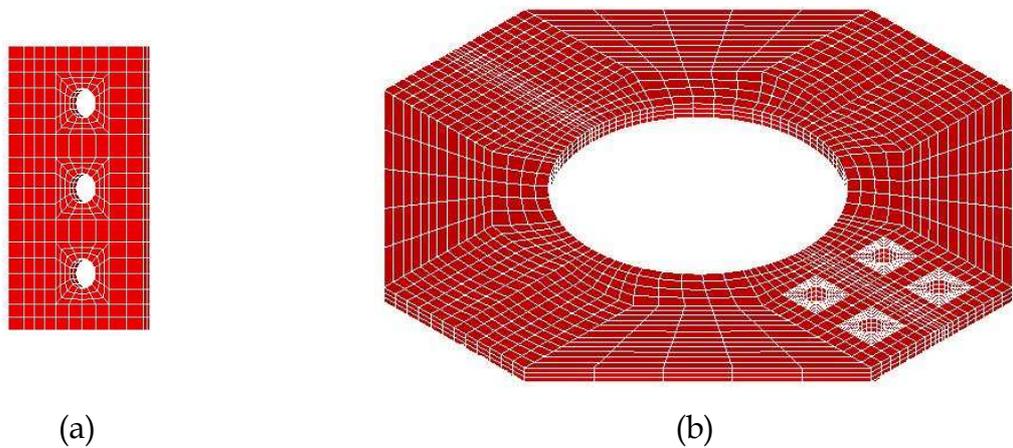
Os parafusos e as porcas foram discretizados considerando-os como um único sólido. A cabeça do parafuso é hexaédrica (seis lados) e o fuste possui comprimento

igual à soma das espessuras das chapas compreendidas entre a cabeça e a porca, figura 4.8.



4.8 - Discretização dos parafusos.

As chapas de ligação e os diafragmas externos foram discretizados conforme apresentado na figura 4.9. Em todos os furos foram considerados folgas em relação ao diâmetro dos parafusos, conforme a NBR 8800.



4.9 - Discretização da chapa de ligação (a) e do diafragma externo (b).

4.5 MODELOS CONSTITUTIVOS DOS MATERIAIS

A determinação da rigidez inicial das ligações é influenciada pelas características elásticas dos materiais, pelas características geométricas e pela tipologia do carregamento.

Porém, as representações do desenvolvimento de deformações plásticas, redistribuições de tensões e colapso, dependem fundamentalmente dos modelos constitutivos dos materiais.

Para melhor caracterização dos materiais envolvidos na análise adotou-se diagramas multilíneares para a representação do comportamento tensão-deformação dos aços utilizados.

A figura 4.10 mostra o modelo constitutivo adotado para o aço das vigas, colunas e chapas. O modelo constitutivo do aço dos parafusos está apresentado na figura 4.11. Os modelos foram inicialmente propostos por Bahaari & Sherbourne (1996) e Kulak ET al. (1987), respectivamente. Maggi (2004) calibrou as curvas e foi o responsável pela adição do trecho final descendente indicado como colapso nas figuras. Esse trecho ocorre após a tensão última do material e termina no ponto de deformação 1% maior que a deformação última. Tristão (2006) relata que este trecho leva a não convergência da solução numérica, caracterizando assim a ruptura do material.

A tabela 4.1 recorda os dados da caracterização das vigas, colunas e chapas, bem como traz os dados nominais dos parafusos e os valores do módulo de elasticidade longitudinal (E) e do coeficiente de Poisson (ν) utilizados na análise numérica.

A plastificação foi caracterizada tendo em vista as tensões equivalentes de Von Mises, o modelo de encruamento adotado foi isótropo.

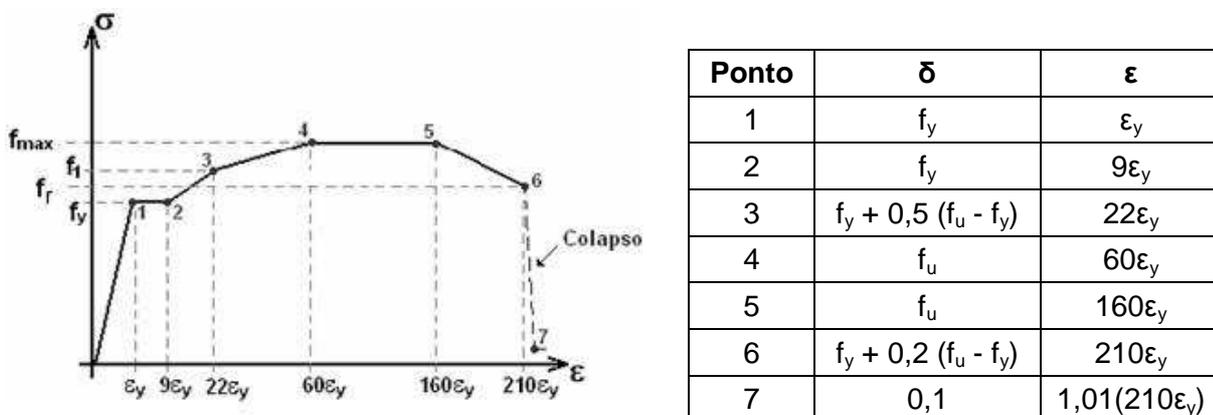


Figura 4.10 - Diagrama multilinear para as vigas, colunas e chapas. Fonte: Maggi (2004).

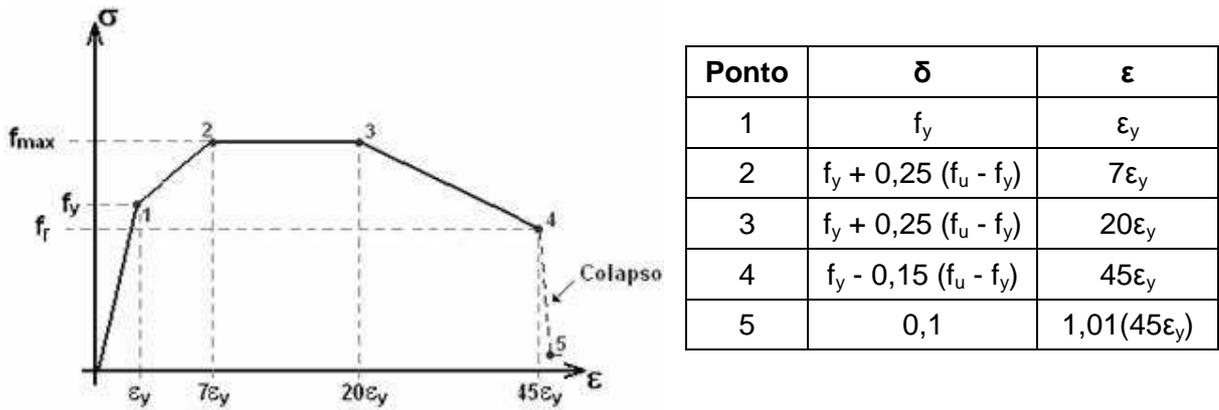


Figura 4.11 - Diagrama multilinear para os parafusos. Fonte: Maggi (2004).

4.1 - Valores utilizadas na análise numérica.

Elemento	F_y (kN/cm ²)	F_u (Fmáx) (kN/cm ²)
Viga	40,0	51,3
Pilar	33,0	47,3
Chapas	38,5	46,8
Parafusos	63,5	82,5
E=20500MPA		
ν=0,3		

4.6 CONDIÇÕES DE CONTORNO E CARREGAMENTO

Todos os nós pertencentes às seções da extremidade inferior e da extremidade superior da coluna foram impedidos de transladar e rotacionar em qualquer uma das três direções ortogonais. Tais restrições de deslocamento impedem deslocamento de corpo rígido, garantindo a não singularidade da matriz de rigidez.

Quanto ao carregamento, foi aplicado em duas etapas. A primeira etapa correspondeu a protensão nos parafusos, a segunda correspondeu ao carregamento da viga, realizado em pequenos passos (incrementos) até que fossem atingidos os estados limites últimos da ligação.

Assim como na análise experimental, não foi considerada a compressão axial da coluna.

4.6.1 Protensão nos parafusos

A protensão dos parafusos se deu por meio de variações negativas de temperatura impostas ao fuste. Como porca e cabeça do parafuso estão restringidos pelas chapas, surgem tensões de tração no fuste e consequentemente pressões de contato entre as chapas conectadas pelos parafusos.

A variação de temperatura adotada foi calculada de modo a resultar em uma força de protensão de 91kN para parafusos de 16 mm e de 125kN para parafusos de 19mm. Esses valores correspondem a aproximadamente 70% da resistência característica a tração do parafuso dada pela NBR 8800 (2008), e podem ser obtidos pela equação 4.3. O coeficiente de dilatação térmica adotado (α_t) foi de 1×10^{-5} e o comprimento do fuste foi definido pela soma das espessuras das chapas conectadas.

$$T_b = 0,49 \cdot A_b \cdot f_{ub} \quad (4.3)$$

Onde:

A_b é a área bruta do parafuso;

f_{ub} é a resistência à ruptura do aço do parafuso.

Tal procedimento é vantajoso uma vez que todos os modelos constitutivos aplicados na modelagem são independentes da temperatura, portanto não altera as características mecânicas dos materiais.

4.6.2 Aplicação das ações

A fim de produzir rotações na região da ligação, a viga foi solicitada à flexão por meio de força aplicada em sua extremidade - último nó do trecho representado por elementos de barra - figura 4.12. Tal carregamento se deu por meio da imposição de deslocamento negativo segundo a direção y. A substituição do processo convencional de aplicação de força busca maior rapidez e estabilidade para a convergência do modelo.

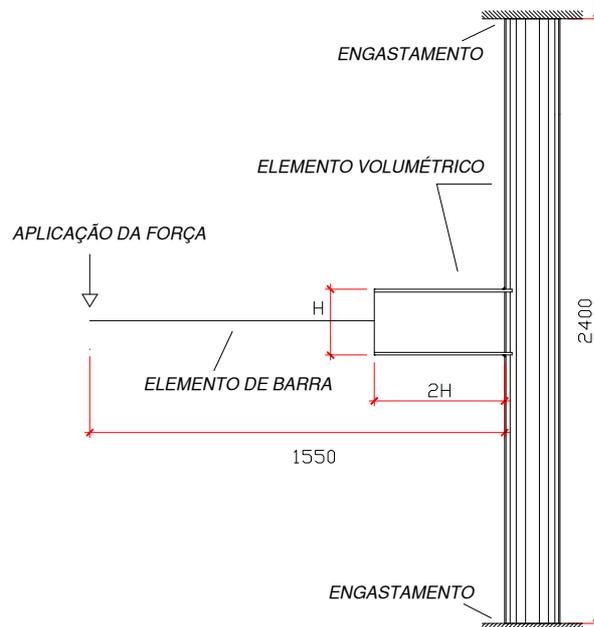


Figura 4.12 - Esquema de aplicação de força no modelo numérico.

4.7 SOLUÇÃO INCREMENTAL- ITERATIVA

A consideração da plasticidade dos materiais e da não linearidade geométrica caracteriza o comportamento não linear do modelo. Nesse caso é necessário subdividir o carregamento em incrementos através de um processo iterativo para atingir o equilíbrio do modelo.

As análises não lineares foram realizadas utilizando-se do método Newton-Raphson Full, onde a rigidez é alterada em cada iteração. Nesse método o tamanho

da etapa de carregamento é definido indicando-se a amplitude dos incrementos de carga, sendo o controle dado de forma automática em função do não atendimento das condições de convergência.

Observando o trecho final descendente dos diagramas tensão-deformação apresentados nas figuras 4.10 e 4.11, percebe-se que a rigidez dos elementos cai a níveis baixíssimos, e para os critérios de convergência adotados, dificilmente se atingirá o equilíbrio, caracterizando-se o colapso da ligação simulado pela não convergência do modelo.

4.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse capítulo foram apresentadas as etapas da construção dos modelos numéricos. A geometria dos modelos foi definida com base nos protótipos experimentais apresentados no capítulo 3. Mostrou-se que a geração das malhas foi realizada no *software TrueGrid®* e a aplicação das condições de contorno, carregamento e processamento foram realizadas no *software Ansys®*. Toda a análise foi realizada por meio de arquivos parametrizados que permitiram maior produtividade e precisão na construção da malha de elementos finitos.

Para a consideração da plasticidade dos materiais e da não linearidade geométrica, o carregamento foi subdividido em incrementos através de um processo interativo para atingir o equilíbrio do modelo. As análises não lineares foram realizadas utilizando-se do método Newton-Raphson Full, onde a rigidez é alterada em cada iteração.

5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Esse capítulo apresenta e estabelece comparações entre os resultados experimentais, numéricos e analíticos (Eurocode 3). Assim foi possível a discussão dos principais aspectos que influenciam no comportamento das ligações entre viga de seção I e coluna tubular.

Os resultados numéricos e analíticos foram obtidos utilizando os resultados da caracterização dos aços do programa experimental.

5.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados descritos referem-se ao comportamento força-deslocamento ($F-D$), momento-rotação ($M-\Phi$) e deformações nas vigas e coluna. O momento fletor considera a distância do ponto de aplicação da força até a face da coluna.

5.2.1 Força vs deslocamento ($F-D$) e momento vs rotação ($M-\Phi$)

A tabela 5.1 traz a força máxima aplicada pelo atuador e o deslocamento máximo na ponta da viga para cada um dos protótipos ensaiados.

Na tabela 5.2 estão apresentados o momento resistente último (M_n) e o momento para uma rotação de 0,02 rad ($M_{\theta=0.02rad}$), que segundo o Eurocode 3 (2005) é a rotação a partir da qual deve ser tomado o momento de plastificação (M_n) quando

o diagrama $M-\Phi$ não apresentar ponto de máximo. A tabela 5.2 também traz a rotação quando atingido M_n (θ_{Mn}) e a rigidez inicial das ligações (S_{jini}).

Tabela 5.1 - Valores de força *vs* deslocamento.

Modelo	Força Máxima no Atuador (kN)	Deslocamento (mm)
TCF-B	4,5	107
TCR-W	57,5	57
TCR-B	102,0	75
TCRS-B	113,7	93

Tabela 5.2 - Valores de M_n , θ_{Mn} , $M_{\theta=0,02rad}$ e S_{jini} .

Modelo	M_n (kN.m)	θ_{Mn} (rad)	$M_{\theta=0,02rad}$ (kN.m)	S_{jini} (kN.m/rad)
TCF-B	7,6	0,041	2,7	110
TCR-W	95,4	0,027	94,0	8.610
TCR-B	181,3	0,037	136,6	9.990
TCRS-B	189,6	0,036	145,6	10.860

As curvas $F-D$ e $M-\Phi$ para o modelo TCF-B, são mostradas na figura 5.1. A apresentação dos resultados do modelo TCF-B é feita de forma separada dos demais modelos, dada a grande diferença de escala na apresentação dos resultados.

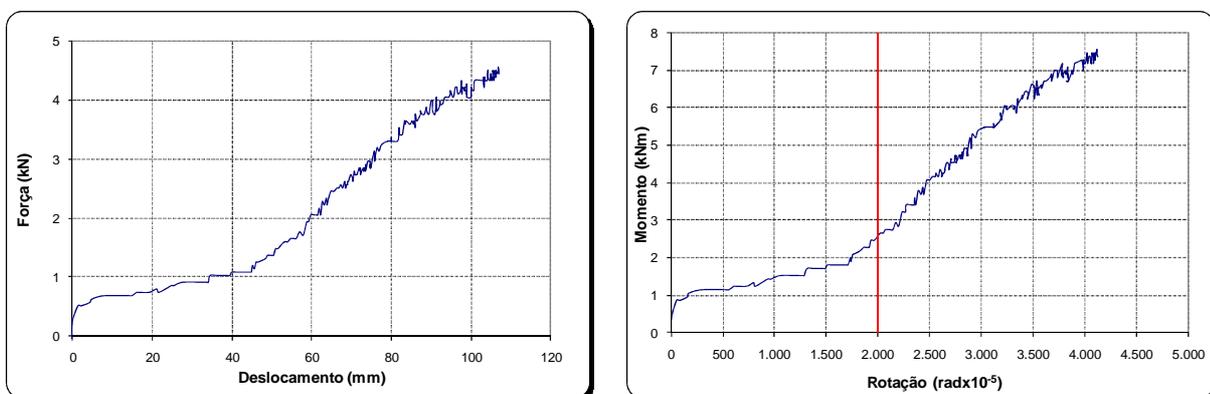
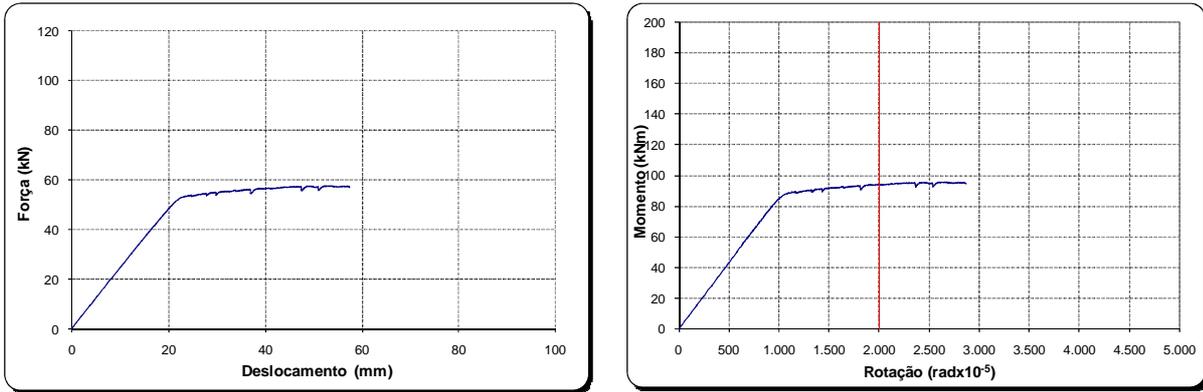


Figura 5.1 - Curva $F-D$ para o ponto de aplicação da força e comportamento $M-\Phi$ do modelo TCF-B.

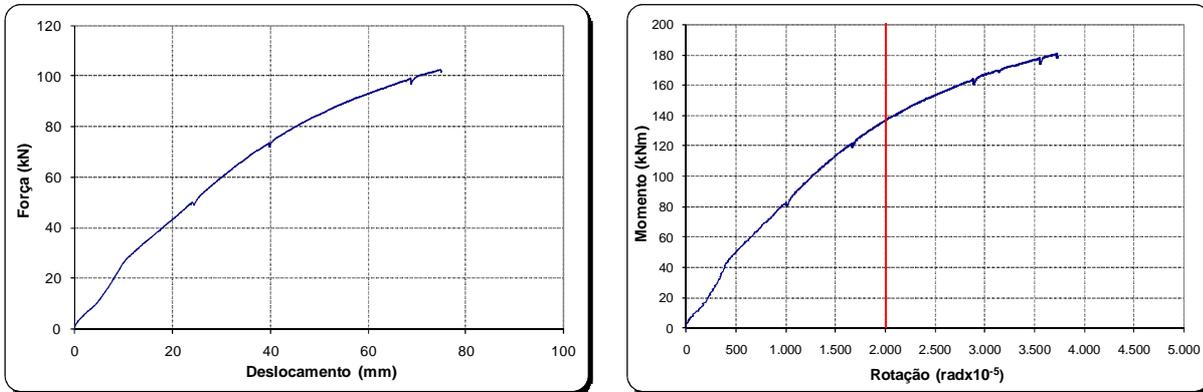
O ensaio da ligação TCF-B foi limitado pelo grande deslocamento vertical apresentado pela viga, dada sua natureza articulada. Os resultados experimentais do modelo de maneira geral já são conhecidos. A validação de modelos numéricos e uma futura análise em situação de viga bi apoiada justificaram a análise experimental da ligação.

As curvas $F-D$ e $M-\Phi$ para os modelos TCR-W, TCR-B e TCRS-B são apresentadas na figura 5.2.

TCR-W



TCR-B



TCRS-B

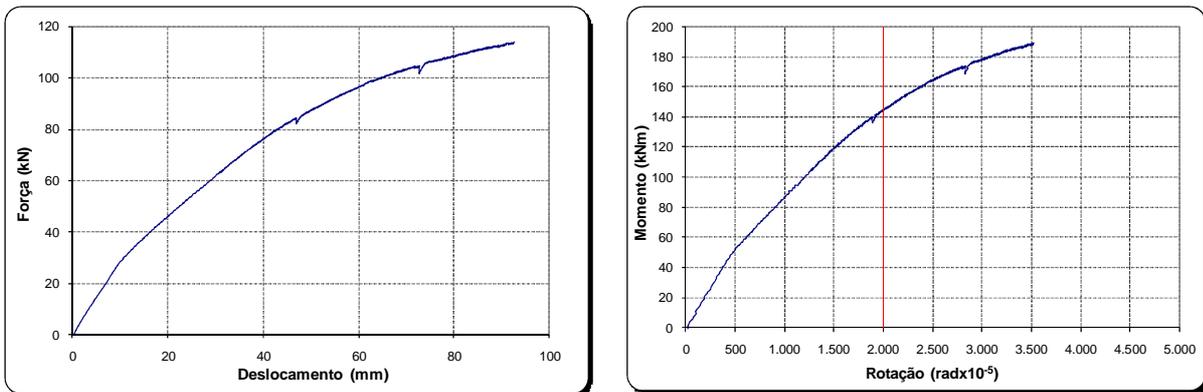


Figura 5.2 - Curvas $F-D$ para o ponto de aplicação da força e comportamento $M-\Phi$.

O modelo TCR-W apresentou patamar de escoamento bem definido. As excessivas deformações justificaram a paralisação do ensaio como medida de preservação dos equipamentos.

Os modelos TCR-B e TCRS-B mostram-se mais rígidos. Após a definição dos modos de colapso, seus respectivos ensaios foram paralisados, também sob a

justificativa da preservação dos equipamentos, uma vez que os parafusos poderiam apresentar ruptura frágil.

5.2.2 Deformações longitudinais na alma da viga

Para cada protótipo são apresentadas as deformações na viga para uma seção próxima a ligação, conforme figuras 5.4 e 5.5. A figura 5.3 mostra a disposição dos extensômetros. A distância dos extensômetros até a extremidade da viga, D , é de 130mm para os modelos TCF-B e TCR-W e de 258mm para os modelos TCR-B e TCRS-B. Os detalhes da extensometria das vigas podem ser vistos nas figuras 3.6, 3.7, 3.8.

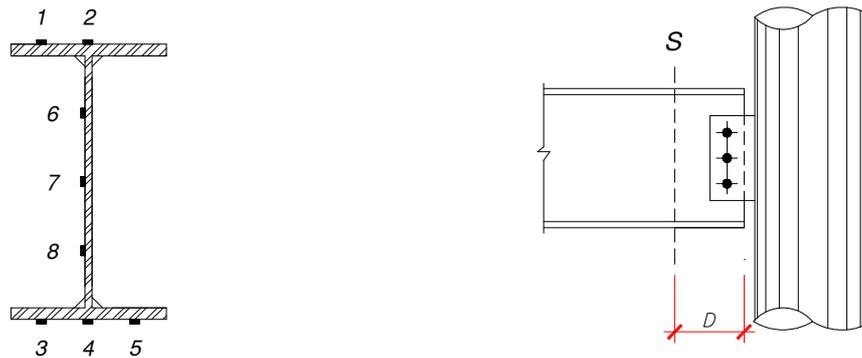


Figura 5.3 - Disposição dos extensômetros na alma e na mesa da viga.

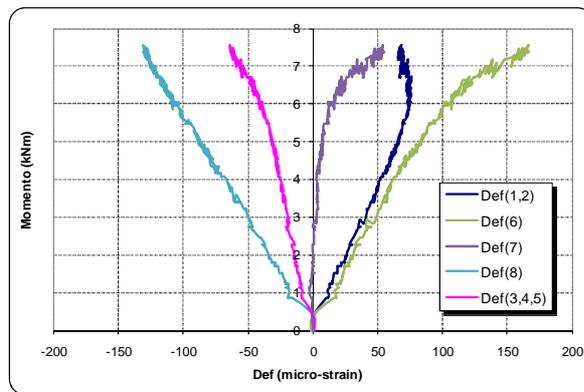


Figura 5.4 - Deformações longitudinais na alma e na mesa da viga do modelo TCF-B.

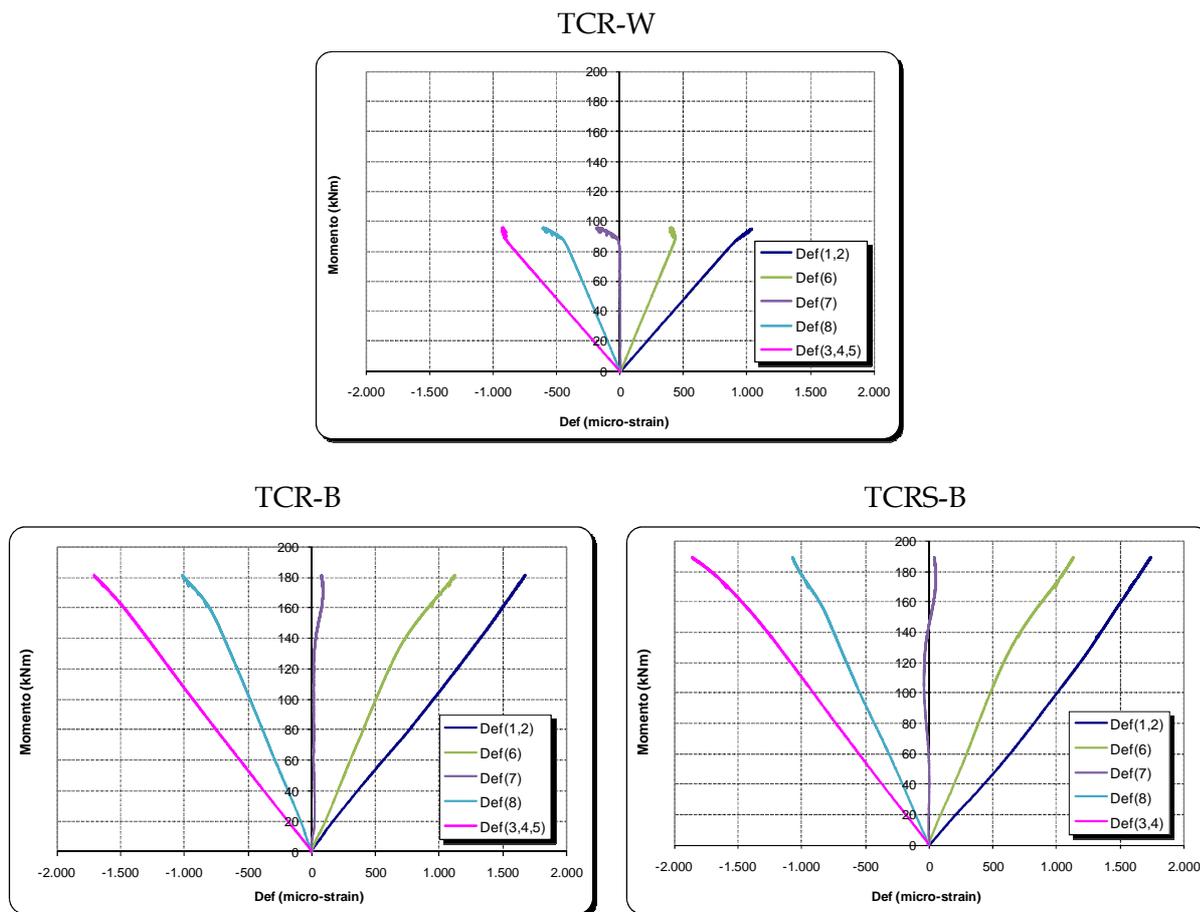


Figura 5.5 – Deformações longitudinais na alma e na mesa da viga.

As deformações medidas nas almas das vigas dos protótipos mostram que a região esteve sob comportamento elástico linear. Mesmo para os protótipos TCR-B e TRS-B cujas tensões são elevadas, não se configurou o escoamento da seção.

5.2.3 Discussão dos resultados experimentais

5.2.3.1 Modelo TCF-B

A ligação mostrou-se articulada com grandes deslocamentos, figura 5.6. A rigidez inicial se deve ao atrito entre as peças da ligação, posteriormente rompe-se o atrito e a rigidez diminui. No momento em que passa a existir o contato entre chapa

de ligação, alma da viga e parafusos, a rigidez volta a crescer. A figura 5.2 mostrou a curva $M-\Phi$ da ligação que apresenta tal fato.

O modo de colapso identificado foi grandes deformações nas regiões próximas aos furos tanto na alma da viga como na chapa de ligação, figura 5.7. Analisando as deformações na viga para uma seção localizada a 130 mm de sua extremidade, mostradas na figura 5.4, observa-se que as deformações na alma da viga superaram as deformações das mesas. O movimento da LN ocorreu no sentido da mesa inferior à medida que cresceu o carregamento.

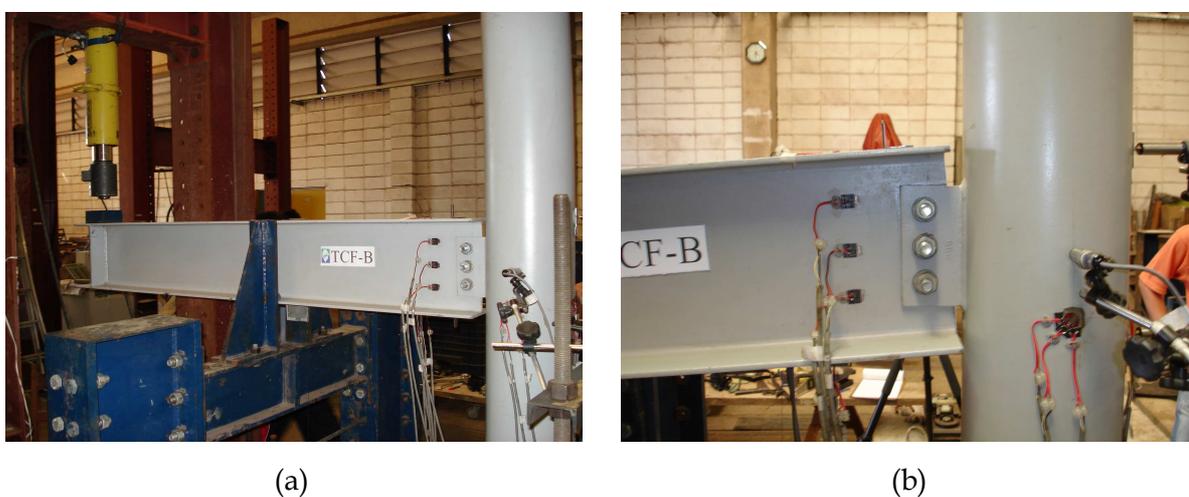


Figura 5.6 - Fotos do modelo TCF-B, antes (a) e durante o ensaio (b).



Figura 5.7 - Fotos do alargamento dos furos da chapa de ligação e da alma.

5.2.3.2 Modelo TCR-W

A ligação apresentou deformações plásticas na coluna nas regiões tracionada e comprimida da viga, definindo como modo de colapso a plastificação da coluna. As fotos das figuras 5.8 e 5.9 ilustram o modelo antes, durante e após a execução do ensaio.

As deformações na viga para uma seção localizada a 130 mm de sua extremidade foram mostradas na figura 5.5. A partir dos resultados do extensômetro de número 6 se observa a tendência da linha neutra LN em se deslocar no sentido da mesa superior em níveis elevados de carregamento.



(a)

(b)

Figura 5.8 – Fotos do modelo TCR-W, antes (a) e durante o ensaio (b).

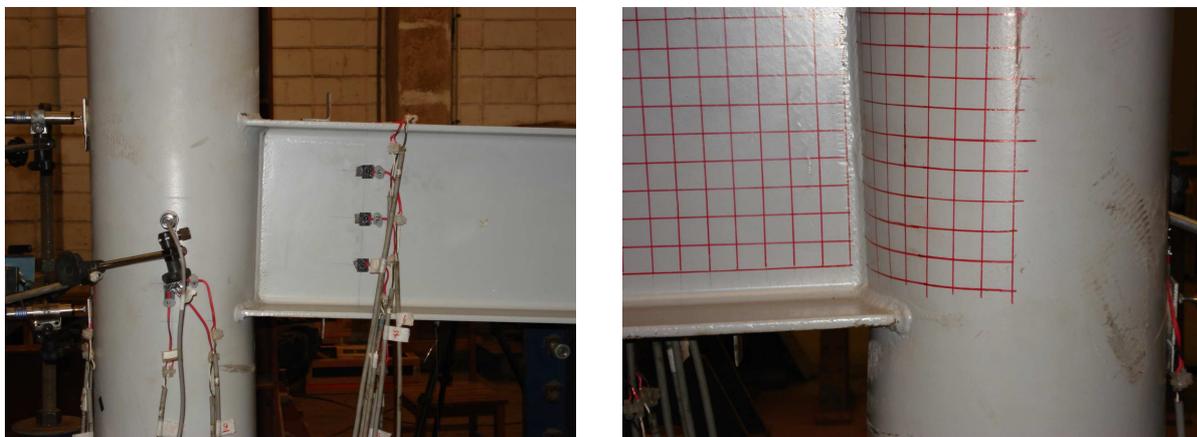


Figura 5.9 – Fotos da plastificação da coluna.

5.2.3.3 Modelo TCR-B

Apesar da ligação parafusada, nesse modelo não ocorreu a influência do atrito na rigidez inicial como aconteceu no protótipo TCF-B. Esse fato deve-se a não existência de folgas para alguns parafusos, o que foi provocado por imperfeições construtivas.

A ligação apresentou deformações das mesas da viga e chapas dos anéis da coluna, com alargamento dos furos tracionados da mesa superior, figuras 5.10 e 5.11.

As deformações na viga para a seção localizada a 258 mm de sua extremidade foram mostradas na figura 5.5. A LN se desloca na direção da mesa inferior quando o momento na ligação atinge 140kNm.



(a)



(b)

Figura 5.10 - Fotos do modelo TCR-B, antes (a) e durante o ensaio (b).

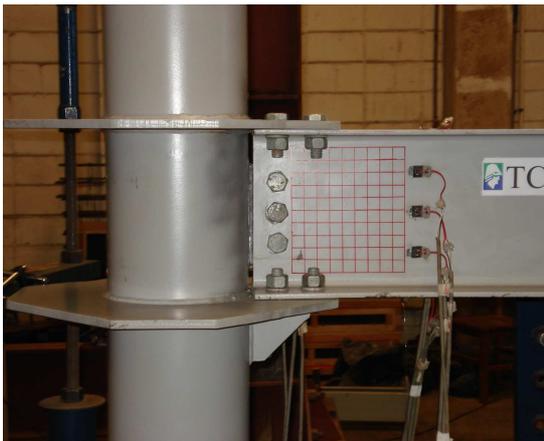


Figura 5.11 - Fotos das deformações nas mesas e anéis e alargamento dos furos na região tracionada.

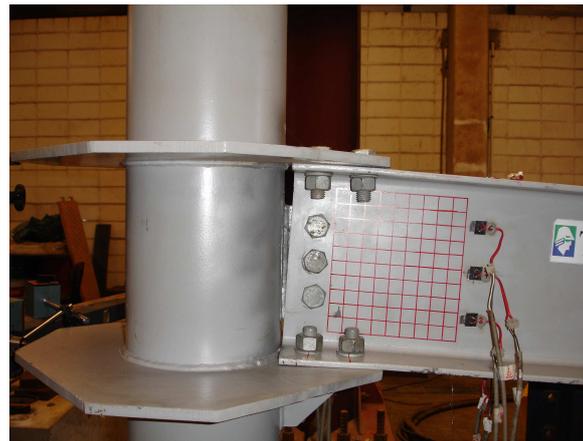
5.2.3.4 Modelo TCRS-B

Assim como no protótipo TCR-B, na ligação TCRS-B também não ocorreu a influência do atrito na rigidez inicial. A ligação apresentou alargamento dos furos das mesas da viga e da chapa do anel na região tracionada, além de esmagamento da mesa comprimida, provocada pelo aumento da rigidez do anel inferior por meio do enrijecedor, figuras 5.12 e 5.13. Observa-se que essa plastificação da mesa comprimida muda o ponto de rotação da ligação.

Analisando as deformações na viga para a seção localizada a 258 mm de sua extremidade, figura 5.5, nota-se que a LN inicialmente se desloca em direção a mesa superior, porém, quando o momento na ligação atinge 140 kNm, a LN inverte sua tendência e passa a se deslocar na direção da mesa inferior.



(a)



(b)

Figura 5.12- Fotos do modelo TCRS-B, antes (a) e durante o ensaio (b).



Figura 5.13 - Fotos da plastificação da mesa comprimida.

5.3 RESULTADOS NUMÉRICOS

Os resultados descritos referem-se ao comportamento força-deslocamento ($F-D$), momento-rotação ($M-\Phi$) e tensões nas vigas e colunas. Assim como nos modelos experimentais, o momento fletor considera a distância do ponto de aplicação da força até a face da coluna. As regiões de plastificação são identificadas por meio da apresentação das tensões segundo o critério de plastificação de Von Mises.

5.3.1 Força vs deslocamento ($F-D$) e momento vs rotação ($M-\Phi$)

A tabela 5.3 traz a força máxima e o deslocamento máximo na ponta da viga para cada um dos modelos estudados.

Na tabela 5.4 estão apresentados o momento resistente último (M_n), o momento para uma rotação de 0,02 rad ($M_{\theta=0,02rad}$), a rotação quando atingido M_n (θ_{Mn}) e a rigidez inicial das ligações (S_{jini}).

Tabela 5.3 – Valores de força vs deslocamento.

Modelo	Força Máxima (kN)	Deslocamento (mm)
TCF-B	7,4	120,0
TCR-W	54,3	104,2
TCR-B	94,7	48,3
TCRS-B	101,8	53,6

Tabela 5.4 – Valores de M_n , θ_{Mn} , $M_{\theta=0,02rad}$ e S_{jini} .

Modelo	M_n (kN.m)	θ_{Mn} (rad)	$M_{\theta=0,02rad}$ (kN.m)	S_{jini} (kN.m/rad)
TCF-B	11,52	0,047	2,82	460
TCR-W	84,12	0,064	78,66	6.670
TCR-B	146,79	0,025	138,91	10.540
TCRS-B	156,51	0,027	139,32	11.260

As curvas $F-D$ e $M-\Phi$ para o modelo TCF-B são mostradas na figura 5.14. Os resultados para os demais modelos estão na figura 5.15.

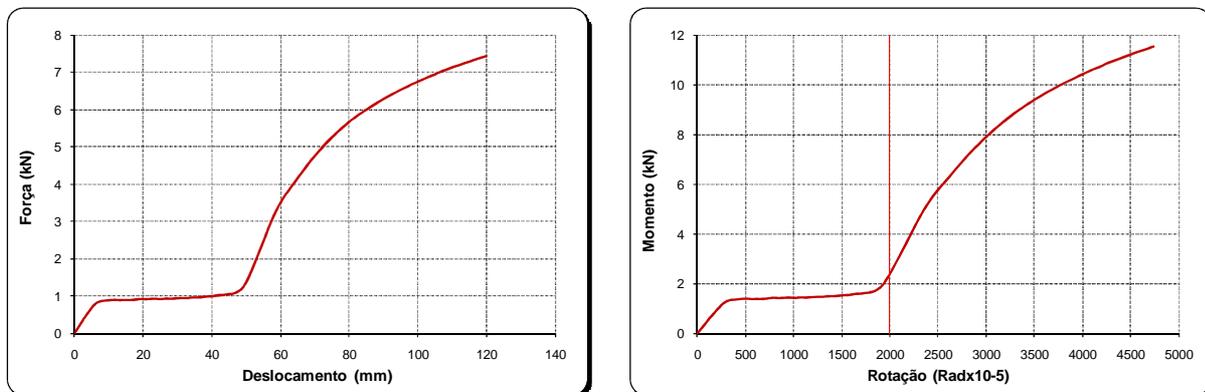
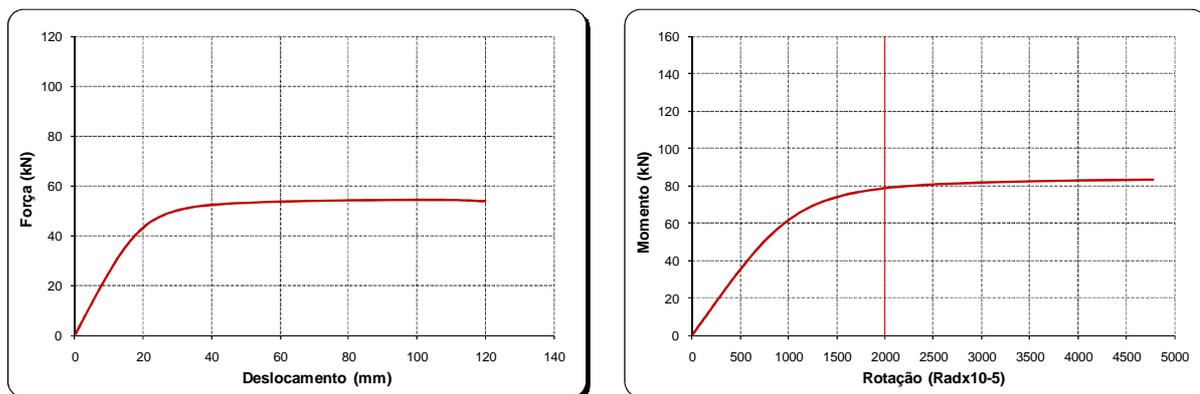
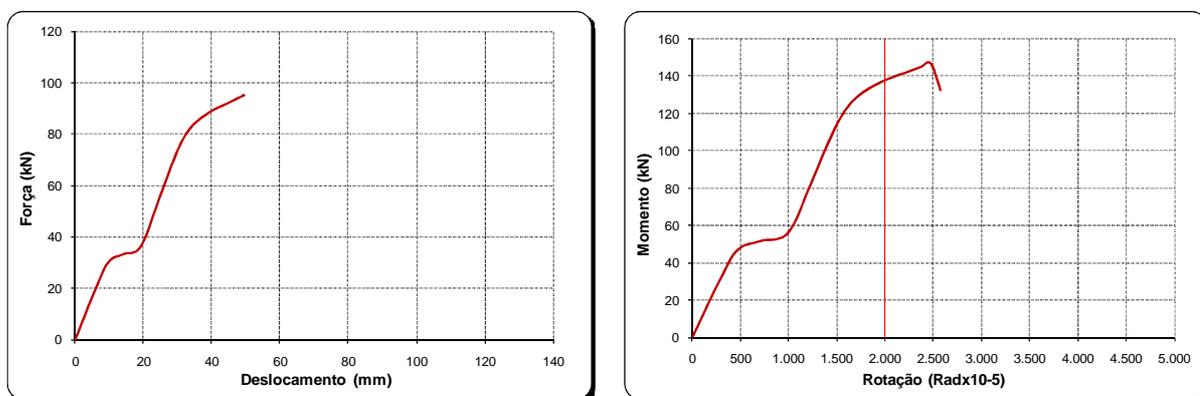


Figura 5.14 – Curva $F-D$ para o ponto de aplicação da força e comportamento $M-\Phi$ do modelo TCF-B.

TCR-W



TCR-B



TCRS-B

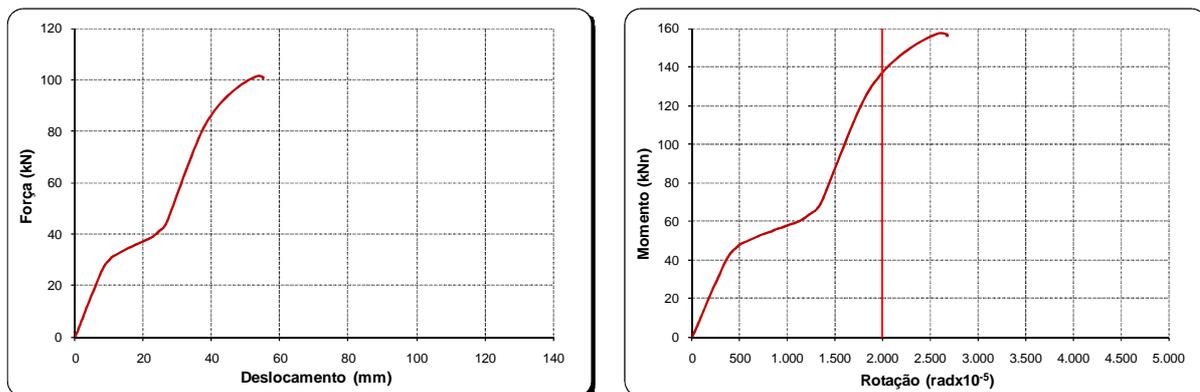


Figura 5.15 - Curvas $F-D$ para o ponto de aplicação da força e comportamento $M-\Phi$.

5.3.2 Tensões longitudinais na alma da viga

O atrito e a pressão de contato dos parafusos conectados na alma da viga promovem perturbação da distribuição linear das tensões longitudinais ao longo da

altura da mesma. Assim a perturbação na alma da viga fica cada vez maior na medida em que se aproxima do apoio.

Para ilustrar tal situação, a seguir são apresentadas as tensões longitudinais na alma da viga para cada modelo estudado. Para tal, foram tomadas duas seções S1 e S2, localizadas a $H/2$ e H da face da coluna, respectivamente, onde H é a altura da viga. A figura 5.16 ilustra o posicionamento das seções S1 e S2.

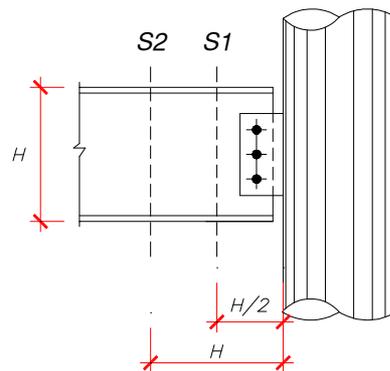


Figura 5.16 – Seções S1 e S2 de captura das tensões longitudinais na alma da viga.

A figura 5.17 traz as tensões longitudinais na alma da viga do modelo TCF-B.

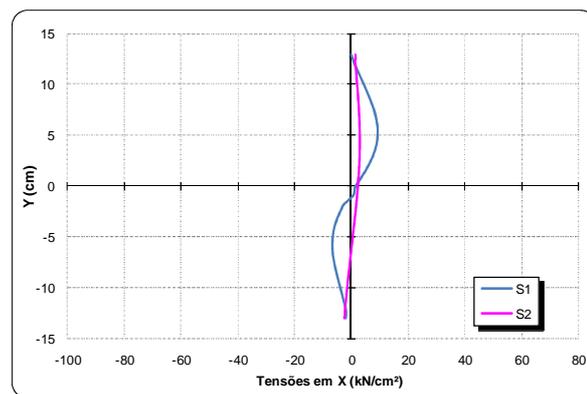


Figura 5.17– Tensões longitudinais na alma da viga do modelo TFC-B.

O comportamento de ligação articulada é claramente visto na ligação TCF-B. O giro da seção em torno do parafuso central gera dois pontos de tensão máxima provocados pelo parafuso superior (tracionando a alma) e pelo parafuso inferior (comprimindo a alma), além disso, as tensões tendem a zero nas mesas.

As tensões longitudinais na alma da viga dos modelos TCR-W, TCR-B e TCRS-B são apresentadas na figura 5.18.

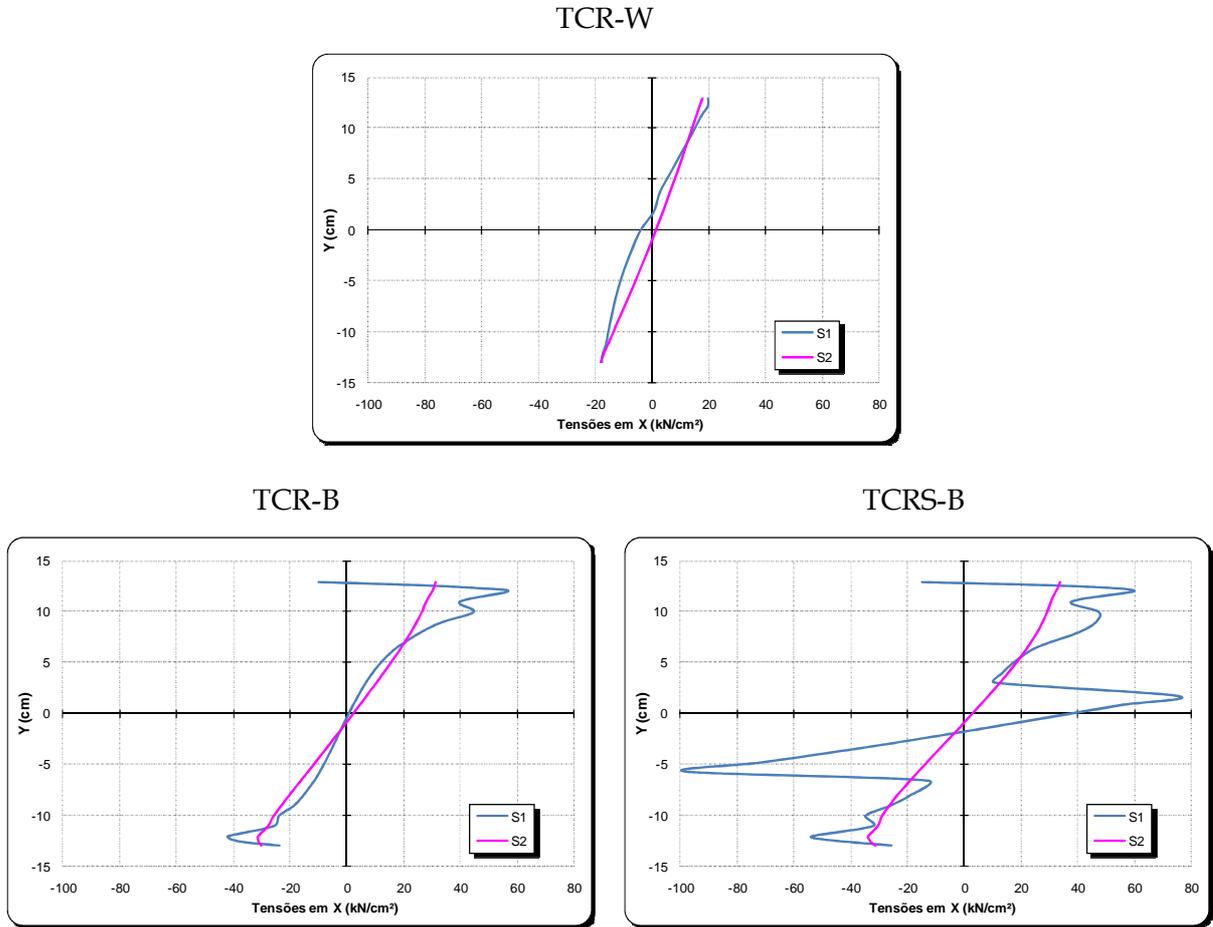


Figura 5.18 – Tensões longitudinais na alma da viga.

Na ligação TCR-W, a distribuição das tensões longitudinais ao longo da altura da viga é aproximadamente linear tanto para S1 como S2. Tal fato é justificado pela ausência de parafusos, não havendo assim, pontos de perturbação e concentração de tensão na alma da viga.

As ligações TCR-B e TCRS-B evidenciam a mudança no comportamento da distribuição das tensões à medida que se aproxima da ligação. Nesses modelos a ligação das mesas com os anéis externos é feita por meio de parafusos, o que gera grande perturbação. As tensões envolvidas apresentam valores elevados, inclusive, com pontos de escoamento.

5.3.3 Evolução das tensões de Von Mises na face da coluna

A figura 5.19 apresenta a evolução das tensões de Von Mises na face da coluna para a respectiva porcentagem da força máxima aplicada em cada modelo. É possível identificar os pontos de plastificação, e a evolução desta à medida que o carregamento é incrementado. A análise do desenvolvimento de tais tensões é fundamental para entender a influência do tubo no comportamento da ligação.

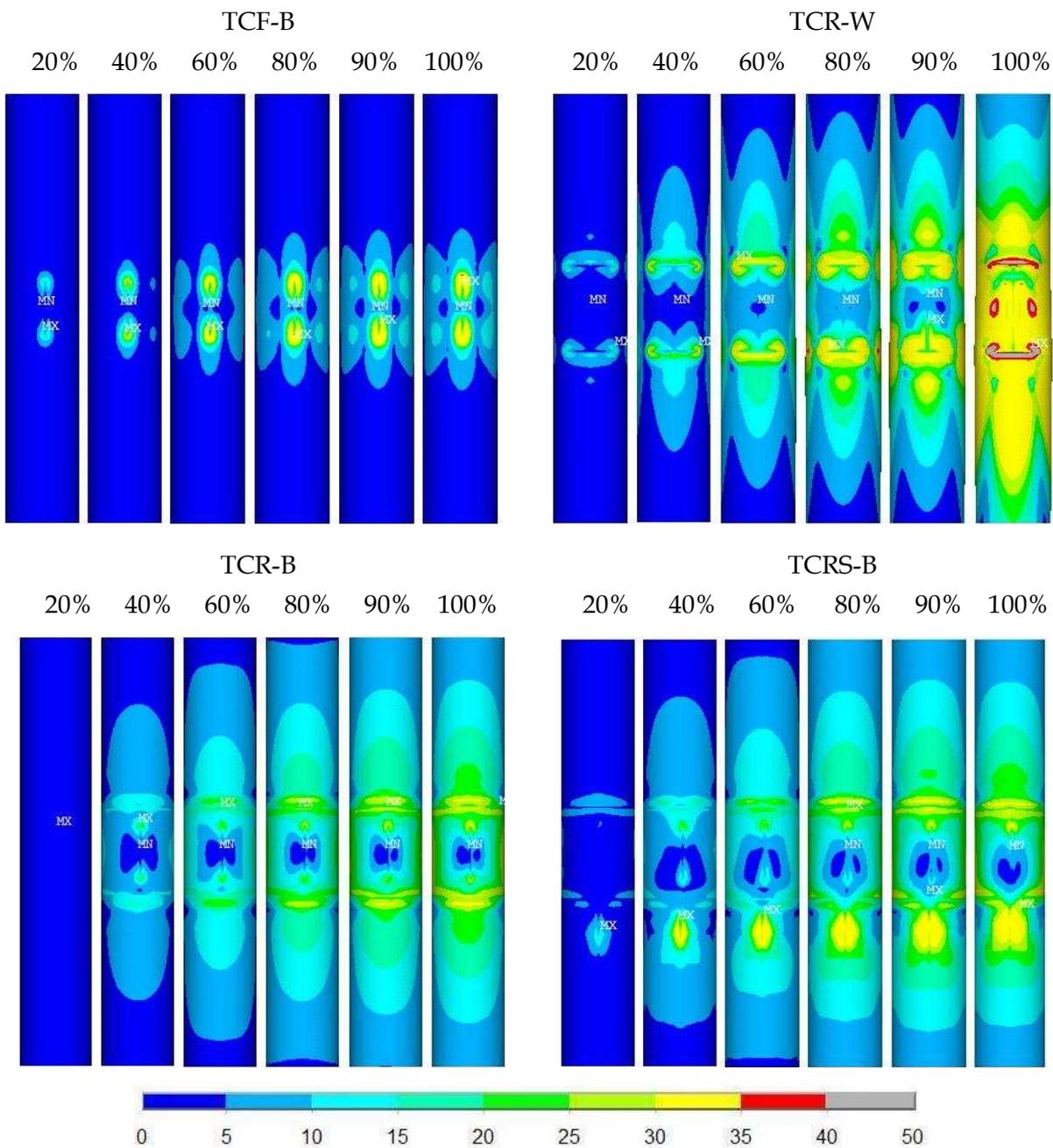


Figura 5.19 - Evolução das tensões equivalentes de Von Mises na face da coluna para a respectiva porcentagem da força máxima aplicada em cada modelo (kN/cm²).

As tensões na face da coluna ao longo de sua circunferência, para o último estágio de carregamento (100% da força máxima resistente de cada modelo), estão mostradas na figura 5.20.

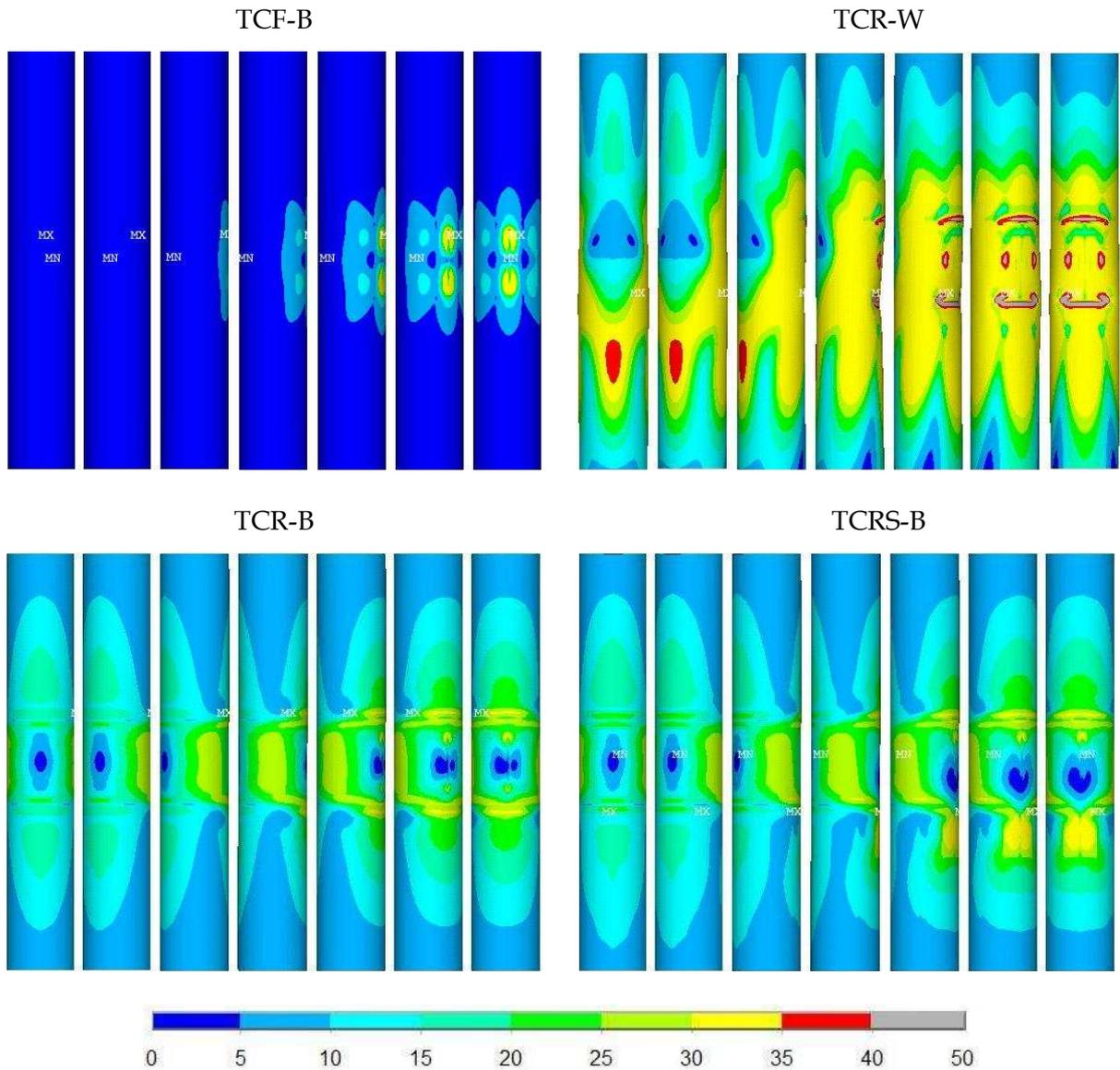


Figura 5.20 - Tensões equivalentes de Von Mises ao longo da circunferência da coluna (kN/cm^2).

Apesar da capacidade resistente da ligação TCF-B ser determinada pelo escoamento da região de contato entre parafusos e chapa, a pequena área de transferência de esforços entre chapa de ligação e coluna gera uma região com alto nível de tensão, porém sem maior influência no comportamento da ligação.

Para a ligação TCR-W a resistência é limitada pelo escoamento da face da coluna na região comprimida. Ocorreu também o escoamento da região tracionada e da região lateral à ligação.

Nas ligações TCR-B e TCRS-B os diafragmas externos possuem grande rigidez às ações aplicadas no seu plano médio, e contribuem para a distribuição dos esforços na face da coluna. Assim o nível de tensão na face da coluna para esses modelos são inferiores aos demais modelos.

A presença do enrijecedor na ligação TCRS-B não forneceu vantagens a rigidez e resistência da ligação, e criou um ponto de grande transferência e concentração de tensão entre o enrijecedor e a coluna. Tal ponto, a depender das relações geométricas dos elementos conectados, pode ser o limitador da resistência da ligação.

5.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS, NUMÉRICOS E DO EUROCODE 3 (2005)

Os resultados mostrados nesse item permitem estabelecer comparações entre as análises numérica, experimental e analítica, Eurocode 3 (2005). O objetivo é avaliar a metodologia adotada na análise numérica bem como a formulação de dimensionamento disponível.

A tabela 5.5 apresenta os resultados de $F_{m\acute{a}x}$ e M_n das análises experimental e numérica.

Tabela 5.5 – Comparação de resultados de $F_{m\acute{a}x}$ e M_n .

Modelo	Força máxima (kN)		M_n (kN.m)		
	Experimental	Numérico	Experimental	Numérico	Numérico/ Experimental
TCF-B	4,5	7,4	7,6	11,5	1,51
TCR-W	57,5	54,3	95,4	84,1	0,88
TCR-B	102,0	94,7	181,3	146,8	0,81
TCRS-B	113,7	101,8	189,6	156,5	0,83

Na tabela 5.6 são confrontados o momento resistente analítico e os resultados de $M_{\theta=0.02\text{rad}}$ das análises experimental, numérica.

Tabela 5.6 - Comparação de resultados de $M_{\theta=0.02\text{rad}}$.

Modelo	$M_{\theta=0.02\text{rad}}$ (kN.m)			Numérico/ Experimental	Analítico/ Experimental
	Experimental	Numérico	Analítico		
TCF-B	2,7	2,8	5,3	1,04	1,96
TCR-W	94,0	78,7	74,3	0,84	0,79
TCR-B	136,6	138,9	114,8	1,02	0,84
TCRS-B	145,6	139,3	114,8	0,96	0,79

Nota-se que os valores analíticos de $M_{\theta=0.02\text{rad}}$ para os modelos TCR-B e TCRS-B são iguais. Tal fato ocorre devido ao Eurocode 3 (2005) não prever a componente ocasionada pela presença do enrijecedor no anel inferior da ligação.

Assim como os resultados numéricos, os resultados analíticos, cerca de 20% inferiores aos resultados experimentais, mostraram-se representativos. Apenas para o modelo TCF-B, o resultado analítico mostrou discordância frente ao valor de $M_{\theta=0.02\text{rad}}$ experimental, porém, quando comparado ao momento resistente M_n experimental, o resultado analítico também se torna representativo.

A tabela 5.7 compara os resultados experimentais e numéricos de S_{jini} .

Tabela 5.7 - Comparação de resultados de S_{jini} .

Modelo	S_{jini}		Numérico/ Experimental
	Experimental	Numérico	
TCF-B	110	460	4.18
TCR-W	8.610	6.670	0,77
TCR-B	9.990	10.540	1,06
TCRS-B	10.860	11.260	1,04

A comparação das curvas momento-rotação provenientes das análises numérica e experimental para o modelo TCF-B é apresentada nas figuras 5.21.

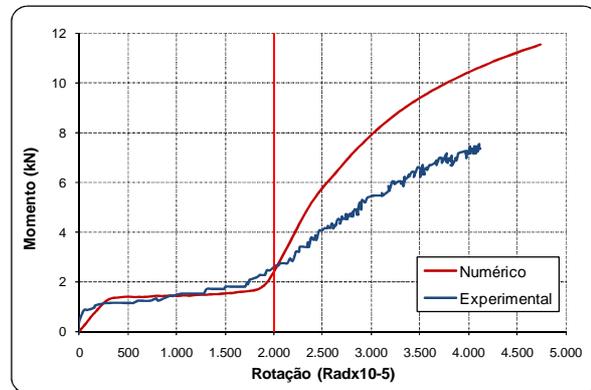


Figura 5.21 – Comparação das curvas $M-\Phi$, experimental e numérica do modelo TFC-B.

Para a ligação articulada TCF-B, as curvas momento-rotação obtidas pelas análises numérica e experimental demonstram claramente que a rigidez inicial é protagonizada pelo atrito entre chapa de ligação e alma, e que a partir da rotação de 0,02 rad, o contato dos parafusos com chapa de ligação e alma assumem tal função.

A figura 5.22 traz a comparação das curvas momento-rotação para os modelos TCR-W, TCR-B e TCRS-B.

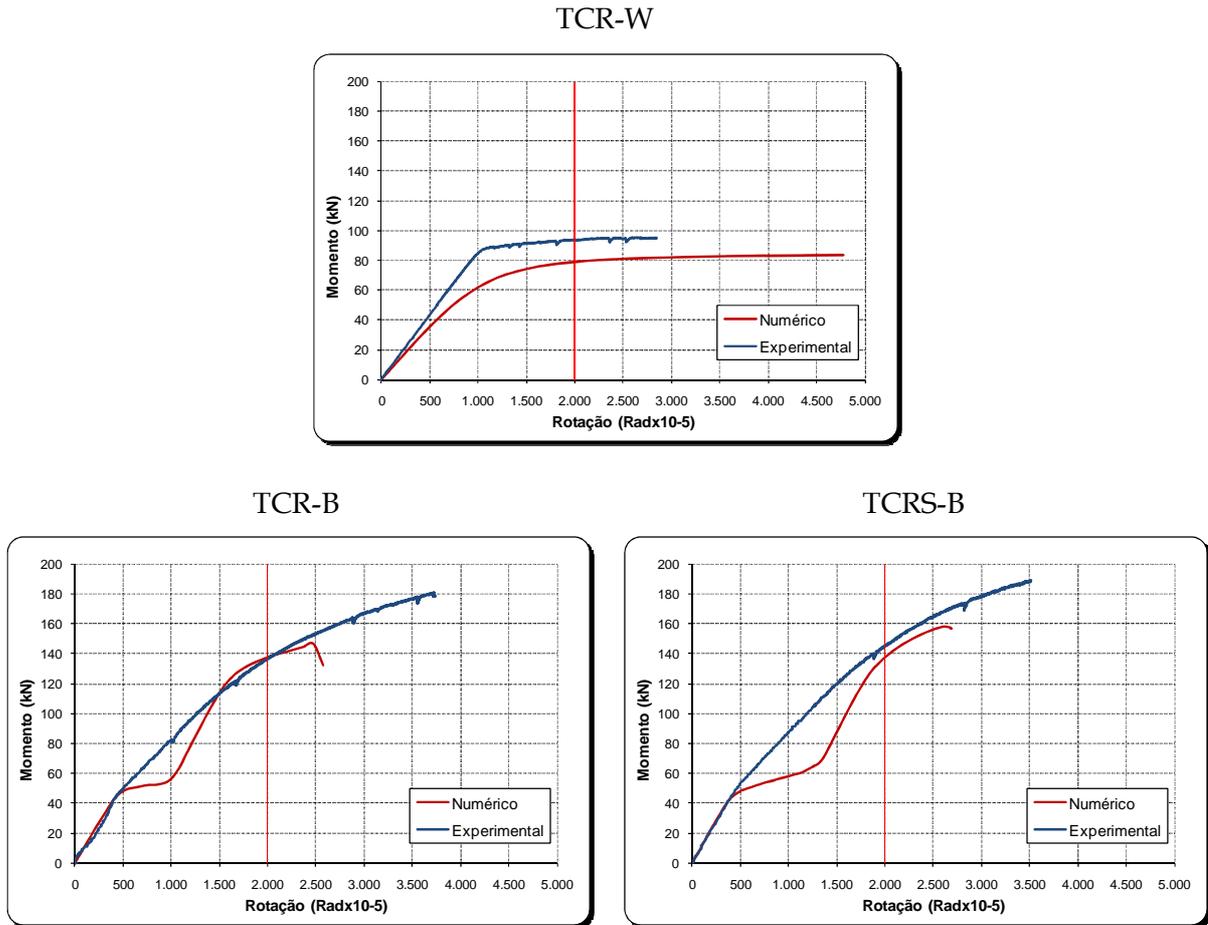


Figura 5.22 – Comparação das curvas M- Φ , experimental e numérica.

Ao analisar as curvas momento rotação do modelo TCR-W fica evidenciado que a análise numérica conduziu o modelo a uma resistência menor que o protótipo experimental, tal fato foi influenciado pela não utilização de elementos representantes da solda. Vale dizer que a solda promove a distribuição das tensões transferidas à coluna pelas mesas da viga, ou seja, a solda aumenta a área de transferência de tensões da viga para a coluna. A retirada da solda na análise numérica foi justificada pela simplificação da análise, pelos representativos resultados aqui obtidos e pelos resultados obtidos por Winkel et al (1993) uma vez que também obteve boa representação do experimento com a mesma metodologia.

Quantos aos modelos TCR-B e TCRS-B a análise numérica se mostrou representativa para fase inicial onde o atrito entre os anéis e as mesas promove a rigidez inicial. Depois de atingida a força limite do atrito, o modelo numérico, por sua perfeição geométrica, perde rigidez até que exista contato entre os parafusos e as

chapas. Os protótipos experimentais apresentaram imperfeições geométricas decorrentes da fabricação, portanto a inexistência de folgas entre parafusos e chapas não produziu o mesmo fenômeno.

A previsão da resistência dos modelos numéricos TRC-B e TCRS-B também foi satisfatória. A concentração de tensões nas regiões tracionadas dos anéis, com superação das tensões últimas, limitou a análise através da não convergência dos modelos.

5.5 CLASSIFICAÇÃO DAS LIGAÇÕES ESTUDADAS

Com os resultados obtidos através da análise experimental é possível classificar as ligações quanto à rigidez e à resistência. O procedimento adotado é o fornecido pelo Eurocode 3 (2005) e exposto no capítulo 2. Para fim de classificação quanto à resistência das ligações, é considerado o caso onde há continuidade do pilar. As tabelas 5.8 e 5.9 trazem as classificações para rigidez e resistência respectivamente.

Tabela 5.8 - Classificação segundo a rigidez, Eurocode 3 (2005).

Ligação	Classificação
TCF-B	Flexível
TCR-W	Semi-rígida
TCR-B	Semi-rígida
TCRS-B	Semi-rígida

Tabela 5.9 - Classificação segundo a resistência, Eurocode 3 (2005).

Ligação	Classificação
TCF-B	Flexível
TCR-W	Parcialmente Resistente
TCR-B	Parcialmente Resistente
TCRS-B	Parcialmente Resistente

5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ligação TCF-B, com comportamento articulado, teve sua resistência determinada pelo alargamento dos furos na chapa de ligação e na alma da viga, como mostra a figura 5.23. Os resultados experimentais, apesar de conhecidos previamente, foram importantes para a calibração dos modelos numéricos.

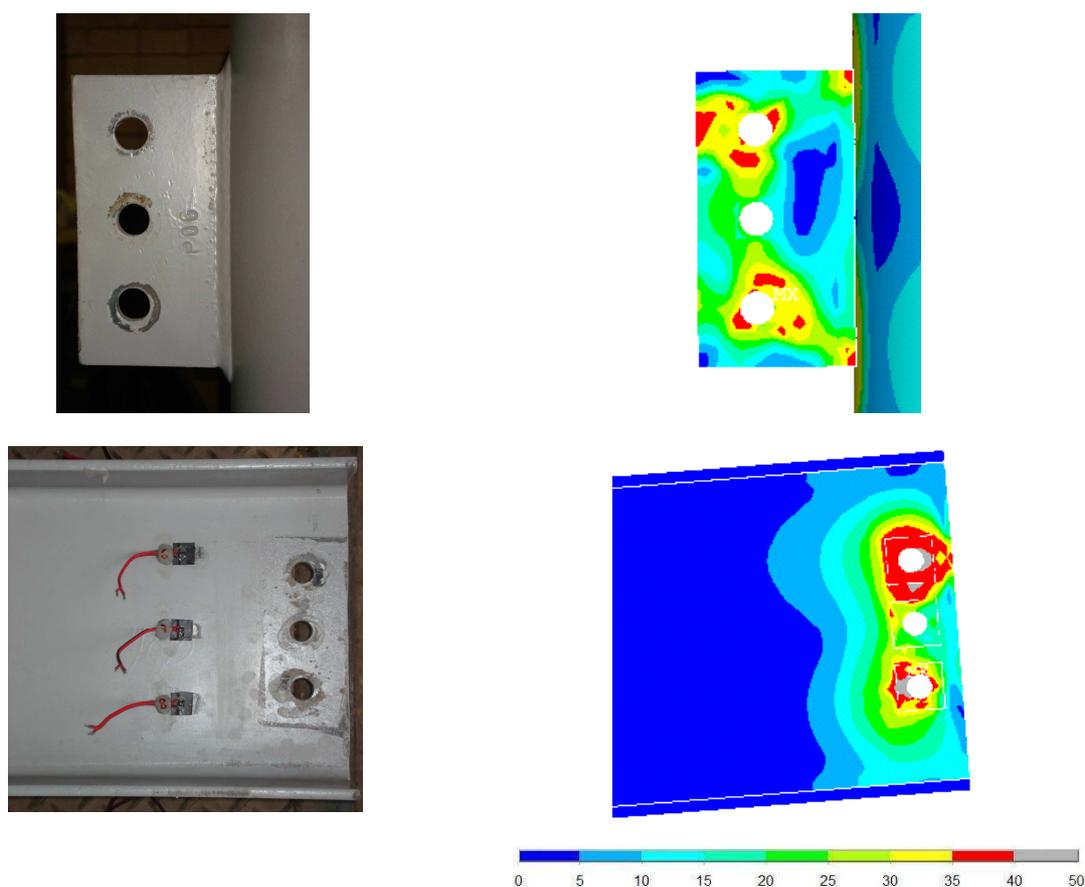


Figura 5.23 – Alargamento dos furos da chapa de ligação e da alma da viga (kN/cm^2).

As análises, numérica e experimental, mostram o colapso da ligação TCRW por deformações plásticas na coluna, com tensões máximas na zona comprimida, figura 5.24. Destaca-se, mais uma vez, que as deformações no modelo numérico são superiores ao modelo experimental, influenciadas pela não representatividade dos elementos de solda, que atuariam distribuindo as tensões transmitidas pela viga à coluna.

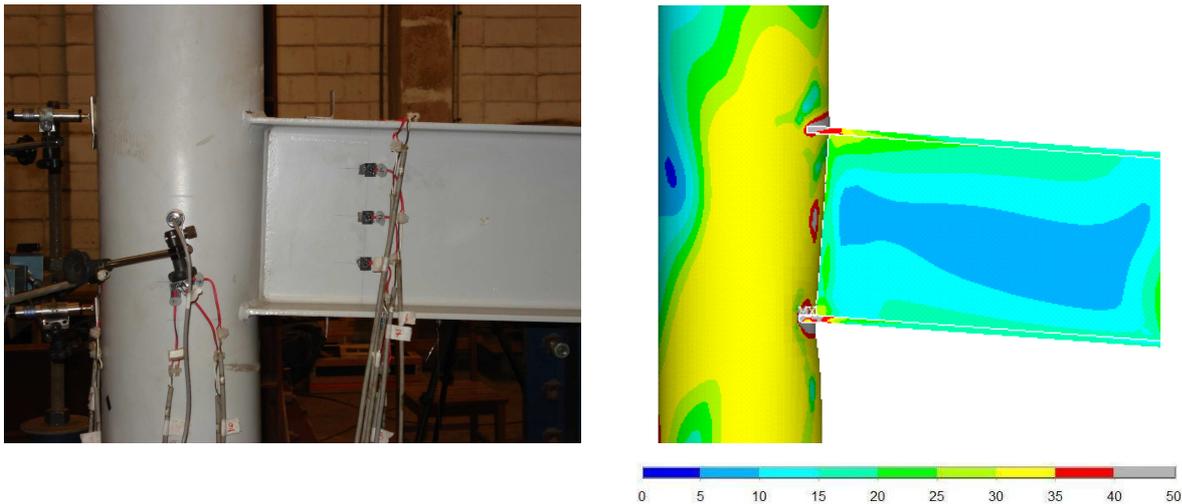


Figura 5.24 - Plastificação da coluna (kN/cm^2).

As ligações TCR-B e TCRS-B, onde as mesas da viga foram parafusadas a anéis externos, apresentaram boa rigidez e resistência.

No modelo TCR-B, as tensões de tração no anel superior, e a pressão de contato dos parafusos determinaram a resistência do modelo, figura 5.25.

A presença do enrijecedor no modelo TCRS-B não acrescentou significativos ganhos de rigidez e resistência. Também criou uma região de concentração de tensão na face da coluna e, por aumentar a rigidez do anel inferior, provocou grandes deformações na mesa comprimida da viga, mudando o ponto de rotação da ligação, figura 5.26.

A comparação dos resultados e dos modos de falha dos modelos TCR-B e TCRS-B evidencia que adicionar elementos objetivando enrijecer a ligação nem sempre apresenta êxito, ao contrário, pode alterar o modo de falha e conduzir a ligação a um comportamento inesperado. Nas figuras 5.25 e 5.26 destacam-se com um círculo a região da mesa comprimida, que apresentou comportamento diferente em cada ligação.

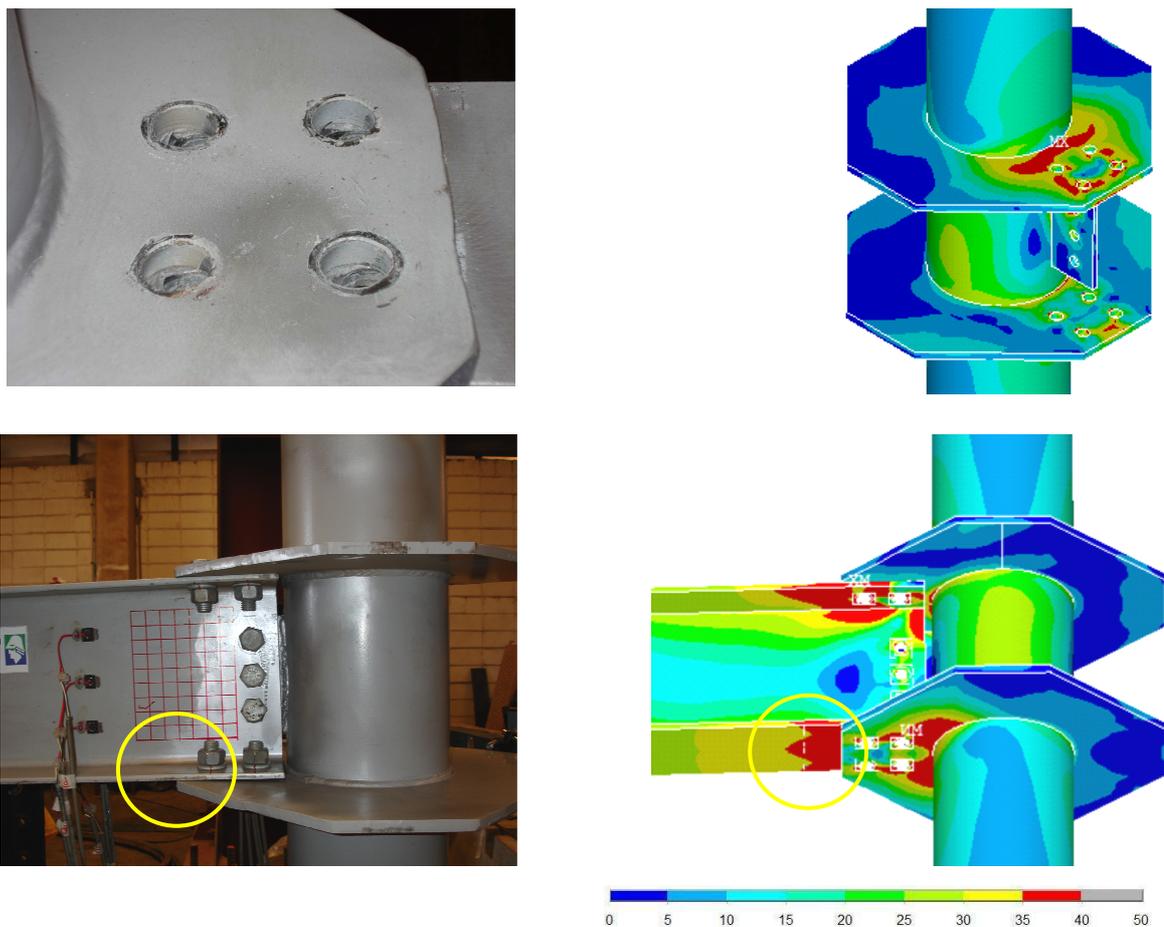


Figura 5.25 - Deformações nas mesas e anéis, alargamento dos furos da região tracionada e destaque da mesa comprimida (kN/cm^2).

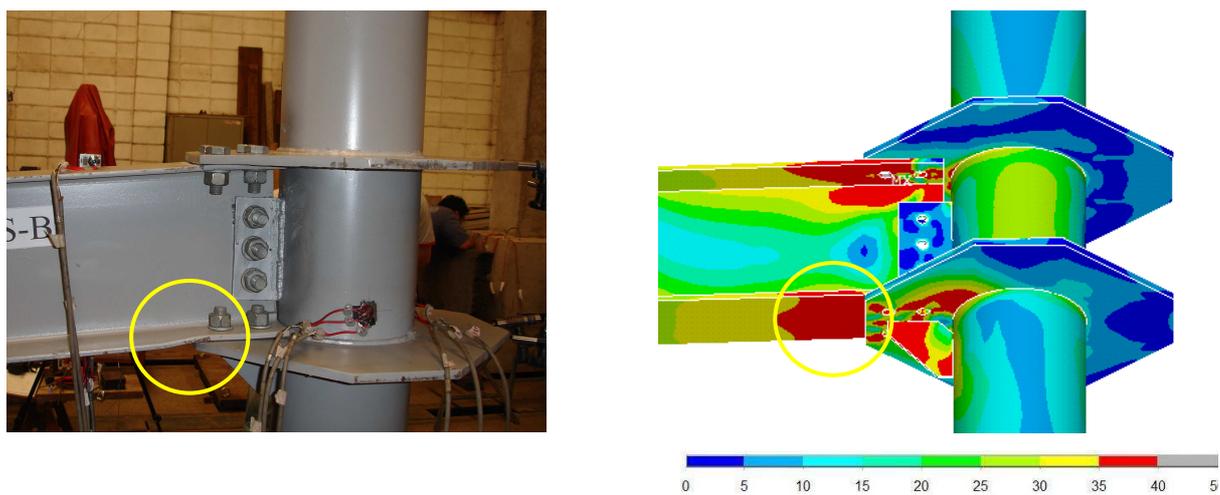


Figura 5.26 - Deformações nas mesas e anéis e destaque da plastificação da mesa comprimida (kN/cm^2).

6 ESTUDO NUMÉRICO PARA DIFERENTES RELAÇÕES GEOMÉTRICAS

6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A parametrização dos arquivos da análise numérica possibilitou grande produtividade e liberdade para alteração das variáveis envolvidas. Dessa forma, foi possível estender o estudo do comportamento das ligações em T, para diferentes relações de rigidez entre coluna e viga. Foram tomadas as configurações TCR-W e TCRS-B, já apresentadas no capítulo 3, definindo-se dois diâmetros de colunas, que foram combinados com três perfis de viga diferentes.

Toda metodologia e parâmetros da análise numérica adotados nesse estudo paramétrico seguem rigorosamente os critérios e definições descritos no capítulo 4, Modelagem Numérica. Os valores da caracterização dos aços das chapas, colunas e vigas também foram utilizados.

Destaca-se que esse capítulo trata de um estudo preliminar que busca através da análise numérica, que obteve boa representatividade mostrada no capítulo 5, avançar no conhecimento da influência da relação geométrica dos elementos conectados na rigidez e na previsão de resistência das ligações tomadas para estudo.

6.2 RELAÇÕES GEOMÉTRICAS DOS MODELOS

A tabela 6.1 apresenta as dimensões nominais dos perfis das colunas e das vigas dos modelos simulados numericamente. Os perfis das vigas foram escolhidos de

maneira que tivessem massa linear semelhante, porém, apresentando variação de altura.

Tabela 6.1 – Dimensões nominais dos perfis das colunas e da vigas.

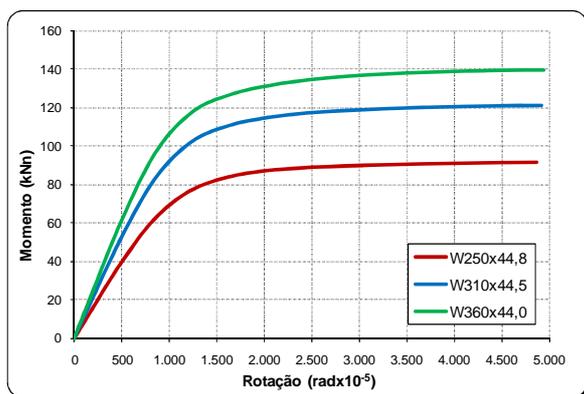
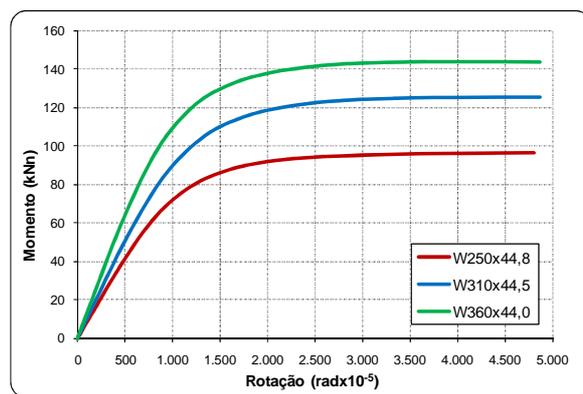
Coluna		Viga				
D (mm)	e (mm)	Perfil (mmxkg/m)	d (mm)	bf (mm)	tf (mm)	tw (mm)
219,1	8,2	W250x44,8	266,0	148,0	13,0	7,6
		W310x44,5	313,0	166,0	11,2	6,6
		W360x44,0	352,0	171,0	9,8	6,9
273,0	9,3	W250x44,8	266,0	148,0	13,0	7,6
		W310x44,5	313,0	166,0	11,2	6,6
		W360x44,0	352,0	171,0	9,8	6,9

6.3 RESULTADOS DO MODELO TCR-W

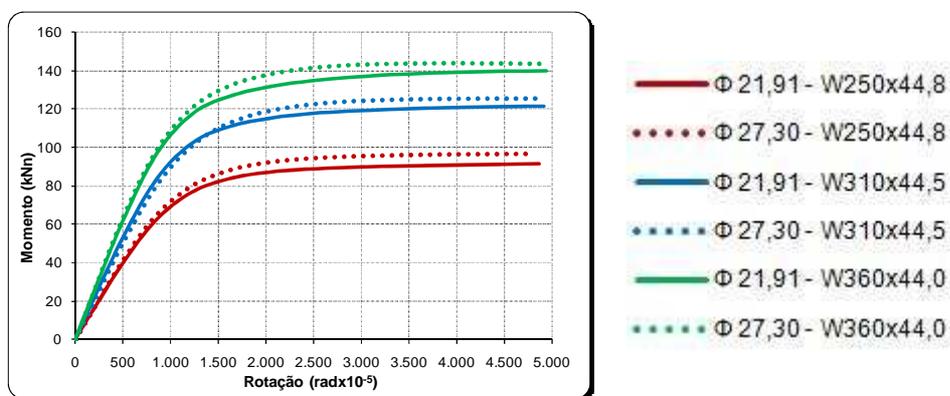
A tabela 6.2 traz, para a configuração TCR-W, os parâmetros obtidos na análise numérica que caracterizam o comportamento $M-\Phi$ de cada relação geométrica estudada. Estão apresentados o momento resistente último (M_n) com sua respectiva rotação (θ_{M_n}), o momento para uma rotação de 0,02 rad ($M_{\theta=0,02\text{rad}}$), além da rigidez inicial (S_{jini}). As curvas $M-\Phi$ para cada uma das relações geométricas estão apresentadas na figura 6.1.

Tabela 6.2 - Configuração TCR-W: valores de M_n , θ_{Mn} , $M_{\theta=0.02\text{rad}}$ e S_{jini} .

Modelo	Diâmetro Coluna (mm)	Viga	M_n (kN.m)	θ_{Mn} (rad)	$M_{\theta=0.02\text{rad}}$ (kN.m)	S_{jini} (kN.m/rad)
TCR-W	219,1	W250x44,8	92,27	0,077	87,07	7.490
		W310x44,5	121,42	0,061	115,02	9.940
		W360x44,0	139,64	0,054	131,60	11.500
	273,0	W250x44,8	96,98	0,078	91,71	7.830
		W310x44,5	125,21	0,049	119,70	9.420
		W360x44,0	143,84	0,041	138,11	11.920

Coluna $\Phi= 21.91\text{mm}$ Coluna $\Phi= 27.30\text{mm}$ 

Comparação dos Resultados

Figura 6.1- Configuração TCR-W: comportamento momento rotação para as colunas de $\Phi= 21.91\text{mm}$ e $\Phi= 27.30\text{mm}$.

A figura 6.2 evidencia as tensões equivalentes de Von Mises na face da coluna para a configuração TCR-W com colunas de diâmetro iguais a 219,1mm e 273,0mm combinados com a viga de perfil W360x44,0.

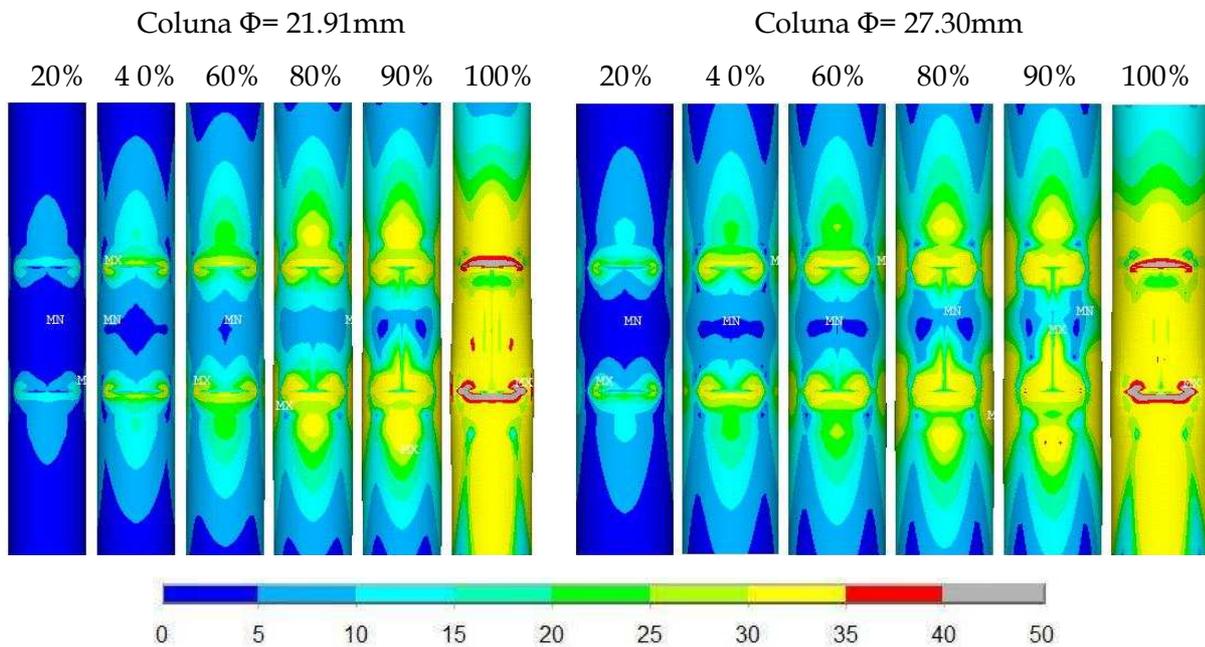


Figura 6.2 - Configuração TCR-W: tensões equivalentes de Von Mises na face da coluna para ligação com o perfil de viga W360x44 (kN/cm^2).

A figura 6.3 mostra as tensões de Von Mises para o modelo TCR-W com coluna de diâmetro igual a 219,1mm combinada com os três tipos de viga estudadas: W250x44,8; W310x44,5 e W360x44,0.

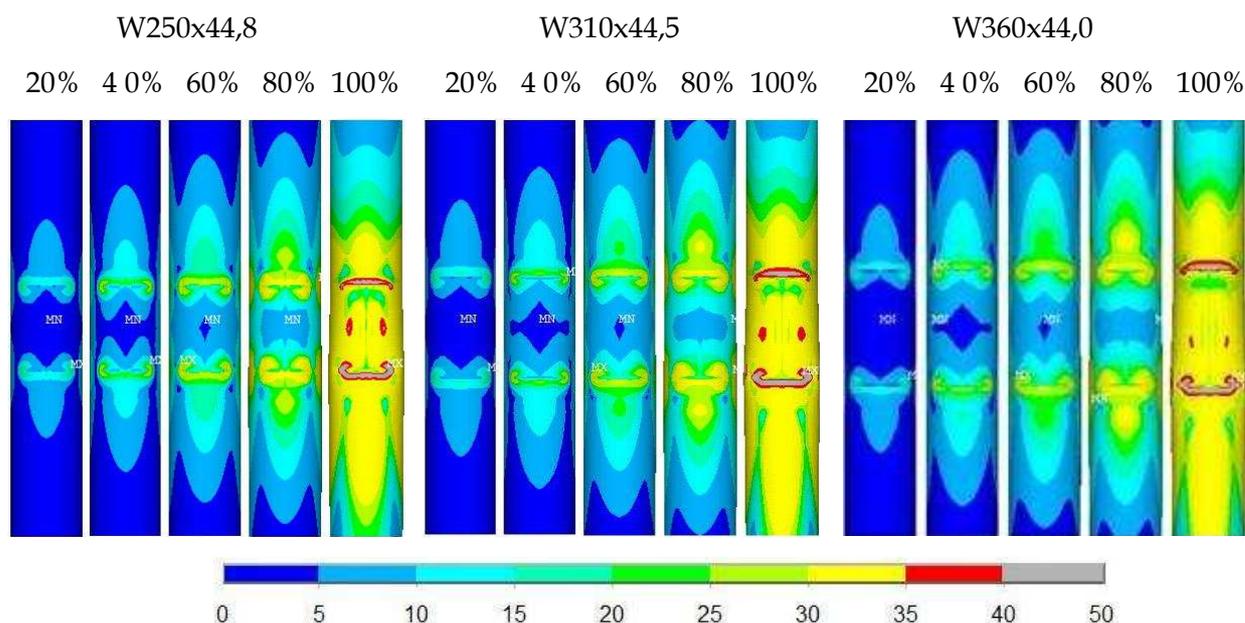


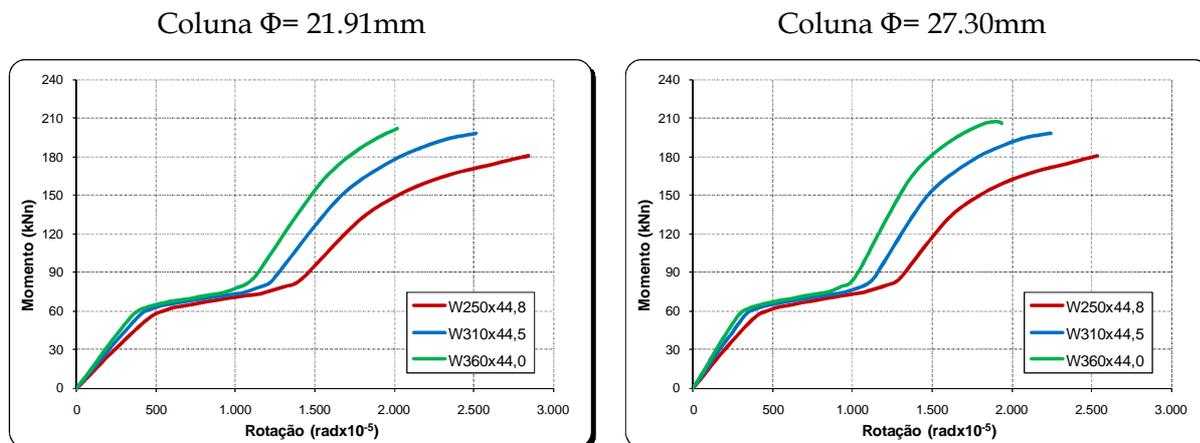
Figura 6.3 - Configuração TCR-W: tensões equivalentes de Von Mises na face da coluna para ligações com coluna de $\Phi= 21.91\text{mm}$ (kN/cm^2).

6.4 RESULTADOS DO MODELO TCRS-B

A tabela 6.3 traz, para a configuração TCRS-B, os parâmetros obtidos na análise numérica que caracterizam o comportamento $M-\Phi$. As curvas $M-\Phi$ para cada uma das relações geométricas estão apresentadas na figura 6.4.

Tabela 6.3 - Configuração TCRS-B: valores de M_n , θ_{Mn} , $M_{\theta=0.02\text{rad}}$ e S_{jini} .

Modelo	Diâmetro Coluna (mm)	Viga	M_n (kN.m)	θ_{Mn} (rad)	$M_{\theta=0.02\text{rad}}$ (kN.m)	S_{jini} (kN.m/rad)
TCRS-B	219,1	W250x44,8	180,39	0,028	150,63	12.190
		W310x44,5	198,21	0,025	179,69	14.370
		W360x44,0	202,25	0,020	202,25	16.410
	273,0	W250x44,8	180,51	0,025	162,05	14.330
		W310x44,5	198,18	0,022	191,96	17.380
		W360x44,0	207,53	0,019	207,53	19.910



Comparação dos Resultados

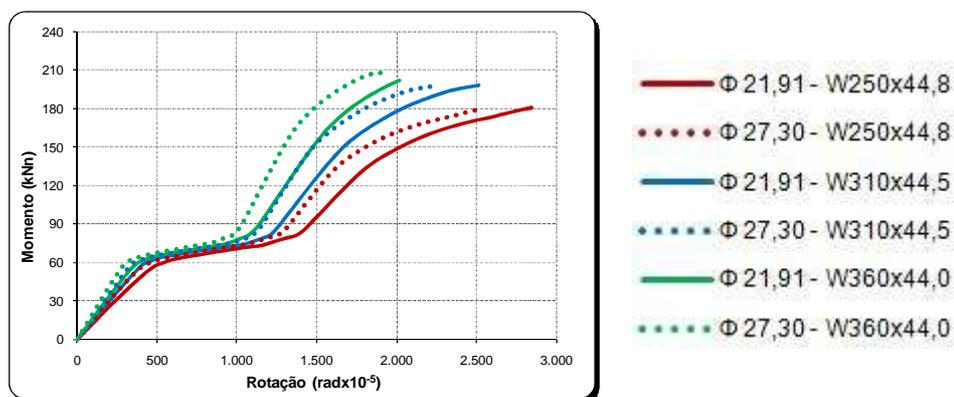


Figura 6.4- Configuração TCRS-B: comportamento momento rotação para as colunas de $\Phi=21.91\text{mm}$ e $\Phi=27.30\text{mm}$.

A figura 6.5 evidencia as tensões equivalentes de Von Mises na face da coluna para a configuração TCRS-B com colunas de diâmetro iguais a 219,1mm e 273,0mm combinados com a viga de perfil W360x44,0.

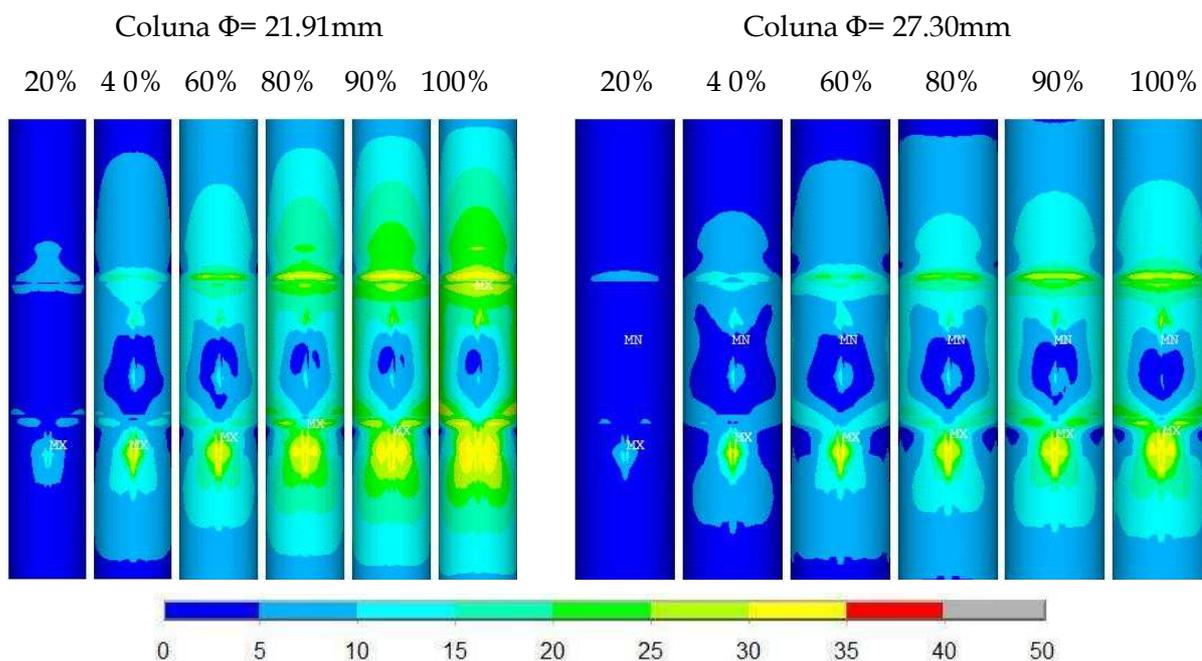


Figura 6.5 – Configuração TCRS-B: tensões equivalentes de Von Mises na face da coluna para ligação com o perfil de viga W360x44 (kN/cm^2).

A figura 6.6 mostra as tensões de Von Mises para o modelo TCRS-B com coluna de diâmetro igual a 219,1mm combinada com os três tipos de viga estudadas: W250x44,8; W310x44,5 e W360x44,0.

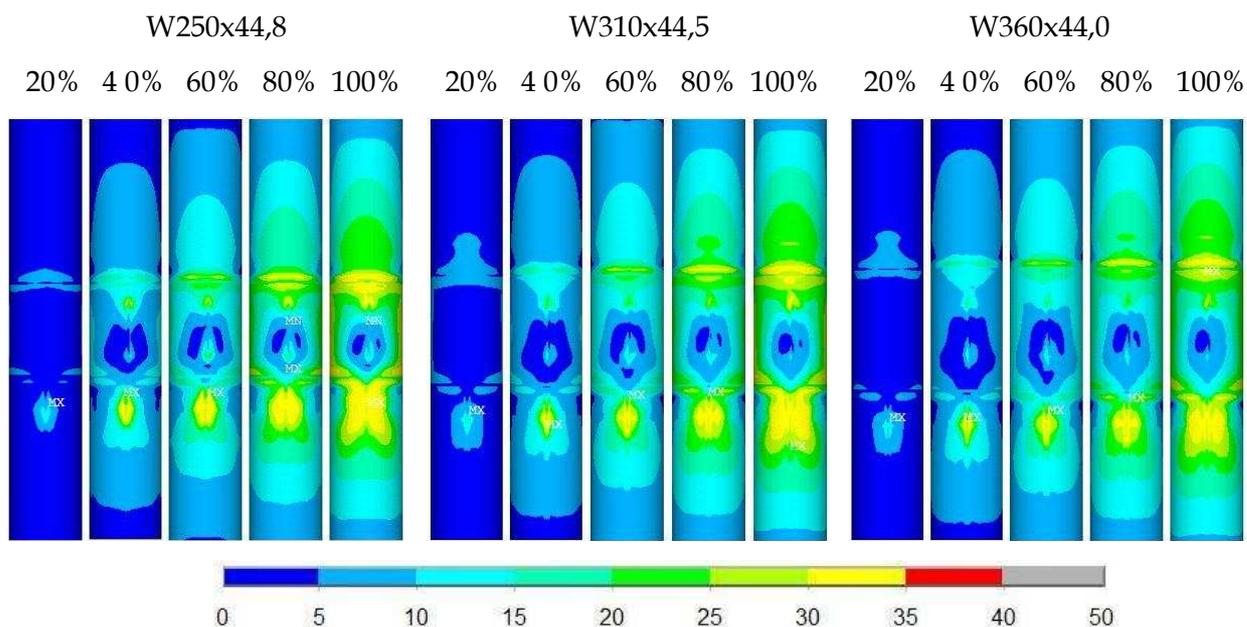


Figura 6.6 – Configuração TCRS-B: tensões equivalentes de Von Mises na face da coluna para ligações com coluna de $\Phi= 21.91\text{mm}$ (kN/cm^2).

6.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através da análise paramétrica foi possível evidenciar que tanto para a ligação soldada TCR-W quanto para a ligação parafusada TCRS-B à medida que se aumenta a rigidez da viga, aumenta-se também a resistência e a rigidez inicial da ligação. Tal fenômeno é justificado pelo aumento do binário resistente, uma vez que ao aumentar a altura da viga, aumenta-se também o braço de alavanca. A ligação TCR-W se mostrou mais sensível às variações de rigidez da viga.

Quanto ao comportamento das ligações para as situações com coluna de maior esbeltez (diâmetro= 27.30mm; espessura=0,93mm; $d/e=29,35$) e com coluna de menor esbeltez (diâmetro= 21.91mm; espessura=0,82mm; $d/e=26,71$), a ligação TCR-W apresentou comportamento similar e a ligação TCRS-B, na situação com tudo de maior esbeltez, obteve maior rigidez inicial, porém sem ganhos de resistência final.

Ainda sob o ponto de vista da variação do diâmetro da coluna, a ligação TCRS-B apresentou menor nível de perturbação local na face do tubo de maior esbeltez. O comportamento da ligação TCRS-B é explicado pelo fato de que ao aumentar o diâmetro do tubo, aumenta-se também a área de transferência de esforços através dos anéis externos.

O aumento da rigidez da viga e o aumento do diâmetro da coluna tendem a reduzir a capacidade de rotação de ambas às ligações.

7 CONCLUSÕES

7.1 CONCLUSÕES FINAIS

Fica evidenciado que classificar as ligações apenas como rígidas ou articuladas não é suficiente. A utilização do conceito de semi-rigidez permite entender melhor o comportamento global das estruturas, e torna as ligações variáveis influentes na produção de dimensionamentos mais realísticos e econômicos.

A boa representatividade dos valores numéricos frente aos valores experimentais nos permite concluir que a metodologia numérica adotada nesse trabalho e em Freitas (2009) foi adequada. Dessa forma podem-se reunir, com maior segurança, informações do comportamento das ligações entre viga de seção I e coluna tubular para as relações de espessuras de chapas aqui estudadas.

As configurações geométricas estudadas mostraram que a utilização de diafragmas externos conectados às vigas por parafusos apresentam boa funcionalidade e solução interessante quando se deseja evitar soldas em campo. Os anéis ajudam a distribuir as tensões provenientes das vigas na face da coluna e possuem grande rigidez em seu plano, o que permite maior aproveitamento da capacidade resistente da coluna. Ressalva-se que a montagem é um fator a ser considerado, tendo em vista as dificuldades do acoplamento horizontal da viga à coluna.

A adição de enrijecedor ao anel externo inferior não se mostrou eficiente, uma vez que os resultados de resistência e rigidez da ligação não sofreram alterações relevantes. Também se observou o aparecimento de uma região com concentração de tensões na face da coluna, o que, a depender das relações geométricas dos elementos conectados, pode limitar a resistência da ligação. Porém, a maior desvantagem apresentada pela presença do enrijecedor foi a plastificação da mesa comprimida,

provocada pelo aumento de rigidez do anel inferior, o que alterou o ponto de rotação da ligação.

Ficou evidenciado que adicionar elementos objetivando enrijecer a ligação nem sempre apresenta êxito, ao contrário, pode alterar o modo de falha e conduzir a ligação a um comportamento inesperado.

A formulação do Eurocode 3 (2005) foi adaptada para as ligações viga-coluna e apresentou boa representatividade na determinação da resistência das ligações. Porém, o código não traz formulação capaz de prever a rigidez das ligações viga-coluna.

As ligações TCR-W, TCR-B e TCRS-B foram classificadas como parcialmente resistentes, segundo o critério de resistência, e como semi-rígidas, segundo o critério de rigidez. Ambos os critérios classificam a ligação TFC-B como flexível.

Através dos estudos numéricos paramétricos concluí-se que na medida em que se aumenta a altura da seção transversal da viga, aumenta-se também o binário resistente da ligação, tornando a ligação mais rígida e resistente.

Ao se aumentar o diâmetro da coluna, notou-se que as ligações TCR-W e TCRS-B não apresentam variações relevantes de resistência e rigidez. Para ligação TCRS-B o aumento do diâmetro da coluna proporcionou melhor distribuição dos esforços e, conseqüentemente, menores tensões na parede da coluna.

Nesse trabalho buscou-se o avanço do conhecimento do comportamento das ligações entre viga de seção I e coluna tubular, ficando evidenciada a necessidade de explorar o conceito de semi-rigidez das ligações tubulares, desenvolvendo aplicações e propondo formulações capazes de prever sua rigidez.

7.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Como propostas de estudos para dar continuidade à análise das ligações entre viga de seção I e coluna tubular circular propõem-se as seguintes investigações:

- Estudo da variação das espessuras das chapas no comportamento das ligações;

- Estudo da influência na ligação da introdução de força diretamente na coluna;
- Estudo de ligações com anéis externos com enrijecedor no anel superior;
- Estudo de ligações com pilares internos, ou seja, quatro vigas por nó;
- Estudo da influência na ligação da relação d/t do tubo;
- Estudos de ligações com pilares preenchidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION (2005). **Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings**. Chicago, USA.

ANSYS Versão 10.0 (2006). Users Manual. ANSYS, Inc.

ARAÚJO, A. H. M.; REQUENA, J. A. V.; MINCHILLO, D. G. V.; THOMAZ, S. A. M. (2001). Projeto, fabricação e montagem de estruturas tubulares - Seção circular. **IV Seminário Internacional O Uso de Estruturas Metálicas na Construção Civil / I Congresso Internacional da Construção Metálica (I CICOM)**. São Paulo, SP - Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2002). **NBR ISO 6892: Materiais metálicos - Ensaio de tração à temperatura ambiente**. Rio de Janeiro.

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

BESSA, W.O. (2009). **Análise experimental e numérica de ligações viga mista-pilar com cantoneiras de alma e assento - pavimento-tipo e ligações isoladas**. 266p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos.

CAO, J. J.; PACKER, J. A.; YANG, G. J. (1998). Yield line analysis of RHS connections with axial loads. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 48, p. 1-25.

CARVALHO, P.H. (2005). **Avaliação numérica do comportamento estrutural de ligação entre pilar de seção tubular circular e viga de seção "I"**. 94p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

EUROCODE 3 (2003). Design of steel structures – Part 1-1: General Rules. European Committee for Standardization, Brussels.

EUROCODE 3 (2003). Design of steel structures – Part 1-8: Design of joints. European Committee for Standardization, Brussels.

EUROCODE 3 (2005). Design of steel structures – Part 1-1: General Rules. European Committee for Standardization, Brussels.

EUROCODE 3 (2005). Design of steel structures – Part 1-8: Design of joints. European Committee for Standardization, Brussels.

FREITAS, P. C. B. (2009). **Análise Numérica de Ligações Metálicas Viga-Coluna Com Coluna Tubular Circular**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

GERKEN, F. S. (2003). **Perfis tubulares: aspectos arquitetônicos e estruturais**. Dissertação (Mestrado em Construção Metálica) - Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

GHOBARAH, A.; MOURAD, S.; KOROL, R. M. (1996) Moment-rotation relationship of blind bolted connections for HSS columns. **J. Construct Steel Research**, v. 40, n. 01, p. 63-91.

JONES, S. W.; KIRBY, P. A.; NETHERCOT, D. A. (1983). The analysis of frames with semi-rigid connections. A State-of-the-Art Report. **Journal of Constructional Steel Research**. v. 03, n. 2, p. 2-13.

KAMEI, C. M. (2001). **Estado da arte das ligações metálicas viga-coluna com comportamento semi-rígido**. Trabalho auxiliar para dissertação de mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

KISHI, N.; CHEN, W. F. (1990). Moment-rotations relations of semi-rigid connections with angles. **Journal of Structural Engineering**. v. 116, n. 07, p. 1813-1834.

KOSTESKI, N.; PACKER, J.A. (2003). Longitudinal Plate and Through Plate-to-Hollow Structural Section Welded Connections. **Journal of structural Engineering**. Vol. 129, No 4, p. 478-486.

KUMAR, S.R.S.; RAO, D.V.P. (2006). RHS beam-to-column connection with web opening - Experimental study and finite element modeling. **Journal of Constructional Steel Research**. Vol. 62, p. 739-746.

MAGGI, Y. I. (2000). **Análise numérica, via MEF do comportamento de ligações parafusadas viga-coluna com chapa de topo**. 235p. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

MAGGI, Y.I. (2004). **Análise do comportamento estrutural de ligações parafusadas viga-pilar com chapa de topo estendida**. 269p. São Carlos. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

MAGGI, Y.I., GONÇALVES, R. M., LEON, R. T., RIBEIRO, L. F. L. (2005). Parametric Analysis of Steel Bolted End Plate Connections Using Finite Element Modelling. **Journal of Constructional Steel Research**, Vol. 61, p. 689-708.

NETHERCOT, D. A.; LI, T. Q.; AHMED, B. (1998). Unified classification system for beam-to-column connections. **Journal of Constructional Steel Research**. v. 45, n. 1, p. 39-65.

PACKER, J. A. (1979). A computer program for the structural analysis of welded tubular Joints with RHS chords. **Advances in Engineering Software**, v. 01, n. 04, p. 153-164.

PACKER, J. A. (1993). Moment connections between rectangular hollow sections. **Journal Constructional Steel Research**, v. 25, p. 63-81.

PACKER, J.A.; HENDERSON, J.A. (1996). **Design guide for hollow structural section connections**. 6.ed. Ont: Canadian Institute of Steel Construction.

PACKER, J.A.; MASHIRI, F.R.; ZHAO, X.L.; WILLIBALD, S. (2007). **Static and fatigue design of CHS-to-RHS welded connections using a branch conversion method**. *Journal of Constructional Steel Research*. Vol. 63, p. 82-95.

RAMBERG, W.; OSGOOD, W. R. (1941). Determination of stress-strain curves by three parameters. **Technical note no. 503. National Advisory Committee on Aeronautics (NACA), USA.**

RAO, D.V.P.; KUMAR, S.R.S. (2006). RHS beam-to-column connection with web opening - Parametric study and design guidelines. **Journal of Constructional Steel Research**. Vol. 62, p. 747-756.

REQUENA, J. A. V.; SANTOS, A. L. E. F. (2007). Dimensionamento de ligações em barras tubulares de estruturas metálicas planas. **Coleção Técnico-Científica V&M do Brasil**. Ed. 1. Campinas, SP - Brasil.

TRISTÃO, G. A. (2006). **Análise teórica e experimental de ligações viga mista-pilar de extremidade com cantoneiras de assento e alma**. 273p. São Carlos. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

WINGERDE, A. M.; PACKER, J. A.; WARDENIER, J. (1995) Criteria for the fatigue assessment of hollow structural section connections. **J. Construct Steel Research**, v. 35, p. 71-115.

WINGERDE, A. M.; PACKER, J. A.; WARDENIER, J. (1997). SCF Formulae for fatigue design of K-connections between square hollow sections. **J. Construct Steel Research**, v. 43, ns 1-3, p. 87-118.

WINGERDE, A.M.; PACKER, J.A.; WARDENIER, J. (2001). Simplified SCF formulae and graphs for CHS and RHS K- and KK-connections. **Journal of Constructional Steel Research**. Vol. 57, p. 221-252.

WINKEL, G.D.DE.; RINK, H.D.; WARDENIER, J.; PUTHLI, R.S. (1993). Behaviour and static strength of unstiffened I-beam to circular column connections under multiplanar in-plane bending moments. **Proceedings of the Third International Offshore and Polar Engineering Conference**. p 167-174.

WINKEL, G.D.; RINK, H.D.; WARDENIER, J. (1994). The static Strength of uniplanar and multiplanar I-beam to tubular column connections loaded with in-plane bending moments. **Proceedings of the Fourth International Offshore and Polar Engineering Conference**. p 65-72.