

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

FELIPE BOTELHO COUTINHO

**COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE LIGAÇÕES DE AÇO COM
DIAFRAGMA EXTERNO ENTRE VIGA DE SEÇÃO I E PILAR
TUBULAR DE SEÇÃO CIRCULAR**

VITÓRIA
2015

FELIPE BOTELHO COUTINHO

**COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE LIGAÇÕES DE AÇO COM DIAFRAGMA
EXTERNO ENTRE VIGA DE SEÇÃO I E PILAR TUBULAR DE SEÇÃO CIRCULAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil na Área de concentração Estruturas.

Orientador: Macksuel Soares de Azevedo

VITÓRIA
2015

FELIPE BOTELHO COUTINHO

**COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE LIGAÇÕES DE AÇO COM
DIAFRAGMA EXTERNO ENTRE VIGA DE SEÇÃO I E PILAR
TUBULAR DE SEÇÃO CIRCULAR**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Estruturas.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Macksuel Soares de Azevedo
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof^a. Dr^a. Adenilcia Fernanda Grobério Calenzani
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador interno

Prof. Dr. Cilmar Donizeti Baságli
Universidade Estadual de Campinas
Examinador externo

A Deus.
À minha esposa Danielle.
Aos meus pais Clóvis e Nilda.
Ao meu irmão Thiago.

Agradecimentos

A Deus por tudo que me tem proporcionado, nada seria possível sem Ele.

À minha esposa Danielle pelo amor incondicional e motivação, por sua dedicação em todos os momentos.

Aos meus pais Clóvis e Nilda pelo apoio e insistência nos meus estudos.

Ao meu irmão Thiago pela grande amizade e alegria proporcionada.

Ao Prof. Macksuel, pela sua disponibilidade e paciência, pela amizade e pelas críticas construtivas.

À Universidade Federal do Espírito Santo, em especial aos professores do departamento de engenharia civil, pela solicitude e valia.

Aos meus colegas do mestrado, em especial a Felipe Barbosa Teixeira, pela auxílio e amizade.

“Bem-aventurado o homem que acha sabedoria,
e o homem que adquire conhecimento.”

Provérbios 3:13

RESUMO

O uso do diafragma externo na ligação de aço entre viga de seção I e pilar tubular de seção circular tem por objetivo o aumento da eficácia na transferência dos seus esforços. As pesquisas tiveram início na década de 1970 no Japão, onde foram feitas análises teóricas e experimentais da sua aplicação - no Brasil os primeiros estudos surgiram em 2005. A norma brasileira para dimensionamento de estruturas tubulares em aço, NBR 16239:2013, não trata especificamente desse assunto, sendo necessária a utilização de pesquisas nacionais e internacionais para embasamento teórico. Neste trabalho são feitas análises numéricas em 104 modelos para diferentes larguras e espessuras do diafragma externo, onde é constatado o aumento proporcional com as suas dimensões da rigidez inicial e da resistência máxima. Também são comparados com os resultados da equação do nono manual do CIDECT (*Comité International Pour Le Développement Et L'étude De La Construction Tubulaire*), que se mostra a favor da segurança e sugere uma reavaliação em seus parâmetros e limites de aplicação.

Palavras chaves: diafragma externo; ligação viga-pilar; estrutura tubular; estrutura de aço.

ABSTRACT

The use of external diaphragm in the connection between I-beam and circular hollow section (CHS) column aims to increase efficiency in the transfer of their efforts. The research began in the early 1970s in Japan, where theoretical and experimental analysis of their application were made - in Brazil the first studies have emerged in 2005. The Brazilian standard for tubular steel structural, NBR 16239:2013, does not specifically address this subject, requiring the use of national and international research to theoretical basis. In this work were made numerical analysis on 104 models for different widths and thicknesses of the external diaphragm, where it was found the proportional increase of the initial stiffness and maximum strength of connections. Also compares the results obtained by ninth manual of CIDECT (*Comité International Pour Le Développement Et L'étude De La Construction Tubulaire*), which proved to be in favor of safety and it suggested re-evaluation of its parameters and application limits.

Keywords: external diaphragm; beam-column connection; structural hollow section; steel structure

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Sede do NEXEM	14
Figura 1.2: Capacidade de compressão entre perfis de igual massa com comprimento de 5 m.....	15
Figura 1.3: Diafragma externo, aeroporto de Auckland, Nova Zelândia.....	16
Figura 1.4: Disposição do diafragma externo parafusado a mesa da viga.....	17
Figura 2.1: Momento para a viga em (a); o apoio em (b); e a ligação em (c).....	20
Figura 2.2: Curva momento-rotação genérica.....	20
Figura 2.3: Intervalos de classificação para rigidez inicial, S_i	21
Figura 2.4: Ligação entre viga de seção I e pilar tubular de seção circular, com chapa simples em (a), e com a mesa soldada no pilar em (b).....	23
Figura 2.5: Pilar tubular circular a ser preenchido com concreto.....	24
Figura 2.6: Ligação enrijecida por meio da continuidade da viga através do pilar	24
Figura 2.7: Ligação viga-pilar por meio de diafragma passante.....	25
Figura 2.8: Diafragma externo (vermelho) na ligação, com vista isométrica em (a) e superior em (b).....	25
Figura 2.9: Modelos de diafragma externo.....	26
Figura 2.10: Ligação com diafragma externo.....	27
Figura 2.11: Modelo dos diafragmas externos de Tabuchi (medidas em mm).....	28
Figura 2.12: Modelo numérico de Rink (1991).....	28
Figura 2.13: Diafragma externo na ligação, segundo o AIJ de 1990.....	29
Figura 2.14: Ligação com diafragma externo entre viga e pilar.....	31
Figura 2.15: Tensões de von Mises para ligação com diafragma externo e enrijecedor vertical inferior. Em vermelho a plastificação do aço.....	32
Figura 2.16: Região da flambagem local no pilar para os três modelos ensaiados...	33
Figura 2.17: Deformação da mesa inferior da viga para ligação com diafragma externo.....	34
Figura 2.18: Tensões máximas nas regiões mais escuras, sem diafragma externo em (a), para a largura do diafragma externo igual a 45 mm em (b), e largura igual a 90 mm em (c).....	35
Figura 2.19: Tensões máximas na região mais escura: falha apenas na viga devido ao enrijecedor vertical.....	35
Figura 2.20: Modelos de ligações entre viga de seção I e pilar tubular de seção circular: sem diafragma externo em (a) e com diafragma externo em (b).....	35
Figura 2.21: Modelos de diafragmas externos e seção de pilares utilizados.....	36
Figura 2.22: Ligação entre viga I e pilar tubular circular.....	38
Figura 2.23: Verificações de resistência para ligações entre a viga I e o pilar tubular circular.....	38
Figura 2.24: Modos de falha em ligações.....	39
Figura 2.25: Modelos de diafragmas externo.....	39

Figura 2.26: Distorção da parede do pilar em (a), e falha da ligação devido a concentração de tensões em (b).	40
Figura 2.27: Fenômeno de ovalização do pilar.	40
Figura 2.28: Ligação tipo T em (a) e X em (b).	41
Figura 2.29: Ligação tipo T com chapa simples transversal ao pilar	43
Figura 2.30: Ligação com chapa longitudinal ao pilar	44
Figura 2.31: Ligação tipo T, entre viga I e pilar tubular circular	45
Figura 2.32: Influência de β	46
Figura 2.33: Diafragma externo na ligação	47
Figura 3.1: Geometria do experimento de Masioli (2011)	50
Figura 3.2: Momento-rotação para diferentes esforços de compressão no pilar (Nrd)	51
Figura 3.3: Restrição do pilar e força F do modelo TCR-W	53
Figura 3.4: Restrição ao deslocamento lateral na região da metade da viga em (a), e na sua extremidade em (b).	54
Figura 3.5: Representação da restrição da viga	54
Figura 3.6: Distribuição de extensômetros e transdutores de deslocamento no experimento TCR-W	55
Figura 3.7 Comportamento do transdutor de deslocamento 15	55
Figura 4.1: Sequência da análise numérica	56
Figura 4.2: Geometria do modelo numérico TCR-W	58
Figura 4.3: Detalhe da seção da viga e do pilar do modelo numérico TCR-W	58
Figura 4.4: Cortes das áreas na região da ligação entre viga e pilar do modelo numérico TCR-W	59
Figura 4.5: Elemento <i>Shell181</i>	60
Figura 4.6: Rotação no sentido anti-horário na extremidade da viga	61
Figura 4.7: Curvas tensão-deformação dos aços	62
Figura 4.8: Regiões para as duas dimensões de referência do modelo numérico TCR-W	63
Figura 4.9: Disposição inicial dos elementos no modelo TCR-W	64
Figura 4.10: Condições de contorno do modelo numérico, TCR-W	65
Figura 4.11: Seção transversal do pilar acima do diafragma externo.	66
Figura 4.12: Corte da seção longitudinal do pilar e do diafragma externo	66
Figura 4.13: Modelo numérico para ligação com diafragma externo com $t_d=6$ mm, sendo em (a) $h_d=10$ mm e em (b) $h_d=70$ mm	68
Figura 4.14: Modelo numérico para ligação com diafragma externo com $t_d= 20$ mm, sendo em (a) $h_d= 10$ mm e em (b) $h_d= 70$ mm	69
Figura 5.1: Convergência do modelo numérico TCR-W	71
Figura 5.2: Modelo numérico TCR-W	71
Figura 5.3: Comportamento da viga na altura do enrijecedor vertical	72
Figura 5.4: Experimento TCR-W	73
Figura 5.5: Referência de rotação da ligação	74
Figura 5.6: Momento-rotação do TCR-W – diferentes pontos	74

Figura 5.7: Vista frontal da ligação submetida à força máxima: sem restrição lateral ao deslocamento, em (a), e com restrição, em (b).....	75
Figura 5.8: Vista lateral da ligação submetida à força máxima: sem restrição lateral ao deslocamento, em (a), e com restrição, em (b).....	75
Figura 5.9: Momento-rotação do TCR-W – diferentes restrições	76
Figura 5.10: Momento-rotação do TCR-W – diferentes imperfeições geométricas ...	76
Figura 5.11: Comportamento momento-rotação do modelo numérico TCR-W	77
Figura 5.12: Tensões de von Mises no modelo TCR-W. (Valores em MPa)	78
Figura 5.13: Tensões de von Mises no modelo TCR-W para a ligação. (Valores em MPa).....	78
Figura 5.14: Rotação da ligação, para $F=49,0$ kN aplicado na extremidade da viga	79
Figura 5.15: Máximas tensões de von Mises no pilar, para $F=49,0$ kN aplicado na extremidade da viga	80
Figura 5.16: Tensões de von Mises no modelo em: (a) TCR-W e em (b), diafragma externo ($h_d=70$ mm e $t_d=20$ mm)	81
Figura 5.17: Tensões de von Mises na ligação em: (a) TCR-W e em (b), diafragma externo ($h_d=70$ mm e $t_d=20$ mm)	82
Figura 5.18: Momento-rotação para a ligação com diafragma externo	83
Figura 5.19: Principais curvas momento-rotação	83
Figura 5.20: Resistência máxima para o intervalo de h_d entre 10 e 70 mm.....	84
Figura 5.21: Deformação do modelo para a força máxima, com $t_d=6$ mm e $h_d= 10$ mm. Vista frontal em (a), e vista lateral em (b).....	85
Figura 5.22: Deformação do modelo para a força máxima, com $t_d=20$ mm e $h_d= 70$ mm. Vista frontal em (a), e vista lateral em (b).....	85
Figura 5.23: Resistência máxima da ligação	86
Figura 5.24: Rigidez inicial da ligação	87
Figura 5.25: Resistência máxima das ligações	88
Figura 5.26: Rigidez inicial das ligações	88
Figura 5.27: Tensões de von Mises (Mpa) para a resistência máxima da ligação: $t_d=6$ mm, com $h_d=10$ mm em (a), e $h_d= 70$ mm em (b)	89
Figura 5.28: Tensões de von Mises (Mpa) para a resistência máxima da ligação: $t_d= 20$ mm, com $h_d=10$ mm em (a) e $h_d= 70$ mm em (b)	90
Figura 5.29: Momento resistente máximo da equação do CIDECT-DG9 (Kurobane, 2004)	91
Figura 5.30: Comparativo entre os resultados numéricos para a equação do CIDECT-DG9 (Kurobane, 2004).....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Resistência axial para a chapa transversal	43
Tabela 2.2: Resistência axial da chapa longitudinal.....	44
Tabela 2.3: Força axial resistente da ligação	45
Tabela 3.1: Propriedades geométricas da viga I	51
Tabela 3.2: Propriedades geométricas do pilar tubular circular.....	51
Tabela 3.3: Resistência média dos aços	52
Tabela 4.1: Pontos tensão e deformação.....	61
Tabela 4.2: Dimensões para o diafragma externo, em destaque os valores além dos limites do CIDECT-DG9 (Kurobane, 2004)	68
Tabela 5.1: Características numérica do modelo	70
Tabela 5.2: Força máxima na extremidade da viga.....	72
Tabela 5.3: Principais parâmetros do modelo numérico TCR-W.....	77

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	14
1.2	JUSTIFICATIVA	15
1.3	OBJETIVOS	17
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	COMPORTAMENTO MOMENTO-ROTAÇÃO	19
2.1.1.1	Classificação quanto à rigidez, segundo o EN 1993-1-8:2005.....	21
2.1.1.2	Classificação quanto à resistência, segundo o EN 1993-1-8:2005	22
2.2	FORMAS DE AUMENTO DA RIGIDEZ E RESISTÊNCIA NUMA LIGAÇÃO.....	23
2.3	ESTUDOS DE LIGAÇÕES COM DIAFRAGMA EXTERNO	26
2.4	MODOS DE FALHA DA LIGAÇÃO	37
2.5	RESISTÊNCIA DAS LIGAÇÕES	41
2.5.1	Sem diafragma externo	41
2.5.1.1	Chapa simples transversal.....	42
2.5.1.2	Chapa simples longitudinal	43
2.5.1.3	Viga I.....	44
2.5.1.4	Considerações a respeito das equações	46
2.5.2	Com diafragma externo	47
3	EXPERIMENTO DE MASIOLI (2011)	50
3.1	PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS	51
3.2	PROPRIEDADES DOS MATERIAIS.....	52
3.3	CONDIÇÕES DE CONTORNO E CARREGAMENTO	53
3.4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	54
4	ANÁLISE NUMÉRICA	56
4.1	MODELO NUMÉRICO TCR-W	57
4.1.1	Análise Estrutural	57
4.1.2	Geometria do modelo	57
4.1.3	Elemento finito	59
4.1.4	Não-Linearidade geométrica	60
4.1.5	Propriedades físicas dos materiais	61
4.1.6	Mapeamento e discretização da malha de elementos finitos	62

4.1.7	Condições de contorno e carregamento.....	64
4.2	ACRÉSCIMO DO DIAFRAGMA EXTERNO.....	65
4.2.1	Características geométrica	65
4.2.2	Dimensões adotadas	66
5	RESULTADOS	70
5.1	MODELO NUMÉRICO TCR-W	70
5.1.1	Dimensão do elemento finito	70
5.1.2	Validação do modelo numérico	72
5.1.3	Comportamento da ligação do modelo TCR-W	74
5.1.3.1	Rotação da ligação	74
5.1.3.2	Restrição lateral da viga.....	75
5.1.3.3	Imperfeição geométrica inicial.....	76
5.1.3.4	Modelo numérico TCR-W.....	77
5.2	LIGAÇÃO COM DIAFRAGMA EXTERNO	78
5.2.1	Comparação com o modelo TCR-W	79
5.2.1.1	Rotação máxima da ligação.....	79
5.2.1.2	Tensões de von Mises no pilar	80
5.2.2	Comportamento da ligação para as forças máximas aplicadas na extremidade da viga.....	82
5.2.2.1	Momento resistente máximo	84
5.2.2.2	Rigidez inicial	86
5.2.2.3	Correlações da ligação com as geometrias do diafragma externo	87
5.2.2.4	Tensões de von Mises na ligação.....	89
5.2.3	Comparação com os resultados do CIDECT	90
6	CONCLUSÃO	92
6.1	COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO COM DIAFRAGMA EXTERNO	92
6.2	PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS.....	92
	REFERÊNCIAS.....	93

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O uso da estrutura tubular de aço é principalmente em virtude do conceito arquitetônico do projeto, por apresentar aparência uniforme e não possuir arestas, o qual proporciona a melhor passagem das correntes de vento e água, além de não depositar sujeira, resultando na sua simples manutenção. Como exemplo de utilização tem-se: pilares; andaimes; treliças espaciais; vigas treliçadas; arcos; plataformas de petróleo; etc.. A Figura 1.1 mostra a aplicação da estrutura tubular de aço no Núcleo de Excelência em Estrutura Metálica (NEXEM), da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), o qual é composto de vigas e pilares em seção tubular circular e perfil de seção aberta.

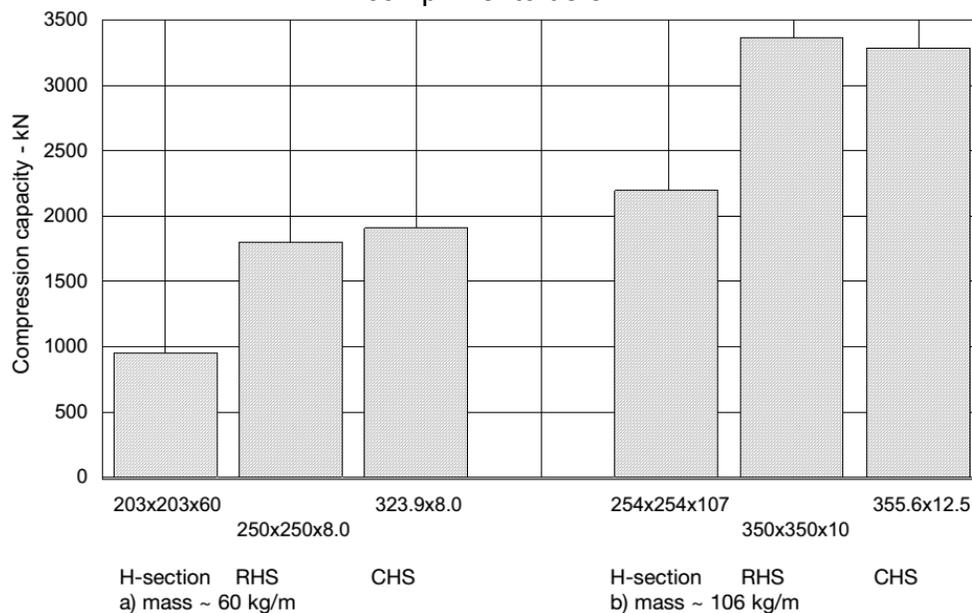
Figura 1.1: Sede do NEXEM



Fonte: Acervo pessoal

Os perfis tubulares de seção circular também apresentam vantagens estruturais em comparação aos de seção aberta (I, U, C, etc.), onde apresentam o mesmo comportamento a flambagem para todas as direções, grande resistência a torção e a possibilidade de enchimento com concreto. O raio de giração é maior do que o de seção aberta com área similar, resultando numa menor esbelteza para o mesmo comprimento e maior resistência a compressão. Além disso, em função do método de fabricação, as tensões residuais pouco influenciam, sendo geralmente distribuídas de maneira uniforme ao longo da seção. Na Figura 1.2 tem se um estudo analítico apresentando a vantagem estrutural, quando submetido a compressão, dos perfis tubulares, RHS (retangular) e CHS(circular), em comparação com os perfis de seção aberta, para uma mesma área de seção.

Figura 1.2: Capacidade de compressão entre perfis de igual massa com comprimento de 5 m



Fonte: Kurobane (2004)

1.2 JUSTIFICATIVA

As ligações entre vigas e pilares desempenham um papel fundamental no comportamento global das estruturas tubulares de aço, o que proporciona um elevado e contínuo interesse da comunidade técnico-científica em realizar trabalhos de pesquisa com o objetivo de entender o seu comportamento real. No entanto para

ligação com diafragma externo, que segundo Kamba (1993) é a forma mais simples de enrijecer uma ligação, a maioria das normas técnicas não abordam o seu dimensionamento, sendo necessários estudos para embasamento teórico da sua aplicação. Na Figura 1.3 é mostrado um exemplo do uso do diafragma externo entre viga de seção I e pilar tubular de seção circular.

Figura 1.3: Diafragma externo, aeroporto de Auckland, Nova Zelândia

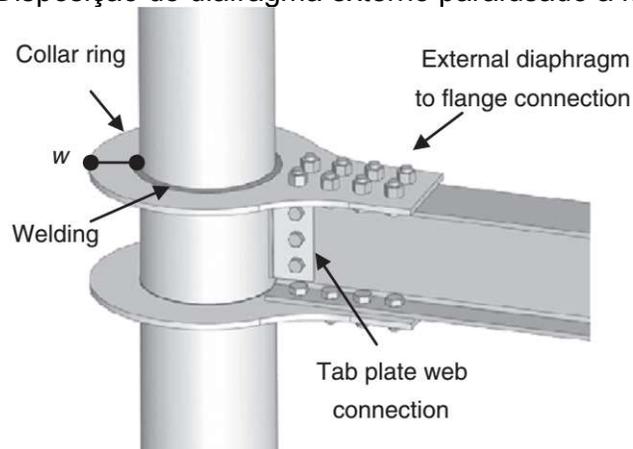


Fonte: Disponível em: <www.atlastube.com>. Acesso em: 17 out. 2013.

No Brasil, apesar do crescimento do uso das estruturas tubulares, ainda são poucas as pesquisas sobre o comportamento das ligações com diafragma externo. A norma brasileira para ligações tubulares em aço, NBR 16239:2013, e as principais normas internacionais, americana AISC 360-10 e europeia EN 1993-1-8:2005, não fazem referência sobre a sua utilização. As equações de dimensionamento são limitadas ao Instituto de Arquitetura do Japão (AIJ) de 1990 “*Recommendations for Design and Fabrication of Tubular Structures in Steel*” na seção 4.4.5, conforme tradução do japonês para o inglês *apud* Kamba (1993), e ao nono manual do CIDECT-DG9 (*Comité International Pour Le Développement Et L'étude De La Construction Tubulaire – Design Guide 9: For Structural Hollow Section Column Connections*) para ligações em perfis tubulares escrito por Kurobane (2004), o qual é referência deste trabalho. O que demonstra a necessidade de estudos, principalmente no âmbito das técnicas construtivas nacionais, sobre esse elemento enrijecedor e sua influência no comportamento da ligação. Na Figura 1.4 é ilustrado um exemplo de diafragma

externo e a sua disposição na ligação entre viga de seção I e pilar tubular circular de seção circular.

Figura 1.4: Disposição do diafragma externo parafusado a mesa da viga



Fonte: Sabbagh (2013)

1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é estudar o comportamento estrutural da ligação de aço com diafragma externo entre viga de seção I e pilar tubular de seção circular.

Os objetivos específicos consistem em:

- a) Elaborar modelos numéricos em elementos finitos de forma a representar o comportamento não linear, geométrico e do material;
- b) Validar os modelos numéricos com resultados experimentais da literatura;
- c) Verificar a influência do diafragma externo para a rigidez inicial e resistência máxima da ligação;
- d) Avaliar os resultados obtidos numericamente com as equações disponíveis no CIDECT-DG9 (Kurobane, 2004).

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A estrutura da dissertação é composta de seis capítulos, onde no primeiro é apresentado a introdução da pesquisa sobre a utilização de diafragma externo na ligação entre viga de seção I e pilar tubular de seção circular.

No capítulo dois é exposto a sua revisão bibliográfica, com estudos nacionais e internacionais sobre o assunto. Também são mostrados os métodos analíticos para o dimensionamento da ligação entre viga de seção I e pilar tubular de seção circular, de acordo com a NBR 16239:2013 e o EN 1993-1-8:2010, além da equação da resistência para o uso do diafragma externo de acordo com o CIDECT-DG9 (Kurobane, 2004).

No capítulo três é abordado o modelo experimental de Masioli (2011), o qual é utilizado para validação do modelo numérico em uma ligação entre viga de seção I e pilar tubular de seção circular sem diafragma externo.

No capítulo quatro descreve-se a metodologia utilizada na preparação do modelo numérico, identificando as características e dimensões, tipo de elemento finito utilizado, condição de contorno e carregamento.

No capítulo cinco é mostrado a validação do modelo numérico e os resultados da análise da ligação com diafragma externo, com a avaliação da sua influência para a rigidez inicial e resistência máxima.

No sexto capítulo contém as conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

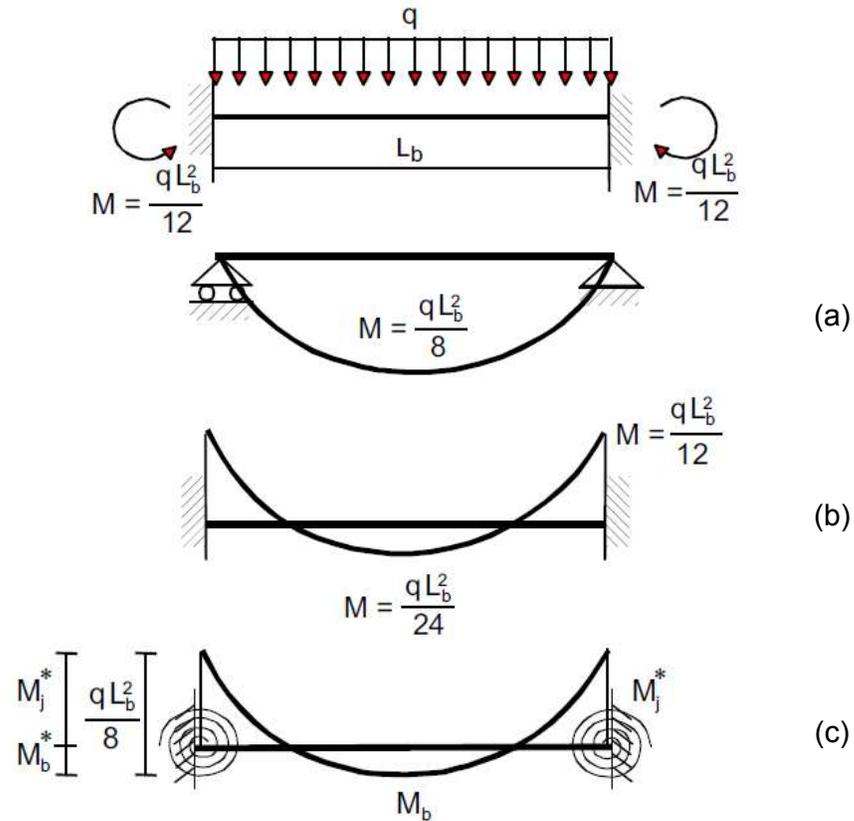
Nesse capítulo são apresentados os principais fatores que influenciam na ligação entre viga de seção I e pilar tubular de seção circular, com suas principais características e formas de enrijecimento. Também é mostrado a evolução dos estudos para o diafragma externo e da sua equação resistente.

2.1 COMPORTAMENTO MOMENTO-ROTAÇÃO

A principal característica de uma ligação é o seu comportamento momento-rotação, que representa o deslocamento relativo entre a viga e o pilar para um momento aplicado em função das suas condições de apoio. A obtenção pode ser de diferentes formas: experimental; analítica; ou numérica. Sua análise é feita após aplicação dos esforços a ligação, onde é verificada a rotação relativa entre os elementos juntamente com sua resistência. A Figura 2.1 representa esse comportamento, para a viga de comprimento L_b e os elementos dos apoios para um dado carregamento q , com o momento M correspondente ao momento nos apoios e M_b para o momento na metade da viga, onde em uma primeira análise, a ligação é rotulada em (a), rígida em (b) e semirrígida em (c).

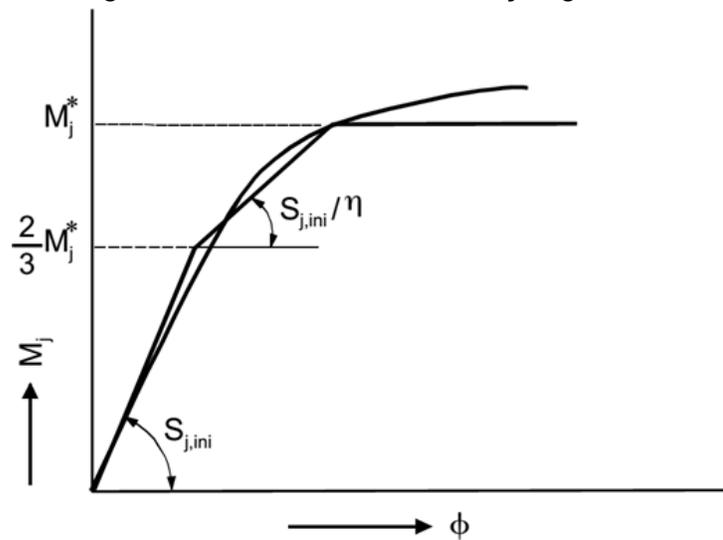
Na Figura 2.2 é mostrada a representação genérica do comportamento de uma ligação por meio da curva momento-rotação ($M_j-\Phi$), com três diferentes fases: a primeira correspondendo a fase elástica dos materiais, a segunda ao início e o fim da plastificação do aço, e a terceira correspondente ao período que já ocorreu toda a plastificação do aço. Onde $S_{j,ini}$, conforme o EN 1993-1-8:2005, representa a rigidez inicial, que é a resistência da ligação a rotação quando submetida a um momento na fase (elástica) do carregamento. Para a rigidez correspondente ao início da plastificação do aço, da viga ou do pilar, tem-se $S_{j,ini}/\eta$, com η sendo um fator associado ao tipo de ligação e M_j^* correspondente ao momento resistente máximo.

Figura 2.1: Momento para a viga em (a); o apoio em (b); e a ligação em (c)



Fonte: Kurobane (2004)

Figura 2.2: Curva momento-rotação genérica



Fonte: Kurobane (2004). Figura adaptada pelo autor.

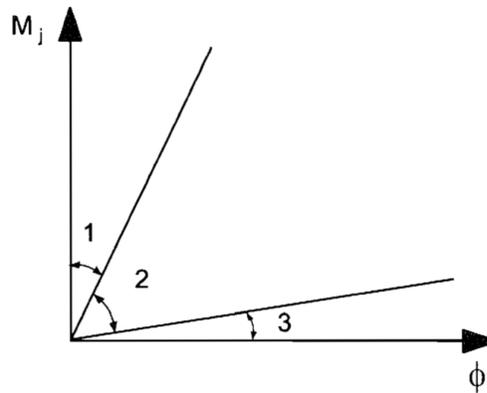
Para o comportamento momento-rotação há ainda a classificação das ligações conforme a sua rigidez e resistência máxima. A NBR 8800:2008 trata de forma

superficial esse assunto, indicando como referência o EN 1993-1-8:2005 o qual é adotado neste trabalho - a simbologia utilizada será a da norma brasileira.

2.1.1.1 Classificação quanto à rigidez, segundo o EN 1993-1-8:2005

Referente à rigidez inicial da ligação, corresponde à fase elástica do comportamento momento-rotação. Segundo este critério a ligação é classificada conforme a Figura 2.3.

Figura 2.3: Intervalos de classificação para rigidez inicial, S_i



Fonte: EN 1993-1-8:2005

Sendo:

a) Rígida na zona 1, quando:

$$S_i \geq \frac{k_v EI_v}{L_v} \quad (2.1)$$

Onde possui rigidez rotacional suficiente para justificar uma análise baseada em continuidade completa entre os elementos adjacentes a ligação.

b) Rotulada na zona 3, quando:

$$S_i \leq \frac{0,5 EI_v}{L_v} \quad (2.2)$$

O que permite rotações relativas entre os elementos submetidos às solicitações externas, sem transmitir momento fletor considerável que possa afetar a estrutura.

c) Semirrígida na zona 2. Quando não atendem aos critérios básicos de uma ligação rígida ou rotulada, ou seja, se encontra no intervalo entre as zonas 1 e 3.

Onde:

k_v : Valor médio de I_v/L_v para todas as vigas (rigidamente ligadas) do nível acima do andar analisado, sendo:

- Igual a 8 para pórticos em que o sistema de contraventamento reduz o deslocamento horizontal em pelo menos 80%;

- Igual a 25, para outros pórticos, desde que em todos os pavimentos $K_v/K_p \geq 0,1$. Para ligações onde $K_v/K_p < 0,1$ a ligação deverá ser classificada como semirrígida.

k_p : Valor médio de I_p/L_p para todos os pilares deste andar;

I_v : Momento de inércia da seção transversal da viga;

I_p : Momento de inércia da seção transversal do pilar;

L_v : Vão da viga medido entre os eixos dos pilares;

L_p : Altura do pilar relativa ao pé-direito do pavimento;

E: Módulo de elasticidade da viga.

2.1.1.2 Classificação quanto à resistência, segundo o EN 1993-1-8:2005

Neste critério é feita uma comparação entre o momento resistente da ligação com o momento resistente dos elementos adjacentes, sendo:

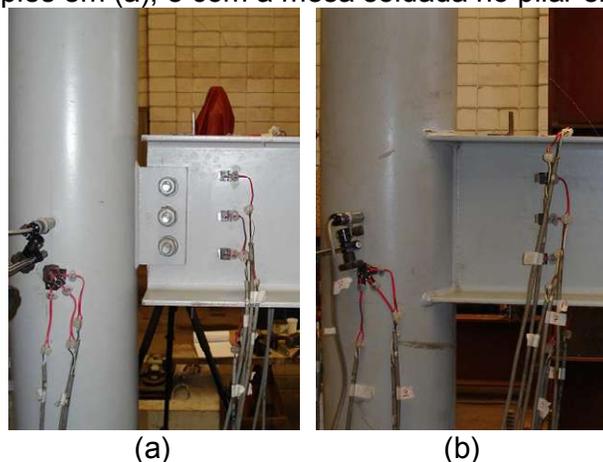
- Totalmente resistente: Apresenta momento resistente igual ou maior do que os elementos da ligação. Devendo ser atendidos os seguintes critérios na análise das estruturas: onde não há continuidade do pilar, como em pilares de topo de edificações, o momento resistente da ligação deve ser maior do que o momento de plastificação da viga e do pilar; em pavimentos intermediários de edificações, 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.

- Rotulada: Caso o momento de cálculo não seja superior à 0,25 vezes o momento para uma ligação totalmente resistente, desde que a ligação tenha também capacidade de rotação suficiente.
- Parcialmente resistente: Analogamente a ligação semirrígida, corresponde ao intervalo entre as ligações rotulada e totalmente resistente.

2.2 FORMAS DE AUMENTO DA RIGIDEZ E RESISTÊNCIA NUMA LIGAÇÃO

Na ligação entre viga de seção I e pilar tubular de seção circular, a chapa de alma ou chapa simples é a que possui maior facilidade na sua execução e consiste numa chapa soldada ao pilar, ainda na fábrica, que posteriormente é conectada a viga por meio de parafusos, conforme é mostrado na Figura 2.4-(a), e tem por característica a pequena capacidade de restrição, não transmitindo momentos significativos ao pilar. Para as mesas da viga ligadas ao pilar, de acordo com o mostrado na Figura 2.4-(b), Packer (1997) destaca: “[...] as ligações resistentes ao momento fletor em pilares de seção tubular não enrijecido têm comportamento semirrígido e o momento resistente utilizado no dimensionamento é limitado pelo momento de plastificação devido ao carregamento na face do pilar[...]”, onde o enrijecimento da ligação é uma das formas de se combater esse efeito, no qual Kamba (1993) fornece algumas recomendações específicas para esse fim.

Figura 2.4: Ligação entre viga de seção I e pilar tubular de seção circular, com chapa simples em (a), e com a mesa soldada no pilar em (b)



Para a condição exclusiva do pilar, tem-se: o preenchimento com concreto, armado ou não, conforme é apresentado na Figura 2.5; a utilização de chapa de reforço na face do pilar; e o aumento da espessura da parede do pilar. Procedimentos esses que apesar de aumentarem a resistência da ligação, não a tornam completamente rígida, de acordo com Kamba (1993).

Figura 2.5: Pilar tubular circular a ser preenchido com concreto

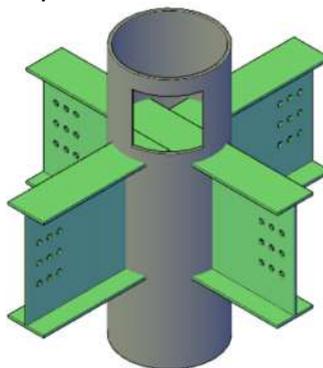


Fonte: Winkel (1998)

Para as vigas, tem-se:

- A possibilidade da sua continuidade através do pilar, conforme é mostrado na Figura 2.6, por meio da realização de cortes na face do pilar, sendo a viga secundária interrompida devido a presença da principal.

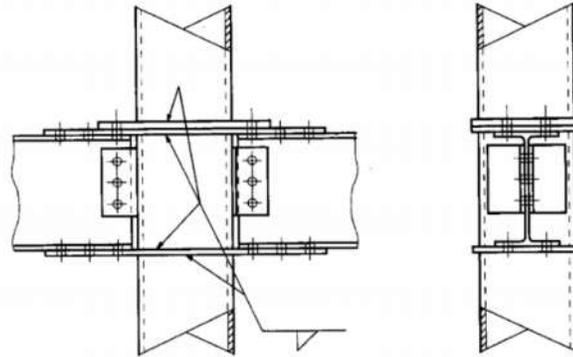
Figura 2.6: Ligação enrijecida por meio da continuidade da viga através do pilar



Fonte: Pereira (2013)

- A utilização de diafragma passante, com a interrupção completa da seção do pilar entre a altura correspondente a parte inferior e superior da viga, com o acréscimo de duas chapas transversais ligadas as vigas, conforme é apresentado na Figura 2.7.

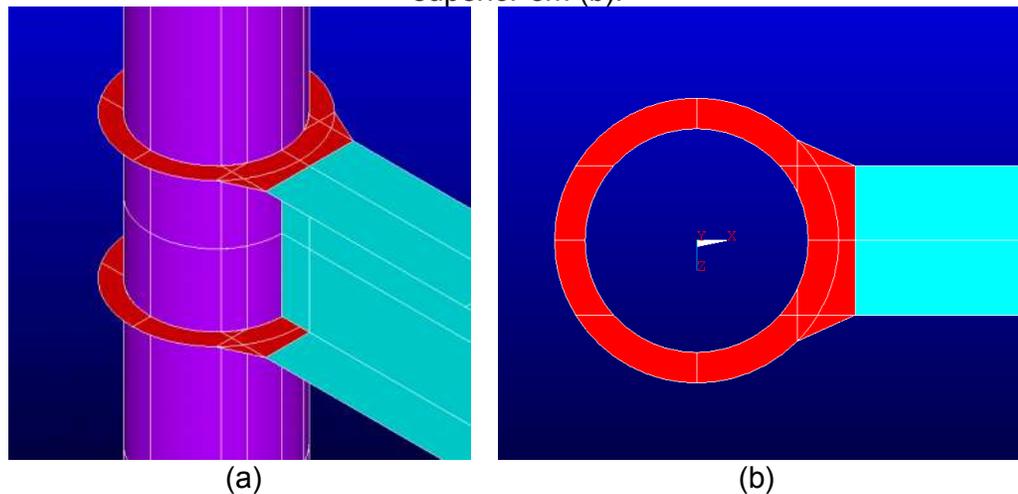
Figura 2.7: Ligação viga-pilar por meio de diafragma passante



Fonte: Packer (1997). Figura adaptada pelo autor.

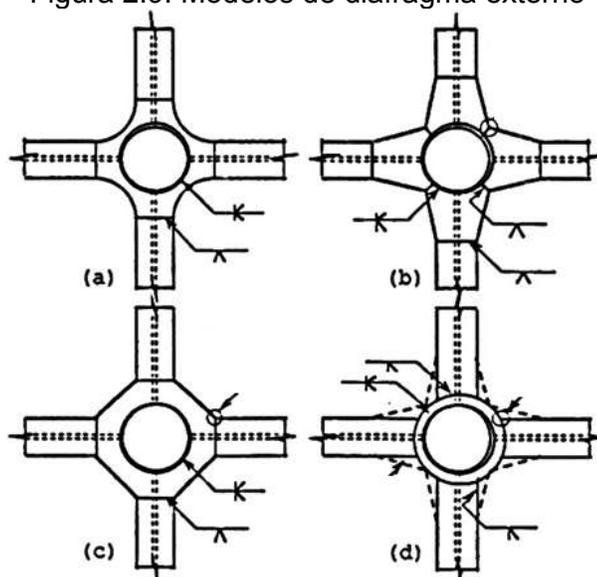
- E o uso do diafragma externo, que corresponde a fixação de uma chapa ao redor do pilar ligado as mesas da viga, de acordo com o mostrado na Figura 2.8. O qual é capaz de transmitir momento fletor entre os elementos, proporcionando o alívio da concentração de tensões na face do pilar, e segundo Kamba (1993), é a melhor alternativa para o enrijecimento das ligações entre viga de seção I e pilar tubular de seção circular. Além disso pode apresentar diferentes formatos, circular ou poligonal, como é ilustrado na Figura 2.9.

Figura 2.8: Diafragma externo (vermelho) na ligação, com vista isométrica em (a) e superior em (b).



Fonte: Acervo pessoal

Figura 2.9: Modelos de diafragma externo



Fonte: Kamba (1993). Figura adaptada pelo autor.

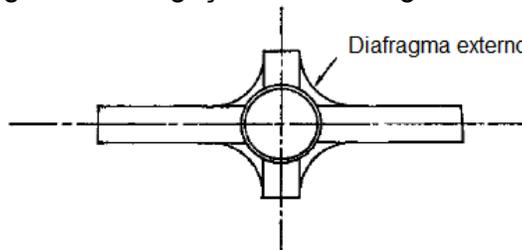
2.3 ESTUDOS DE LIGAÇÕES COM DIAFRAGMA EXTERNO

Os estudos de ligações com diafragma externo iniciaram com Wakabayashi (1971), que destacou a contribuição no ganho da resistência pela presença de diafragmas externos na ligação. Durante os anos oitenta, segundo Kurobane (2004), estudos de Kamba e Tabuchi contribuíram consideravelmente para a equação da ligação com diafragma externo do AIJ em 1990. Na década de noventa, destaca-se o trabalho de Kamba (1993) que apresentou a tradução para o inglês do capítulo da norma japonesa correspondente às ligações com diafragma externo. Kurobane (2004) no início deste século, em sua publicação associada ao CIDECT, apresenta uma nova equação para cálculo da resistência da ligação com diafragma externo. No Brasil o primeiro registro sobre o comportamento da ligação entre viga e pilar com diafragma externo foi realizado por Carvalho (2005). Para este trabalho são contemplados os históricos de pesquisa específico para ligação com diafragma externo entre viga de seção I e pilar tubular de seção circular.

Wakabayashi (1971) realizou os primeiros experimentos, em três tipos diferentes de ensaios, envolvendo diafragma externo na ligação entre viga de seção I e pilar tubular de seção circular. O primeiro foi em escala real, analisando separadamente os

esforços verticais e horizontais na extremidade da viga, o segundo em escala a 1/3 do tamanho real e o terceiro com chapa na lateral ao pilar tubular circular, simulando a mesa da viga. Neste último foram feitos onze experimentos onde foram analisados parâmetros da resistência da ligação da espessura e do raio do tubo, além da consideração do diafragma externo conforme é mostrado na Figura 2.10.

Figura 2.10: Ligação com diafragma externo



Fonte: Wakabayashi (1971). Figura adaptada pelo autor.

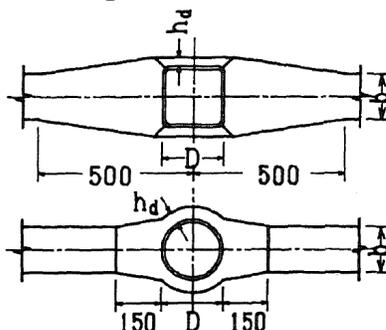
O autor constatou nos resultados do modelo em escala reduzida, resistência aproximada ao seu correspondente em escala real. Para a consideração apenas da chapa, verificou que a resistência à força aplicada era menor daqueles que não possuíam diafragma externo, não influenciando de forma considerável as dimensões em comparação à sua presença na ligação.

Kamba em 1982, *apud* Pereira (2013), investigou o colapso local da ligação com diafragma externo entre viga de seção I e pilar tubular de seção circular. Vinte e nove modelos experimentais foram estudados, com análise das suas dimensões e parâmetros que influenciam na resistência. No ano seguinte, em continuidade a esse trabalho, desenvolveu equação empírica para a resistência da ligação com diafragma externo entre viga de seção I e pilar tubular de seção circular. Em 1986, Kamba, Kanatani e Tabuchi, em sequência aos resultados experimentais de Kamba, analisaram as ligações com diafragma externo entre viga de seção I e o pilar tubular de seção circular submetidas a esforços verticais e horizontais, além das equações propostas por Kamba em 1983. Concluíram que, para as situações onde a falha ocorreu por deformação local, as expressões de Kamba foram satisfatórias, enquanto para os outros casos, algumas adaptações foram sugeridas.

Tabuchi (1988) estudou a ligação com diafragma externo entre viga de seção I e pilar tubular de seção circular para estrutura submetida a esforços laterais. Foram feitos testes com 39 protótipos, considerando pilar tubular circular ou retangular, conforme

é apresentado na Figura 2.11. Os modos de falha encontrados no conjunto da ligação foram a deformação excessiva devido a força cisalhante, flambagem local e falha da ligação em razão da parede do pilar.

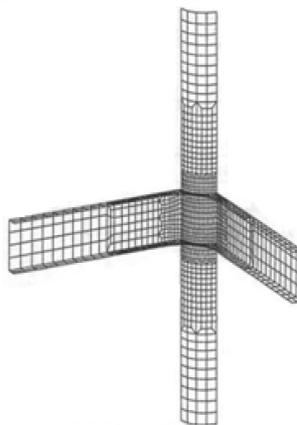
Figura 2.11: Modelo dos diafragmas externos de Tabuchi (medidas em mm)



Fonte: Tabuchi (1988)

Rink (1991) analisou numericamente a aplicação de diafragmas externos nas estruturas de plataforma *offshore*, utilizou programa de elementos finitos MARC e comparou os seus resultados com a equação do AIJ de 1990. Considerou as não linearidades de geometria e de material, elemento finito tipo casca com quatro nós e seis graus de liberdade em cada nó, e geometria correspondente a apenas 1/4 do modelo total com o objetivo da economia do tempo de cálculo computacional, como é exibido na Figura 2.12. O seu modelo numérico foi validado de acordo com o experimento de Wakabayashi (1971) e na sua análise variou a largura do diafragma externo, a mesa da viga e a espessura do pilar.

Figura 2.12: Modelo numérico de Rink (1991)



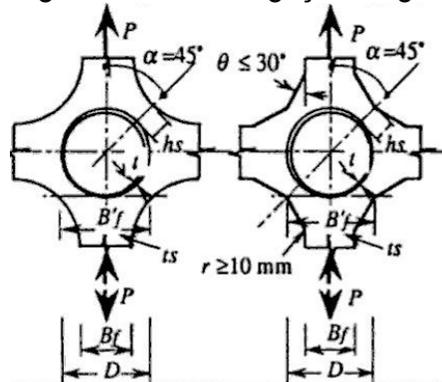
Fonte: Rink (1991)

Nos seus resultados verificou que a resistência da ligação decresceu consideravelmente com a aplicação de carregamento axial ao pilar ou quando

submetido à esforços oriundos de momentos assimétricos. Concluiu também que a equação do AIJ de 1990 apresentou resultado similar ao encontrado no modelo numérico, mas recomendou cautela na sua utilização para pequenos valores da razão entre espessura da mesa da viga e espessura do pilar. Em todos os casos constatou que o modo de falha foi a flambagem local da mesa inferior da viga. Com o aumento da largura do diafragma externo verificou ganho considerável na resistência da ligação, não tanto quanto a equação do AIJ de 1990.

Kamba (1993) fez inicialmente uma breve exposição das possíveis formas de enrijecimento da ligação entre viga de seção I e pilar tubular de seção circular. Em seguida apresentou a equação da resistência da ligação com diafragma externo e citou que os seus resultados correspondem à 50% dos obtidos em testes experimentais. Kamba (1993) também traduziu para o inglês as equações e procedimentos de cálculo resistente da equação (2.1) para a ligação com diafragma externo de acordo com o AIJ de 1990, conforme Figura 2.13. A simbologia é própria do AIJ de 1990.

Figura 2.13: Diafragma externo na ligação, segundo o AIJ de 1990



Fonte: Kamba (1993)

$$P = \left(3,28 \frac{B'_f}{D} + 1,43 \right) \cdot t \cdot \sqrt{t_s(t + h_s)} \cdot F_2 \quad (2.3)$$

Onde:

$$\text{Se: } \sqrt{2} \left(\frac{D}{2} + h_s \right) \geq D; B'_f = D \quad (2.4)$$

$$\text{Se: } \sqrt{2} \left(\frac{D}{2} + h_s \right) < D; B'_f \text{ deverá ser obtido geometricamente} \quad (2.5)$$

O intervalo de validade da equação, é conforme as equações (2.4) e (2.5).

$$15 \leq \frac{D}{t} \leq 55 \quad (2.6)$$

$$\frac{B'_f}{2t_s} \leq \frac{237}{\sqrt{F_1}} \quad (2.7)$$

Onde:

P – Resistência axial da ligação com diafragma externo ao nível da mesa da viga.

h_s – Largura do diafragma externo

t_s – Espessura do diafragma externo

B'_f – Largura cônica do diafragma externo, junto ao pilar

t – Espessura da parede do pilar

D – Diâmetro do pilar

F_1 – Tensão de escoamento do aço do diafragma externo e

F_2 – Tensão de escoamento do aço do pilar.

No trabalho de Kamba (1993), também é citado a aplicação teórica feita por Rink (1991) e sua consideração errônea da largura cônica do diafragma externo, além do modo de falha diferente ao contemplado pelo AIJ de 1990. Nas suas conclusões, o acréscimo da largura do diafragma externo não proporcionou aumento relevante na resistência da ligação, como sugere a equação do AIJ de 1990.

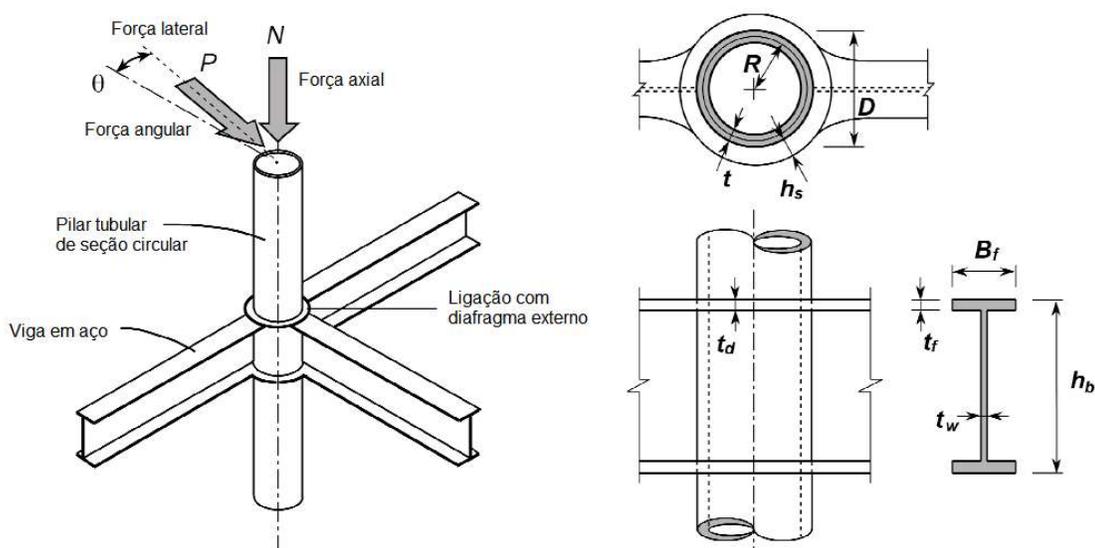
Packer (1997) apresentou um estudo sobre estrutura tubular contemplando o cálculo da resistência para perfis e ligações e relata a pesquisa do uso do diafragma externo feita por Kato em 1981, que de forma simples, apresenta como uma chapa de aço no entorno do pilar. Também mostra a equação do AIJ de 1990, adotando como referência a tradução feita para o inglês por Kamba (1993).

Kurobane (2004) elaborou o manual do CIDECT-DG9 para ligações em estruturas tubulares, onde propôs uma equação para o cálculo da força resistente da ligação com diafragma externo entre viga de seção I e pilar tubular de seção circular diferente da apresentada pelo AIJ de 1990, que segundo o próprio autor, apresenta maior confiabilidade. Essa equação será utilizada como referência no desenvolvimento desse trabalho.

Carvalho (2005) foi um dos pioneiros nas pesquisas com diafragmas externos no Brasil, e por meio de análise numérica da ligação entre viga de seção I e pilar tubular de seção circular analisou o comportamento dessas ligações. Analisou as tensões e forças últimas para 8 configurações diferentes, compreendendo ligação com chapa simples e com diafragma externo. Concluiu que o comportamento da ligação com diafragma externo foi análogo à uma viga bi engastada.

Sui (2007) deduziu equações de força e rigidez, para a ligação com diafragma externo entre viga de seção I e pilar tubular de seção circular, por meio de regressão linear dos resultados obtidos de modelos numéricos com diferentes geometrias. Após a validação utilizou trinta e dois modelos numéricos em sua pesquisa, onde também analisou forças de compressão axial e lateral no pilar. Na Figura 2.14, são apresentados as principais características consideradas em seu modelo numérico - a simbologia é própria do autor.

Figura 2.14: Ligação com diafragma externo entre viga e pilar



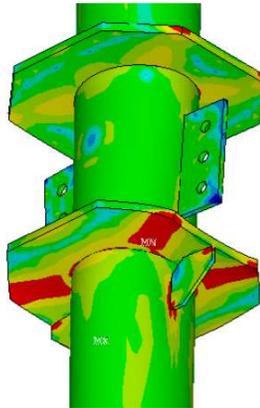
Fonte: Sui (2007). Figura adaptada pelo autor.

Sui (2008) analisou numericamente o uso de diafragmas externos nas ligações entre viga de seção I e pilar tubular de seção circular para a estrutura submetida à abalos sísmicos. Adotou 12 modelos diferentes para a simulação, sendo compostas de vigas e pilares com diferentes geometrias. Em seus resultados recomendou o uso do diafragma externo (ligações semirrígidas) para a dissipação da concentração de

energia, onde concluiu que o seu uso pôde direcionar a energia histórica dos pilares através das ligações, evitando assim o colapso da estrutura.

Freitas (2009), com base nos estudos realizados por Carvalho (2005), analisou numericamente as ligações entre viga de seção I e pilar tubular de seção circular. Validou seu trabalho de acordo com Winkel (1998), e através de trinta diferentes configurações classificou as ligações conforme a rigidez e a resistência de acordo com o EN 1993-1-8:2005. Em seu trabalho concluiu que a presença de diafragmas externos foi significativa na absorção das forças provenientes do binário das mesas da viga, aumentando a resistência da ligação e a sua rigidez, com redução da área plastificada na face do pilar. Para o uso de enrijecedor vertical inferior ao diafragma externo, conforme é mostrado na Figura 2.15, constatou a plastificação da parede do pilar antes que as demais tensões do aço atingissem o seu patamar máximo, ficando a resistência da ligação restrita apenas a esta região.

Figura 2.15: Tensões de von Mises para ligação com diafragma externo e enrijecedor vertical inferior. Em vermelho a plastificação do aço



Fonte: Freitas (2009)

Li (2010) analisou experimentalmente a ligação com diafragma externo entre viga de seção I e pilar tubular de seção circular utilizando três protótipos de diferentes larguras. Os resultados experimentais mostraram com o aumento da largura do diafragma externo, ocorreu proporcionalmente a dissipação da energia do sismo e o acréscimo da resistência ao momento. O modo de falha foi a flambagem local do pilar próximo ao diafragma externo, conforme é mostrado na Figura 2.16, para os três protótipos.

Figura 2.16: Região da flambagem local no pilar para os três modelos ensaiados



Fonte: Li (2010)

Wang (2010) fez uma breve comparação para a ligação com diafragma externo entre os resultados experimentais e a equação do AIJ de 1990. Na China, relatou que é usual adotar a largura mínima do diafragma externo igual a 70% da largura da mesa da viga, de forma a garantir que toda a força de tração e compressão seja transferida ao pilar. Em seus resultados, concluiu que os valores analíticos foram inferiores aos experimentais. Também analisou numericamente o fluxo das forças entre a viga, o diafragma externo e o pilar, onde constatou ser conservadora a consideração construtiva chinesa sobre a largura do diafragma externo. Ainda recomendou tamanho máximo para a largura do diafragma externo, a fim de evitar a deformação plástica da parede do pilar.

Masioli (2011), dando sequência aos estudos realizados por Carvalho (2005) e Freitas (2009), realizou pesquisas analítica, numérica e experimental de ligações entre viga de seção I e pilar tubular de seção circular. Ensaiou ligações com a presença ou não do diafragma externo, bem como o uso ou não de enrijecedor vertical inferior ao diafragma externo, através de quatro modelos reais. Para o estudo analítico utilizou o método das componentes de acordo com o EN 1993-1-8:2005. Para os modelos com diafragma externo, TCR-B e TCRS-B, a ligação obteve um ganho considerável da resistência em comparação com o TCR-W, sem diafragma externo, mas com a mesa da viga ligada ao pilar. O uso do enrijecedor vertical abaixo do diafragma externo, TCRS-B, seguindo os resultados encontrados por Freitas (2009), não influenciou significativamente na resistência da ligação. A Figura 2.17 apresenta a falha para ligação com diafragma externo no modelo TCRS-B.

Figura 2.17: Deformação da mesa inferior da viga para ligação com diafragma externo

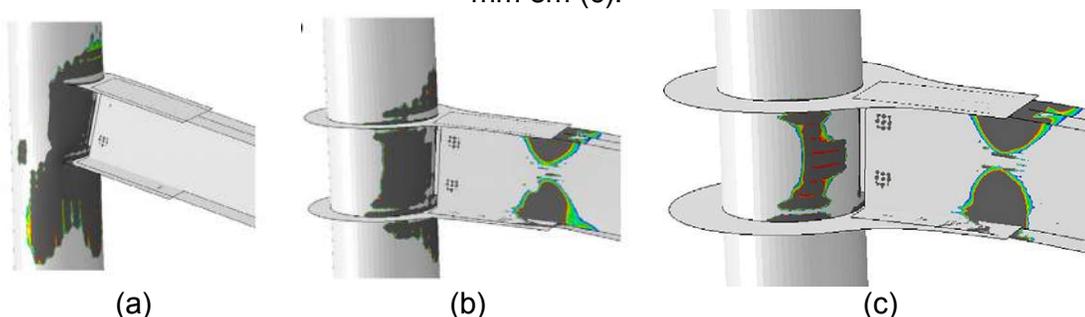


Fonte: Masioli (2011)

O autor supracitado também realizou um estudo numérico para diferentes geometrias, sendo seis do tipo TCR-W e outras seis TCRS-B. Avaliou parâmetros que influenciaram na resistência da ligação, onde constatou o aumento da rigidez diretamente proporcional ao aumento das geometrias da viga e do pilar.

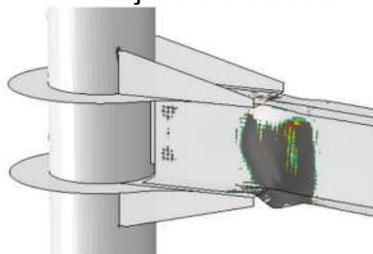
Sabbagh (2013) pesquisou a influência do diafragma externo, com e sem enrijecedor vertical, na ligação entre viga de seção I e pilar tubular de seção circular sob a condição de sismo – o modelo numérico foi validado a partir de experimentos sem o diafragma externo. Os resultados mostraram que apenas a presença do diafragma externo, independente da largura, foi suficiente para o aumento da resistência da ligação, o qual eliminou a falha na parede do pilar. Destacou que os principais modos de falha são a distorção do pilar na altura da região da alma da viga e a concentração de tensões de cisalhamento no diafragma. A Figura 2.18 apresenta a mudança da região de concentração de tensões, que se desloca do pilar para a viga, em função do diafragma externo. Também pesquisou a influência do uso do enrijecedor vertical no diafragma externo, como mostrado na Figura 2.19, de forma a prevenir a distorção da parede do pilar causada pela alta rigidez da ligação.

Figura 2.18: Tensões máximas nas regiões mais escuras, sem diafragma externo em (a), para a largura do diafragma externo igual a 45 mm em (b), e largura igual a 90 mm em (c).



Fonte: Sabbagh (2013)

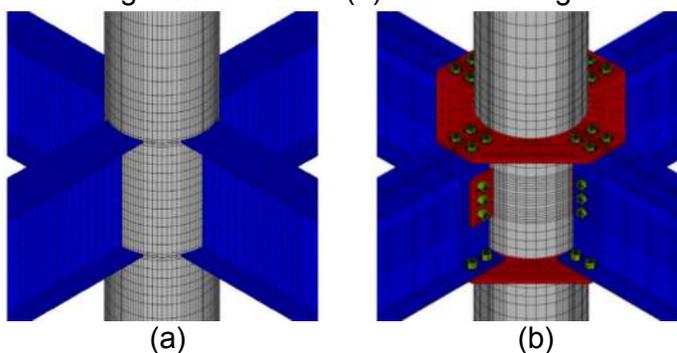
Figura 2.19: Tensões máximas na região mais escura: falha apenas na viga devido ao enrijecedor vertical



Fonte: Sabbagh (2013)

Pereira (2013) analisou o comportamento estrutural das ligações entre viga de seção I e pilar tubular de seção circular por meio de estudo analítico e numérico, para as situações de pilar de canto (solicitado por duas vigas), e central (solicitado por quatro vigas). Na ligação com diafragma externo simulou 10 modelos numéricos, onde analisou a influência de diversos parâmetros como: força vertical aplicada na extremidade da viga; a espessura do pilar; espessura da chapa do diafragma; diâmetro dos parafusos; e comprimento da viga. Na Figura 2.20 são mostrados os tipos de ligações utilizados.

Figura 2.20: Modelos de ligações entre viga de seção I e pilar tubular de seção circular: sem diafragma externo em (a) e com diafragma externo em (b).



Fonte: Pereira (2013)

Nos resultados numéricos dos modelos com diafragma externo, a falha não ocorreu na face do pilar, com as tensões nessa região inferiores ao limite do escoamento do aço. Também concluiu que a variação da espessura da parede do pilar não influenciou de forma considerável o comportamento da ligação. No entanto a variação da espessura da chapa do diafragma externo aumentou a resistência da ligação. Para as vigas, a intensidade da tensão na mesa superior foi diretamente proporcional ao aumento da espessura da chapa do diafragma externo, ocorrendo falhas da ligação nessa região, causando o cisalhamento dos parafusos ou a plastificação da mesa da viga.

Dessouki (2014) analisou numericamente a resistência da ligação com diafragma externo entre viga de seção I e pilar tubular de seções, circular ou quadrado, preenchidos ou não com concreto. Na Figura 2.21 são mostrados os quatro tipos de geometria adotados para o diafragma externo. Na análise numérica o modelo foi validado sem o diafragma externo e sem o preenchimento do concreto, onde verificou a diferença máxima de 10% na relação dos valores com os resultados experimentais.

Figura 2.21: Modelos de diafragmas externos e seção de pilares utilizados



Fonte: Dessouki (2014)

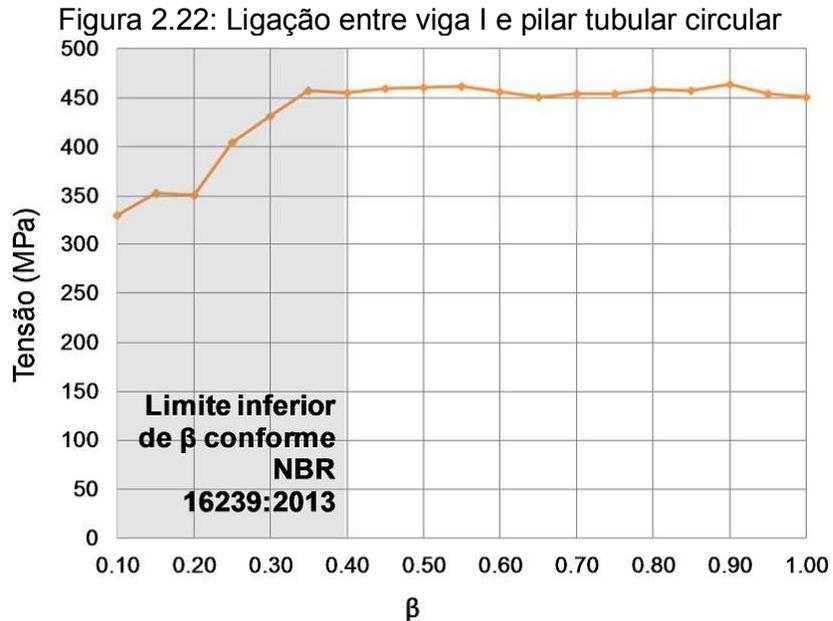
O autor supracitado constatou, consoante as geometrias do diafragma externo, que as falhas podem ocorrer tanto no enrijecedor quanto na mesa da viga. Além disso relatou a vantagem deste tipo de ligação para a seção do pilar circular em relação a quadrada, por não possui aresta viva para concentração de tensões o que diminui a ocorrência de flambagem local do diafragma externo. No caso do preenchimento do pilar com concreto, a sua influência foi limitada à redução dos valores de deformação, sendo que a resistência ao momento teve acréscimo de 33% para ligação sem diafragma externo e de 39% com diafragma externo. No entanto para essa última relação, o aumento da resistência decresceu com o incremento na espessura do enrijecedor. Por último o autor fez uma breve comparação, para pilar quadrado e circular com diafragma externo preenchido com concreto, entre os resultados numéricos das equações do AIJ de 1990 e do CIDECT-DG9 (Kurobane, 2004), que apresentou correlação entre os valores, com destaque aos resultados para o CIDECT-DG9 (Kurobane, 2004) que se mostraram mais conservadores.

Coutinho (2014), através de estudo numérico de Rink (1991), realizou um estudo analítico para ligação com diafragma externo onde comparou a resistência para as equações do AIJ de 1990 e do CIDECT-DG9 (Kurobane, 2004). Concluiu o aumento considerável da resistência da ligação para a inserção do diafragma externo, recomendando o uso das equações do CIDECT-DG9 (Kurobane, 2004).

2.4 MODOS DE FALHA DA LIGAÇÃO

Segundo Requena (2007) “Problemas de flexão na parede surgem principalmente quando um ou mais tubos de pequeno diâmetro são soldados na sua extremidade a um tubo maior e quando a razão entre as espessuras das paredes e o diâmetro do tubo maior é relativamente pequena.”, gerando efeitos de instabilidade na ligação – nesse caso a ocorrência da flambagem da parede na face do pilar na ligação. De forma análoga, para a ligação entre viga I e pilar tubular circular, a falha pode ocorrer quando há perda de estabilidade da estrutura ou quando se alcança o estado limite último para as tensões de alguns dos elementos da ligação, sendo caracterizado alguns modos predominantes conforme as geometrias e a natureza das solicitações.

Coutinho (2015) estudou numericamente o comportamento da ligação entre viga de seção I e pilar tubular de seção circular, onde variou apenas a largura da mesa da viga e observou a mudança do colapso da ligação, de flambagem local da parede do pilar para o escoamento do aço. A Figura 2.23 mostra esse aumento da tensão no pilar conforme aumento da relação entre a largura da mesa e o diâmetro (β), onde se estabiliza para a tensão de ruptura do aço. A NBR 16239:2013 estabelece um limite mínimo de 0,4 para o β , o qual podemos constatar a sua influência como limitador mínimo do modo de falha na ligação para tensão máxima no pilar. Pereira (2013) em estudo similar para ligação entre viga I e pilar tubular circular apresenta algumas verificações desse tipo de ligação, como mostra a Figura 2.23.



Fonte: Coutinho (2015)

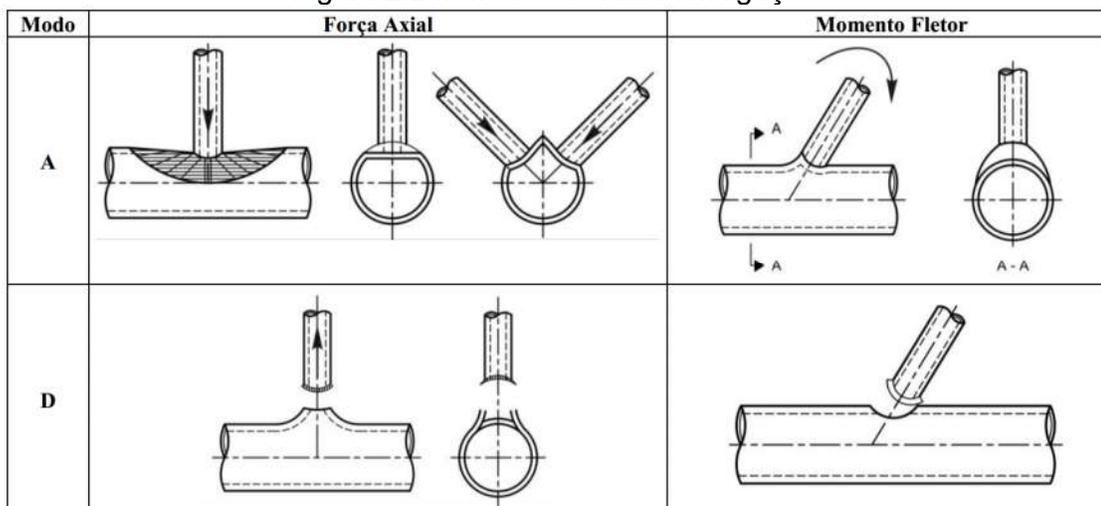
Figura 2.23: Verificações de resistência para ligações entre a viga I e o pilar tubular circular

Tipo de ligação	Componentes a verificar
<p><u>Ligação soldada</u></p>	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ Cisalhamento na face do pilar na região tracionada pela mesa superior da viga; ⇒ Plastificação da parede do pilar na região comprimida pela mesa inferior da viga; ⇒ Plastificação da seção da viga; ⇒ Soldas.

Fonte: Pereira (2013). Figura adaptada pelo autor.

A NBR 16239:2013 trata especificamente das estruturas tubulares de aço e apresenta critérios de falha para a ligação entre viga de seção I e pilar tubular de seção circular, como é mostrado na Figura 2.24 (análogo entre a viga tubular circular e a viga de seção I), onde são apresentados os modos de falha: A, referente a plastificação da face ou de toda a seção transversal do pilar junto a viga; e D, correspondente à ruptura por punção da parede do pilar na região do contato junto à viga.

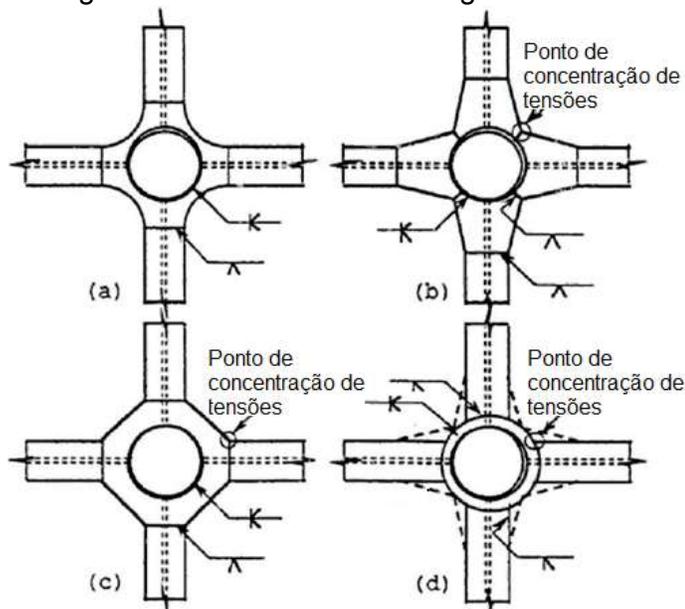
Figura 2.24: Modos de falha em ligações



Fonte: NBR 16239:2013.

Para a ligação com diafragma externo, o CIDECT-DG9 (Kurobane, 2004) cita que as falhas podem ocorrer devido aos cantos reentrantes ou nas soldas entre os elementos, e recomenda evitar cantos agudos com a sugestão de raio mínimo igual a 10 mm, como é ilustrado na Figura 2.25. O CIDECT-DG9 (Kurobane, 2004), ainda relata que a melhor geometria para o diafragma externo é a de linhas concordantes (Figura 2.25-(a)).

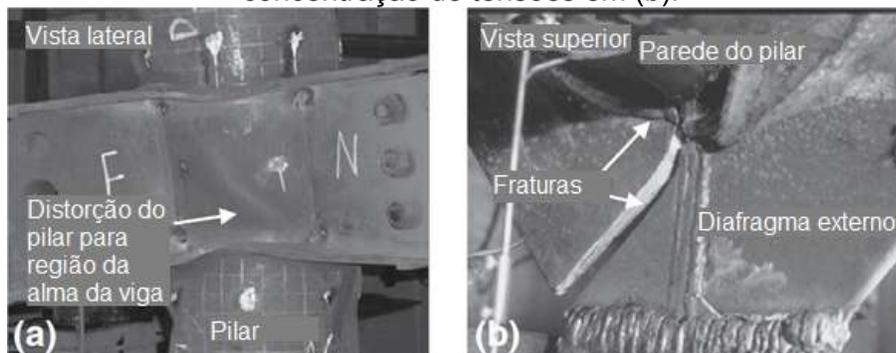
Figura 2.25: Modelos de diafragmas externo.



Fonte: Kamba (1993). Figura adaptada pelo autor

Sabbagh (2013) apresenta alguns modos de falha para a ligação com diafragma externo, que compreende a distorção do pilar e as falhas na solda, conforme é mostrado na Figura 2.26.

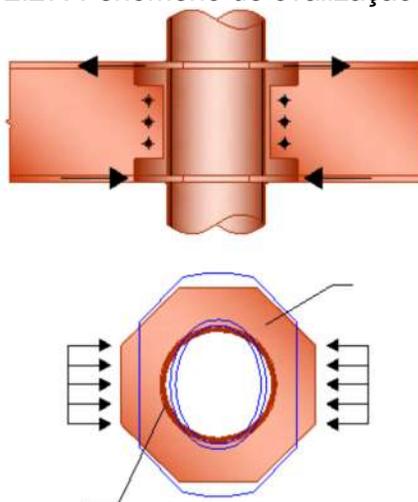
Figura 2.26: Distorção da parede do pilar em (a), e falha da ligação devido a concentração de tensões em (b).



Fonte: (a) Wang *apud* Sabbagh (2013). (b) Schneider *apud* Sabbagh (2013). Figura adaptada pelo autor

Freitas (2009) também constata modo de falha para a ligação com diafragma externo na condição de carregamento simétrico, onde o confinamento gerado pelos esforços da mesa da viga contribuem para efeitos de ovalização do pilar, conforme é mostrado na Figura 2.27.

Figura 2.27: Fenômeno de ovalização do pilar



Fonte: Freitas (2009)

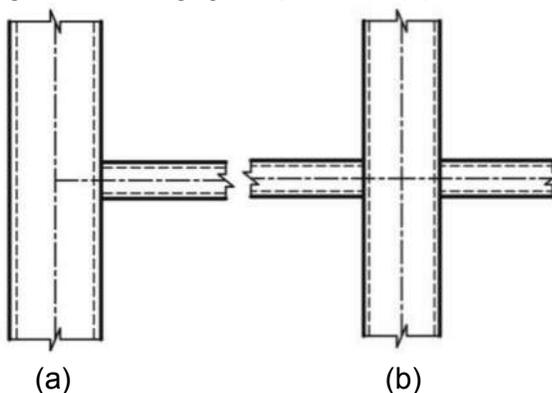
2.5 RESISTÊNCIA DAS LIGAÇÕES

Neste item é apresentado as resistências de ligações entre viga de seção I e pilar tubular de seção circular, sendo primeiramente mostrado para a ligação sem diafragma externo, com a viga soldada ao pilar, e depois com o diafragma externo. Após isso é feito uma breve comparação entre as equações, com destaque aos principais fatores que contribuem nos seus resultados.

2.5.1 Sem diafragma externo

Uma breve revisão analítica é feita das normas NBR 16239:2013 e a EN 1993-1-8:2005 com o propósito de analisar e destacar os principais fatores que contribuem para a resistência da ligação entre viga de seção I e pilar tubular de seção circular. O colapso corresponde a plastificação da parede do pilar junto a ligação (modo de falha A, do item 2.4) e o momento resistente corresponde ao plano principal. Na Figura 2.28 tem-se dois tipos de ligações, T e X, referência deste trabalho.

Figura 2.28: Ligação tipo T em (a) e X em (b)



Fonte: NBR 16239:2013

A simbologia adotada e os seus parâmetros é conforme a NBR 16239:2013, sendo:

N_{ch} – Resistência axial da chapa no tubo;

$N_{ch,Rd}$ – Resistência axial de cálculo da chapa;

$N_{1,Rd}$ – Resistência axial de cálculo para a viga de seção I;

$M_{ip,ch,Rd}$ – Resistência ao momento de cálculo da chapa, longitudinal ao pilar;

$M_{ip,1,Rd}$ – Resistência ao momento de cálculo para a viga de seção I, longitudinal ao pilar;

d_0 – Diâmetro do pilar;

t_0 – A espessura da parede do pilar;

b_1 – Largura do montante, ou da mesa da viga no pilar tubular circular;

h_{ch} – Altura da chapa longitudinal;

h_1 – Altura total do montante, ou da viga no pilar tubular circular;

β – Razão entre a largura da mesa da viga e o diâmetro do pilar, com $\beta \geq 0,4$;

K_p – Fator de redução da resistência da ligação, sendo $k_p = 1,0$ para tração e $k_p = 1 - 0,3 \cdot n_p \cdot (1 + n_p)$ para compressão, onde n_p é a razão entre a tensão no banzo e na chapa;

η – Relação entre a altura da alma da viga e a sua espessura, com $\eta \leq 4,0$;

γ_{a1} – Coeficiente de segurança da NBR 16239:2013, sendo igual a 1,0;

γ_{M5} – Coeficiente de segurança do EN 1993-1-8:2005, sendo igual a 1,1.

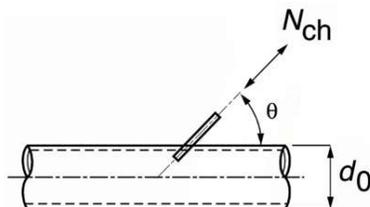
Os perfis devem ser compactos, de acordo com a NBR 8800:2008.

Os principais termos que influenciam na resistência da ligação são o $f(\beta)$, correspondente à relação entre a mesa da viga e o diâmetro do pilar tubular circular e o $f(\eta)$, referente à influência da alma na resistência da ligação. Esses dois termos são exibidos em destaque para melhor compreensão das equações.

2.5.1.1 Chapa simples transversal

Na Figura 2.29 é apresentado a resistência axial da ligação com chapa transversal no pilar tubular circular. Na Tabela 2.1 são mostrados os parâmetros que compõem a equação (2.8), correspondente à NBR 16239:2013 e o EN 1993-1-8:2005.

Figura 2.29: Ligação tipo T com chapa simples transversal ao pilar



Fonte: NBR 16239:2013. Figura adaptada pelo autor.

Tabela 2.1: Resistência axial para a chapa transversal

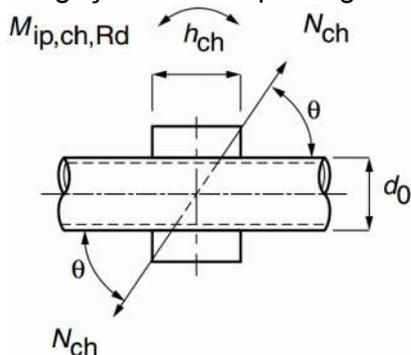
Norma	$f(\beta)$		CS
	T	X	
NBR 16239:2013	$\frac{(4,4 + 22 \cdot \beta^2)}{\sin \theta}$	$\frac{5,5}{(1 - 0,81\beta) \cdot \sin \theta}$	$\frac{1}{\gamma_{a1}}$
EN 1993-1-8:2005	$(4 + 20 \cdot \beta^2)$	$\frac{5}{1 - 0,81\beta}$	$\frac{1}{\gamma_{M5}}$

$$N_{ch,Rd} = f(\beta) \cdot k_p \cdot f_{y0} \cdot t_0^2 \cdot CS \quad (2.8)$$

2.5.1.2 Chapa simples longitudinal

Para a ligação com chapa longitudinal no tubo, conforme é mostrado na Figura 2.30, a Tabela 2.2 apresenta os parâmetros da equação resistente (2.9). A chapa longitudinal apresenta a resistência ao momento no plano principal devido à possibilidade da ocorrência do binário de forças, conforme a equação (2.10) para a NBR 16239:2013, e equação (2.11) segundo o EN 1993-1-8:2005.

Figura 2.30: Ligação com chapa longitudinal ao pilar



Fonte: NBR 16239:2013. Figura adaptada pelo autor.

Tabela 2.2: Resistência axial da chapa longitudinal

Norma	$f(\eta)$ (ligação tipo T ou X)	CS
NBR 16239:2013	$\frac{5,5(1 + 0,25\eta)}{\text{sen}\theta}$	$\frac{1}{\gamma_{a1}}$
EN 1993-1-8:2005	$5(1 + 0,25\eta)$	$\frac{1}{\gamma_{M5}}$

$$N_{ch,Rd} = f(\eta) \cdot k_p \cdot f_{y0} \cdot t_0^2 \cdot CS \quad (2.9)$$

$$M_{ip,ch,Rd} = 0,8 \cdot h_{ch} \cdot N_{ch,Rd} \quad (2.10)$$

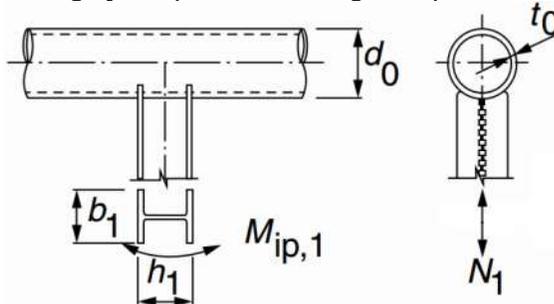
$$M_{ip,ch,Rd} = h_{ch} \cdot N_{ch,Rd} \quad (2.11)$$

2.5.1.3 Viga I

Para a ligação entre viga de seção I e pilar tubular de seção circular, são apresentados as características geométricas e os parâmetros que compõem a sua resistência axial na Figura 2.31 e na Tabela 2.3 – com a força axial resistente conforme a equação

(2.11) e o momento devido ao seu binário na equação (2.12), referentes à NBR 16239:2013 e o EN 1993-1-8:2005.

Figura 2.31: Ligação tipo T, entre viga I e pilar tubular circular



Fonte: NBR 16239:2013. Figura adaptada pelo autor

Tabela 2.3: Força axial resistente da ligação

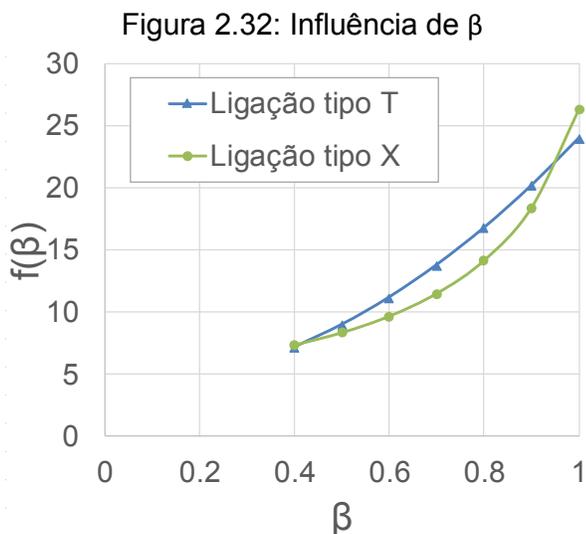
Norma	f(β)		f(η)	CS
	T	X		
NBR 16239:2013	$(4,4 + 22 \cdot \beta^2)$	$\frac{5,5}{1 - 0,81 \cdot \beta}$	$(1 + 0,25\eta)$	$\frac{1}{\gamma_{a1}}$
EN 1993-1-8:2005	$(4 + 20 \cdot \beta^2)$	$\frac{5}{1 - 0,81 \cdot \beta}$	$(1 + 0,25\eta)$	$\frac{1}{\gamma_{M5}}$

$$N_{1,Rd} = f(\beta) \cdot f(\eta) \cdot k_p \cdot f_{y0} \cdot t_0^2 \cdot CS \quad (2.12)$$

$$M_{ip,1,Rd} = \frac{h_1 \cdot N_{1,Rd}}{f(\eta)} \quad (2.13)$$

2.5.1.4 Considerações a respeito das equações

Na aplicação do coeficiente de segurança constata-se como equivalentes as equações da NBR 16239:2013 e o EN 1993-1-8:2005, com diferença apenas no momento resistente da chapa longitudinal, onde a norma brasileira considera uma redução de 20% em comparação com a europeia. Entre os tipos de ligações, T ou X, a diferença apresentada é o $f(\beta)$, com a relação dos valores desse parâmetro no intervalo dos seus limites mostrado na Figura 2.32, onde verifica-se interno ao intervalo de validade, a redução da resistência da ligação X em relação à T – decorrente da ovalização do pilar pelo seu carregamento simétrico. Para $f(\beta)$ igual a 1,0, ocorre a total transferência dos esforços entre as chapas, com a ligação tipo X mais resistente.



Fonte: Acervo pessoal

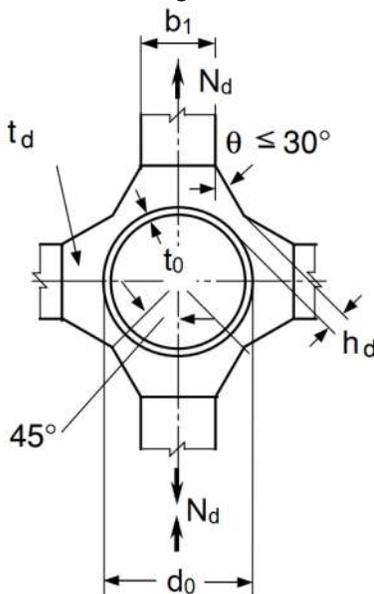
A influência da alma da viga I na resistência ao momento da ligação é desconsiderada, sendo adotado o $f(\eta)$ apenas para a resistência axial. O qual é explícita a ponderação exclusiva da mesa da viga e o seu binário de forças – equivalente à chapa transversal ligada ao pilar.

2.5.2 Com diafragma externo

A NBR 16239:2013 e o EN 1993-1-8:2005 não fazem referência à ligação com diafragma externo, sendo adotado neste trabalho as equações do CIDECT-DG9 (Kurobane, 2004), que conforme o próprio autor, é uma evolução dos estudos feitos da norma japonesa (AIJ de 1990).

Segundo o CIDECT-DG9 (Kurobane, 2004), esse tipo de ligação é rígida e totalmente resistente quanto ao intervalo de aplicação da equação, e o modo de falha é a plastificação da face ou de toda a seção transversal do pilar, desconsiderando a falha na solda. Na Figura 2.33 é apresentada a geometria do diafragma externo, sua força resistente ao nível da mesa da viga é mostrado na equação (2.14). Para a simbologia é feita a correlação, quando possível, com a NBR 16239:2013 e a NBR 8800:2008, sendo adotado o termo d referente ao diafragma externo, o seu intervalo de validade conforme as equações (2.15) à (2.17), e sua resistência ao momento conforme a equação (2.18).

Figura 2.33: Diafragma externo na ligação



Fonte: Kurobane (2004). Figura adaptada pelo autor

$$N_d = 19,6 \left(\frac{d_0}{t_0}\right)^{-1,54} \left(\frac{h_d}{d_0}\right)^{0,14} \left(\frac{t_d}{t_0}\right)^{0,3} \left(\frac{d_0}{2}\right)^2 \cdot f_{y0} \quad (2.14)$$

Onde:

N_d – Resistência axial última para a ligação com diafragma

h_d – Largura do diafragma externo

t_d – Espessura do diafragma externo

f_{y0} – Tensão de escoamento do aço do pilar

$$14 \leq \frac{d_0}{t_0} \leq 36 \quad (2.15)$$

$$0,05 \leq \frac{h_d}{d_0} \leq 0,14 \quad (2.16)$$

$$0,75 \leq \frac{t_d}{t_0} \leq 2,0 \quad (2.17)$$

$$M_{ip,d} = (h_1 - t_f) \cdot N_d \quad (2.18)$$

Onde:

$M_{ip,d}$ – Momento resistente da ligação no plano principal;

t_f – Espessura da mesa da viga.

Inicialmente, numa comparação da equação (2.3) do AIJ de 1990 com a equação (2.14) do CIDECT-DG9 (Kurobane, 2004), verifica-se o aprimoramento do cálculo resistente da ligação, em especial por não mais necessitar da análise geométrica na coleta de dados. Na equação do CIDECT-DG9 (Kurobane, 2004) é observada a semelhança com os principais fatores da ligação com chapa transversal, tendo relação direta com a espessura e a tensão de escoamento do aço do pilar. Para o momento resistente, é considerado o binário das forças na metade da mesa da viga, independente da espessura do diafragma externo, o que é a favor da segurança.

No segundo e terceiro termo da equação (2.14), nota-se a correlação do diafragma externo com o pilar, onde é considerável a influência do seu diâmetro. Para o intervalo

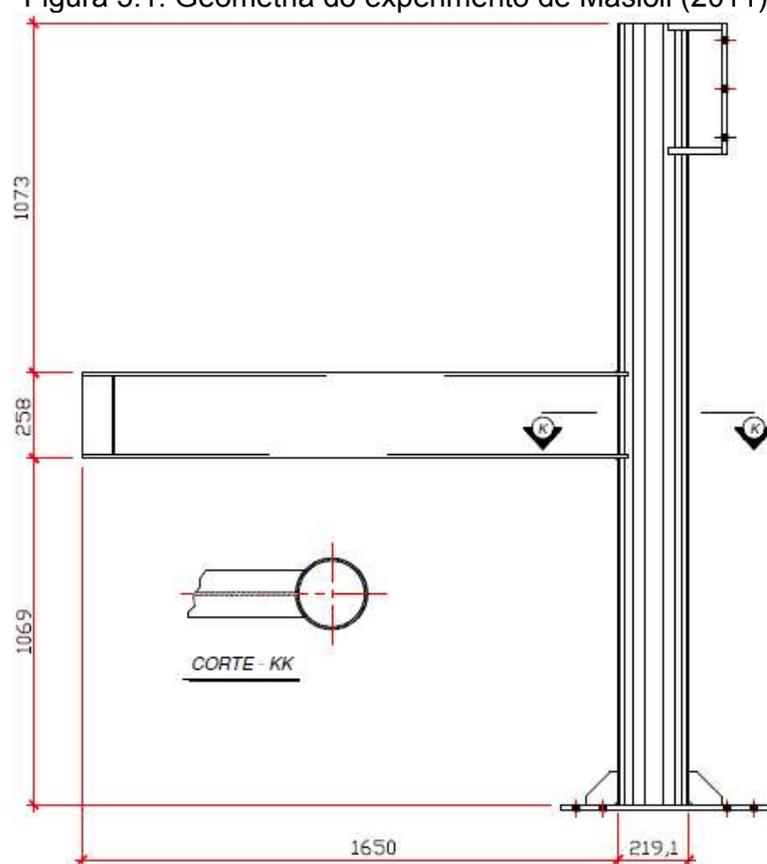
de validade da equação, a largura do diafragma externo (h_d) é limitada à 5% e 14% do seu diâmetro, e para a espessura (t_d) o intervalo é entre 75% e 200%.

O uso da tensão de escoamento para o estado limite último, segundo Kurobane (2004), é uma recomendação da norma japonesa, que adota a resistência da ligação ao escoamento multiplicado por 1/0,7, onde conforme o CIDECT-DG9 (Kurobane, 2004), estudos experimentais revelaram que a resistência última da ligação é maior do que a sua divisão por 0,7 – no entanto devido as ligações com diafragma externo apresentarem grandes deformações, além de cantos reentrantes, essa consideração é válida.

3 EXPERIMENTO DE MASIOLI (2011)

O experimento para validação do modelo numérico desse trabalho é segundo o protótipo TCR-W de Masioli (2011), conforme ilustrado na Figura 3.1. O fato de ter sido utilizada solda na ligação entre a viga e o pilar facilita na análise numérica o posterior acréscimo do diafragma externo. Se tivesse sido utilizado experimento com ligação parafusada ocorreriam pontos de perturbação devido à concentração de tensões na região dos parafusos, não apresentando patamar de escoamento bem definido conforme consta em Sabbagh (2013) e Masioli (2011).

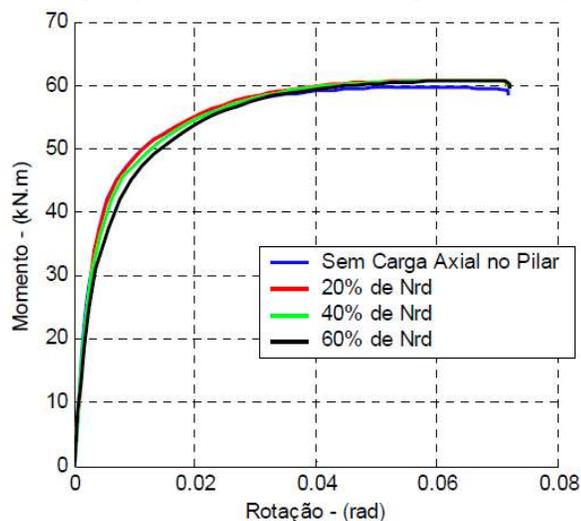
Figura 3.1: Geometria do experimento de Masioli (2011)



Fonte: Masioli (2011)

Masioli (2011) não considerou a influência da carga axial do pilar na ligação, em sequência aos estudos realizados por Freitas (2009), onde relatou pequena influência em modelo numérico similar, como mostra a Figura 3.2.

Figura 3.2: Momento-rotação para diferentes esforços de compressão no pilar (Nrd)



Fonte: Freitas (2009)

3.1 PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS

Para a viga de seção I e o pilar tubular de seção circular foram considerados perfil soldado e comercial respectivamente, e suas geometrias apresentadas nas Tabela 3.1 e Tabela 3.2.

Tabela 3.1: Propriedades geométricas da viga I

Perfil	Massa linear (kg/m)	Área (cm ²)	d (mm)	t _w (mm)	h _w (mm)	t _f (mm)	b _f (mm)	I _x (cm ⁴)	W _x (cm ⁴)
258x32	32,34	41,2	258	6,1	239,8	9,1	146	4818	374

Tabela 3.2: Propriedades geométricas do pilar tubular circular

d _o (mm)	t _a (mm)	Massa Linear (kg/m)	Área (cm ²)	I (cm ⁴)	W _x (cm ³)
219,1	8,2	42,5	54,2	3020	276

Onde:

d – É a altura total da viga I;

t_w – A espessura da alma da viga I;

h_w – A altura da alma da viga I;

t_f – Espessura da mesa da viga I;

b_f – Largura da mesa da viga I;

I – Momento de inércia;

I_x – Momento de inércia em relação ao eixo x;

W_x – Módulo de elasticidade em relação ao eixo X;

d_o – Diâmetro do pilar;

t_d – Espessura da parede do pilar.

3.2 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

As propriedades mecânicas do aço foram obtidas por meio de ensaio de tração e a caracterização realizada em máquina de ensaio universal, com a utilização de três corpos de prova para cada elemento: viga, pilar e chapa. Para o pilar, segundo Masioli (2011), uma das amostras não se mostrou representativa e foi excluída da análise. Para o diafragma externo, será considerado a mesma propriedade da chapa utilizada por Masioli (2011) em seu experimento com diafragma externo parafusado na viga. O mesmo critério será adotado para o enrijecedor vertical na extremidade da viga oposta ao pilar. Na Tabela 3.3 são apresentadas as propriedades dos materiais.

Tabela 3.3: Resistência média dos aços

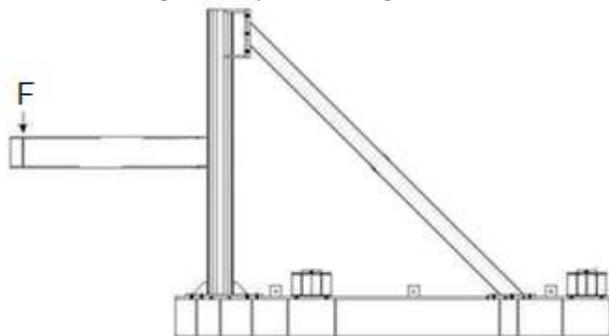
Elemento	f_y (MPa)	f_u (MPa)
Viga	400,0	513,0
Pilar	330,0	473,0
Diafragma externo	385,0	468,0

O módulo de elasticidade, E , é igual a 205000 MPa e o coeficiente de Poisson, ν , é igual a 0,3.

3.3 CONDIÇÕES DE CONTORNO E CARREGAMENTO

As condições de contorno descritas por Masioli (2011) são apresentadas na Figura 3.3, com restrições aos deslocamentos de translação nas extremidades inferior e superior do pilar. Para o carregamento foi aplicado uma força na extremidade da viga por meio de atuador hidráulico com capacidade de carga igual a 300 kN.

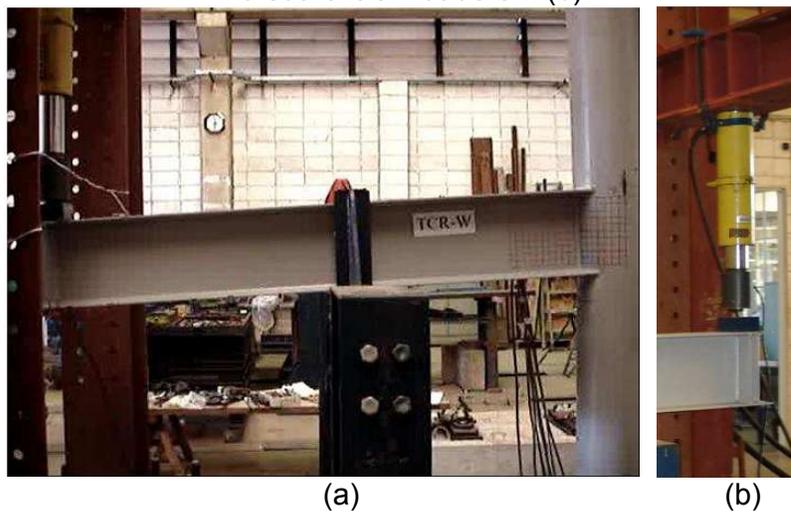
Figura 3.3: Restrição do pilar e força F do modelo TCR-W



Fonte: Masioli (2011). Figura adaptada pelo autor.

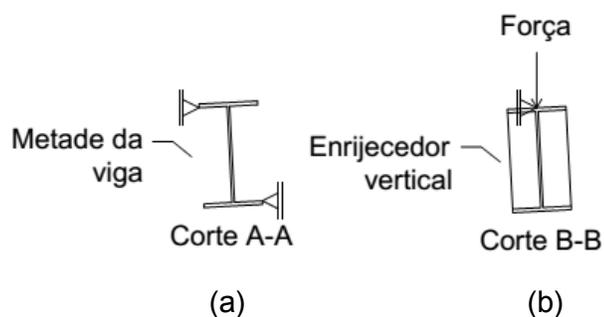
Através dos registros fotográficos do ensaio de Masioli (2011), também foi constatado uma restrição lateral no meio do vão da viga, conforme é mostrado na Figura 3.4-(a), o qual impede a viga de transladar fora do plano principal durante o carregamento, onde essa restrição é de contenção e acontece após pequeno deslocamento lateral da viga. Além disso, o atuador hidráulico restringe a translação da extremidade da viga na região da aplicação da carga devido a sua base ser indeslocável, de acordo com a Figura 3.4-(b), com a ilustração dessa restrição na Figura 3.5.

Figura 3.4: Restrição ao deslocamento lateral na região da metade da viga em (a), e na sua extremidade em (b)



Fonte: Masioli (2011)

Figura 3.5: Representação da restrição da viga

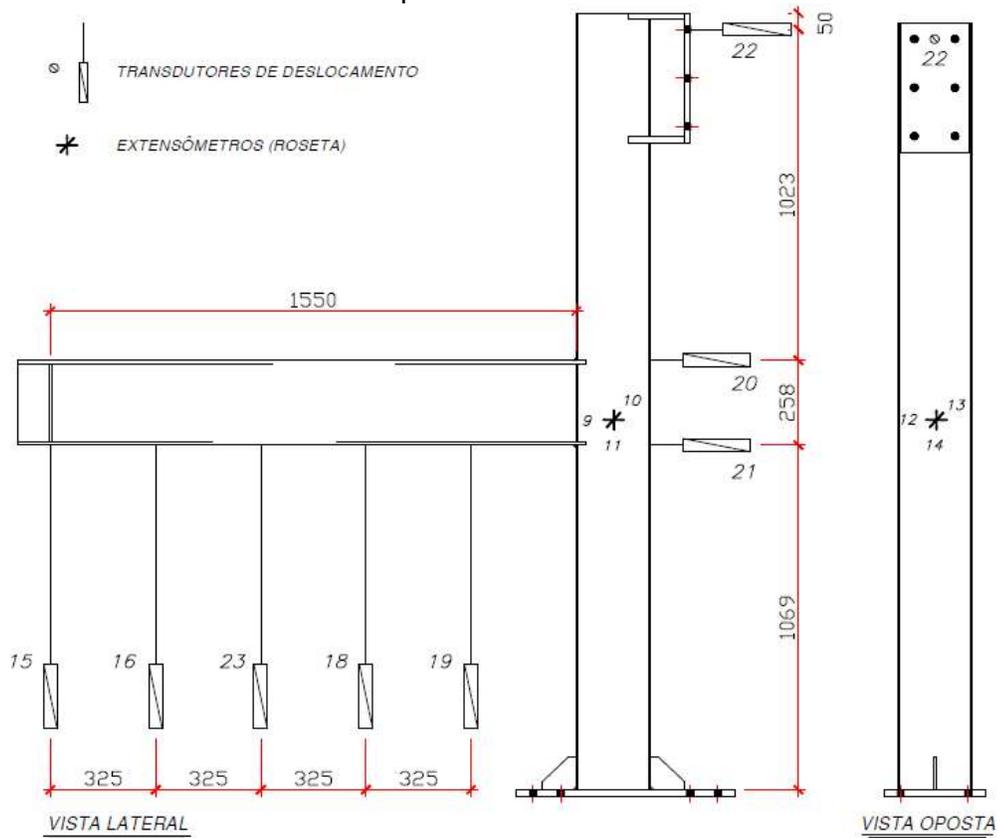


Fonte: Acervo pessoal

3.4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

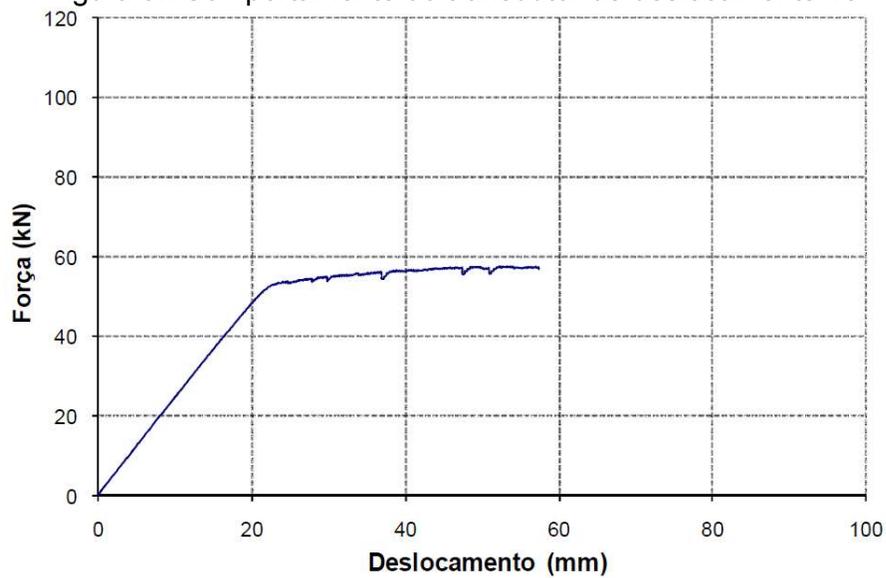
A Figura 3.6 mostra a distribuição dos extensômetros e transdutores de deslocamento, sendo o de número 15 utilizado para a validação deste trabalho. Na Figura 3.7 tem-se o gráfico do deslocamento desse ponto conforme aplicação da força, e pela carga considerada verifica-se pequena influência do peso próprio da viga, aproximadamente 1%, mesmo com todo o peso no local da aplicação da força, não sendo adotada nesta análise os efeitos da gravidade.

Figura 3.6: Distribuição de extensômetros e transdutores de deslocamento no experimento TCR-W



Fonte: Masioli (2011)

Figura 3.7 Comportamento do transdutor de deslocamento 15



Fonte: Masioli (2011)

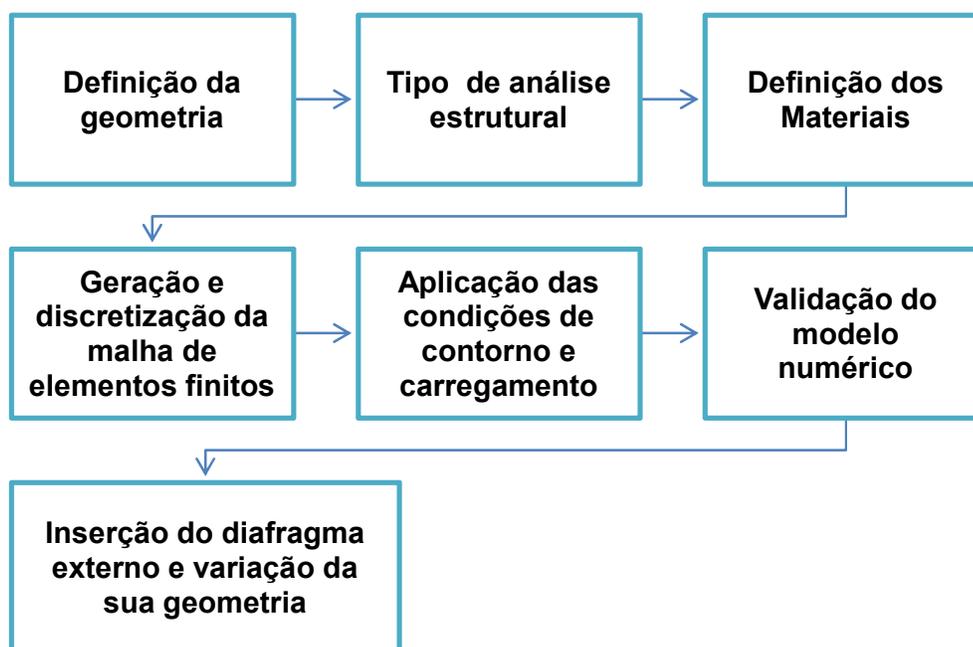
4 ANÁLISE NUMÉRICA

O objetivo da análise numérica em elementos finitos é expandir para diferentes geometrias o conhecimento de um dado comportamento estrutural, o que possibilita a redução substancial de tempo e custo da solução quando comparados com ensaios de laboratórios convencionais, devido as suas dificuldades.

Nesta análise é adotado um modelo tridimensional, utilizando o programa de elementos finitos ANSYS-v.13, concebido de forma a representar o máximo possível a situação real de uma estrutura. Inicialmente, para a validação do modelo numérico, é adotada a ligação entre a viga de seção I e o pilar tubular de seção circular sem diafragma externo, conforme o protótipo TCR-W de Masioli (2011). Posteriormente é acrescido o diafragma externo onde são feitas análises da sua influência na rigidez e na capacidade resistente da ligação, conforme a variação das suas dimensões.

A linguagem de programação do ANSYS-v.13 é adotada com o propósito de automatizar todo o processo de geração do modelo e processamento dos dados. A Figura 4.1 apresenta a sequência da análise numérica.

Figura 4.1: Sequência da análise numérica



4.1 MODELO NUMÉRICO TCR-W

4.1.1 Análise Estrutural

Na análise numérica do modelo TCR-W, Freitas (2009), Masioli (2011) e Pereira (2013) adotaram nas suas pesquisas o regime de grandes deslocamentos. O programa ANSYS-v.13 também recomenda essa análise quando há a possibilidade de flambagem no modelo e conseqüentemente grandes deformações a estrutura, mesma ponderação feita por Ferreira (2008) em seu trabalho sobre estabilidade estrutural. O protótipo TCR-W de Masioli (2011), referência deste trabalho, apresentou grandes deslocamentos para a carga máxima, o que justifica o uso da teoria de grandes deslocamentos no modelo numérico.

Na resolução das equações de equilíbrio deste trabalho é adotado o método Newton-Raphson *full*, o qual leva em consideração os efeitos não-lineares do comportamento estrutural e consiste em pequenos incrementos iterativos de carga, gerando pequenos deslocamentos que alteram a estrutura do modelo e ocasionam outros esforços. O colapso ocorre em estados avançados de carregamento e o critério de falha é a energia de distorção máxima (critério de von Mises).

4.1.2 Geometria do modelo

A geometria será a mesma utilizada por Masioli (2011) no protótipo TCR-W, conforme é ilustrado nas Figura 4.2 e Figura 4.3. O elemento referente à solda não é considerado, seguindo mesmo procedimento de Masioli (2011) na parte numérica do seu trabalho. Na configuração da geometria são feitas várias divisões, como mostrado na Figura 4.4, com a finalidade de forçar a interação entre as linhas de interseção da viga com o pilar na região da ligação.

Figura 4.2: Geometria do modelo numérico TCR-W

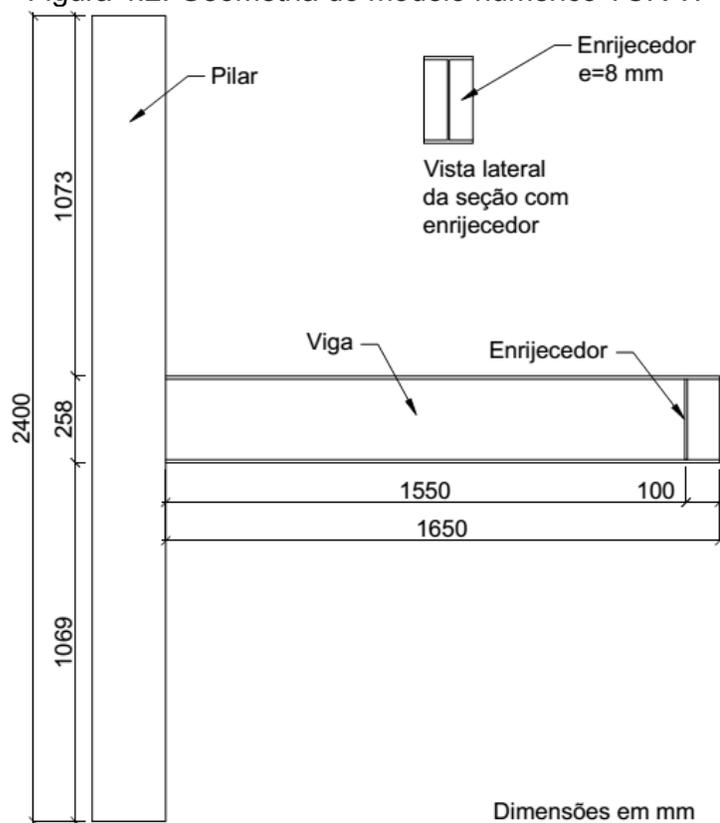


Figura 4.3: Detalhe da seção da viga e do pilar do modelo numérico TCR-W

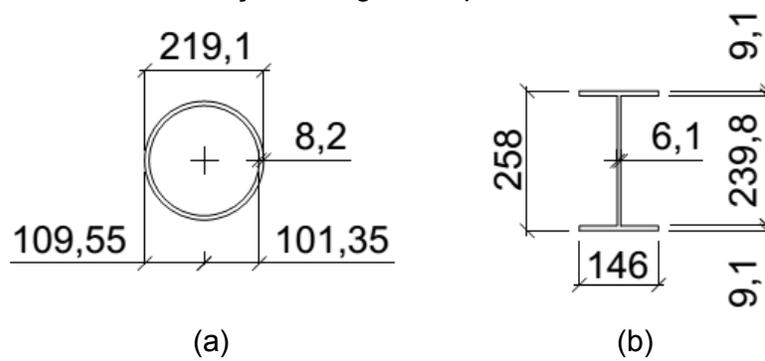
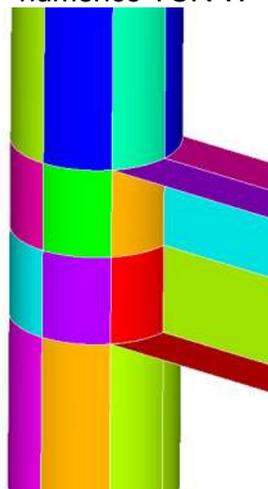


Figura 4.4: Cortes das áreas na região da ligação entre viga e pilar do modelo numérico TCR-W

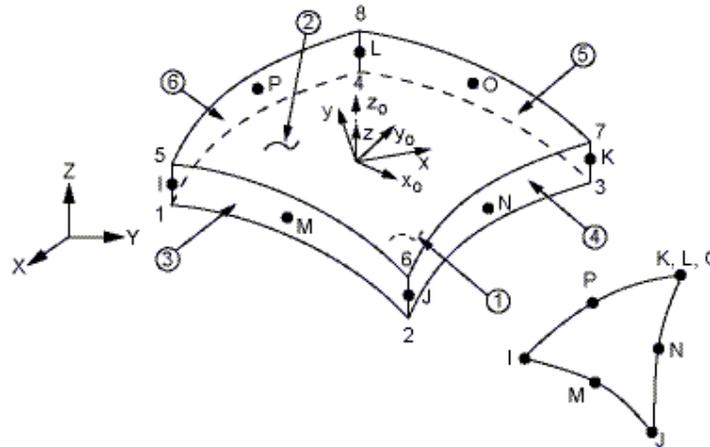


Fonte: Arquivo pessoal

4.1.3 Elemento finito

A viga é composta por um agrupamento de placas correspondente às mesas e a alma, de forma análoga o pilar corresponde à geometria de casca, devido a sua seção oca e espessura de parede fina. Portanto, para a simulação numérica deste trabalho é utilizado um elemento que represente o comportamento desses dois tipos de estruturas. Assim, o elemento adotado é o *Shell281* da biblioteca do ANSYS-v.13, governado pela teoria de Mindlin-Reissner, derivado da análise de estruturas de placa fina e moderadamente espessa, condição para as formas que compõem a viga e pilar deste trabalho, o qual atende o caráter de grandes rotações e deformações não lineares e consiste em um elemento de 8 nós (i, j, k, l, m, n, o, p) com 6 graus de liberdade cada nó, com translações nas direções x, y e z e rotações em relação aos eixos x, y e z conforme é apresentado na Figura 4.5.

A escolha desse tipo de elemento em detrimento a outro mais simples, com quatro nós (*Shell181* da biblioteca do ANSYS-v.13), decorre pelo surgimento de elementos triangulares na ligação entre a mesa da viga com o pilar em função da geração automática da malha, o que não é recomendada a esse elemento de quatro nós.

Figura 4.5: Elemento *Shell181*

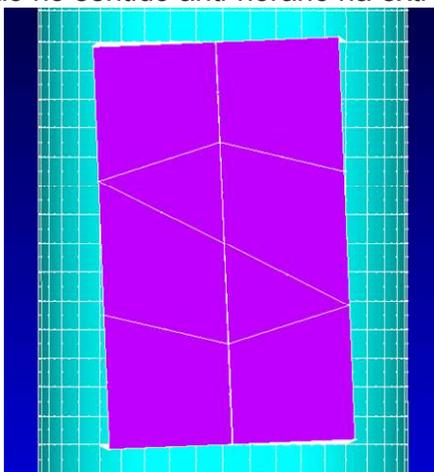
Fonte: ANSYS-v.13

4.1.4 Não-Linearidade geométrica

O modelo numérico tem por premissa característica geométrica perfeita, ou seja, geometria alinhada sem apresentar desvios, o que não corresponde a situação real de um perfil ou estrutura, onde as suas imperfeições associadas aos carregamentos geram esforços de 2ª ordem. Para essa consideração, o EN 1993-1-1:2005 recomenda a adoção de imperfeição geométrica inicial para os casos de alteração significativa da estrutura quando submetida a um carregamento, onde se considera a deformada da estrutura através de análise de flambagem a partir da condição inicial na forma mais desfavorável (primeiro modo de flambagem). Para o modelo TCR-W, a viga, pela sua condição em balanço, é utilizada como referência e segundo o EN 1993-1-1:2005, o seu deslocamento para esta análise corresponde a $L/200$, sendo L o seu comprimento.

Portanto para a definição da imperfeição geométrica inicial no modelo numérico, é utilizado o artifício da superposição de análise de flambagem, que envolve duas análises com os dados de um mesmo modelo. Primeiramente a análise de flambagem sobre o modelo geométrico perfeito e após isso, é aplicado uma amplitude a essa deformação. Na Figura 4.6 é mostrada a situação para imperfeição geométrica da estrutura, com modo de flambagem escolhido correspondente a rotação na extremidade da viga.

Figura 4.6: Rotação no sentido anti-horário na extremidade da viga



Fonte: Arquivo pessoal

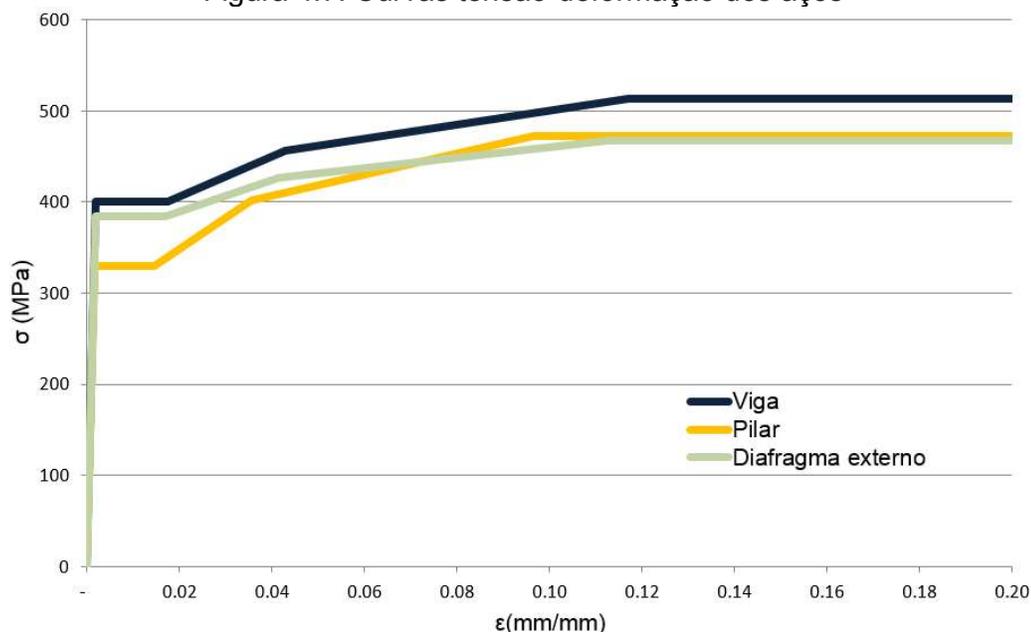
4.1.5 Propriedades físicas dos materiais

Para a viga, o pilar e o diafragma externo, é atribuído as propriedades mecânicas obtidas por Masioli (2011) em ensaios de caracterização, conforme Tabela 3.3. No comportamento tensão e deformação é adotado diagrama multilinear, seguindo mesmo critério sugerido por Maggi (2004), conforme Tabela 4.1. Na Figura 4.7 é mostrado o diagrama multilinear obtido da Tabela 4.1 para os diferentes elementos. Neste trabalho não são consideradas as tensões residuais, devido a sua pequena influência em decorrência da fabricação do tubo (pilar tubular circular).

Tabela 4.1: Pontos tensão e deformação

Ponto	δ	ϵ
1	f_y	ϵ_y
2	f_y	$9\epsilon_y$
3	$f_y + 0,5(f_u - f_y)$	$22\epsilon_y$
4	f_u	$60\epsilon_y$

Figura 4.7: Curvas tensão-deformação dos aços



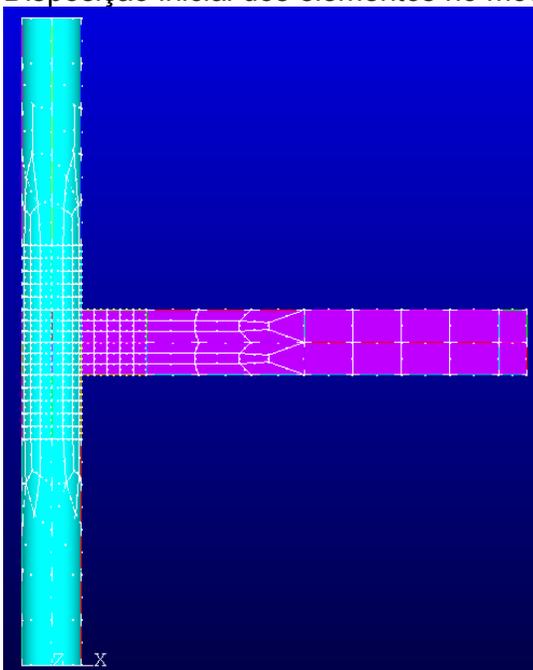
Fonte: Acervo pessoal

4.1.6 Mapeamento e discretização da malha de elementos finitos

No mapeamento da malha é adotado critério do programa para a disposição dos elementos e a interação entre si (método automático), o que é recomendado principalmente pela irregularidade da interface entre a viga I e o pilar tubular circular. Além disso é considerada maior concentração de elementos para as regiões próximas a ligação, interesse principal deste estudo, seguindo mesmo critério de Masioli (2011) na parte numérica do seu trabalho. Na Figura 4.8 é apresentado os dois tipos de dimensões dos elementos utilizados, refinado na região da ligação correspondente a uma altura da viga e padrão para as demais regiões.

A razão entre as duas dimensões é que o tamanho do elemento refinado corresponda à 1/4 do tamanho padrão, onde num estudo preliminar essa relação apresentou a melhor compatibilidade. Quando considerado o diafragma externo, essa razão com a malha padrão é igual à 1/5, devido a sua geometria na ligação com a mesa da viga. O programa na sua distribuição automática pode reduzir os tamanhos pré-estabelecidos dos elementos para uma melhor disposição.

Figura 4.9: Disposição inicial dos elementos no modelo TCR-W

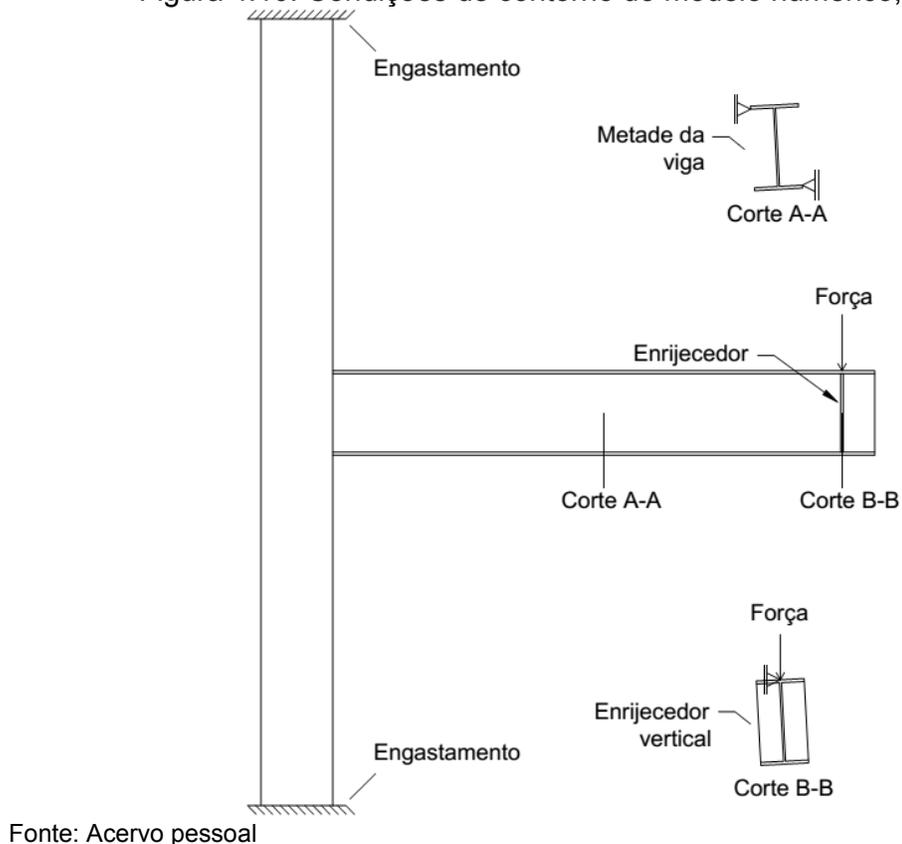


Fonte: Arquivo pessoal

4.1.7 Condições de contorno e carregamento

Com o mesmo critério da análise numérica de Masioli (2011) e Pereira (2013), as extremidades inferior e superior do pilar são impedidas de transladar e rotacionar em qualquer uma das três direções. Além disso, conforme item 3.3, as mesas do perfil da viga no meio do vão são impedidas de transladar fora do plano, por apresentar contenção lateral e restrição em duas extremidades da sua seção. No local da aplicação da força, também há o comedimento ao deslocamento fora do plano principal devido ao atuador hidráulico estar impedido na sua base ao deslocamento lateral. As limitações da viga são aplicadas após consideração da imperfeição geométrica inicial. A Figura 4.10 mostra as restrições consideradas à estrutura e o ponto da aplicação da força.

Figura 4.10: Condições de contorno do modelo numérico, TCR-W



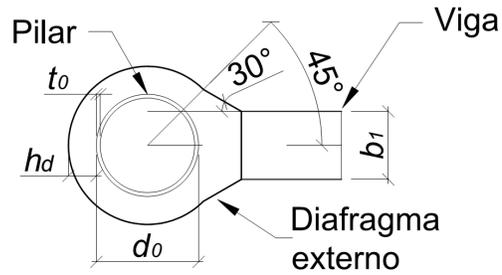
4.2 ACRÉSCIMO DO DIAFRAGMA EXTERNO

Após validação do modelo numérico é acrescentado a ligação o diafragma externo conforme disposição apresentada no manual do CIDECT-DG9 (Kurobane, 2004).

4.2.1 Características geométrica

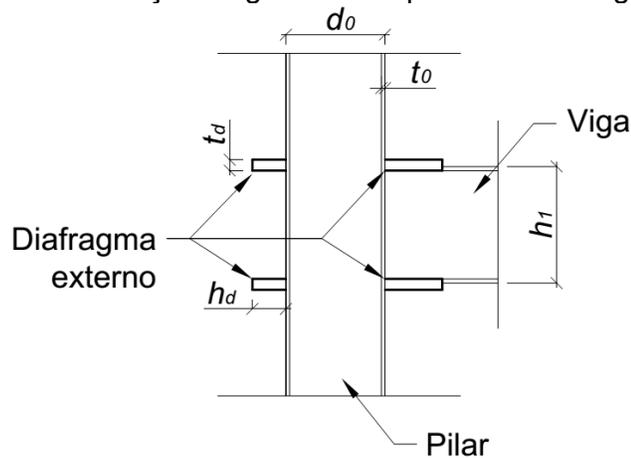
Na Figura 4.11 é ilustrado a disposição transversal do diafragma externo através de relações geométricas na ligação entre a viga I e o pilar tubular circular, considerando os valores mínimos dos ângulos conforme item 2.5.2. O CIDECT-DG9 (Kurobane, 2004) não contempla a sua inserção longitudinal, onde neste trabalho é adotado a configuração mais usual na prática, com a face interna concordante a mesa da viga.

Figura 4.11: Seção transversal do pilar acima do diafragma externo



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 4.12: Corte da seção longitudinal do pilar e do diafragma externo



Fonte: Arquivo pessoal

4.2.2 Dimensões adotadas

Para as geometrias do diafragma externo, é feita análise dos seus limites geométricos, onde é adotada a sigla VC em cada estudo, com referência às verificações do CIDECT-DG9 (Kurobane, 2004). Também é apresentado o intervalo de dados para investigação de diferentes larguras e espessuras além desses limites.

- **VC-1:** Exclusiva ao pilar correspondente a relação do seu diâmetro d_0 , com a sua espessura t_0 , sendo:

$$14 \leq \frac{d_0}{t_0} \leq 36 \quad (4.1)$$

Para $d_0=219,1$ mm e $t_0=8,2$ mm, tem-se:

$$\frac{d_0}{t_0} = 26,71$$

O que atende ao intervalo de validade.

- **VC-2:** Relação entre a largura do diafragma externo, h_d , com o diâmetro do pilar, d_0 .

$$0,05 \leq \frac{h_d}{d_0} \leq 0,14 \quad (4.2)$$

Conhecido o valor do diâmetro do pilar, tem-se o intervalo da variação da largura do diafragma externo, h_d :

$$10,95 \leq h_d \leq 30,67$$

Para esta análise é adotado a largura mínima de 10 mm. A partir desse valor, é acrescido em 5 mm a sua largura até 70 mm, limite em virtude da largura da mesa da viga.

- **VC-3:** Nessa verificação é estudado a relação entre a espessura do diafragma externo, t_d , com a espessura da parede do pilar t_0 .

$$0,75 \leq \frac{t_d}{t_0} \leq 2,0 \quad (4.3)$$

Para a espessura do pilar t_0 igual a 8,2 mm, tem-se o intervalo de validade para a espessura do diafragma, t_d :

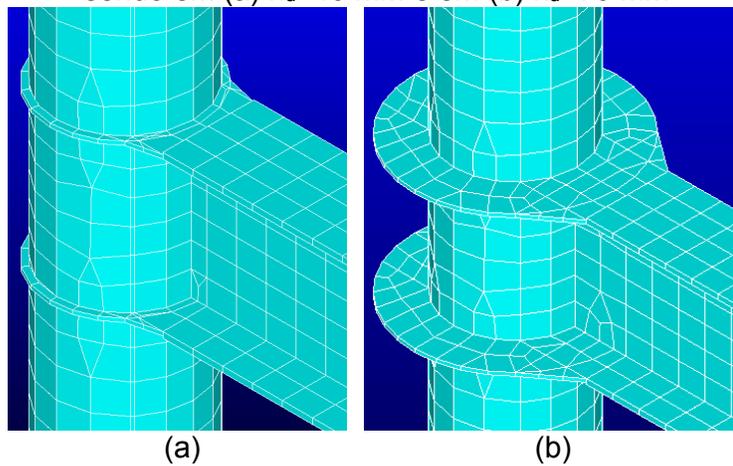
$$6,15 \leq t_d \leq 16,4$$

A dimensão considerada é a partir de 6 mm com variação de 2 mm até o máximo de 20 mm, limite esse referente ao dobro da espessura da mesa da viga. Na Tabela 4.2 são apresentadas as dimensões do diafragma externo segundo as verificações acima, além dos quantitativos da análise. Na Figura 4.13 e Figura 4.14, tem-se exemplos das ligações dos modelo numéricos com diafragma externo.

Tabela 4.2: Dimensões para o diafragma externo, em destaque os valores além dos limites do CIDECT-DG9 (Kurobane, 2004)

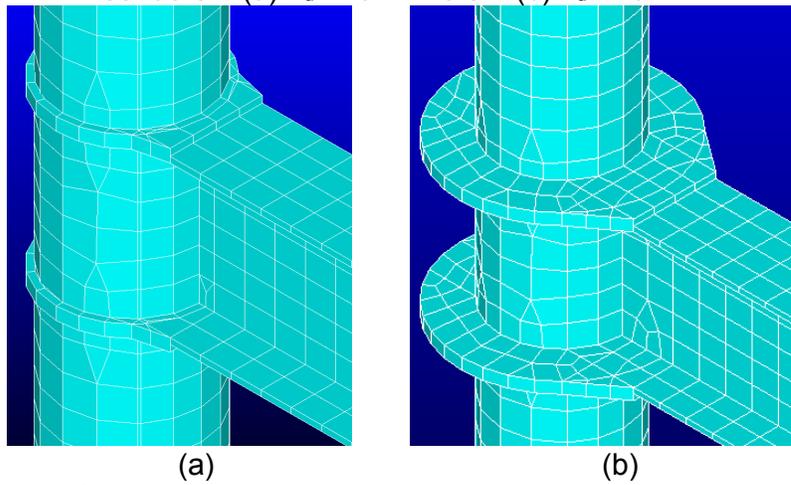
Espessura - t_d (mm)	Largura - h_d (mm)	Total de modelos numéricos
6	10	104
8	15	
10	20	
12	25	
14	30	
16	35	
18	40	
20	45	
	50	
	55	
	60	
	65	
	70	

Figura 4.13: Modelo numérico para ligação com diafragma externo com $t_d=6$ mm, sendo em (a) $h_d=10$ mm e em (b) $h_d=70$ mm



Fonte: Acervo pessoal

Figura 4.14: Modelo numérico para ligação com diafragma externo com $t_d = 20$ mm, sendo em (a) $h_d = 10$ mm e em (b) $h_d = 70$ mm



Fonte: Acervo pessoal

5 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados da análise numérica. Inicialmente é feita a validação e análise do comportamento do modelo TCR-W, sendo posteriormente comparado às ligações com diafragma externo. Após isso é feito um estudo para a resistência máxima e a rigidez inicial, além da comparação com os resultados analíticos da equação do CIDECT-DG9 (Kurobane, 2004). Ao fim é realizado um estudo de correlação entre as propriedades geométricas do diafragma externo para a resistência máxima e a rigidez inicial da ligação.

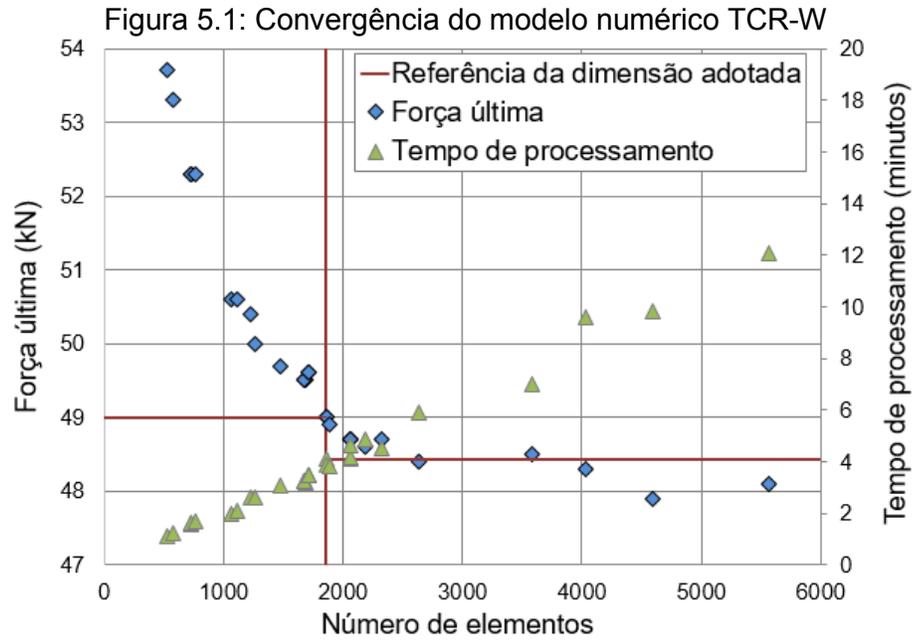
5.1 MODELO NUMÉRICO TCR-W

5.1.1 Dimensão do elemento finito

Primeiramente é avaliado o número mínimo de elementos finitos compatível com a invariabilidade da força máxima absorvida na extremidade da viga do modelo, conforme é mostrado na Figura 5.1, onde também é apresentado o tempo de processamento em cada condição. Na Tabela 5.1 tem-se a dimensão adotada do elemento finito, com a sua disposição no modelo numérico TCR-W de acordo com o apresentado na Figura 5.2.

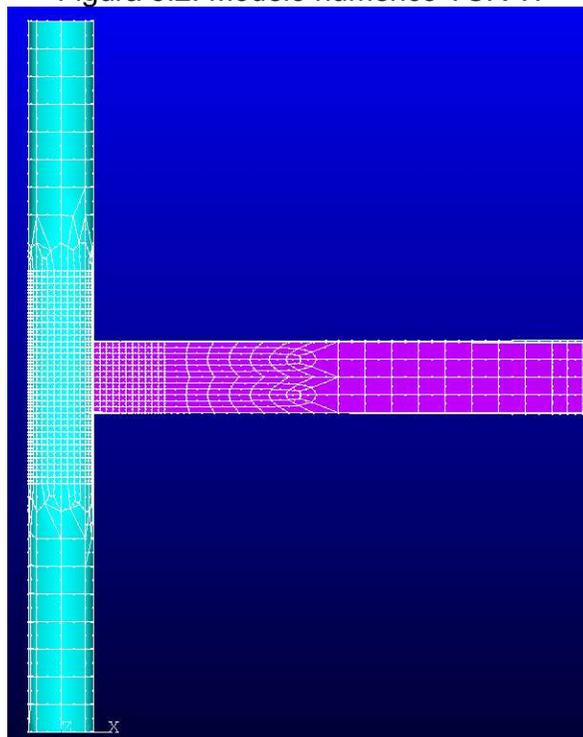
Tabela 5.1: Características numérica do modelo

Força (kN)	Dimensão do elemento (mm)		Número de elementos	Tempo de processamento (minutos)
	Padrão	Refinado		
49,0	95,0	23,75	1862	4,0



Fonte: Acervo pessoal

Figura 5.2: Modelo numérico TCR-W

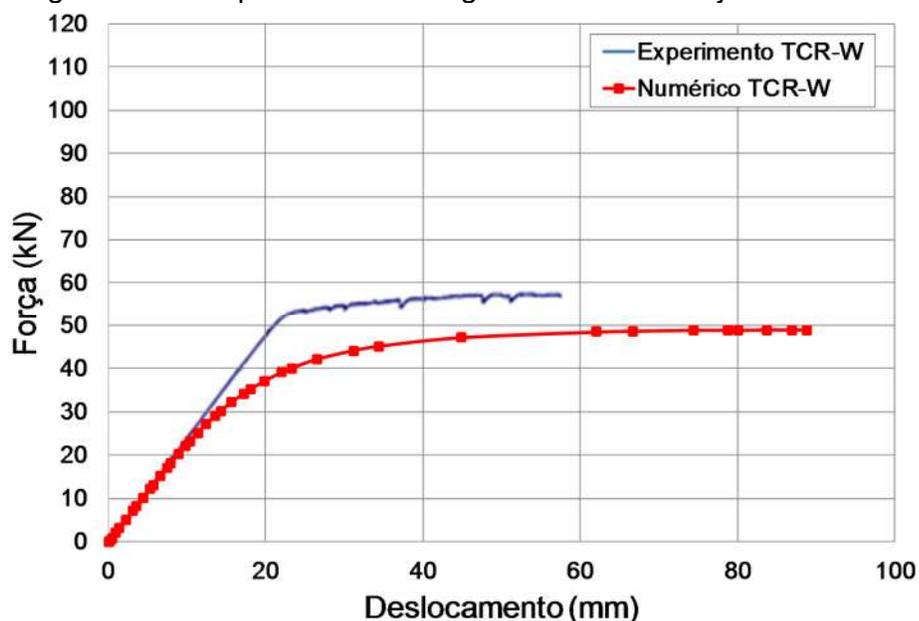


Fonte: Acervo pessoal

5.1.2 Validação do modelo numérico

Na validação é comparado o deslocamento da extremidade da viga entre o modelo numérico e o protótipo de Masioli (2011), conforme é mostrado na Figura 5.3, o qual é possível constatar na fase inicial (elástica) a equivalência entre os gráficos. No entanto conforme a ocorrência da rótula plástica, o modelo numérico ao final da análise apresenta menor resistência do que o experimento de Masioli(2011), de acordo com o apresentado na Tabela 5.2.

Figura 5.3: Comportamento da viga na altura do enrijecedor vertical



Fonte: Acervo pessoal

Tabela 5.2: Força máxima na extremidade da viga

Força máxima (kN)		Razão Experimental/ Numérico
Numérico	Experimental	
49,0	57,5	1,17

Winkel (1998), num estudo similar de ligação entre viga de seção I e pilar tubular de seção circular, na validação de um dos seus modelos numéricos encontrou diferença dessa relação maior que 16%, o que segundo o próprio autor seria acima dos limites aceitáveis. No entanto ainda Winkel (1998), valida o seu modelo numérico e destaca que a possível razão dessa diferença tenha sido a translação e rotação das

extremidades do pilar, efeitos esses não contemplados na análise experimental de Masioli (2011).

Dessa forma, em sequência ao mesmo conceito de Winkel (1998), verifica-se incompatibilidade entre as restrições do modelo numérico deste trabalho com o experimento de Masioli (2011), onde na análise numérica a restrição é perfeita e no experimento, conforme registros fotográficos apresentados na Figura 5.4, há possibilidade de deslocamento e rotação do topo do pilar, principalmente na face voltada para a viga. O que permite aplicar a mesma consideração de Winkel (1998) e afirmar que a diferença entre os deslocamentos ilustrados na Figura 5.3 decorreu da movimentação do topo do pilar da análise experimental, e assim poder validar o modelo numérico TCR-W desta análise.

Figura 5.4: Experimento TCR-W



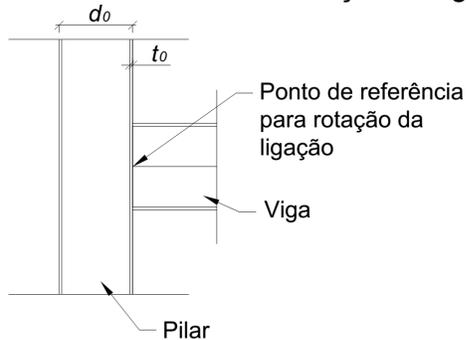
Fonte: Masioli(2011)

5.1.3 Comportamento da ligação do modelo TCR-W

5.1.3.1 Rotação da ligação

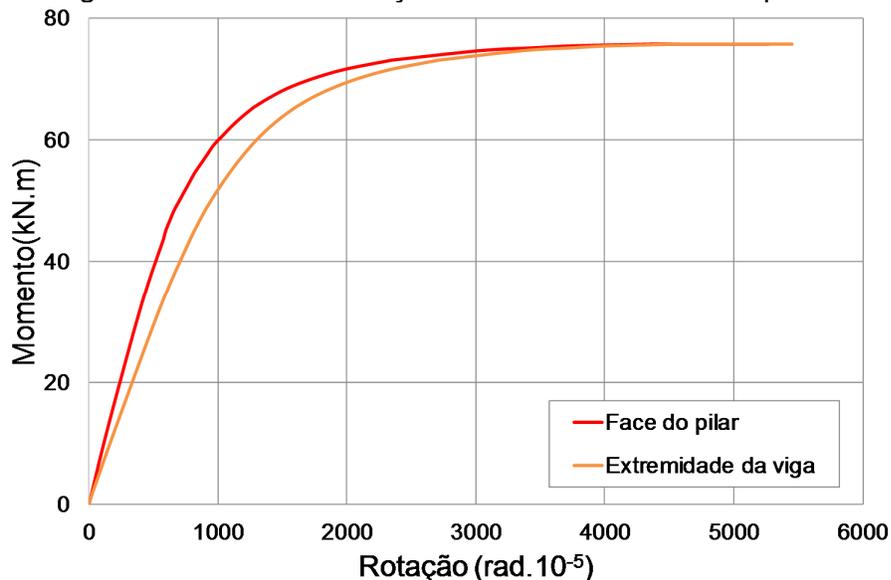
Para a análise da rotação da ligação é adotado como referência um ponto no meio da viga junto ao pilar, conforme é mostrado na Figura 5.5, em que são coletados os dados da sua rotação conforme a aplicação da força. Essa consideração, ao invés da tangente do deslocamento na extremidade da viga, é em função de se evitar nos resultados o acúmulo da deformação ocasionado pela flexão da viga, conforme é ilustrado mostrado na Figura 5.6, onde constata-se maior flexibilidade da ligação para a análise na extremidade da viga.

Figura 5.5: Referência de rotação da ligação



Fonte: Acervo pessoal

Figura 5.6: Momento-rotação do TCR-W – diferentes pontos

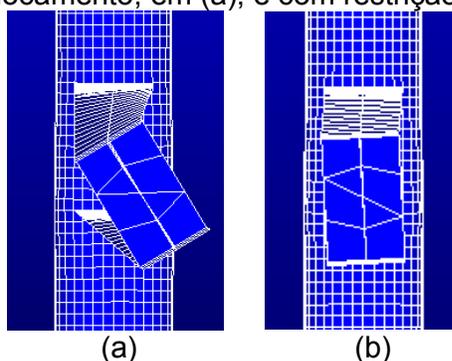


Fonte: Acervo pessoal

5.1.3.2 Restrição lateral da viga

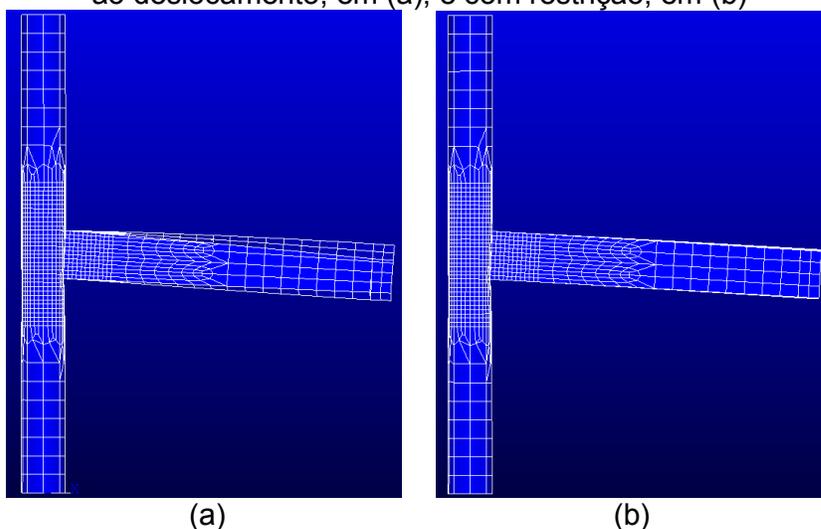
Na restrição lateral da viga é verificado que a sua não ponderação acarreta na rotação da extremidade em balanço, conforme é mostrado nas Figura 5.7 e Figura 5.8. Porém para o comportamento momento-rotação, de acordo com o ilustrado na Figura 5.9, a diferença entre as duas condições é pequena. Ainda assim essa restrição é considerada nesta análise, especialmente para a ligação com o diafragma externo, onde em função da sua maior resistência, tais deformações podem invalidar os resultados.

Figura 5.7: Vista frontal da ligação submetida à força máxima: sem restrição lateral ao deslocamento, em (a), e com restrição, em (b)



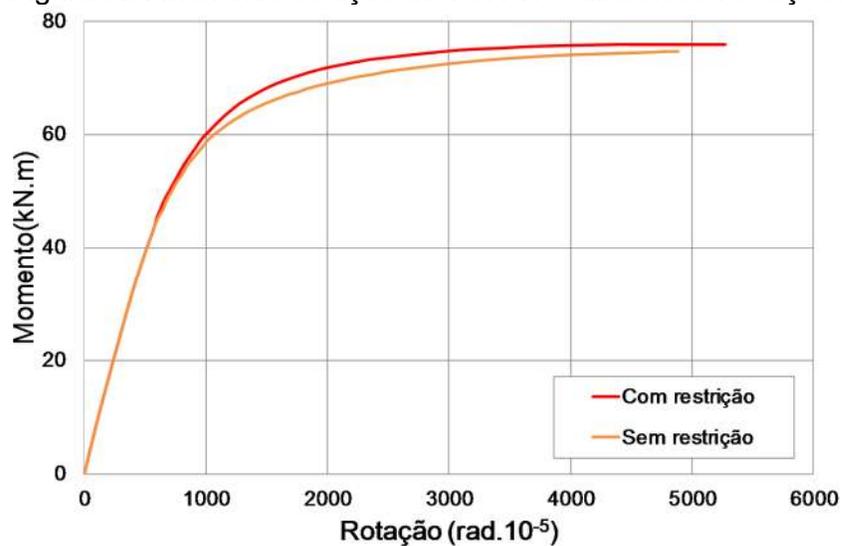
Fonte: Acervo pessoal

Figura 5.8: Vista lateral da ligação submetida à força máxima: sem restrição lateral ao deslocamento, em (a), e com restrição, em (b)



Fonte: Acervo pessoal

Figura 5.9: Momento-rotação do TCR-W – diferentes restrições

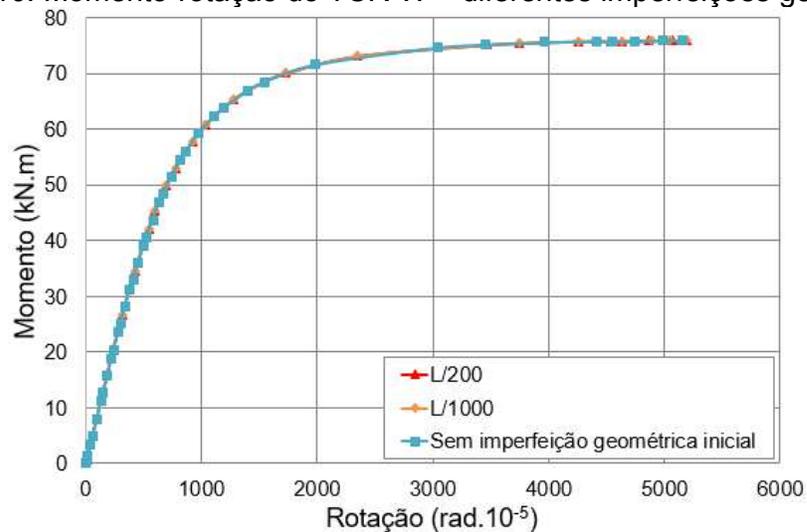


Fonte: Acervo pessoal

5.1.3.3 Imperfeição geométrica inicial

Por último, é feita a verificação da influência da imperfeição geométrica inicial no comportamento da ligação, onde são atribuídos valores além daqueles estabelecidos pelo EN 1993-1-1:2005. Na Figura 5.10 é mostrado a irrelevância dessa consideração, mas aplicada para esta análise pelo desconhecimento do comportamento da ligação com diafragma externo.

Figura 5.10: Momento-rotação do TCR-W – diferentes imperfeições geométricas

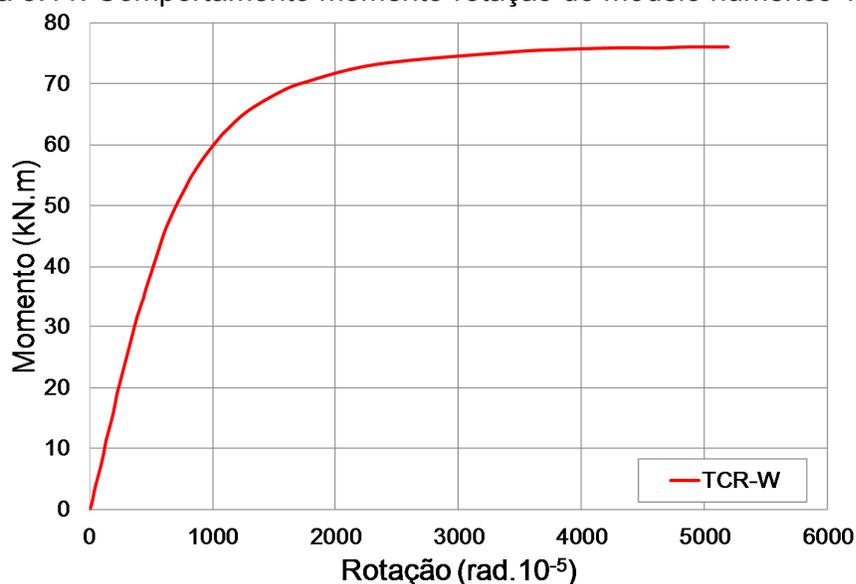


Fonte: Acervo pessoal

5.1.3.4 Modelo numérico TCR-W

Após as definições das principais características que compõem a análise numérica do modelo TCR-W, tem-se o comportamento momento-rotação da ligação, conforme é ilustrado na Figura 5.11, onde na Tabela 5.3 são apresentados os principais parâmetros para comparação com as ligações com diafragma externo. Na Figura 5.12 são mostradas as tensões de von Mises para a força máxima aplicada na extremidade da viga, com destaque para a sua concentração na região da ligação, de acordo com o exposto na Figura 5.13.

Figura 5.11: Comportamento momento-rotação do modelo numérico TCR-W

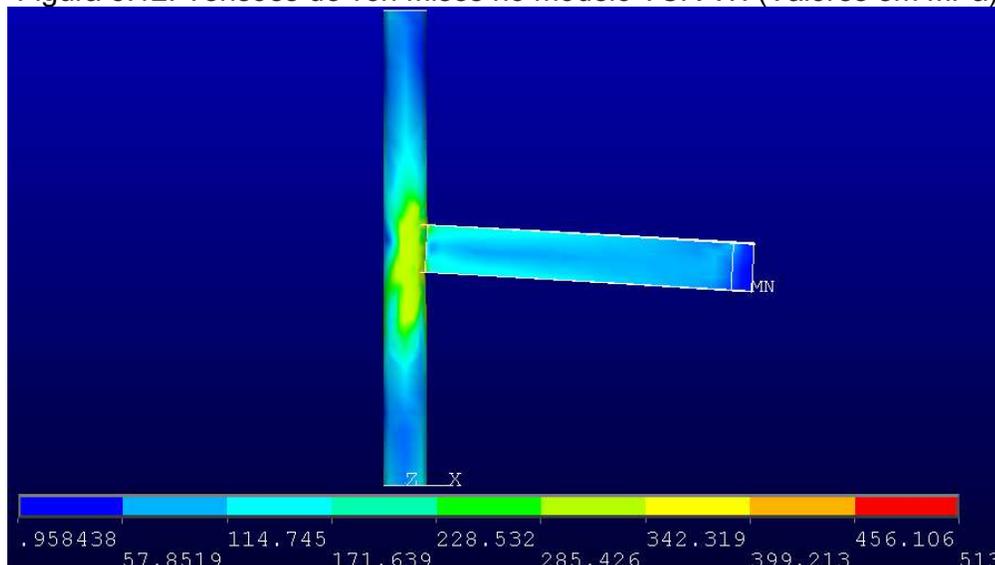


Fonte: Acervo pessoal

Tabela 5.3: Principais parâmetros do modelo numérico TCR-W

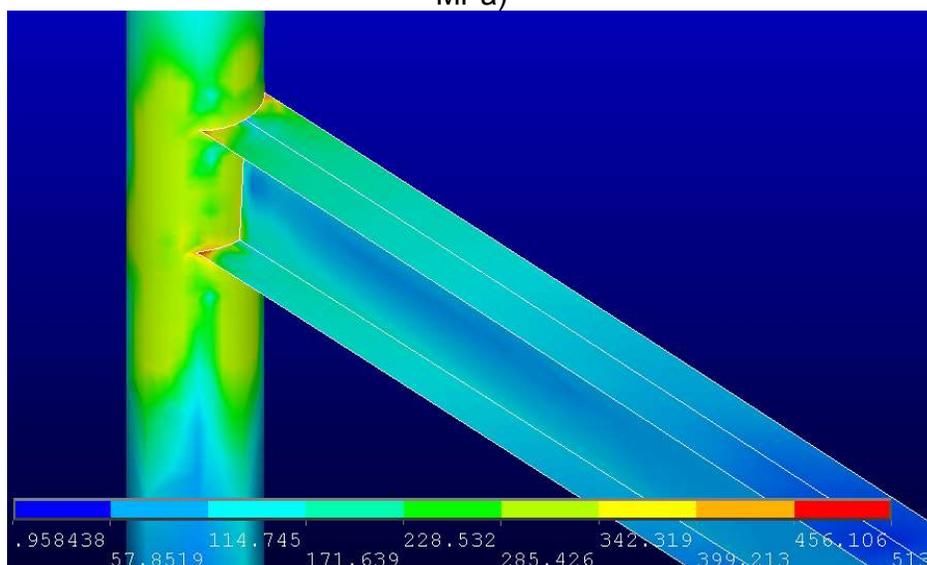
Força Máxima (kN)	Rigidez Inicial kN.m/ (rad.10⁻⁵)	Tensão máxima na face do pilar (MPa)	Deslocamento máximo da viga (enrijecedor) (mm)	Rotação (rad.10⁻⁵)
49,0	8595	443,84	88,8	90,10

Figura 5.12: Tensões de von Mises no modelo TCR-W. (Valores em MPa)



Fonte: Acervo pessoal

Figura 5.13: Tensões de von Mises no modelo TCR-W para a ligação. (Valores em MPa)



Fonte: Acervo pessoal

5.2 LIGAÇÃO COM DIAFRAGMA EXTERNO

Após a validação do modelo numérico, é adicionado a ligação o diafragma externo e analisado a sua influência. Por corresponder a uma análise de viga em balanço, não é feita a classificação da ligação segundo o EN 1993-1-8:2005, o qual abrange um

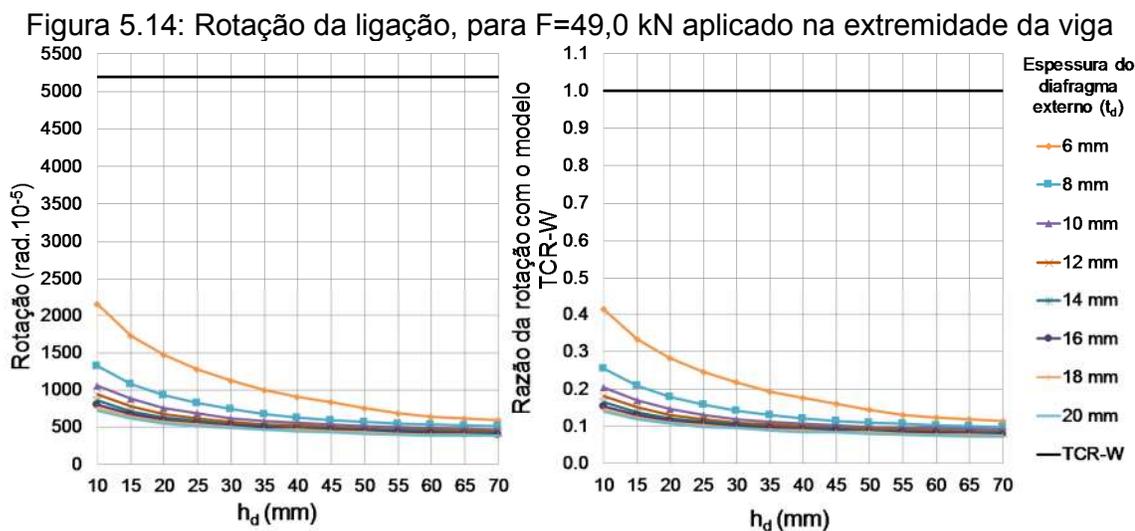
sistema estrutural, mas que serão adotadas as suas caracterizações na análise dos resultados.

5.2.1 Comparação com o modelo TCR-W

Inicialmente é aplicado na extremidade da viga força igual a 49,0 kN, correspondente a resistência máxima do modelo TCR-W, e comparados os seus resultados com a ligação sem diafragma externo.

5.2.1.1 Rotação máxima da ligação

Na Figura 5.14 é mostrado a rotação máxima da ligação para diferentes geometrias de diafragma externo, onde há redução média de 90% em relação ao modelo TCR-W, o que comprova a afirmação de Wakabayashi (1971) que apenas a presença do diafragma externo influencia consideravelmente no comportamento da ligação. A largura h_d pouco influencia, com o desempenho constante dos resultados, inclusive para os valores além dos limites do CIDECT-DG9 (Kurobane, 2004) deste trabalho, entre 15 mm e 30 mm.



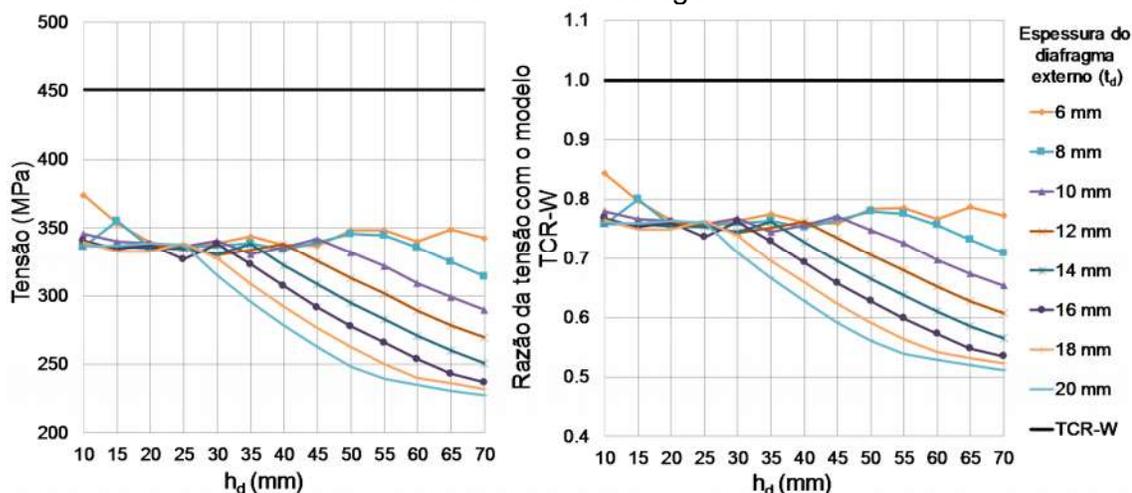
Fonte: Acervo pessoal

Apenas para a espessura igual a 6 mm a curva é diferente das demais, sendo esse valor abaixo do limite inferior do CIDECT-DG9 (Kurobane, 2004) deste trabalho, conforme item 4.2.2. Nos valores acima do limite superior, igual a 18 e 20 mm, os resultados são uniformes. Para t_d igual a 6 e 8 mm, apesar da espessura menor que a mesa da viga, ainda assim houve redução da rotação, o que comprova a eficácia desse elemento e evidencia a pequena rigidez entre a viga I e o pilar tubular circular.

5.2.1.2 Tensões de von Mises no pilar

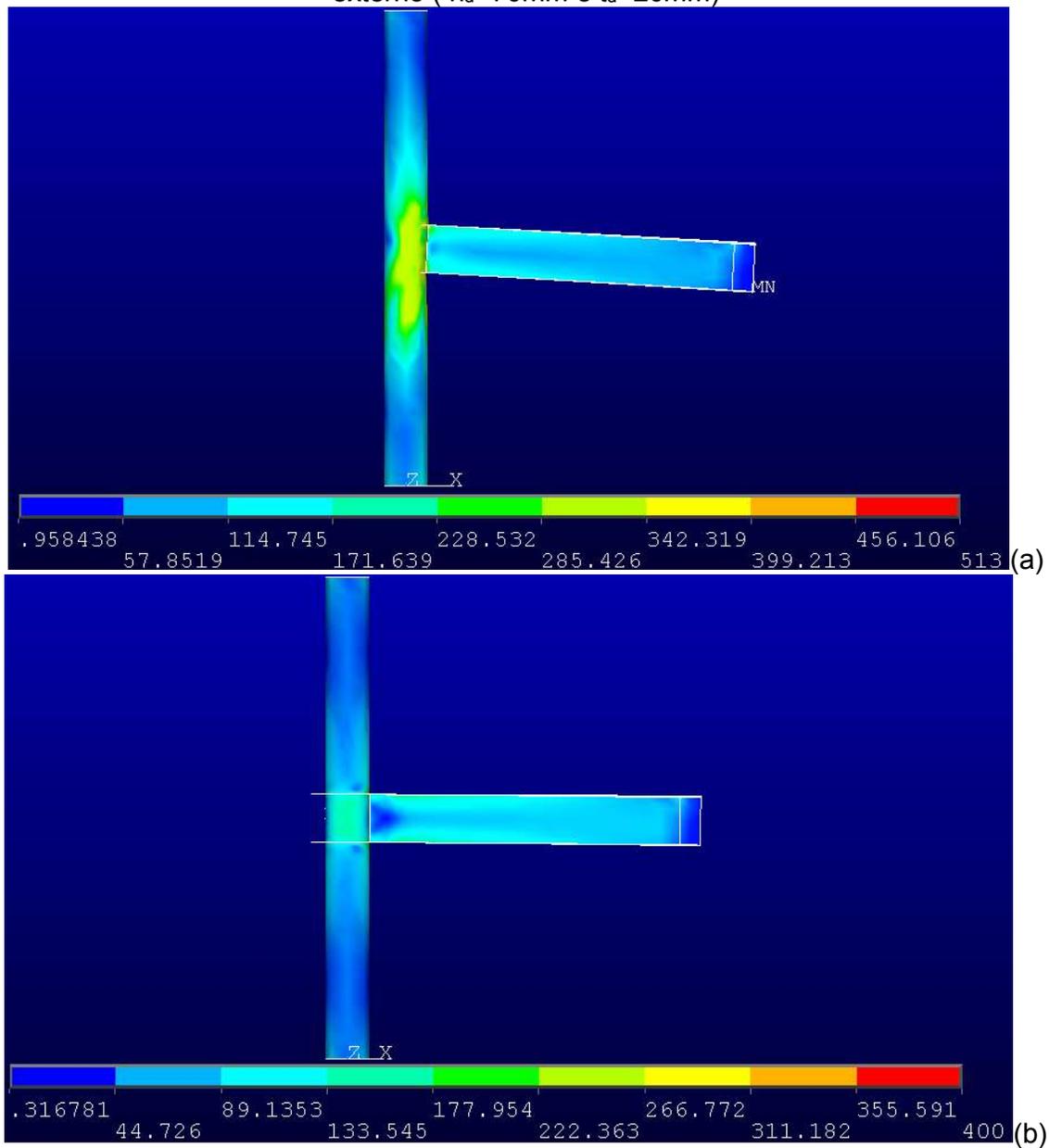
Na Figura 5.15 é apresentado as tensões máximas de von Mises no pilar, sendo destacado a redução dos seus valores apenas pela presença do diafragma externo, mesmo conceito para a rotação. No intervalo do CIDECT-DG9 (Kurobane, 2004) para a largura do diafragma externo, entre 15 mm e 30 mm, as tensões são constantes. Para os valores acima desse limite o comportamento é distinto em cada espessura, com os maiores valores de t_d sendo os primeiros a iniciarem uma nova redução de tensões – exceto para a espessura igual a 6 mm que permanece constante. Na Figura 5.16 é mostrado o alívio das tensões no pilar e na viga em função do diafragma externo, na Figura 5.17 em destaque esse comportamento na ligação.

Figura 5.15: Máximas tensões de von Mises no pilar, para $F=49,0$ kN aplicado na extremidade da viga



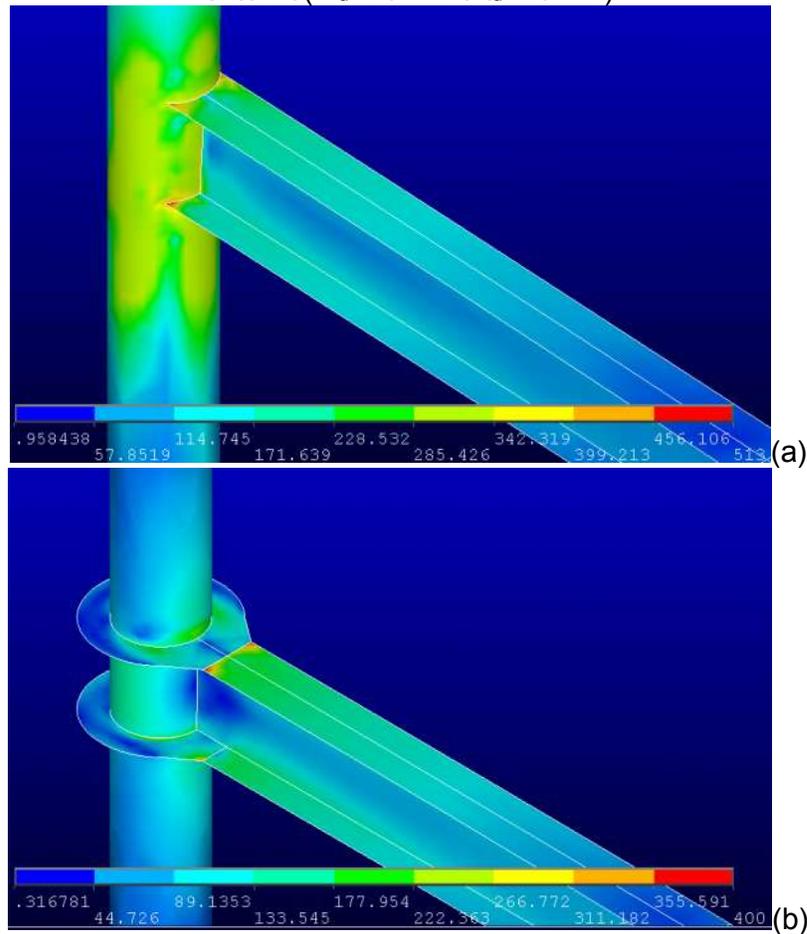
Fonte: Acervo pessoal

Figura 5.16: Tensões de von Mises no modelo em: (a) TCR-W e em (b), diafragma externo ($h_d=70\text{mm}$ e $t_d=20\text{mm}$)



Fonte: Acervo pessoal

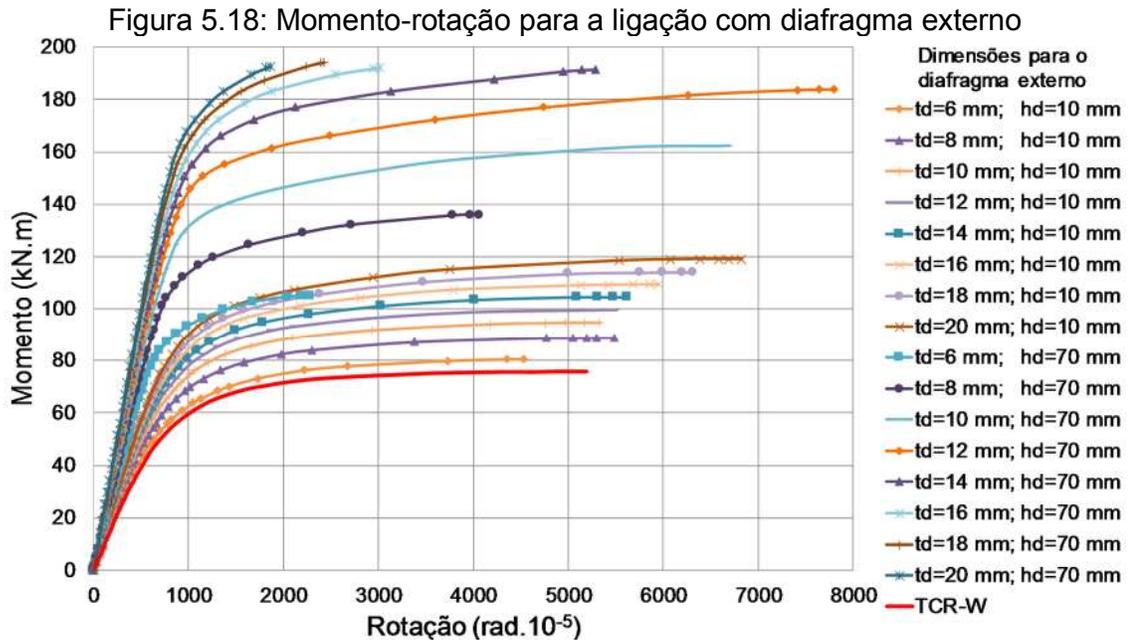
Figura 5.17: Tensões de von Mises na ligação em: (a) TCR-W e em (b), diafragma externo ($h_d=70\text{mm}$ e $t_d=20\text{mm}$)



Fonte: Acervo pessoal

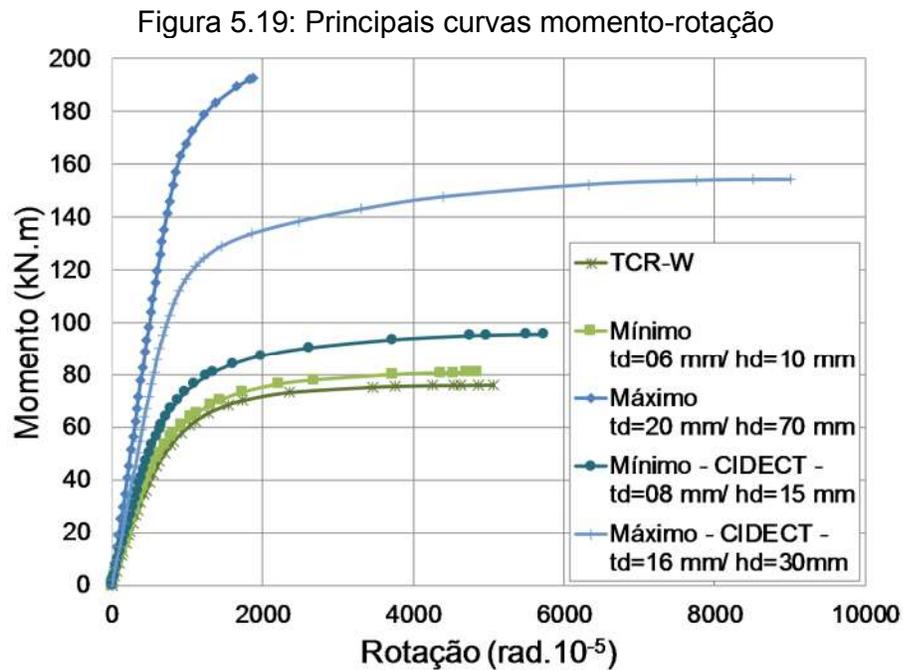
5.2.2 Comportamento da ligação para as forças máximas aplicadas na extremidade da viga

Inicialmente são avaliadas as curvas momento-rotação das ligações para todas as espessuras, como também para a menor e maior largura, conforme é mostrado na Figura 5.18. O comportamento é uniforme, como o ganho da resistência e da rigidez inicial de acordo com o aumento das dimensões do diafragma externo. Para h_d igual a 70 mm, a diferença entre as curvas é maior quando comparado a menor largura. Em evidência a curva momento-rotação da ligação TCR-W e o ganho da rigidez e da resistência proporcionado pelo diafragma externo.



Fonte: Acervo pessoal

Na Figura 5.19 são apresentados os comportamentos das ligações para as principais dimensões e limites do CIDECT-DG9 (Kurobane, 2004) considerados nesta análise, com o objetivo de verificar possíveis discordâncias.

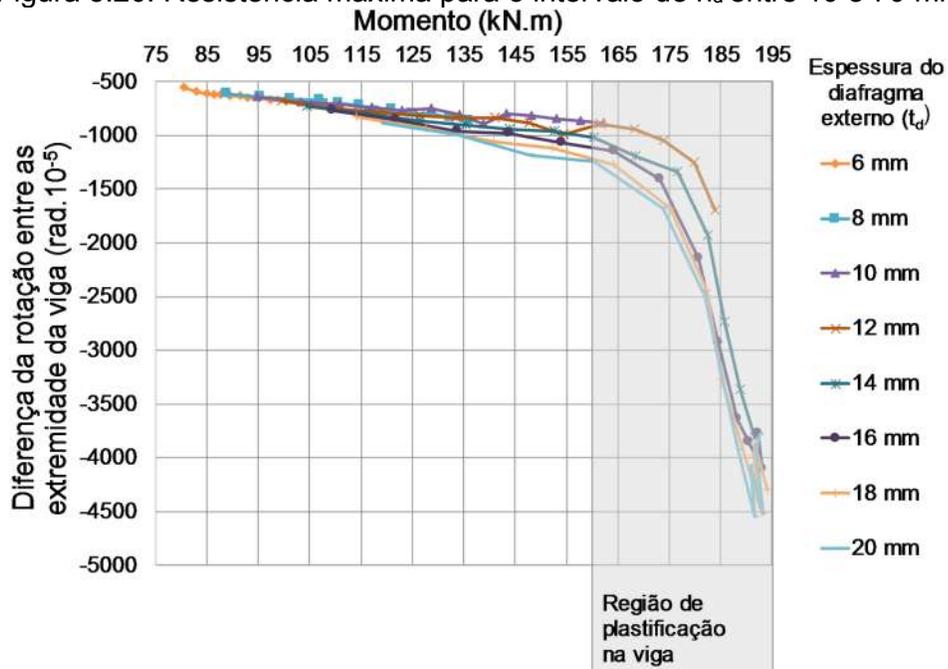


Fonte: Acervo pessoal

5.2.2.1 Momento resistente máximo

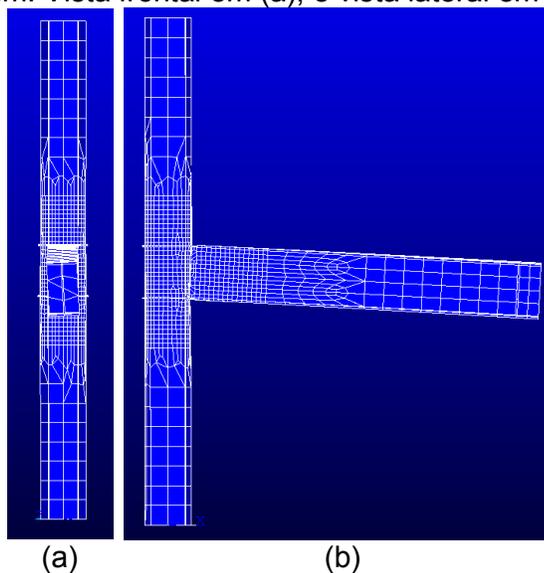
Inicialmente é analisado para a resistência máxima da ligação com diafragma externo a rotação relativa entre as extremidades da viga, como é mostrado na Figura 5.20, onde verifica-se a partir do momento aproximado de 160,0 kNm que as relações entre as rotações deixam de ser proporcionais – que corresponde a uma ligação totalmente resistente e a falha ocorrendo na viga. Nas Figura 5.21 e Figura 5.22 são apresentados as deformações do modelo no seu colapso para as dimensões mínimas e máximas do diafragma externo.

Figura 5.20: Resistência máxima para o intervalo de h_d entre 10 e 70 mm



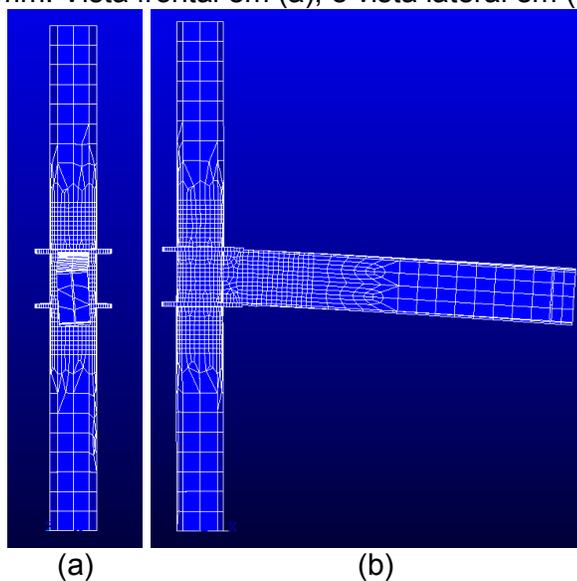
Fonte: Acervo pessoal

Figura 5.21: Deformação do modelo para a força máxima, com $t_d=6$ mm e $h_d= 10$ mm. Vista frontal em (a), e vista lateral em (b)



Fonte: Acervo pessoal

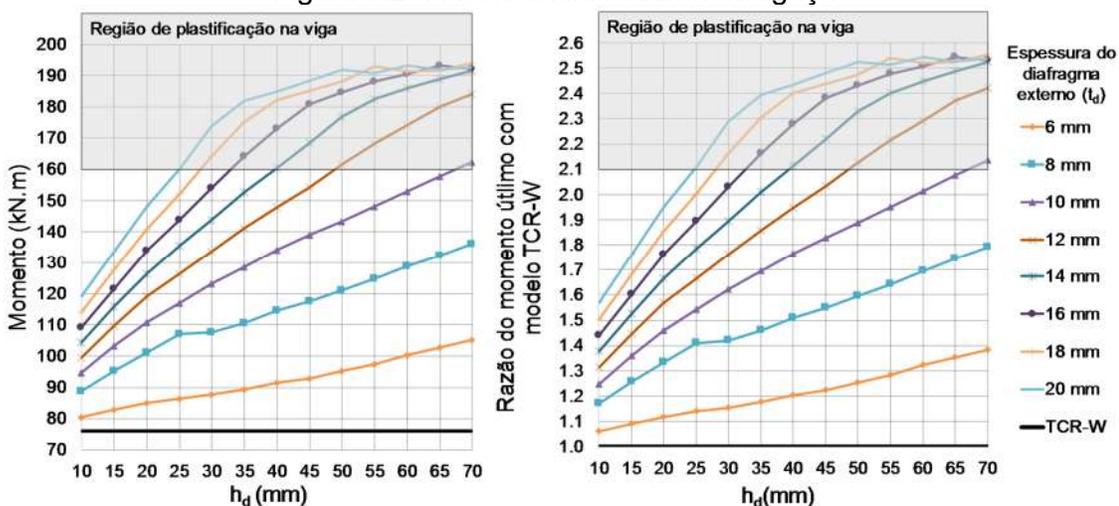
Figura 5.22: Deformação do modelo para a força máxima, com $t_d=20$ mm e $h_d= 70$ mm. Vista frontal em (a), e vista lateral em (b)



Na Figura 5.23, após conhecidos os modos de falha, são apresentados as resistências máximas para as diferentes dimensões do diafragma externo. Onde verifica-se o acréscimo considerável da resistência da ligação, inclusive para a menor espessura, em comparação ao modelo TCR-W. Para a forma mais simples da inserção do diafragma externo, largura igual a 10 mm e espessura igual a 20 mm, o acréscimo da

resistência corresponde a quase 60% e demonstra a eficiência do seu uso na ligação. Além disso, no limite de resistência devido a viga, o acréscimo de resistência da ligação é de até 110%, com a possibilidade de maiores ganhos. Também verifica-se para os valores além dos limites do CIDECT-DG9 (Kurobane, 2004), comportamento proporcional nos resultados, tanto para a largura quanto para a espessura, onde apenas para t_d igual a 6 mm houve diferença para as demais curvas.

Figura 5.23: Resistência máxima da ligação

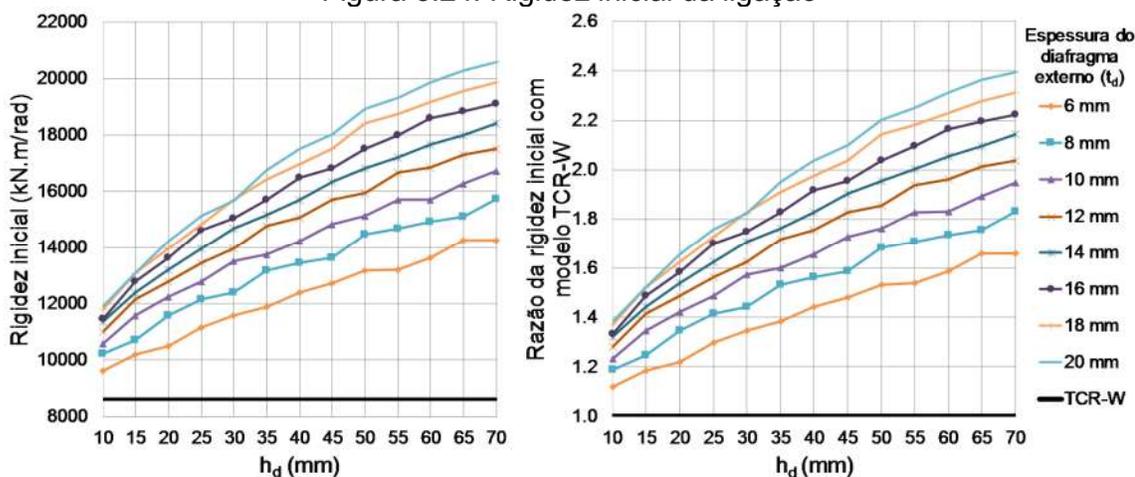


Fonte: Acervo pessoal

5.2.2.2 Rigidez inicial

Na Figura 5.24 é apresentada o ganho de rigidez inicial para as ligações, conforme aumento das dimensões do diafragma externo. Onde é considerável o enrijecimento devido ao diafragma externo em comparação ao modelo TCR-W, inclusive para a menor espessura e largura, o qual para h_d igual a 10 mm e t_d igual a 20 mm, é possível enrijecer em até 40% a ligação, e para as maiores dimensões, em até 140%, o que atesta a sua eficácia nas ligações.

Figura 5.24: Rigidez inicial da ligação

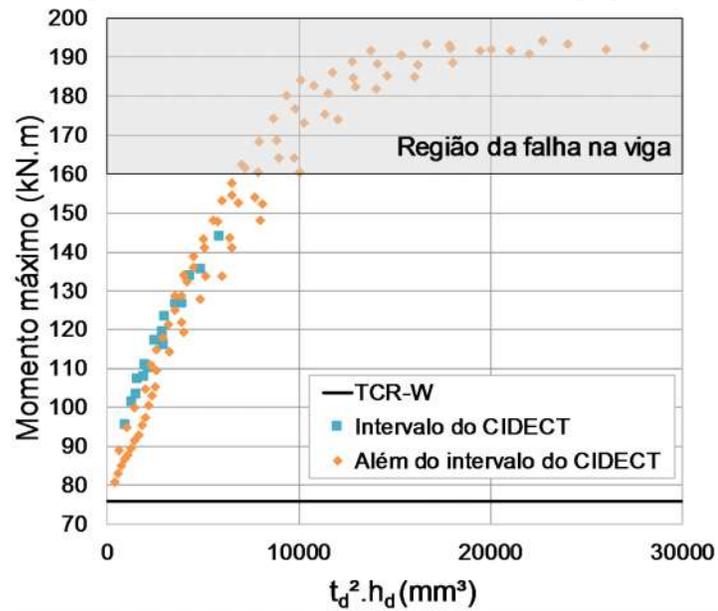


Fonte: Acervo pessoal

5.2.2.3 Correlações da ligação com as geometrias do diafragma externo

Para o momento resistente máximo e rigidez inicial da ligação, é feita uma análise dos resultados para o estabelecimento de uma correlação com a geometria do diafragma externo. Inicialmente considera-se a relação entre a largura do diafragma externo e sua espessura (área), onde posteriormente é acrescentado os expoentes a esses dois termos de forma a buscar um comportamento conhecido. Para o momento máximo da ligação, verifica-se um comportamento próximo ao linear a partir do expoente da espessura igual a 2, conforme ilustrado na Figura 5.25. O comportamento para $t_d^2 \cdot h_d$ é proporcional no aumento da resistência da ligação, com pequena variação perto da região de falha proporcionado pela viga, o que valida o comportamento da ligação na Figura 5.23, onde a espessura do diafragma externo teve maior influência na resistência da ligação. Também afirma a consideração geométrica para valores além dos limites de geometria do CIDECT-DG9 (kurobane, 2004), o que sugere uma reavaliação dos seus valores.

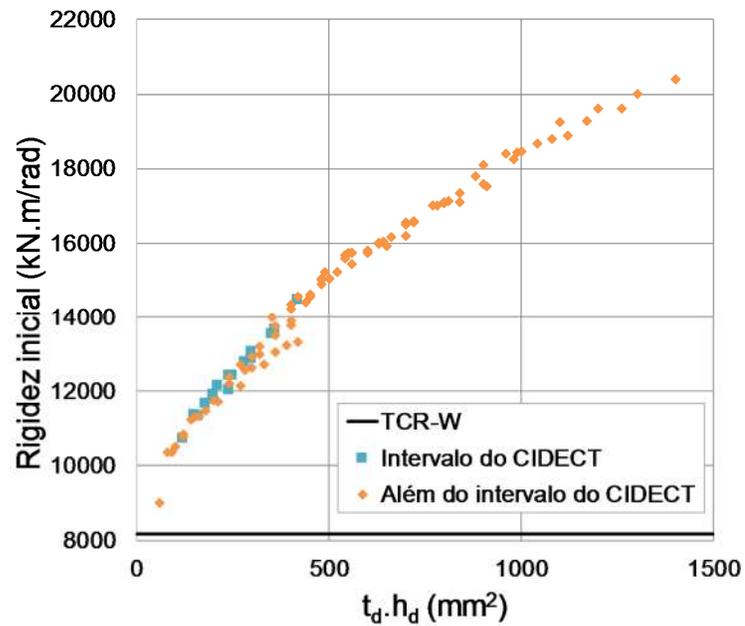
Figura 5.25: Resistência máxima das ligações



Fonte: Acervo pessoal

Para a rigidez inicial, há proporcionalidade com a área do diafragma externo - $t_d \cdot h_d$ conforme é apresentado na Figura 5.26, onde também constata-se correspondência entre os valores além dos limites do CIDECT-DG9 (Kurobane, 2004), seguindo a mesma tendência do momento resistente máximo.

Figura 5.26: Rigidez inicial das ligações

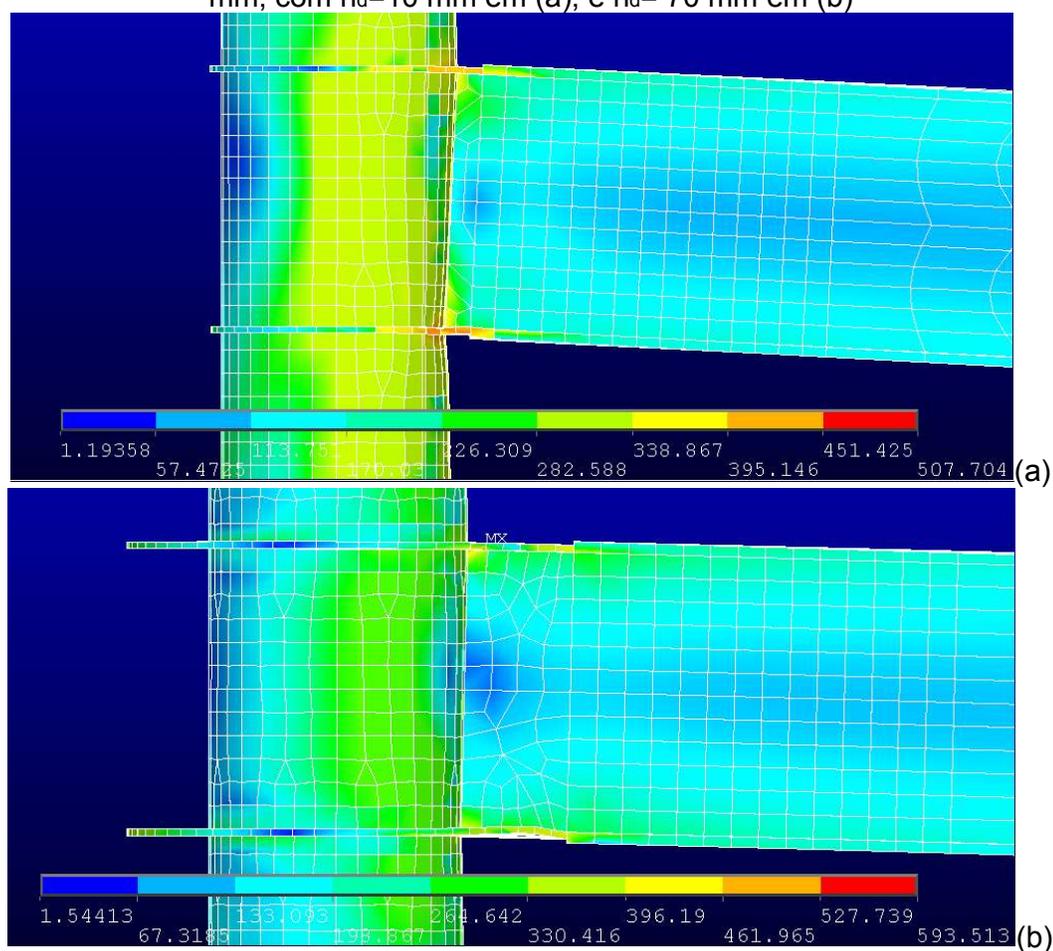


Fonte: Acervo pessoal

5.2.2.4 Tensões de von Mises na ligação

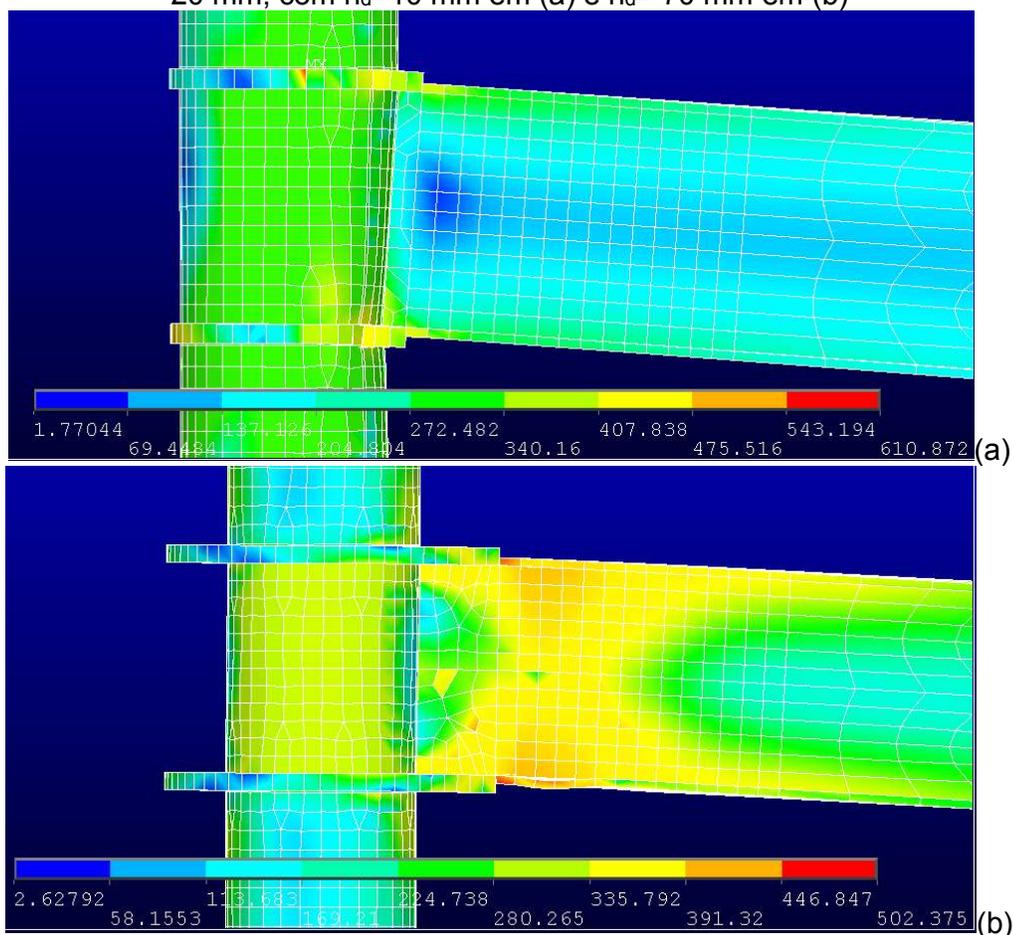
Nas Figura 5.27 e Figura 5.28 são apresentados as tensões de von Mises para as resistências máximas das ligações, onde visualiza-se na maior largura e espessura, o seu confinamento no pilar entre os limites do diafragma externo. Também é possível constatar o modo de falha ocorrendo na viga, conforme é mostrado na Figura 5.28-(b), e para os demais na ligação, Figura 5.27 e Figura 5.28-(a). Os valores apresentados são médios, e por ser uma representação volumétrica de um elemento de casca, são apenas ilustrativos, não correspondendo a sua característica no cálculo computacional.

Figura 5.27: Tensões de von Mises (Mpa) para a resistência máxima da ligação: $t_d=6$ mm, com $h_d=10$ mm em (a), e $h_d=70$ mm em (b)



Fonte: Acervo pessoal

Figura 5.28: Tensões de von Mises (Mpa) para a resistência máxima da ligação: $t_d=20$ mm, com $h_d=10$ mm em (a) e $h_d=70$ mm em (b)

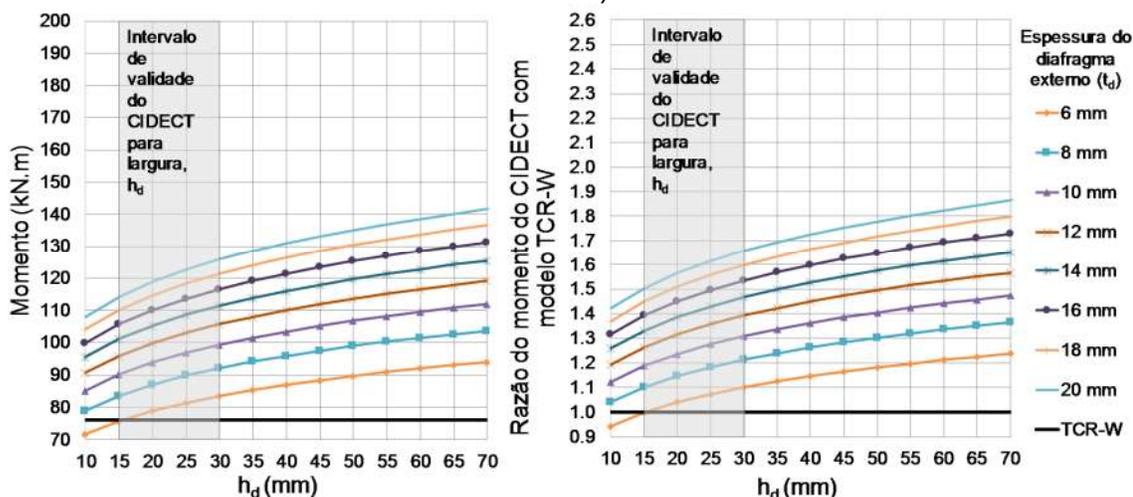


Fonte: Acervo pessoal

5.2.3 Comparação com os resultados do CIDECT

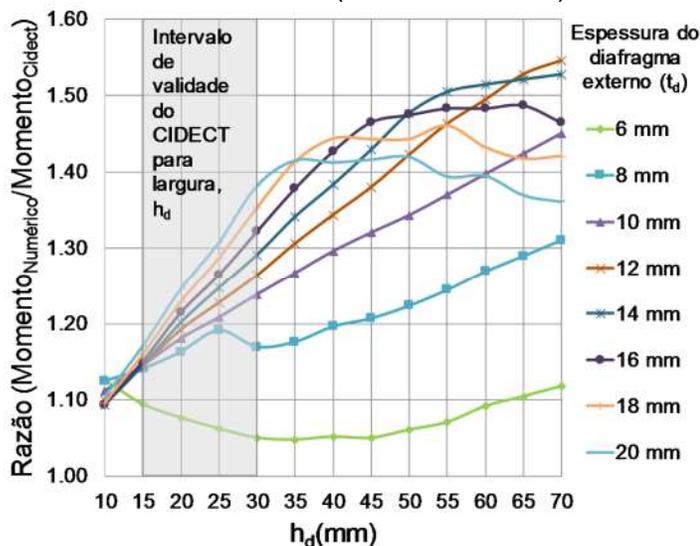
Na Figura 5.29 são apresentados os resultados para a equação (3.23) do CIDECT-DG9 (Kurobane, 2004), com a aplicação além dos limites do seu intervalo de validade – para a espessura o limite interno é entre 8 e 16 mm conforme item 4.2.2. O aumento em relação ao modelo TCR-W é até 55% no intervalo de validade, em t_d igual a 16 mm e h_d igual a 30 mm. Apenas para a menor espessura e largura os resultados são abaixo do modelo sem diafragma externo, o que se mostra a favor da segurança, tendo em vista que tais dimensões estão abaixo do intervalo da equação. Na Figura 5.30 é apresentada a relação entre os valores numéricos e analíticos para os momentos resistentes máximos.

Figura 5.29: Momento resistente máximo da equação do CIDECT-DG9 (Kurobane, 2004)



Fonte: Acervo pessoal

Figura 5.30: Comparativo entre os resultados numéricos para a equação do CIDECT-DG9 (Kurobane, 2004)



Fonte: Acervo pessoal

Na relação entre os resultados analíticos e numérico, dentro do intervalo do CIDECT-DG9 (Kurobane, 2004), é constatado o seu aumento proporcional com a espessura do diafragma externo. Nos valores onde a resistência numérica é limitada pela plastificação da viga, a razão é decrescente devido a constância gerada por essa falha. Os resultados da equação do CIDECT-DG9 (Kurobane, 2004) são conservadores, o que também foi constatado por Dessouki (2014), com seus valores inferiores ao momento resistente máximo encontrado no modelo numérico, o que é a favor da segurança, mas que também sugere uma melhor avaliação desse parâmetro.

6 CONCLUSÃO

6.1 COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO COM DIAFRAGMA EXTERNO

Neste trabalho é analisado o comportamento da ligação com diafragma externo e constatado a sua eficiência no alívio das tensões e rotações para a ligação entre viga de seção I e pilar tubular de seção circular. Para a sua geometria, é possível estabelecer correlação com a resistência máxima e a rigidez inicial, o que proporciona embasamento teórico para uma futura análise experimental. Também é sugerida reavaliação da equação do CIDECT-DG9 (Kurobane, 2004) e dos seus limites de aplicação, onde os resultados numéricos são consideravelmente acima dos analíticos e as dimensões, além dos limites de validade, apresentam comportamento proporcional.

6.2 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

- Analisar experimentalmente o uso do diafragma externo, para as ligações tipo T e X;
- Analisar a ligação com diafragma externo considerando a carga axial no pilar;
- Em sequência ao estudo de Wakabayashi (1971), estabelecer analogia com chapa transversal para a ligação com o diafragma externo;
- Classificar o comportamento da ligação com diafragma externo, de acordo com o EN 1993-1-8:2005, quanto ao momento máximo resistente e a rigidez inicial;
- Estabelecer equação da rigidez inicial para ligação com diafragma externo;
- Reavaliar os parâmetros e limites da equação do CIDECT-DG9 (Kurobane, 2004).

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: projeto de estrutura de aço e de estrutura mista de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16239**: projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares. Rio de Janeiro, 2013.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE/AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION **360-10**: specification for structural steel buildings. Chicago, 2010.

CARVALHO, P.H. **Avaliação numérica do comportamento estrutural de ligação entre pilar de seção tubular circular e viga de seção “I”**. 2005. Dissertação (Mestrado) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

COUTINHO, F. B. **Análise numérica da influência da largura da mesa da viga I na ligação com pilar tubular circular**. Monografia (Pós-graduação) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.

COUTINHO, F. B.; AZEVEDO M. S.; FERREIRA W. G. Diafragmas externos nas ligações entre viga de seção I e pilar tubular circular. In: Congresso Latino-Americano da Construção Metálica (Construmetal), 6., 2014, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABCEM, 2014 p. 397-409.

DESSOUKI, A. K.; YOUSEF, A. H.; FAWZY, M. M. Stiffener Configurations in Moment Connections between Steel I-Beams and Concrete-Filled Steel Tube Columns. **World Applied Sciences Journal**, 30 (2), p. 120-132, 2014.

EUROCODE 3: DESIGN OF STEEL STRUCTURES. **Part 1-1**: general rules and rules for buildings. Bélgica, 2005.

EUROCODE 3: DESIGN OF STEEL STRUCTURES. **Part 1-8**: Design of Joints. Bélgica, 2005.

FERREIRA, W. G.; SILVEIRA, Ricardo A. M.; BADKE N., A. **Conceitos e Terminologias da Estabilidade Estrutural**. In: Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 36., São Paulo. **Anais...** 2008, v. 1. p. 115.

FREITAS, P. C. B. **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, 2009.

KAMBA, T.; KANATANI, H. **Design formulae for CHS column-to-beam connections with exterior diaphragms**. In: Proceedings of the V International Symposium on Tubular Structures, 5., 1993, Nottingham, p. 249-256.

KUROBANE, Y.; PACKER, J. A.; WARDENIER, J.; YEOMANS, N. **CIDECT Design Guide 9: Design guide for structural hollow section column connections**. Köln: CIDECT and Verlag TÜV Rheinland, 2004.

LI, W. Q.; CHEN, Y.Y., WANG, W.; XU, Y. J.; LV, X. D. Experimental Study of External Diaphragm Joint Connecting CHS Column and H-Shaped Beam. **Advanced Steel Construction**, 2010, v. 6, N°. 1, p. 578-588.

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

MASIOLI, C. Z. **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, 2011.

PACKER, J. A.; HENDERSON, J. E. **Hollow structural section connections and trusses**. Alliston: Canadian Institute of Steel Construction, 1997.

PEREIRA, D. H. F. **Análise do comportamento estrutural de ligações em aço entre viga de seção I e pilar de seção tubular circular**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

RINK H.D.; WINKEL G.D.; WARDENIER J.; PUTHLI R.S. Numerical Investigation into the Static of Stiffened I-Beam-to-Column Connections. In: Tubular Structures, 4^o International Symposium, 4. 1991, Delft. **Anais...** Delft: Delft University Press, 1991, p. 461-470.

REQUENA, J. A. V.; SANTOS, A. L. E. de F. **Dimensionamento de ligações em barras tubulares de estruturas metálicas planas.** Coleção técnico-científica V&M do Brasil, 2007.

SABBAGH, A.B.; CHAN, T.M.; MOTTRAM J.T. Detailing of I-beam-to-CHS column joints with external diaphragm plates for seismic actions, **Journal of Constructional Steel Research**, 2013, p. 31-33.

SUI, W.; YAMANARI, M. Evaluation of the characteristics of external diaphragm connections with steel CHS columns and wide-flange steel beams. In: Pacific Structural Steel Conference, 2007, Wairakei. **Anais...**

SUI, W. N.; OTSUKA, T.; YAMANARI, M. Seismic design requirements of steel frames with external diaphragm connections. In: World Conference on Earthquake Engineering, 14., 2008, Beijing. **Anais...**

TABUCHI, M.; KANATANI, H.; KAMBA, T. Behavior of Tubular Column to H-Beam Connections under Seismic Loading. In: Conference of Earthquake Engineering, 9., 1988, Tokyo-Kyoto. **Anais...** v. 4.

WANG, W.; CHEN, Y.; LI, W.; LEON, R. T. **Bidirectional seismic performance of steel beam to circular tubular column connections with outer diaphragm.** Earthquake Engineering and Structural Dynamics. No. 40, November, 2010, p. 1063-1081.

WAKABAYASHI, M.; SASAKI, R.; KISHIMA, Y. **An Experimental Study on Centrifugally-Cast Steel Pipe to H-Beam Connections Annuals.** Disaster Prevention Research Institute. Kyoto University, No. 14, April, 1971, p. 343-369.

WINKEL, G. D. **The static strength of I-beam to circular hollow section column connections.** Tese (PhD) - Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Delft, 1998.

WARDENIER, J.; PACKER, J. A.; ZHAO, X.-L.; VEGTE, G. J. van der. **Hollow sections in structural applications**. Bouwen met Staal, 2 ed., 2010.