



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Escola Politécnica
Programa de Projeto de Estruturas

Fabício Rosado Urquhart

**ANÁLISE PARAMÉTRICA DA RIGIDEZ EM LIGAÇÕES APARAFUSADAS
DE AÇO**



UFRJ

Fabício Rosado Urquhart

ANÁLISE PARAMÉTRICA DA RIGIDEZ EM LIGAÇÕES APARAFUSADAS DE
AÇO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Projeto de Estruturas, Escola Politécnica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Projeto de Estruturas.

Orientadora:
Silvia Corbani

Rio de Janeiro
2019

Urquhart, Fabrício Rosado

Análise paramétrica da rigidez em ligações aparafusadas de aço / Fabrício Rosado Urquhart – 2019.

86: 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Projeto de Estruturas) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Programa de Projeto de Estruturas, Rio de Janeiro, 2019.

Orientadora: Silvia Corbani

1. Ligações aparafusadas, 2. Análise paramétrica, 3. Estruturas de aço. I. Corbani, Silvia II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica. III. Análise paramétrica de ligações aparafusadas de aço.



UFRJ

ANÁLISE PARAMÉTRICA DA RIGIDEZ EM LIGAÇÕES APARAFUSADAS DE
AÇO

Fabício Rosado Urquhart

Orientadora:

Silvia Corbani

Dissertação de Mestrado apresentada Programa de Projeto de Estruturas, Escola Politécnica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Projeto de Estruturas.

Aprovada pela Banca:

Prof. Silvia Corbani, D. Sc., UFRJ

Prof. Maria Cascão Ferreira de Almeida, D. Sc., UFRJ

Prof. Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco, PhD., UERJ

Rio de Janeiro
2019

AGRADECIMENTOS

À minha família: pais, namorada, irmão, cunhada e sobrinhos pelo apoio e total compreensão por ausências durante esse período.

À professora Silvia Corbani, pela confiança, dedicação, orientação e principalmente paciência e compreensão.

À toda equipe da Radix, desde copeiras até diretores, pois todos deram o suporte necessário para a elaboração deste trabalho.

Aos professores da Oceânica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, por me ajudarem nesse pontapé inicial que foi entrar no tão sonhado mestrado profissional da Escola Politécnica do Rio de Janeiro.

Aos professores Sergio Hampshire, Maria Cascão e Gilberto Ellwanger pela paciência e apoio nessa chegada definitiva à Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Aos amigos Renato Tobias e Leandro Chagas por me incentivarem desde o início até o final dessa jornada.

Aos amigos Murad Said, Simone Semptovski pela parceria em momentos de descontração e suporte em momentos difíceis.

Ao Peter, da comunidade da Ansys, pela constante ajuda no ANSYS e pelas ideias e conselhos fundamentais para a realização deste trabalho.

Ao professor Roger Matsumoto Moreira, da Universidade Federal Fluminense, por permitir o uso do ANSYS no Laboratório de Fluidodinâmica Computacional (LabCFD).

RESUMO

URQUHART, Fabricio Rosado. **Análise Paramétrica da Rigidez em Ligações Aparafusadas de Aço**. Rio de Janeiro. 2019. Dissertação (Mestrado) – Programa de Projeto de Estruturas, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2019.

A utilização de ligações aparafusadas em projetos industriais vem aumentando devido à dificuldade de soldar em campo. Considerando diversas espessuras de chapas de extremidade, diâmetros e locação dos parafusos, raramente hipóteses de ligações rígidas ou flexíveis são adequadas para representar o problema. Uma hipótese mais realista do problema é assumir que estas ligações são semirrígidas, ou seja, a rigidez nestas ligações não é nula, como assumido em ligações flexíveis, e a rigidez não é infinita, como assumido em ligações rígidas. Assim, em ligações semirrígidas deve-se assumir uma rigidez intermediária a qual depende de parâmetros de projeto para se conhecer a influência no seu comportamento. No presente trabalho é realizado um estudo paramétrico em uma ligação viga-pilar de um pórtico de aço, composta por chapa de extremidade e parafusos. A partir de análises numéricas com três diferentes disposições entre parafusos, avalia-se a rigidez da ligação utilizando diferentes parâmetros como espessura de chapa de extremidade e diâmetros de parafuso. Nas análises não é considerada a solda entre a viga e a chapa de extremidade, além disso, é assumido atrito entre todas as superfícies que podem estar em contato. A modelagem da geometria e as análises numéricas são feitas em um programa comercial de elementos finitos, o programa *Ansys*. Foi avaliado se as ligações aparafusadas apresentam comportamento semirrígido, conforme critérios existentes no Eurocode-3 (2010), e quais dos dois parâmetros tem maior influência na rigidez destas ligações. Observou-se que para as ligações semirrígidas estudadas neste trabalho com alta rigidez, a espessura da chapa de extremidade tem maior impacto na sua rigidez, ao passo que para ligações semirrígidas com rigidez baixa, a maior influência é dada pelo diâmetro dos parafusos.

Palavras-chave: Estruturas em aço, ligações aparafusadas, elementos finitos, ligações semirrígidas.

ABSTRACT

URQUHART, Fabricio Rosado. **Parametric Analysis of Stiffness in Steel Bolted Connections**. Rio de Janeiro. 2019. Dissertation (MSc) – Programa de Projeto de Estruturas, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2019.

The use of bolted connections in industrial projects has been increasing due to the difficulty of welding in the field. Considering different values of thickness of end-plates, diameters and location of bolts, it is difficult to represent the stiffness of the connection using rigid or flexible theory. A more realistic hypothesis of the problem is to assume that these connections are semi-rigid. Therefore, the stiffness in these connections is not null, as assumed in flexible connections, and the stiffness is not infinite, as considered in rigid connections. Thus, in semi-rigid connections, an intermediate stiffness shall be assumed, which depends on the project parameters. In this work, a parametric study is done based on a beam-column connection of a steel portic composed of end-plate and bolts. From three numerical analyses with different distance between the bolts, it is done an evaluation of the stiffness of this connection using different parameters of end-plate thickness and bolt diameter. In the analyses, the weld between the beam and the end-plate is not considered, furthermore the friction between the components which can be in contact is assumed. The modeling of three-dimensional geometry and the numerical analyses are done in a commercial finite element software, the Ansys software. It was evaluated if the bolted connections have semi-rigid behavior, according to existing criteria in Eurocode-3 (2010), and which of the two parameters have the greater influence on the stiffness connection. It has been observed that for the semi-rigid connections studied in this work with high stiffness, the thickness of the end-plate has greater impact on the stiffness connections, whereas for semi-rigid connections with low stiffness, the greater influence is given by the diameter of the bolts.

Keywords: steel structures, bolted connections, finite elements, semi-rigid connections.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Motivação	2
1.2. Objetivos	3
1.3. Hipóteses do Problema	3
1.4. Organização do Trabalho	3
2. LIGAÇÕES APARAFUSADAS	5
2.1. Ligações aparafusadas no universo de estruturas de aço	5
2.2. Evolução das ligações aparafusadas	5
2.3. Classificação das ligações	8
2.3.1. Classificação do AISC (1980)	9
2.3.2. Classificação do AISC/LRFD (1986)	9
2.3.3. Classificação do Eurocode-3 (1992 e 2010)	9
2.4. Parafusos	11
2.5. Dimensionamento das ligações aparafusadas pelo Eurocode (2010)	11
2.5.1. Método T-stub equivalente à tração	12
2.5.2. Método das componentes	15
2.5.3. Momento resistente	22
2.5.4. Rigidez rotacional	24
3. METODOLOGIA PARA TRAÇAR A CURVA MOMENTO-CURVATURA A PARTIR DE ANÁLISES PARAMÉTRICAS	28
3.1. Definição da Geometria e carregamento	29
3.2. Definição dos tipos e possíveis regiões de contato	32
3.3. Propriedade dos materiais elastoplásticos	34
3.3.1. Curva Tensão-Deformação	34
3.3.2. Definição da Curva Tensão-Deformação no Ansys	36
3.4. Definição da Malha de Elementos Finitos	38
3.4.1. Elemento SOLID186	38
3.4.2. Elementos Conta174 e Targe170	39
3.4.3. Discretização dos Perfis e Chapas	40
3.4.4. Teste de convergência	43
3.5. Análise Incremental	43
3.6. Gráfico Momento <i>versus</i> Curvatura	44

4. PROCEDIMENTOS E RESULTADOS	46
4.1. Descrição dos Modelos Utilizados	46
4.2. Resultados Obtidos.....	48
4.2.1. Coeficiente de Atrito	48
4.2.2. Distribuição de tensões na Viga	49
4.2.3. Distribuição de Tensões na Chapa de Extremidade e Mesa do Pilar ...	57
4.2.4. Análise dos Parafusos	65
4.2.5. Rigidez da ligação: curva momento versus rotação e Eurocode	69
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	80
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
7. SÍTIOS DA INTERNET.....	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 – Modelo de EF: (a) pórtico, (b) detalhe DP120, (c) detalhe DP285 e (d) detalhe 2DP285.	2
Figura 2-1 – Construção da ponte de <i>Mackinan</i> (fonte: http://www.americanbridge.net).	6
Figura 2-2 – (a) Ligação viga-coluna com chapa de extremidade e (b) Ligação viga-coluna com perfis “T”.....	7
Figura 2-3 – Classificação da rigidez das Ligações (Eurocode-3 2010).	10
Figura 2-4 – (a) ligação viga-pilar sem continuidade e (b) ligação viga-pilar com continuidade do pilar.	11
Figura 2-5 – Método <i>T-stub</i> aplicada à: (a) mesa da coluna à flexão e (b) chapa de extremidade à flexão.....	12
Figura 2-6 – Modos de ruptura do método T-stub equivalente à tração: (a) modo 1 (b) modo 2 e (c) modo 3.....	13
Figura 2-7 – Dimensões de uma mesa T-sub equivalente (a) vista superior (b) vista frontal (c) forças do efeito alavanca (Eurocode, 2010).....	14
Figura 2-8 – Componentes de uma ligação parafusada com chapa de extremidade.	15
Figura 2-9 – Propriedades geométricas da alma de uma coluna à compressão: (a) vista lateral e (b) corte (Eurocode, 2010).....	17
Figura 2-10 – Propriedades geométricas da chapa de extremidade à flexão como método <i>T-stub</i> equivalente (Eurocode, 2010).....	19
Figura 2-11 – Valores de α para colunas enrijecidas e chapas de extremidade (Eurocode, 2010).....	20
Figura 2-12 – Simplificação de uma ligação parafusada com chapa de extremidade, Eurocode (2010).	23
Figura 3-1 – Rotação nas ligações semirrígidas.	28
Figura 3-2 – Três diferentes disposições de parafusos estudados.	28
Figura 3-3 – Modelo estrutural analisado no Ansys 15.0:.....	30
Figura 3-4 – Extrusão para gerar um componente.	30
Figura 3-5 – Discretização de Perfis e Chapa: (a) Geral e (b) Ligação.	31
Figura 3-6 – Malha de Elementos Finitos para Viga e Chapa de Extremidade:	31

Figura 3-7 – Superfícies de contato: (a) chapa de extremidade/porca (b) mesa do pilar/cabeça do parafuso (c) chapa de extremidade/pilar e (d) em torno dos furos/fuste dos parafusos.	33
Figura 3-8 – Gráfico da tensão-deformação verdadeira e de engenharia	35
Figura 3-9 – Elemento finito <i>SOLID186</i> (ANSYS, 2014).	39
Figura 3-10 – Elementos finitos de contato: (a) CONTA174 e (b) TARGE170.....	40
Figura 3-11 – Malha de Elementos Finitos para Pilar e Chapa de Extremidade:.....	41
Figura 3-12 – Malha de Elementos Finitos para região dos furos:.....	42
Figura 3-13 – Malha de Elementos Finitos para os parafusos.....	42
Figura 3-14 – Teste de convergência de malha de elementos finitos.....	43
Figura 3-15 – Definição de rotação de um nó (Bursi & Jaspart, 1997).....	44
Figura 4-1 – Detalhe das ligações aparafusadas: (a)D120 (b)DP285 (c)2DP285	46
Figura 4-2 – Definição do coeficiente de atrito de contato:	49
Figura 4-3 – Posição das seções transversais horizontais da mesa da viga	50
Figura 4-4 – Distribuição de tensões de Von Mises na mesa superior da viga na seção de intersecção viga/chapa de extremidade.	50
Figura 4-5 – Distribuição de tensões de Von Mises na mesa superior da viga na seção a uma distância da chapa de extremidade de $H/2$	51
Figura 4-6 –Comparação entre Tensão Analítica e Tensão Média em gráfico Tensão <i>versus</i> Momento na seção $H/2$ do Modelo Numérico.	51
Figura 4-7 – Influência da variação da espessura da chapa de extremidade t_{ch} no gráfico tensão média <i>versus</i> momento na seção $H/2$	52
Figura 4-8 – Influência da variação do diâmetro de parafuso φ_p no gráfico tensão média <i>versus</i> momento na seção $H/2$	53
Figura 4-9 – Distribuição de tensões normais na alma da viga na seção de intersecção viga/chapa de extremidade – Modelo 2DP285-T190-P190.	53
Figura 4-10 – Distribuição de tensões normais na alma da viga na seção $H/2$	54
Figura 4-11 –Influência do diâmetro do parafuso φ_p na distribuição de tensões normais σ_y na alma da viga na seção $H/2$ para momento fletor na ligação de 75 kNm.	55
Figura 4-12 – Influência da espessura da chapa de extremidade t_{ch} na distribuição de tensões na alma da viga na seção $H/2$ para momento fletor na ligação de 75 kNm.....	55
Figura 4-13 – Posição das seções transversais verticais da alma da viga.	56
Figura 4-14 – Distribuição de tensões transversais na alma da viga para momento na ligação de 89 kNm.	56

Figura 4-15 – Deformação da Chapa de extremidade e da mesa do pilar: (a) 2DP285-T160-P190 (b) 2DP285-T190-P190 e (c) 2DP285-T220-P190.	57
Figura 4-16 –Seções na chapa de extremidade: (a) verticais, (b) horizontais e na (c) mesa do pilar.....	58
Figura 4-17 –Deslocamentos na chapa de extremidade e mesa do pilar na seção A-A .	58
Figura 4-18 –Deslocamentos na Chapa de extremidade na seção vertical B-B.	59
Figura 4-19 –Deslocamentos na chapa de extremidade e mesa do pilar na seção C-C..	59
Figura 4-20 – Influência da espessura da chapa de extremidade t_{ch} nos deslocamentos relativos entre Chapa de extremidade e mesa do pilar na seção vertical A'-A'	60
Figura 4-21 – Influência da espessura da chapa de extremidade t_{ch} nos deslocamentos da mesa do Pilar na seção vertical A'-A'	61
Figura 4-22 –Deslocamentos na chapa de extremidade na seção horizontal D-D.	61
Figura 4-23 –Deslocamentos na chapa de extremidade na seção horizontal E-E.	61
Figura 4-24 –Deslocamentos na chapa de extremidade na seção horizontal F-F.....	62
Figura 4-25 –Deslocamentos relativos entre chapa de extremidade e mesa do Pilar na seção D-D.	62
Figura 4-26 –Deslocamentos relativos entre Chapa de extremidade e Mesa do Pilar na seção horizontal E-E.....	63
Figura 4-27 – Influência do diâmetro do parafuso φ_p nos deslocamentos relativos entre chapa de extremidade e mesa do Pilar na seção horizontal D-D.....	63
Figura 4-28 – Influência da espessura da chapa de extremidade t_{ch} nos Deslocamentos relativos entre Chapa de extremidade e Mesa do Pilar na seção horizontal D-D.....	64
Figura 4-29 – Tensões σ_y na chapa de extremidade (MPa), para momentos (kNm) de: (a) M17, (b) M50, (c) M75 e (d) M106 para o modelo 2DP285-T160-P160.....	64
Figura 4-30 –Força de tração nos parafusos externo e interno para o modelo.....	66
Figura 4-31 –Força de tração nos parafusos externo e interno para o modelo.....	68
Figura 4-32 – Medição da rotação da ligação: (a) posição dos pontos da estrutura não deformada e (b) pontos nas posições deformadas	69
Figura 4-33 – Gráfico momento <i>versus</i> rotação do modelo 2DP285-T190-P190 para definição da seção para medição da rotação da ligação.	70
Figura 4-34 – Gráfico momento X rotação das ligações do tipo DP120.....	71
Figura 4-35 – Gráfico momento X rotação das ligações do tipo DP285.....	71
Figura 4-36 – Gráfico momento X rotação das ligações do tipo 2DP285.....	72

Figura 4-37 – Gráfico com a variação da espessura da chapa de extremidade t_{ch} nos modelos 2DP285-T-P220.	73
Figura 4-38 – Gráfico com a variação do diâmetro de parafuso φ_p nos modelos 2DP285-T220-P.	74
Figura 4-39 – Gráfico com a variação da espessura da chapa de extremidade t_{ch} nos modelos DP120-T-P220.	75
Figura 4-40 – Gráfico com a variação do diâmetro de parafuso φ_p nos modelos DP120-T220-P.	75
Figura 4-41 – Gráfico momento <i>versus</i> rotação comparativo do modelo DP285-T190-P190 com o Eurocode (2010).	76
Figura 4-42 – Gráfico momento <i>versus</i> rotação comparativo do modelo 2DP285-T190-P190 com o Eurocode (2010).	77
Figura 4-43 Influência dos parâmetros t_{ch} e φ_p no gráfico momento <i>versus</i> rotação nos modelos DP285.	78
Figura 4-44 Influência dos parâmetros t_{ch} e φ_p no gráfico momento <i>versus</i> rotação nos modelos DP120.	78
Figura 4-45 – Modos de de falha: (a) modo 1 (b) modo 2 e (c) modo 3.	78

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2-1 – Materiais mais utilizados comercialmente em parafusos.	11
Tabela 2-2 – Comprimento efetivo da mesa de coluna não enrijecida (Eurocode, 2010).	15
Tabela 2-3 – Fator de redução ω (Eurocode, 2010).	17
Tabela 2-4 – Comprimento efetivo da chapa de extremidade com linhas de parafuso consideradas individualmente.....	19
Tabela 2-5 – Comprimento efetivo chapa de extremidade com linhas de parafuso consideradas como para de um grupo de parafusos (Eurocode, 2010).	20
Tabela 2-6 – Braço de alavanca z para: (a) duas linhas de parafusos, (b) três linhas de parafuso, Eurocode (2010).	23
Tabela 3-1 – Força de Protensão mínima F_t dos parafusos	32
Tabela 3-2 – Relação Tensão-deformação para Viga e Coluna (ASTM A572 G50).....	37
Tabela 3-3 – Relação Tensão-deformação para a Chapa de Extremidade (ASTM A36).	37
Tabela 3-4 – Relação Tensão-deformação para os parafusos (ASTM A325).....	38
Tabela 4-1 – Parâmetros dos Modelos Numéricos.....	47
Tabela 4-2 – Distribuição de tensões normais nos parafusos.....	67
Tabela 4-3 – Modos de falha dos modelos numéricos.	79

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, as ligações aparafusadas são amplamente utilizadas em indústrias onde se tem a possibilidade de futuras desmontagens de estruturas de aço, assim como em galpões que permitam a remoção futura de equipamentos internos através da desmontagem da estrutura da cobertura. Além dessas aplicações, as ligações aparafusadas possuem outras vantagens como a rapidez de execução das ligações de campo, mão de obra utilizada para instalação e inspeção dos parafusos, a qual não precisa ser especializada como a utilizada em ligações soldadas.

Antigamente, em projetos e análises de estruturas de aço, as ligações eram classificadas apenas em dois tipos: rígida e flexível. Entretanto, ligações rígidas ou flexíveis raramente representam o comportamento real das ligações de estruturas de aço. Por isso foi introduzido o conceito de ligações semirrígidas, o qual representa uma rigidez intermediária entre os casos extremos citados. As ligações aparafusadas são os principais modelos de ligações semirrígidas de estruturas de aço.

Na Figura 1-1(a), é ilustrado o pórtico que será analisado neste estudo. A ligação semirrígida é adotada para conectar uma viga em balanço ao pilar, o qual foi considerado um apoio rígido na sua base. O objetivo deste trabalho é analisar parametricamente esta ligação semirrígida parafusada com chapa de extremidade a qual conecta a viga em balanço ao pilar. A aplicação de análise paramétrica em estruturas de aço já foi investigada em Eldemerdash *et al.* (2012). Entretanto, a distância entre parafusos não foi considerada como um parâmetro variável. Neste trabalho, serão analisadas três diferentes distâncias entre linhas de parafusos. Inicialmente, serão analisados modelos com as linhas de parafusos entre as mesas superior e inferior da viga ilustradas na Figura 1-1(b). Depois será analisada uma ligação com uma linha de parafusos acima da mesa superior da viga, e outra linha de parafusos localizada acima da mesa inferior do perfil de aço, conforme ilustrado na Figura 1-1(c). Além desses dois modelos, será estudado um terceiro modelo com o acréscimo de uma linha de parafusos, com o objetivo de analisar o seu impacto na rigidez da ligação, o qual pode ser observado na Figura 1-1(d), onde as medidas estão em mm e DP significa distância entre parafusos.

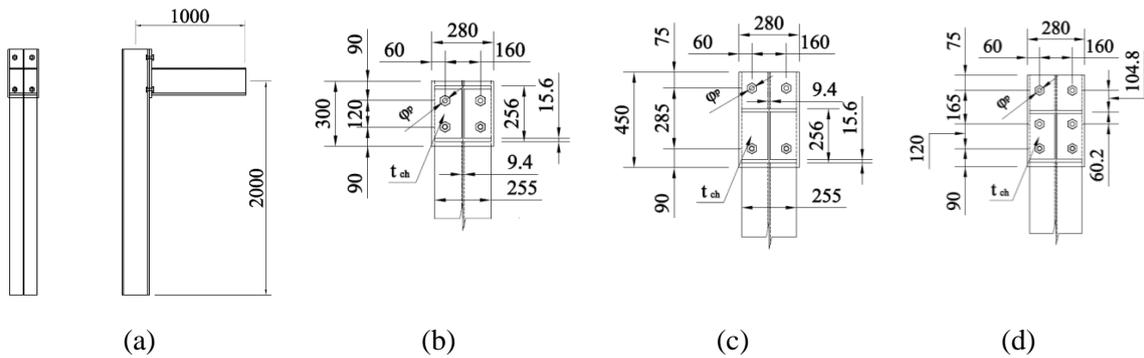


Figura 1-1 – Modelo de EF: (a) pórtico, (b) detalhe DP120, (c) detalhe DP285 e (d) detalhe 2DP285.

Portanto, essas disposições de linhas de parafusos foram selecionadas para esclarecer que, em ligações aparafusadas, o braço de alavanca formado pelo binário de forças de tração e de compressão depende da distância entre a posição da resultante das tensões de tração até a posição da resultante das tensões de compressão, e não depende exclusivamente da distância entre parafusos. Inicialmente, neste trabalho assume-se que a região sob tensões de compressão depende principalmente do contato entre a chapa de extremidade e a mesa do pilar. Enquanto que as tensões de tração ocorrem apenas nos parafusos e depende do comportamento elastoplástico dos materiais.

Dessa maneira, a análise de elementos finitos tridimensional é inserida modelando o problema de contato da ligação viga-pilar e a não-linearidade física dos materiais no programa *Ansys*. A partir das tensões e deformações obtidas na análise de elementos finitos, foram determinados os momentos resultantes na região da ligação com o objetivo de traçar o gráfico momento/curvatura da ligação. Os resultados de momento/curvatura obtidos desta análise serão comparados com critérios estabelecidos no Eurocode-3 (2010) onde se tem a classificação das ligações como flexível, semirrígida e rígida. Para se analisar a influência na rigidez da ligação, diversos modelos serão analisados, os quais estão divididos três disposições de parafusos com diferentes diâmetros de parafuso, φ_p e diferentes espessuras de chapa, t_{ch} (ver na Figura 1-1).

1.1. Motivação

O papel desempenhado pelas ligações aparafusadas de aço é fundamental no comportamento global da estrutura. A principal motivação deste trabalho é fazer um estudo detalhado em elementos finitos para servir como consulta para projetistas de

estruturas de aço. Atualmente, tem-se excelente ferramentas comerciais, com as quais é possível a simulação dessas ligações. Principalmente, em se tratando de problemas de contato, o qual se trata de uma análise não linear complexa que pode ser simulada através da aplicação de elementos finitos em ligações aparafusadas de aço.

Em função da sua complexidade, o conceito de problemas de contato é ainda pouco difundido pelos projetistas de estruturas de aço. De maneira geral, as ligações parafusadas de aço são classificadas em rígidas ou flexíveis. Portanto a motivação deste trabalho é possibilitar a utilização de conceitos intermediários, como ligações aparafusadas semirrígidas. Conceitos que serão resultados da análise em elementos finitos aplicados a problemas de contato.

1.2. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a rigidez das ligações aparafusadas de aço, traçando um gráfico momento *versus* curvatura, a partir dos resultados dos esforços internos e deslocamentos resultantes das análises paramétricas. A simulação numérica será em um programa comercial de elementos finitos, o *Ansys 15.0*. Os parâmetros definidos são diâmetro de parafuso e espessura de chapa de extremidade. A variação dos parâmetros espessura de chapa de extremidade t_{ch} e diâmetro de parafusos φ_p serão dadas utilizando espessuras e diâmetros comerciais de 16, 19 e 22mm.

1.3. Hipóteses do Problema

Na simulação numérica do problema, foram utilizadas as hipóteses a seguir:

- Não será modelada a solda entre viga e chapa de extremidade
- Foi considerado atrito entre as superfícies que potencialmente podem entrar em contato
- Viga e chapa de extremidade foram modeladas compartilhando a topologia, conceito denominado no *Ansys* de “*shared topology*”.

1.4. Organização do Trabalho

Este trabalho foi escrito em 5 Capítulos. No Capítulo 2, apresenta-se uma introdução sobre ligações aparafusadas. Dessa maneira, compilando informações de Kulak *et al.* (1987), Batho e Bateman (1934), McCormac e Csernal (2012), Sherbourne (1961 apud MAGGI, 2000), Douty e McGuire (1965 apud MAGGI, 2000),

Krishnamurthy (1979 apud MAGGI, 2000), Nair *et al* (1974 apud MAGGI, 2000) elaborou-se uma breve evolução técnica histórica sobre ligações aparafusadas de aço.

Explica-se também como foi o histórico da classificação das ligações aparafusadas de aço em relação a rigidez baseado em normas internacionais como AISC (1980 e 1986), Eurocode-3 (1992 e 2010). Com isso, é demonstrado como é feito o dimensionamento de ligações aparafusadas com chapa de extremidade através do Eurocode-3 (2010).

No Capítulo 3, define-se a metodologia a ser aplicada no programa *Ansys* 15.0 (2014). Explica-se como foi elaborado o modelo numérico no *Ansys*, quais elementos finitos foram utilizados, assim como a definição da malha de elementos finitos. Depois, são apresentadas as definições dos contatos, vinculações e condições de contorno, seguido da aplicação do carregamento nos componentes do modelo numérico. Em seguida são definidos os aspectos da análise numérica não linear, onde são introduzidos os conceitos de tensões de engenharia e tensões verdadeiras, assim como deformações de engenharia e deformações verdadeiras. Com isso, são definidas as características plásticas dos materiais.

No Capítulo 4, se tem a descrição de todos modelos de elementos finitos analisados, definindo a variação dos parâmetros, propriedades dos materiais e perfis a serem utilizados. Posterior as descrições dos parâmetros dos modelos, explica-se os resultados encontrados e uma análise comparativa entre eles.

Finalmente, as conclusões do trabalho são apresentadas no Capítulo 5, onde se discutem as influências e impactos em relação aos parâmetros de ligações aparafusadas de aço com chapas de extremidade e as propostas para futuros trabalhos.

2. LIGAÇÕES APARAFUSADAS

Com o processo evolutivo no qual as estruturas de aço estão submetidas, e conseqüentemente a substituição do concreto pelo aço no Brasil, é indispensável o conhecimento de análise de ligações de estruturas de aço. O termo ligação é aplicado a todos os detalhes construtivos, que promovam a conexão ou união das partes entre si.

2.1. Ligações aparafusadas no universo de estruturas de aço

As ligações aparafusadas se destacam entre os demais tipos de ligações, pela sua rapidez, agilidade e facilidade na construção e montagem de estruturas de aço, assim como na facilidade de desmontagem em possíveis ampliações.

Observa-se, atualmente, que cada vez mais, estruturas de aço são utilizadas para reabilitações de edificações, ou como reforços estruturais para suportar novos carregamentos devido às ampliações. No ambiente industrial existente, onde a dificuldade de construção se torna maior devido às interferências no local ou da falta de espaço para mobilidade de estruturas já montadas de fábrica; as ligações aparafusadas se tornam ainda mais aplicáveis, facilitando a montagem, assim como a agilidade na construção.

As ligações aparafusadas de aço são, portanto cada vez mais importantes no universo de estruturas de aço, e por isso tem lugar de destaque. Sabe-se que o seu estudo é muito importante e é nessa direção que será o tema principal ao longo deste trabalho, onde se vai elaborar uma análise paramétrica da rigidez destas ligações aparafusadas.

2.2. Evolução das ligações aparafusadas

Antigamente, rebites eram os principais fixadores em estruturas de aço, mas ainda assim ocasionalmente parafusos de aço eram utilizados nas ligações aparafusadas. Segundo Kulak *et al.* (1987), Batho e Bateman (1934), foram os primeiros a sugerir o uso de parafusos de alta resistência para ligações de estruturas de aço. Neste estudo foi concluído que parafusos com tensão de escoamento mínima de aproximadamente 370 MPa poderiam ser utilizados com segurança, evitando forças de deslizamento entre as partes conectadas. Importante salientar que os problemas de contato entre os

componentes das ligações aparafusadas começavam a ser observados nesta mesma época.

Em 1947, com a criação do *Research Council on Riveted and Bolted Structural Joints* (RCRBSJ), atualmente com o nome de *Research Council on Structural Connections* (RCSC), iniciou-se com mais ênfase, as pesquisas nesta área nos Estados Unidos. Dessa maneira, reunindo universidades, institutos de pesquisa e o setor industrial, em 1949, o RCRBSJ em conjunto com o *American Society for Testing and Materials* (ASTM) publicaram a primeira especificação técnica de materiais para parafusos de alta resistência. Segundo Kulak *et al.* (1987), utilizando os resultados desta pesquisa, o RCRBSJ, em 1951, publicou a primeira especificação técnica para utilização de parafusos de alta resistência, na qual permitiu-se a substituição equivalente dos rebites por parafusos.

Segundo McCormac e Csernal, 2012, parafusos de alta resistência não só se tornaram rapidamente o meio mais utilizado para ligações de campo, mas também em muitas aplicações nas conexões de fábrica. A construção da ponte de *Mackinan* (Figura 2-1), em 1954, no estado de Michigan, nos Estados Unidos, envolveu o uso de mais de um milhão de parafusos de alta resistência.



Figura 2-1 – Construção da ponte de *Mackinan* (fonte: <http://www.americanbridge.net>).

De acordo com Kulak *et al.*, 1987, fora dos Estados Unidos, parafusos de alta resistência também atraíram muita atenção. A experiência obtida em laboratório e em construção de pontes capacitaram o *German Committee for Structural Steelwork* (GCSS) a emitir um código preliminar de práticas em 1956. Na Grã-Bretanha, a evolução dos estudos foi, de maneira geral, similar ao que aconteceu com a prática e especificações nos Estados Unidos. O British Standards Institution emitiu um padrão de materiais, o British Standard (BS) 3139 (1959), especificando os materiais dos

parafusos. O BS 3294 (1960) foi emitido, estabelecendo os procedimentos de projeto e práticas de execução em campo.

Em 1961, Sherbourne (1961 apud MAGGI, 2000), considerado um dos pioneiros em estudos das ligações viga-coluna com chapa de extremidade, estudou ligações nas quais as transmissões dos esforços da viga para o pilar se davam por meio de uma chapa soldada a extremidade da viga e parafusada a mesa do pilar, como é mostrado na Figura 2-2(a). Segundo Douty e McGuire (1965 apud MAGGI, 2000), em 1965, através de um estudo sobre ligações nas quais a ligação entre viga e pilar era feita com perfis “T” conectados as mesas da viga e do pilar, conforme Figura 2-2(b), introduziram a possibilidade do aparecimento de forças de alavanca (*prying action*). A partir desses estudos, foi estabelecido o primeiro modelo analítico para relacionar as forças de tração aplicadas ao perfil “T” com as forças de alavanca.

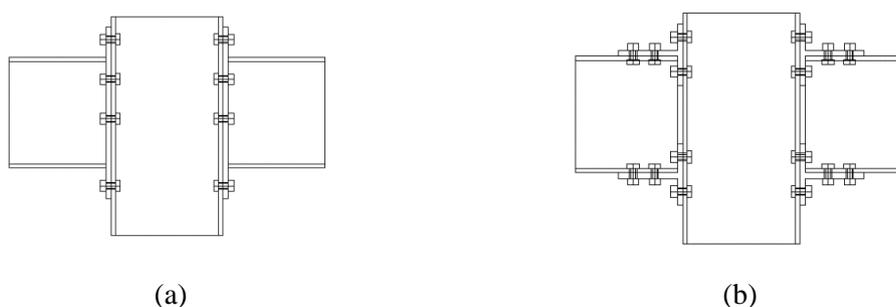


Figura 2-2 – (a) Ligação viga-coluna com chapa de extremidade e (b) Ligação viga-coluna com perfis “T”.

Na década de 70, diversos estudos foram realizados sobre problemas do efeito alavanca. Em 1974, Nair *et al* (1974 apud MAGGI, 2000), realizaram um estudo paramétrico das ligações estudadas por Douty e McGuire (1965 apud MAGGI, 2000), utilizando análise numérica com elementos finitos. Em 1979 Krishnamurthy (1979 apud MAGGI, 2000) realizou diversos trabalhos de análise de ligações via elementos finitos e comparações com ensaios de laboratório. Estudando as ligações com chapa de extremidade, ele estudou a concentração de esforços nas ligações e os problemas do efeito alavanca, sendo seu trabalho base para Norma Americana AISC de 1980.

No Brasil, o pioneiro no estudo experimental de ligações foi Prelorentzou (1991) que analisou o comportamento de ligações com chapa de extremidade e de ligações com cantoneira de alma, discutindo a sua classificação quanto à rigidez. No final da década

de 90, Ribeiro (1998) realizou um trabalho teórico-experimental onde ensaiou 28 protótipos, sendo 24 ligações viga-coluna com chapa de extremidade. Sua análise já levou em considerações os parafusos, porém mantém o apoio rígido, não considerando a flexibilidade da mesa do pilar, fator que neste trabalho está sendo considerando numericamente através de elementos finitos.

2.3. Classificação das ligações

Até recentemente, os elementos e os meios das ligações eram dimensionados separadamente a partir dos esforços de extremidades das barras e/ou elementos estruturais. Isto porque, os efeitos das ligações não eram levados em consideração no comportamento global da estrutura.

No final da década de 70, iniciou-se a utilização da estimativa da influência das ligações de estruturas de aço no comportamento da estrutura, sem a utilização de uma análise não linear, classificando assim, as ligações em 3 diferentes categorias:

- Ligações flexíveis: as quais as rotações relativas entre os elementos conectados não são restringidas, isto é, são livres ou admitem uma restrição de no máximo igual a 20% da rotação relativa teórica, verificada sob condição de rótula ideal.

- Ligações rígidas: o inverso da anterior, são consideradas a continuidade da estrutura e as rotações relativas são restringidas, ou admite uma restrição no mínimo a 90% da rotação relativa teórica, verificada sob condição de rótula ideal.

- Ligações semirrígidas: são as ligações que se situam entre os limites estabelecidos pelos dois tipos anteriores, isto é, admite-se entre 20 e 90% de restrição da rotação relativa.

Uma vez comprovada que a maioria das ligações utilizadas se tratam de ligações semirrígidas, é necessário levar em consideração a real rigidez das ligações, isto é o seu índice de flexibilidade, bem como quando necessário, elaborar uma análise não linear do seu comportamento momento versus rotação. Dessa maneira, a evolução dos estudos e pesquisas levaram ao desenvolvimento de novas classificações de ligações, sendo as três principais apresentadas a seguir:

2.3.1. Classificação do AISC (1980)

As especificações americanas publicadas em 1980, possuem definições similares às anteriormente apresentadas, isto é, são classificadas em:

- Tipo 1: ligações rígidas
- Tipo 2: ligações flexíveis
- Tipo 3: ligações semirrígidas

Exceto que, as ligações flexíveis poderiam ser consideradas sem restrição a rotação quando submetidas a ações gravitacionais, devendo comportar-se como ligações rígidas quando submetidas a ação do vento, por exemplo.

2.3.2. Classificação do AISC/LRFD (1986)

A especificação americana, em 1986, baseada nos métodos dos estados limites, implementou modificações na classificação das ligações, dividindo somente em dois tipos:

- Tipo FR: *fully restrained*, ou traduzindo ao português, completamente restringidas.
- Tipo PR: *partially restrained*, parcialmente restringidas.

As ligações do tipo FR correspondem as classificadas anteriormente como tipo 1 (rígidas) enquanto as do tipo PR englobam as demais: do tipo 2 (flexíveis) e 3 (semirrígidas), abrangendo todas as situações nas quais as ligações não tem rigidez suficiente para manter inalterado o ângulo original entre os elementos conectados.

2.3.3. Classificação do Eurocode-3 (1992 e 2010)

Em 1992, classificaram-se ligações aparafusadas na norma Eurocode-3 (1992). Esta norma foi a primeira norma a utilizar o comprimento real da viga para definir a rigidez da ligação. Os efeitos da semirrígidez das ligações variam de estrutura contraventada ou não-contraventada.

Conforme Eurocode-3 (2010), em termos de rigidez, para a caracterização da ligação como articulada (flexível), é estabelecido o limite

$$S_{j3} = \frac{0,5EI}{L} \quad (2.1),$$

onde S_j é a rigidez rotacional secante da ligação, E é o módulo de elasticidade do aço, I é o momento de inércia da viga e o comprimento da viga é L .

O limite inferior para caracterização da ligação como rígida para estruturas não contraventadas é

$$S_{j2} = \frac{25EI}{L} \quad (2.2).$$

Esta divisão é mostrada graficamente na Figura 2-3.

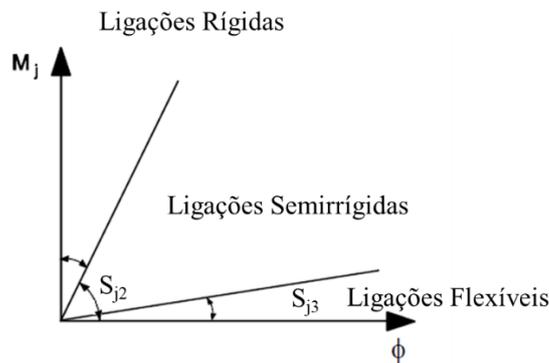


Figura 2-3 – Classificação da rigidez das Ligações (Eurocode-3 2010).

Já em termos de resistência, conforme item 5.2.3.2 (3) do EUROCODE 2010, para a ligação ser classificada como flexível o valor do seu momento resistente deve limitado a:

$$M_{jRd} \leq \frac{M_p}{4} \quad (2.3).$$

As ligações são classificadas como completamente resistentes, quando o momento resistente é igual ou superior ao momento resistente dos elementos conectados. O Eurocode-3 (2010) faz duas considerações sobre esta categoria:

- (a) Em ligações viga-pilar, quando não há continuidade do pilar (topo do pilar, conforme a Figura 2-4(a)), o momento resistente da ligação deve ser maior que o momento de plastificação total dos elementos conectados (viga e pilar)
- (b) Em ligações viga-pilar, quando há continuidade do pilar (topo do pilar, conforme a Figura 2-4(b)), o momento resistente da ligação deve ser maior

que o momento de plastificação total da viga, e maior que duas vezes o momento de plastificação total do pilar.



Figura 2-4 – (a) ligação viga-pilar sem continuidade e (b) ligação viga-pilar com continuidade do pilar.

2.4. Parafusos

Atualmente, no mercado, de maneira geral, existem dois tipos de parafusos: os parafusos comuns e os de alta resistência. Os parafusos comuns possuem menor resistência devido ao material que é composto, aço com baixo teor de carbono; com algumas características específicas como cabeça e porca geralmente quadradas e tem sua designação A307 da ASTM. Já os parafusos de alta resistência, como o próprio nome já diz, se deve ao fato de ser de aço de médio teor de carbono ou de aços temperados; tem sua designação ASTM A325 ou A490, e possuem características como cabeça e porca hexagonal. A Tabela 2-1 fornece a tensão última dos aços em parafusos mais utilizados comercialmente.

Tabela 2-1 – Materiais mais utilizados comercialmente em parafusos.

Especificação	f_{yb} (MPa)	f_{ub} (MPa)	Diâmetro db	
			mm	pol.
ASTM A307	-	415	-	$\frac{1}{2} \leq db \leq 4$
ASTM A325	635	825	$16 \leq db \leq 25$	$\frac{1}{2} \leq db \leq 1$
	560	725	$25 \leq db \leq 36$	$1 \leq db \leq 1\frac{1}{2}$
ASTM A490	895	1035	$16 \leq db \leq 36$	$\frac{1}{2} \leq db \leq 1\frac{1}{2}$

Neste estudo, os parafusos foram considerados como parafusos de alta resistência ASTM A325, com sua modelagem sendo detalhada no Capítulo 3.

2.5. Dimensionamento das ligações aparafusadas pelo Eurocode (2010)

O Eurocode descreve dois modelos de dimensionamento de ligações aparafusadas que são aplicáveis a este trabalho. Inicialmente será demonstrado o método *T-stub*, o qual é aplicado para a mesa da coluna ou para a região da chapa de extremidade soldada a viga, estas situações estão demonstradas na Figura 2-5. O outro modelo de

dimensionamento é o método das componentes, que dimensionada a ligação baseado na resistência de cada componente da ligação aparafusada, este método será descrito detalhadamente no item 0.

2.5.1. Método *T-stub* equivalente à tração

O método *T-stub* é baseado na região da ligação formada por duas chapas transversais. Região a qual pode ser tratada como um T formada por uma parcela da alma junto a mesa do pilar, ou por uma parcela da chapa de extremidade soldada na alma da viga. Aplicando-se o método *T-stub* às ligações aparafusadas estudadas neste trabalho, tem-se que ele pode ser utilizado para calcular a resistência de projeto da mesa da coluna à flexão, composta pela formação de um T entre a alma e a mesa do pilar, ilustrado na Figura 2-5 (a). Assim como para calcular a resistência de projeto da chapa de extremidade à flexão, a qual forma um T, quando analisada em conjunto com a alma da viga, situação ilustrada na Figura 2-5 (b).

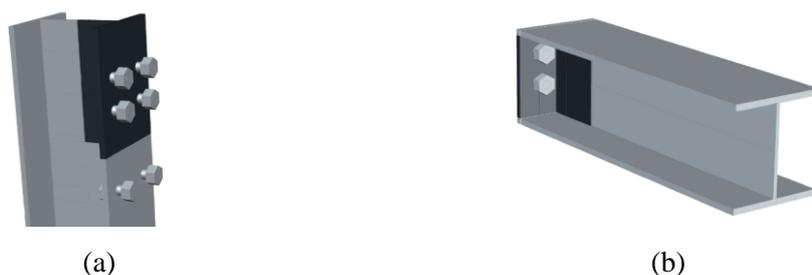


Figura 2-5 – Método *T-stub* aplicada à: (a) mesa da coluna à flexão e (b) chapa de extremidade à flexão.

O método *T-stub* equivalente à tração possui três modos de ruptura, como pode-se observar na Figura 2-6. O primeiro modo trata-se do escoamento das mesas do pilar, ou escoamento da chapa de extremidade. Este modo ocorre quando se trata de perfis cujas mesas têm espessura reduzida, das quais ocorre o escoamento antes da ruptura dos parafusos. No segundo modo se tem a ruptura dos parafusos em conjunto com o escoamento da mesa do perfil ou chapa de extremidade. Já o terceiro modo de ruptura ocorre somente através da ruptura dos parafusos.

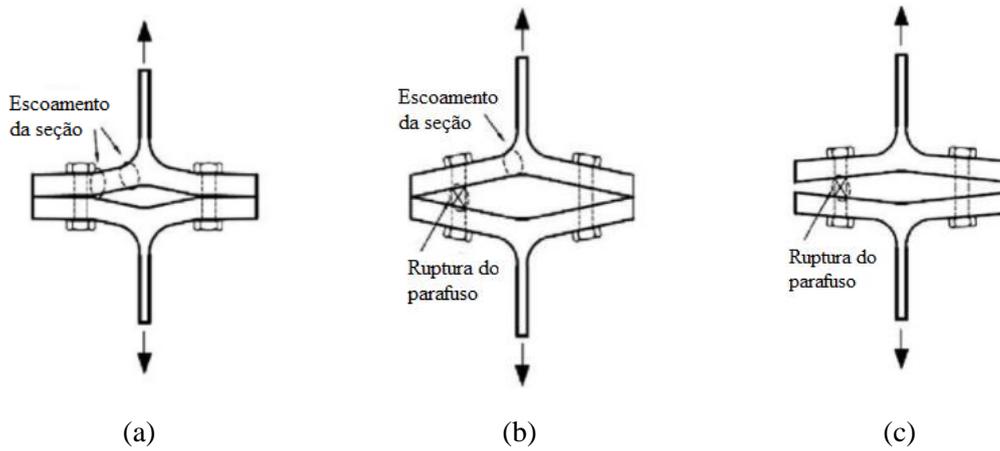


Figura 2-6 – Modos de ruptura do método T-stub equivalente à tração: (a) modo 1 (b) modo 2 e (c) modo 3.

O Eurocode (2010) sugere a utilização de coeficientes de segurança γ_{M2} e γ_{M0} dados por:

$$\gamma_{M0} = 1,1 \text{ e } \gamma_{M2} = 1,25 \quad (2.4)$$

Nas ligações aparafusadas envolvidas neste estudo, são desenvolvidas forças do efeito alavanca (*prying forces*), portanto a tensão resistente de projeto $F_{T,i,Rd}$ de uma mesa pelo método T-stub (Eurocode, 2010) para i modos de ruptura são dados por:

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd}}{m} \text{ ou } F_{T,1,Rd} = \frac{(8n - 2e_w)M_{pl,1,Rd}}{2mn - e_w(m+n)} \quad (2.5),$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2M_{pl,2,Rd} + n \sum F_{t,Rd}}{m+n} \quad (2.6),$$

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} \quad (2.7),$$

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0,25 \sum l_{eff,1} t_f^2 f_y}{\gamma_{M0}} \quad (2.8),$$

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{0,25 \sum l_{eff,2} t_f^2 f_y}{\gamma_{M0}} \quad (2.9),$$

$$n = \min(e_{\min}; 1,25m) \quad (2.10),$$

onde l_{eff} é a largura efetiva de uma mesa ou chapa de extremidade dada na Tabela 2-2 e $F_{t,Rd}$ é a força resistente de projeto de um parafuso determinada por:

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}}; k_2 = 0,9 \text{ para parafusos com cabeça sextavada} \quad (2.11),$$

onde A_s é a área do parafuso com o plano de corte passando pela rosca do parafuso, f_{ub} é a tensão de ruptura do material do parafuso e e_w segundo o Eurocode (2010) é dado pela expressão:

$$e_w = \frac{d_w}{4} \quad (2.12),$$

onde d_w é o diâmetro da arruela, a dimensão externa da cabeça do parafuso ou da porca (ver Figura 2-7(c)). Os valores para e_{min} , m e n são dados conforme Figura 2-7.

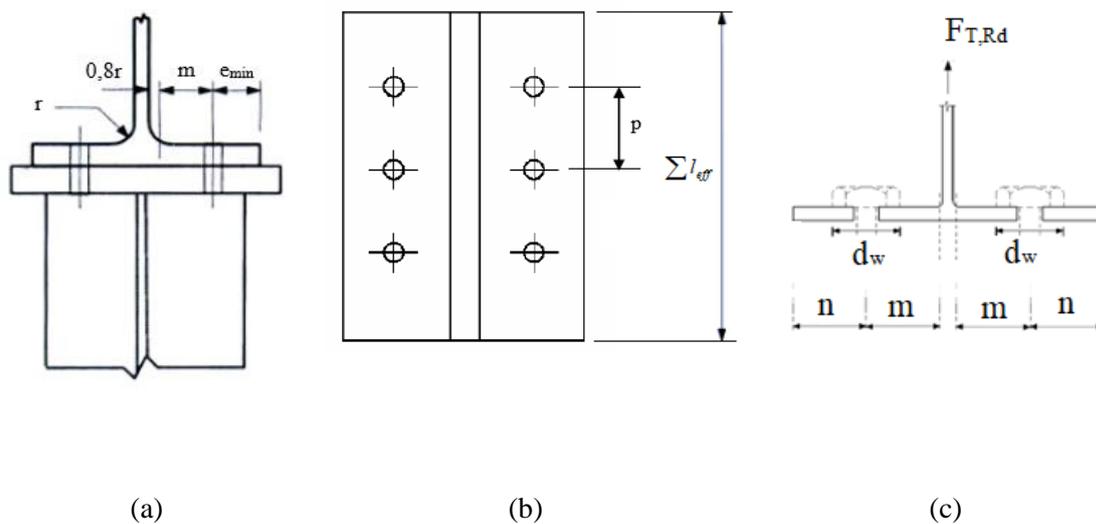


Figura 2-7 – Dimensões de uma mesa T-sub equivalente (a) vista superior (b) vista frontal (c) forças do efeito alavanca (Eurocode, 2010).

Segundo Lima (2004) as expressões para o cálculo da largura efetiva l_{eff} de uma mesa *T-stub* equivalente consideram as diferentes posições de formação das rotulas plásticas, para várias formas de ruptura. No primeiro modo de ruptura, a largura efetiva é dada pelo menor valor calculado entre formas circulares e outros tipos de formas. Já para o modo 2, a largura efetiva correspondente às formas não circulares devem ser adotadas. Na Tabela 2-2 as expressões aparecem em função dos dados geométricos da Figura 2-6.

Tabela 2-2 – Comprimento efetivo da mesa de coluna não enrijecida (Eurocode, 2010).

Localização da linha de parafusos	Linha de parafusos considerada individualmente		Linha de parafusos considerada como parte de um grupo de parafusos	
	Formas circulares ($l_{eff,cp}$)	Outras formas ($l_{eff,nc}$)	Formas circulares ($l_{eff,cp}$)	Outras formas ($l_{eff,nc}$)
Linha interna	$2\pi m$	$4m + 1,25e$	$2p$	p
Linha externa	O menor de: $2\pi m$ $\pi m + e_1$	O menor de: $4m + 1,25e$ $2m + 0,25e + e_1$	O menor de: $\pi m + p$ $2e_1 + p$	O menor de: $2m + 0,625e + 0,5p$ $e_1 + 0,5p$
Modo 1	$l_{eff,1} = l_{eff,nc}$, mas $l_{eff,1} \leq l_{eff,cp}$		$l_{eff,1} = l_{eff,nc}$, mas $l_{eff,1} \leq l_{eff,cp}$	
Modo 2	$l_{eff,2} = l_{eff,nc}$		$l_{eff,2} = l_{eff,nc}$	

2.5.2. Método das componentes

O dimensionamento pelo método das componentes proposto pelo Eurocode (2010) é dado através da análise das possíveis rupturas dos componentes da ligação, conforme Figura 2-8.

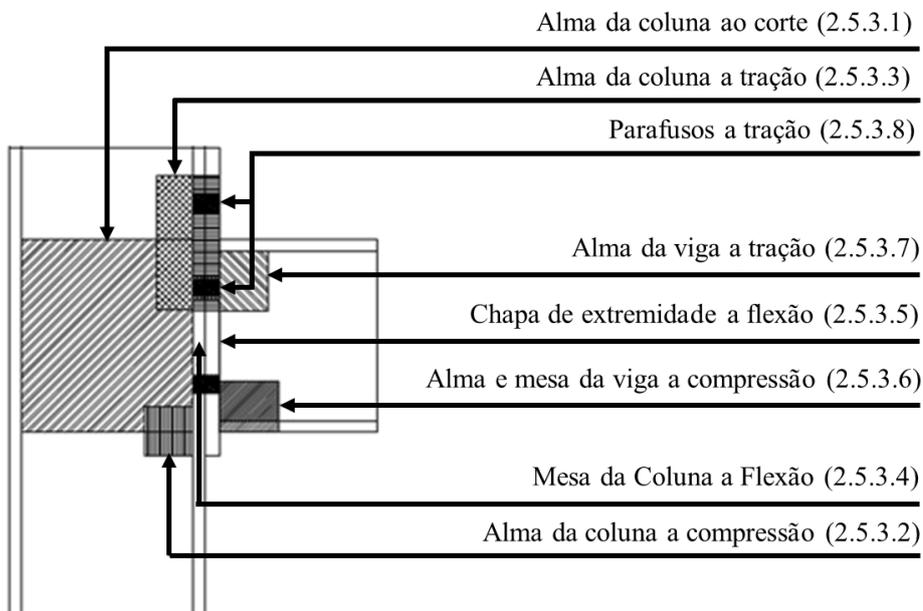


Figura 2-8 – Componentes de uma ligação parafusada com chapa de extremidade.

2.5.2.1. Alma da coluna ao corte

Os métodos de dimensionamento do Eurocode (2010) são usados quando a esbeltez da alma da coluna $d_c/t_w \leq 69\varepsilon$ onde $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$. A resistência ao corte da alma da coluna não enrijecida é dada por:

$$V_{wp,Rd} = \frac{0,9f_{y,wc}A_{vc}}{\sqrt{3}\gamma_{M2}} \quad (2.13),$$

onde $f_{y,wc}$ é a tensão limite de escoamento da alma da coluna, γ_{M2} é o coeficiente de segurança da seção transversal (com valor igual a 1) e A_{vc} é a área de cisalhamento da alma da coluna, determinado por:

$$A_{vc} = A - 2b_{fc}t_{fc} + (t_{wc} + 2r)t_{fc} \quad (2.14),$$

onde A_{vc} é área total da seção transversal da coluna, b_{fc} é a largura da mesa da coluna, t_{wc} é a espessura da alma da coluna, r é o raio de concordância (ver Figura 2-7(a) e t_{fc} é a espessura da mesa.

2.5.2.2. Alma da coluna à compressão

A alma da coluna não está sujeita somente a esforços de compressão transmitidos pela mesa da viga, mas também a esforços internos devido à interação entre tensões normais horizontais e cisalhantes produzidas pela combinação de cargas axiais de compressão e cargas de cisalhamento atuante na conexão. Em função disso, a resistência à compressão da alma de uma coluna não enrijecida é dada pelo menor valor de:

$$F_{c,wc,Rd} = \frac{\omega k_{wc} b_{eff,c,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} \text{ ou } F_{c,wc,Rd} \leq \frac{\omega k_{wc} \rho b_{eff,c,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M1}} \quad (2.15),$$

onde as propriedades geométricas dos componentes da ligação são dadas na Figura 2-9, ω é um fator de redução que leva em consideração os possíveis efeitos da interação entre o cisalhamento e à compressão da alma da coluna que é dado de acordo com a Tabela 2-3; $b_{eff,c,wc}$ é a largura efetiva da alma da coluna à compressão dada por:

$$b_{eff,c,wc} = t_{fb} + 2\sqrt{2}a_p + 5(t_{fc} + s) + s_p \quad (2.16),$$

onde a_p é a largura da garganta efetiva do filete de solda, t_{fc} é a espessura da mesa da coluna, r é o raio de curvatura do perfil laminado da coluna e t_{fb} é a espessura da mesa

da viga, todos ilustrados na Figura 2-9. Além disso, $s = r$, s_p é o comprimento resultante da dispersão à 45° através da chapa de extremidade (no mínimo igual a t_p) e ρ é o fator de redução devido à flambagem da chapa dado pela equação (2.17).

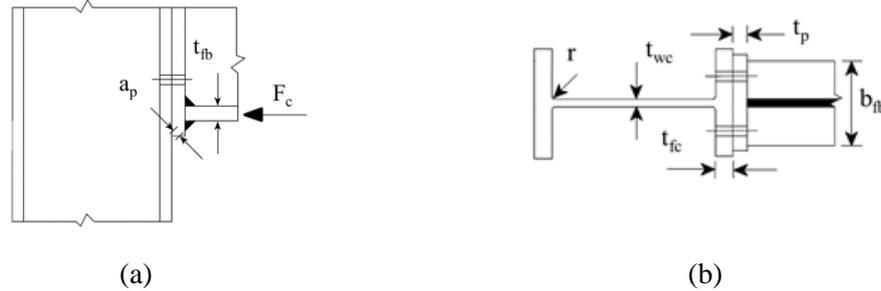


Figura 2-9 – Propriedades geométricas da alma de uma coluna à compressão: (a) vista lateral e (b) corte (Eurocode, 2010).

$$\begin{aligned} \text{se } \bar{\lambda}_p \leq 0,72 \quad \rho &= 1,0 & (2.17), \\ \text{se } \bar{\lambda}_p > 0,72 \quad \rho &= \frac{(\bar{\lambda}_p - 0,2)}{\bar{\lambda}_p^2} \end{aligned}$$

onde $\bar{\lambda}_p$ é a esbeltez da chapa, dado pela equação (2.18)

$$\bar{\lambda}_p = 0,932 \sqrt{\frac{b_{eff,c,wc} d_{wc} f_{y,wc}}{Et_{wc}^2}} \quad (2.18),$$

$$d_{wc} = h_c - 2(t_{fc} + r) \quad (2.19),$$

Tabela 2-3 – Fator de redução ω (Eurocode, 2010).

Parâmetro de transformação β	Parâmetro de redução ω
$0 \leq \beta \leq 0,5$	$\omega = 1$
$0,5 \leq \beta \leq 1$	$\omega = \omega_1 + 2(1 - \beta)(1 - \omega_1)$
$\beta = 1,0$	$\omega = \omega_1$
$1 \leq \beta \leq 2$	$\omega = \omega_1 + (\beta - 1)(\omega_2 - \omega_1)$
$\beta = 2,0$	$\omega = \omega_2$
$\omega_1 = \frac{1}{1 + 1,3(b_{eff,c,wc} t_{wc} / A_{vc})^2}$	$\omega_2 = \frac{1}{1 + 5,2(b_{eff,c,wc} t_{wc} / A_{vc})^2}$
A_{vc} é a área de cisalhamento da coluna, dado pela equação (2.14)	
$\beta = 1$ para as ligações aparafusadas analisadas neste trabalho	

Deve-se ressaltar que, quando a tensão máxima de compressão $\sigma_{com,Ed}$ devido à força axial e momento fletor na alma da coluna excedem $0,7f_{y,wc}$, esse efeito na resistência da alma da coluna à compressão $F_{c,wc,Rd}$ dado na equação (2.15) deve ser reduzido por um fator k_{wc} dado pela equação

$$\begin{aligned} \text{Quando } \sigma_{com,Ed} < 0,7f_{y,wc} : k_{wc} &= 1,0 \\ \text{Quando } \sigma_{com,Ed} > 0,7f_{y,wc} : k_{wc} &= 1,7 - \sigma_{com,Ed} / f_{y,wc} \end{aligned} \quad (2.20).$$

2.5.2.3. Alma da coluna à tração

A distribuição de tensões locais na zona tracionada da alma da coluna é similar ao caso da componente da alma à compressão. A resistência da alma da coluna submetida à tração na região onde a força concentrada devido à mesa tracionada da viga é aplicada é dada pela equação

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega b_{eff,t,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} \quad (2.21),$$

onde $b_{eff,t,wc}$ para ligações aparafusadas com chapa de extremidade é igual ao comprimento efetivo para mesa de coluna não enrijecida, l_{eff} analisada pelo método *T-stub* equivalente, dado na Tabela 2-2. O fator de redução ω é dado pela Tabela 2-3, utilizando o valor para $b_{eff,t,wc}$ dado anteriormente.

2.5.2.4. Mesa da coluna à flexão

A resistência de projeto e o modo de falha para a mesa de uma coluna não enrijecida à flexão, em uma ligação parafusada com chapa de extremidade, é dada de maneira similar à análise da mesa da coluna pelo método *T-stub*, apresentado no Item 2.5.1.

2.5.2.5. Chapa de extremidade à flexão

Assim como a mesa da coluna à flexão, a resistência de projeto da chapa de extremidade à flexão é dada pelas equações apresentada no Item 2.5.1. Assim como no método equivalente *T-stub*, deve-se analisar duas situações de cálculo:

- cada linha de parafuso individualmente resistindo à tração.
- cada grupo de linhas de parafusos resistindo à tração.

Por outro lado, devem ser observadas as propriedades geométricas apresentadas na Figura 2-10. Nesta figura, observa-se que os grupos de parafusos de cada lado da placa de extremidade são tratados como “*T-stubs*” equivalente separadamente. No caso de chapas de extremidade estendidas, a linha de parafusos localizada na parte estendida também deve ser analisada como um “*T-stub*” separado.

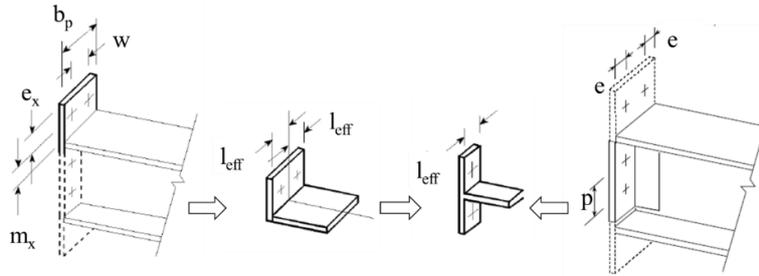


Figura 2-10 – Propriedades geométricas da chapa de extremidade à flexão como método *T-stub* equivalente (Eurocode, 2010).

O comprimento efetivo da chapa de extremidade l_{eff} deve ser determinado utilizando os valores das Tabela 2-4 e Tabela 2-5, α é dado na Figura 2-11.

Tabela 2-4 – Comprimento efetivo da chapa de extremidade com linhas de parafuso consideradas individualmente.

Localização da linha de parafusos	Linha de parafusos considerada individualmente	
	Formas circulares ($l_{eff,cp}$)	Outras formas ($l_{eff,nc}$)
Linha externa a mesa tracionada da viga	O menor de: $2\pi m_x$ $\pi m_x + w$ $\pi m_x + 2e$	O menor de: $4m_x + 1,25e_x$ $e + 2\pi m_x + 0,625e_x$ $0,5b_p$ $0,5w + 2m_x + 0,625e_x$
Primeira linha abaixo da mesa tracionada da viga	$2\pi m$	αm
Outra linha interna	$2\pi m$	$4m + 1,25 e$
Outra linha externa	$2\pi m$	$4m + 1,25 e$
Modo 1	$l_{eff,1} = l_{eff,nc}$, mas $l_{eff,1} \leq l_{eff,cp}$	
Modo 2	$l_{eff,2} = l_{eff,nc}$	

Tabela 2-5 – Comprimento efetivo chapa de extremidade com linhas de parafuso consideradas como para de um grupo de parafusos (Eurocode, 2010).

Localização da linha de parafusos	Linha de parafusos considerada como parte de um grupo de parafusos	
	Formas circulares ($l_{eff,cp}$)	Outras formas ($l_{eff,nc}$)
Linha externa a mesa tracionada da viga	—	—
Primeira linha abaixo da mesa tracionada da viga	$\pi m + p$	$0,5p + am - (2m + 0,625e)$
Outra linha interna	$2p$	p
Outra linha externa	$\pi m + p$	$2m + 0,625e + 0,5p$
Modo 1	$\sum l_{eff,1} = \sum l_{eff,nc}$, mas $\sum l_{eff,1} \leq \sum l_{eff,cp}$	
Modo 2	$\sum l_{eff,2} = \sum l_{eff,nc}$	

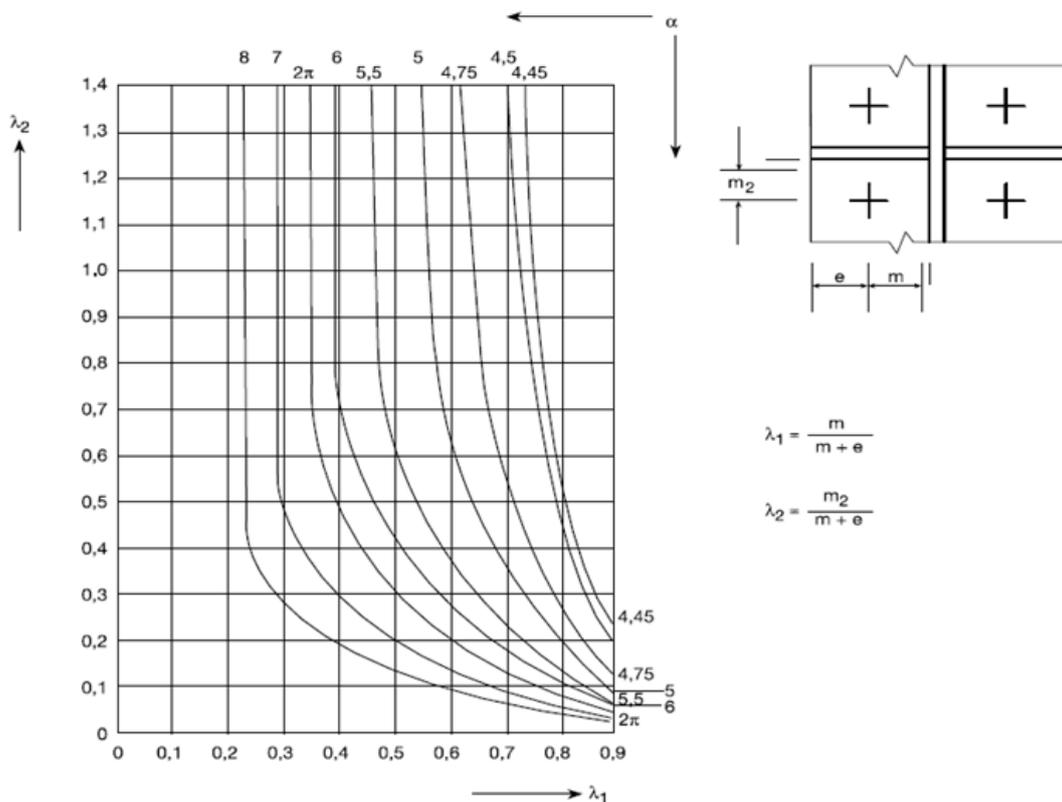


Figura 2-11 – Valores de α para colunas enrijecidas e chapas de extremidade (Eurocode, 2010).

2.5.2.6. Alma e mesa da viga à compressão

A resultante da resistência de projeto da mesa da viga e da zona adjacente comprimida da alma pode ser admitida atuando no ponto de braço de alavanca conforme será descrito no cálculo do momento resistente no Item 2.5.3. A resistência de projeto da alma e da mesa da viga à compressão combinadas é dada por:

$$F_{c,fb,Rd} = \frac{M_{c,Rd}}{(h - t_{fb})} \quad (2.22),$$

onde h é a altura total da viga, t_{fb} é a espessura da mesa da viga e $M_{c,Rd}$ é o momento resistente da viga, dado por:

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (2.23),$$

onde W_{pl} é o momento plástico a flexão da viga, f_y é a tensão de escoamento do aço, e γ_{M0} é o coeficiente de segurança já demonstrado pela equação (2.4).

2.5.2.7. Alma da viga à tração

A resistência de projeto para a componente da alma da viga tracionada é dada com base nas considerações apresentadas para a componente da alma da coluna à tração. Dessa maneira, levando-se em consideração as propriedades geométricas da viga, a resistência de projeto é dada pela equação (2.24):

$$F_{t,wb,Rd} = \frac{b_{eff,t,wb} t_{wb} f_{ywb}}{\gamma_{M0}} \quad (2.24)$$

onde t_{wb} e f_{ywb} são a espessura e tensão de escoamento da alma da viga, $b_{eff,t,wb}$ é igual a largura efetiva dado pelo método *T-stub* nas Tabela 2-4 e Tabela 2-5.

2.5.2.8. Parafusos à tração

Conforme apresentado no método *T-stub* no item 2.5.1, a resistência de projeto de parafusos submetidos à tração é dada pela equação (2.11).

2.5.3. Momento resistente

Inicialmente, o momento aplicado $M_{j,Ed}$ deve satisfazer a equação:

$$\frac{M_{j,Ed}}{M_{j,Rd}} \leq 1,0 \quad (2.25)$$

O método descrito pelo Eurocode para determinar o momento resistente de projeto em um nó $M_{j,Rd}$ não leva em consideração a existência concomitante de uma força axial N_{Ed} . Além disso, o método não deve ser utilizado se a força axial nos elementos conectados superar a 5% da resistência plástica de projeto $N_{pl,Rd}$ da seção. Caso venha a ocorrer um valor superior a 5%, a equação (2.26) deve ser satisfeita:

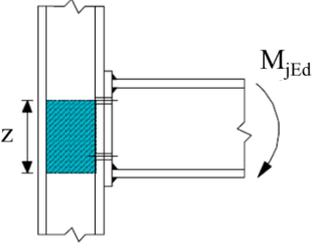
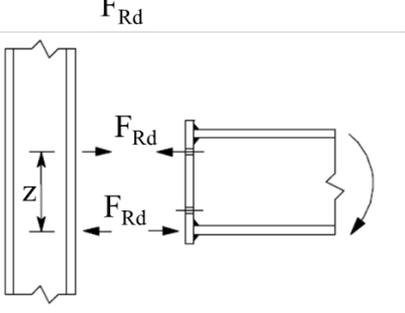
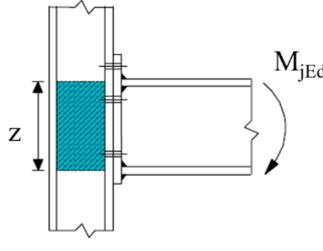
$$\frac{M_{j,Ed}}{M_{j,Rd}} + \frac{N_{j,Ed}}{N_{j,Rd}} \leq 1,0 \quad (2.26)$$

onde $M_{j,Rd}$ é o momento resistente de projeto do nó assumindo a inexistência de força axial, e $N_{j,Rd}$ é a força axial resistente de projeto, assumindo a inexistência de momento aplicado.

Na Tabela 2-6 são demonstrados o braço de alavanca e distribuição de força nos tipos de ligações aparafusadas a serem analisadas neste trabalho. Deve-se ressaltar que o centro de compressão é admitido como sendo na linha de eixo da mesa comprimida da viga.

Como uma simplificação conservadora, o momento resistente de projeto de uma ligação parafusada com chapa de extremidade com somente duas linhas de parafuso tracionadas pode ser aproximada conforme a Figura 2-12, desde que a resistência total de projeto F_{Rd} não exceda $3,8F_{t,Rd}$, onde $F_{t,Rd}$ foi dado no item 2.5.1, pelo método *T-stub*.

Tabela 2-6 – Braço de alavanca z para: (a) duas linhas de parafusos, (b) três linhas de parafuso, Eurocode (2010).

Tipo de ligação	Braço de Alavanca	Distribuição de forças
 <p>(a)</p>	<p>Distância entre o centro de compressão e a linha de parafusos tracionada</p>	
 <p>(b)</p>	<p>Distância entre o centro de compressão a linha de eixo entre as linhas de parafuso tracionadas</p>	

No caso da simplificação da Figura 2-12, toda região tracionada da ligação, chapa de extremidade e mesa tracionada da viga, pode ser tratada como um componente só, desde que as duas linhas de parafusos tracionadas estejam equidistantes da mesa tracionada da viga. Com isso, esta parte da chapa de extremidade pode ser analisada pelo método *T-stub* dado no item 2.5.1 para determinar a força resistente de projeto da linha de parafuso $F_{1,Rd}$. O valor de $F_{2,Rd}$ pode ser assumido como igual ao $F_{1,Rd}$; portanto F_{Rd} pode ser igual a $2F_{1,Rd}$.

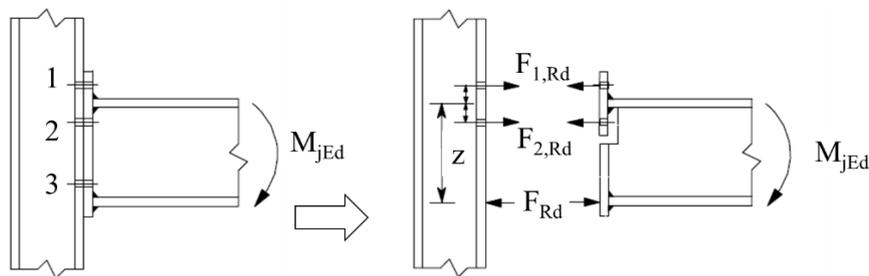


Figura 2-12 – Simplificação de uma ligação parafusada com chapa de extremidade, Eurocode (2010).

Dessa maneira, o momento resistente de projeto para uma ligação parafusada com chapa de extremidade, segundo o Eurocode (2010) é dada por:

$$M_{j,Rd} = \sum_r h_r F_{tr,Rd} \quad (2.27),$$

onde $F_{tr,Rd}$ é a tensão resistente efetiva de projeto da linha de parafuso, r . h_r é a distância da linha de parafuso r até o centroide da região comprimida.

A tensão resistente efetiva de projeto $F_{tr,Rd}$, calculada em cada linha de parafuso, deve ser o menor valor das tensões resistentes de projeto para cada linha de parafuso individualmente dos componentes já apresentados na Figura 2-8:

- alma da coluna à tração, $F_{t,wc,Rd}$, dado em 2.5.2.3.
- mesa da coluna à flexão, $F_{t,fc,Rd}$ dado em 2.5.2.4.
- chapa de extremidade à flexão, $F_{t,ep,Rd}$ dado em 2.5.2.5.
- alma da viga à tração, $F_{t,wb,Rd}$ dado em 0.

Assim como a tensão resistente total de projeto $\sum F_{tr,Rd}$ não pode exceder o menor valor de:

- alma da coluna à compressão, $F_{c,wc,Rd}$, dado em 2.5.2.2.
- alma e mesa da viga à compressão, $F_{c,fb,Rd}$, dado em 2.5.2.6.

Lembrando que deve ser analisado qual é o menor valor para a tensão resistente efetiva de projeto $F_{tr,Rd}$, se para cada linha de parafuso individualmente, ou se para um grupo de parafusos, isto se aplica para a análise de todos os componentes.

2.5.4. Rigidez rotacional

Para o cálculo da rigidez rotacional inicial da ligação, o processo de cálculo proposto pelo Eurocode 3 (2010) depende do coeficiente de rigidez k_i de cada componente da ligação. Para casos em que a força axial não supere 5% da resistência de projeto $N_{pl,d}$ da viga, e o momento $M_{j,Ed}$ menor que o momento resistente de projeto $M_{j,Rd}$; a rigidez rotacional S_j será calculada por:

$$S_j = \frac{Ez^2}{\mu \sum_i \frac{1}{k_i}} \quad (2.28)$$

onde z é o braço de alavanca, dado na Tabela 2-6, μ é determinado por:

- $\mu = 1,0$, para $M_{j,Ed} \leq 2/3 M_{j,Rd}$;
- $\mu = (1,5M_{j,Ed} / M_{j,Rd})^\psi$ caso $2/3M_{j,Rd} < M_{j,Ed} < M_{j,Rd}$;

onde ψ para ligações aparafusadas com chapa de extremidade é igual 2,7.

Portanto, o cálculo da rigidez rotacional pode ser separado de duas maneiras, com seus respectivos componentes a serem levados em consideração:

- Uma linha de parafusos tracionada: alma da coluna ao corte (k_1), alma da coluna à compressão (k_2), alma da coluna à tração (k_3), mesa da coluna à flexão (k_4), chapa de extremidade à flexão (k_5) e parafusos à tração (k_{10}).

- Duas ou mais linhas de parafusos tracionadas: alma da coluna ao corte (k_1), alma da coluna à compressão (k_2). Porém, a alma da coluna à tração (k_3), mesa da coluna à flexão (k_4), chapa de extremidade à flexão (k_5) e parafusos à tração (k_{10}) são dados por uma rigidez equivalente k_{eq} que é dada pela equação (2.29).

$$k_{eq} = \frac{\sum_r k_{eff,r} h_r}{z_{eq}} \quad (2.29)$$

onde h_r é a distância entre a linha de parafuso r e o centro de compressão, $k_{eff,r}$, calculado pela equação (2.30), é o coeficiente de rigidez efetivo por cada linha de parafuso r levando em consideração os componentes citados; z_{eq} é o braço de alavanca equivalente dado pela equação (2.31).

$$k_{eff,r} = \frac{1}{\sum_r \frac{1}{k_{i,r}}} \quad (2.30)$$

$$z_{eq} = \frac{\sum_r k_{eff,r} h_r^2}{\sum_r k_{eff,r} h_r} \quad (2.31)$$

onde $k_{i,r}$ é o coeficiente de rigidez que representa o componente i relativa a linha de parafuso r . A seguir será demonstrado como o Eurocode (2010) sugere o cálculo do coeficiente de rigidez k_i de cada componente i da ligação.

2.5.4.1. Alma da coluna ao corte (k_1)

O coeficiente de rigidez do painel da alma da coluna submetido ao corte é dado pela equação (2.32).

$$k_1 = \frac{0,38A_{vc}}{\beta \cdot z} \quad (2.32)$$

onde A_{vc} é a área de cisalhamento da alma da coluna dado pela equação (2.14), z é altura da alma da coluna, descontando-se as mesas e os raios de concordância, β é igual a 1 para os modelos de ligações aparafusadas analisadas.

2.5.4.2. Alma da coluna à compressão (k_2)

A equação (2.33) representa o coeficiente de rigidez para a componente alma da coluna, não enrijecida, submetida à compressão:

$$k_2 = \frac{0,7b_{eff,c,wc}t_{wc}}{d_{w_{wc}}} \quad (2.33)$$

onde $b_{eff,c,wc}$ foi dado pela equação (2.16) e d_c foi demonstrado no item 2.5.2.2.

2.5.4.3. Alma da coluna à tração (k_3)

O coeficiente de rigidez para a componente alma da coluna à tração é dado pela equação (2.34)

$$k_3 = \frac{0,7b_{eff,t,wc}t_{wc}}{d_{w_{wc}}} \quad (2.34)$$

onde $b_{eff,t,wc}$ para ligações aparafusadas com chapa de extremidade é igual ao comprimento efetivo para mesa de coluna não enrijecida l_{eff} analisada pelo método *T-stub* equivalente, dado na Tabela 2-2.

2.5.4.4. Mesa da coluna à flexão (k_4)

A parcela de rigidez referente à componente mesa da coluna à flexão é dada pela equação (2.35)

$$k_4 = \frac{0,9l_{eff}t_{fc}^2}{m^3} \quad (2.35)$$

onde l_{eff} é o menor comprimento efetivo para a linha de parafusos avaliada apresentado na Tabela 2-2 e m é demonstrado na Figura 2-7.

2.5.4.5. Chapa de extremidade à flexão (k_5)

A parcela do coeficiente de rigidez da componente chapa de extremidade à flexão é dado pela equação (2.36).

$$k_5 = \frac{0,9l_{eff}t_p^2}{m^3} \quad (2.36)$$

onde l_{eff} é o menor comprimento efetivo para a linha de parafusos avaliada apresentado nas Tabela 2-4 e Tabela 2-5, m foi demonstrado na Figura 2-7.

2.5.4.6. Parafusos à tração (k_{10}), (para uma única linha de parafusos)

Finalmente, pela equação (2.37) é calculada a parcela de rigidez da componente parafusos à tração.

$$k_{10} = \frac{1,6A_s}{L_b} \quad (2.37)$$

onde L_b é o comprimento equivalente do parafuso.

3. METODOLOGIA PARA TRAÇAR A CURVA MOMENTO-CURVATURA A PARTIR DE ANÁLISES PARAMÉTRICAS

Para traçar a curva momento-rotação foram realizadas análises paramétricas em um pórtico composto por uma viga em balanço fixada a um pilar engastado na base. Para o cálculo e o dimensionamento deste pórtico, admite-se que a viga e o pilar possuem ligação aparafusada semirrígida que transmite apenas uma parcela do momento fletor para o pilar. Este pórtico é ilustrado na Figura 3-1.



Figura 3-1 – Rotação nas ligações semirrígidas.

Portanto, definem-se três modelos de geometrias das ligações estudadas, conforme Figura 3-2, com os parâmetros t_{ch} e φ_p :

- t_{ch} : espessura da chapa de extremidade;
- φ_p : diâmetro dos parafusos.

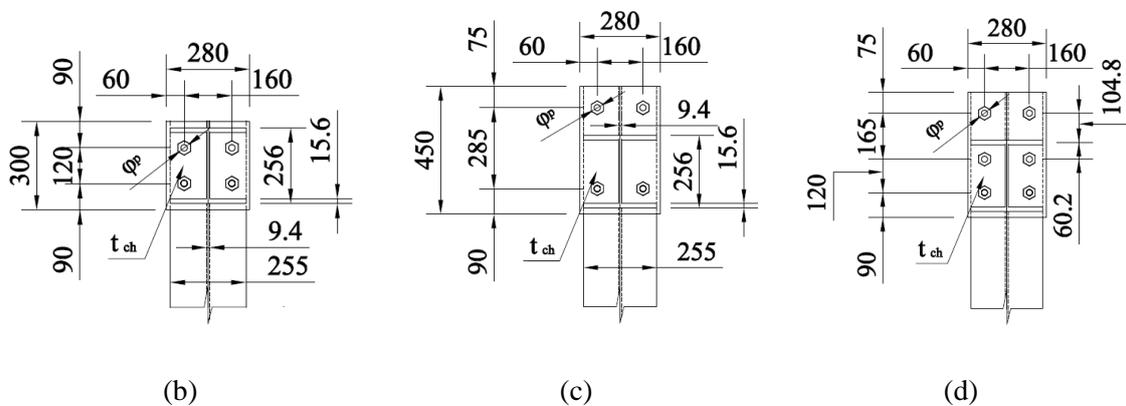


Figura 3-2 – Três diferentes disposições de parafusos estudados.

Os aspectos gerais e a estratégia utilizada na modelagem são:

- Definição da geometria e carregamento
- Definição do tipo e possíveis regiões de contato
- Propriedade do material elastoplástico
- Definição da malha de elementos finitos
- Análise Incremental
- Gráfico Momento *versus* Curvatura.

3.1. Definição da Geometria e carregamento

O pórtico estudado é composto por uma viga em balanço de comprimento 1m, fixada em um pilar, de mesmas propriedades da viga. A altura do pórtico é de 2m, medidos da face inferior do pilar até o eixo da viga.

O pilar foi considerado engastado na base, e na extremidade livre da viga foi aplicado um deslocamento Δz , conforme ilustrado na Figura 3-3. Além disso, para reduzir o número de elementos do modelo, assim como diminuir o tempo de processamento da estrutura, foi utilizado o conceito de planos de simetria. Na Figura 3-3 pode-se observar essas definições da geometria e carregamento que foi utilizado durante a análise no programa *Ansys*.

A modelagem das chapas e perfis se deu através do comando de extrusão do “*Ansys Design Modeler*”, como pode-se observar na Figura 3-4.

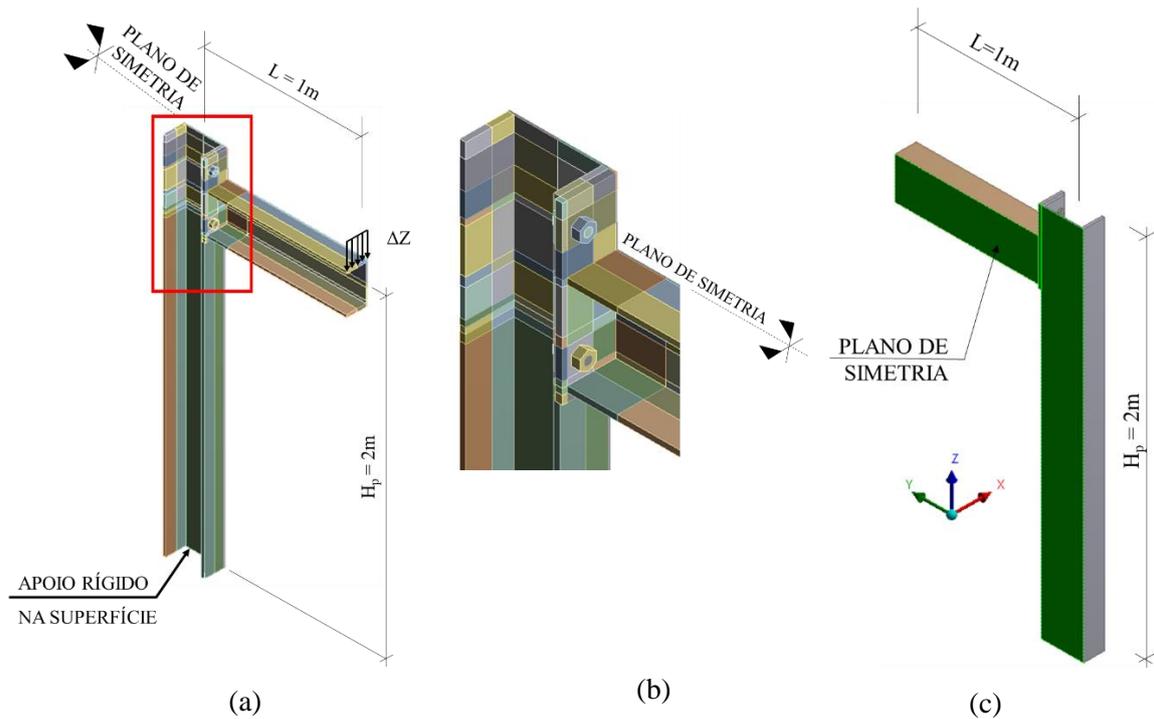


Figura 3-3 – Modelo estrutural analisado no Ansys 15.0:
 (a) modelo 3D e (b) detalhe da ligação no modelo 3D e (c) plano de simetria.

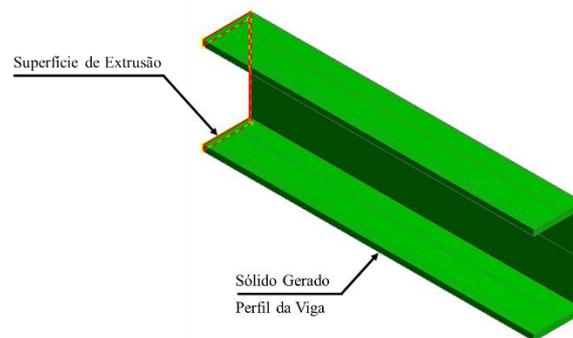


Figura 3-4 – Extrusão para gerar um componente.

Com o objetivo de não gerar mudanças bruscas no tamanho e geometria dos elementos, com o comando *slice* definiram-se planos de corte ou subregiões em todas as superfícies dos componentes da ligação, e inclusive nas regiões circundantes dos furos dos parafusos, ilustrado na Figura 3-5.

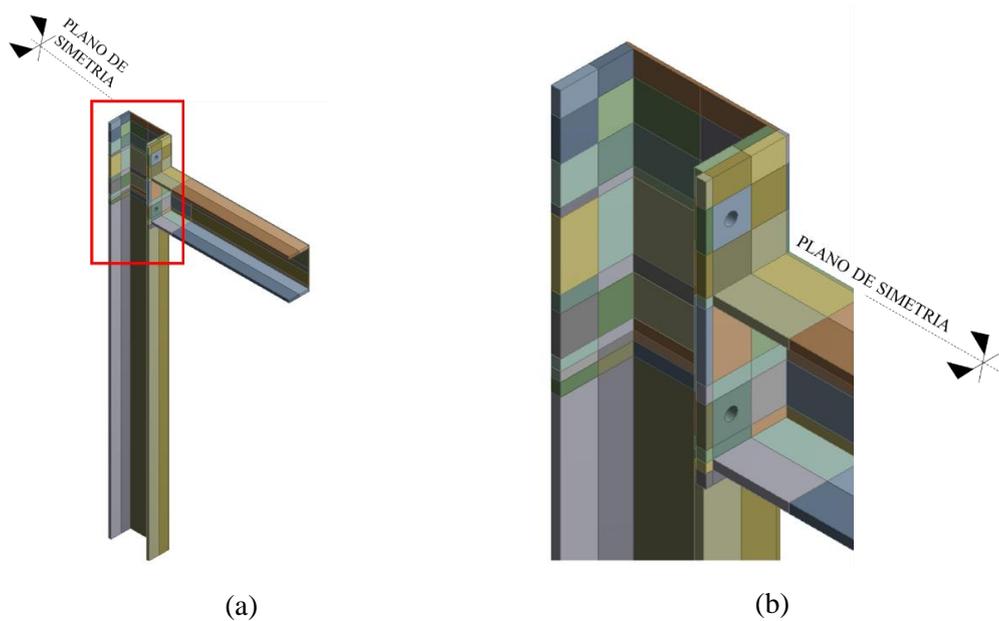


Figura 3-5 – Discretização de Perfis e Chapa: (a) Geral e (b) Ligação.

Para que nas regiões de intersecção entre chapa de extremidade e perfil sejam gerados vértices e arestas coincidentes, fez-se uso de outra ferramenta, que chama-se compartilhar topologia, a qual faz com que os nós pertencentes a um elemento do componente chapa, também pertençam ao elemento do componente viga, ilustrado na Figura 3-6.

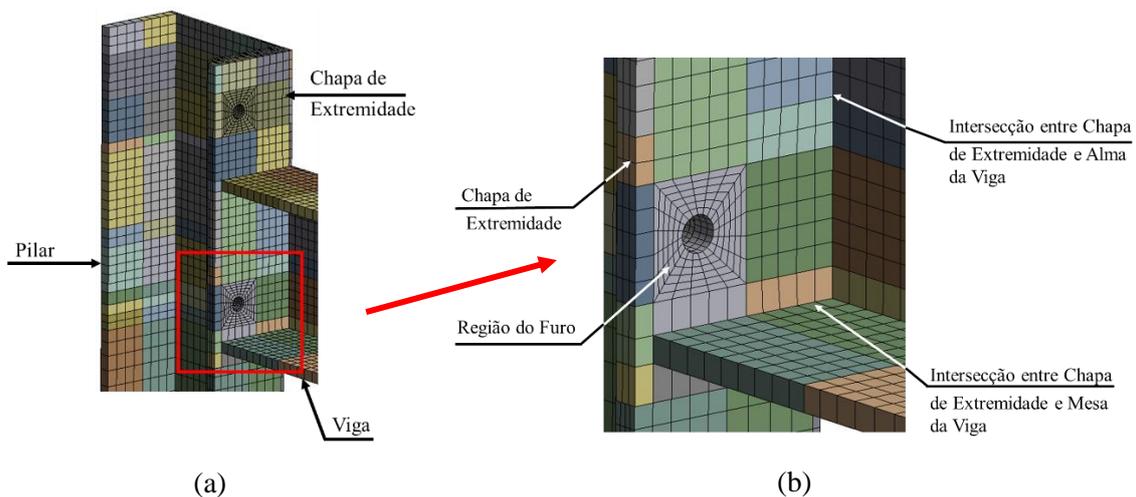


Figura 3-6 – Malha de Elementos Finitos para Viga e Chapa de Extremidade:

(a) Geral (b) Intersecção entre Chapa de Extremidade e Viga.

Neste trabalho, o carregamento é atribuído através de duas fases:

1. Protensão dos parafusos;
2. Carregamento da viga através de um deslocamento Δz , ver Figura 3-3(a)

Na fase inicial, é feita a simulação do aperto dado aos parafusos, isto é, através de forças de protensão, é simulado o torque real dos parafusos. Como os parafusos, em função da aplicação do torque, tendem a encurtar, sendo impedidos pela chapa de extremidade de um lado, e a mesa do pilar do outro, simula-se o comportamento devido à protensão, gerando pressões de contato entre a chapa de extremidade e a mesa do pilar.

As forças de protensão recomendadas pela NBR8800 (2008) variam de acordo com o diâmetro dos parafusos. Estes valores são apresentados na Tabela 3-1.

Tabela 3-1 – Força de Protensão mínima F_t dos parafusos

Diâmetro d_p		F_t
pol	mm	kN
5/8	16	91
3/4	19	125
7/8	22	173

Nesta fase, para a simulação da protensão nos modelos numéricos ocorrer, as superfícies de contato citadas no item 3.2 devem estar corretamente atribuídas. Com o término da fase de aplicação das forças de protensão nos parafusos, inicia-se o carregamento da viga, através da aplicação de um deslocamento Δz na extremidade livre da viga. O valor do carregamento, foi arbitrado de modo a gerar plastificação dos elementos que compõem a ligação.

3.2. Definição dos tipos e possíveis regiões de contato

Conforme Maggi (2000), uma das formas de modelar essas regiões, uma vez que não devem haver restrições quanto ao deslocamento da chapa de extremidade, principalmente na direção das forças de tração e compressão devido ao momento fletor, é a utilização de elementos de contato entre as regiões que potencialmente podem estar em "contato" umas com as outras. Os elementos finitos de contato estabelecem novos termos na matriz de rigidez fornecendo informações ao processo da análise numérica quanto à pontos ou regiões distintas que deverão gerar pressões quando comprimidas umas contra as outras, ou níveis de abertura quando houver separação. Assim, o elemento de contato possui a característica de apresentar rigidez na compressão e nenhuma rigidez na tração.

É previsível que sob um esforço solicitante ocorra contato ou afastamento entre os diferentes pares de superfícies: (i) superfície externa da chapa de extremidade e superfície externa da mesa do pilar (ver Figura 3-7(a)); (ii) superfície interna da chapa de extremidade e faces das porcas (Figura 3-7(b)); (iii) superfície interna da mesa do pilar e superfície interna da cabeça dos parafusos (Figura 3-7 (c)) e; (iiii) superfície dos furos e fustes dos parafusos (Figura 3-7(d)). Embora sejam previsíveis as superfícies que irão ocorrer o contato, a solução exata do problema de contato é iterativa, que demanda um maior refinamento da malha para se ter a convergência do problema iterativo de contato. O Método Lagrangeano Aumentado foi utilizado. Nesta análise, as superfícies são adotadas igualmente deformáveis e verifica-se a convergência do contato avaliando os pares em contato, que no programa *Ansys* são definidos como contato simétrico e os pares de superfície como *contact/target*. Foram definidas como *contact* as superfícies em vermelho na Figura 3-7, normalmente as chapas; e *target* para superfícies em azul na Figura 3-7, que estão relacionadas aos parafusos.

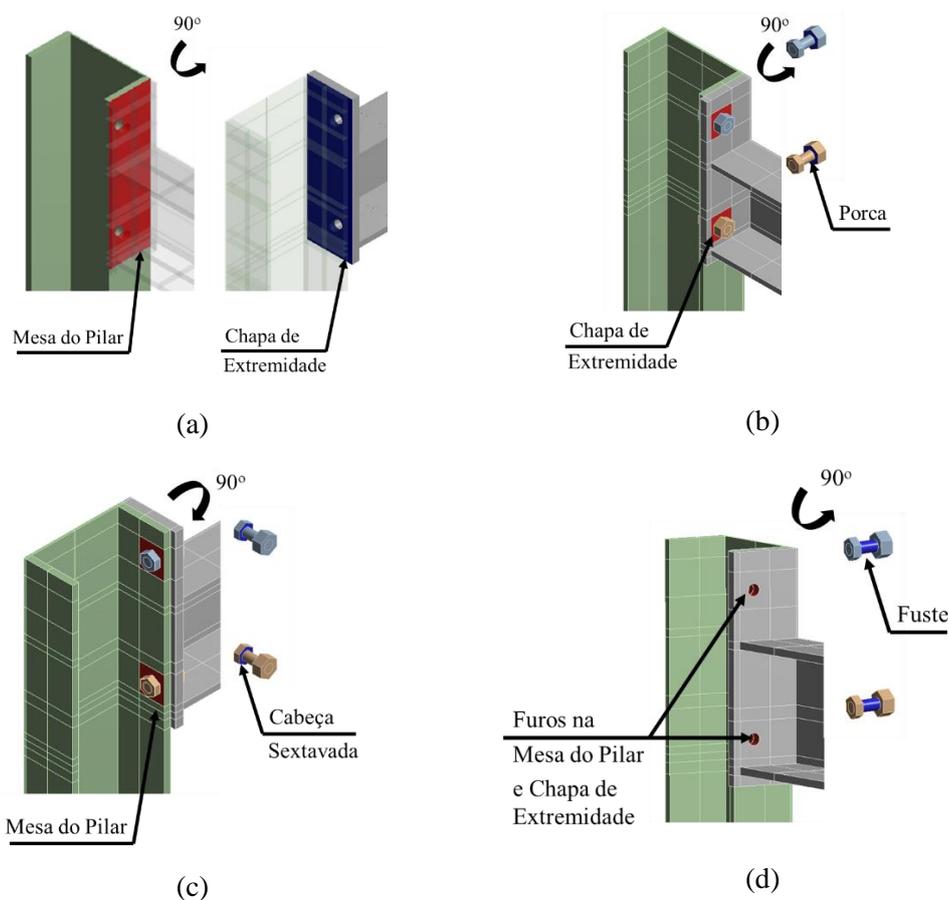


Figura 3-7 – Superfícies de contato: (a) chapa de extremidade/porca (b) mesa do pilar/cabeça do parafuso (c) chapa de extremidade/pilar e (d) em torno dos furos/fuste dos parafusos.

3.3. Propriedade dos materiais elastoplásticos

3.3.1. Curva Tensão-Deformação

Em função das características dos materiais sofrerem significativas variações dentro de um mesmo ensaio, um ponto importante para a análise elastoplástica é a uniformização das características dos materiais através de curvas tensão-deformação de cada material.

Para esclarecer essa uniformização dos materiais, será apresentada uma breve explicação, comparando tensões convencionais ou tensões nominais (“*engineering stress*”) com tensões verdadeiras (“*true stress*”) aplicadas a parafusos para facilitar o entendimento. Abaixo tem-se alguns conceitos que serão utilizados nas equações a seguir:

- Tensão convencional ou nominal, ou de engenharia: carga aplicada no parafuso, dividido pela área da seção transversal original do material, dada pela equação (3.1).
- Tensão verdadeira: carga aplicada no parafuso dividida pela área atual do parafuso, isto é, leva-se em consideração a redução da área em função da carga aplicada, dada pela equação (3.2).
- Deformação de engenharia ou nominal: é a parcela que um dado material deforma por unidade de comprimento em um ensaio de tração, dada pela equação (3.3).
- Deformação Verdadeira: é igual ao logaritmo neperiano do quociente do comprimento atual sobre o comprimento original conforme dada pela equação (3.4) .

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (3.1)$$

$$\sigma_t = \frac{P}{A} \quad (3.2)$$

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L_0} \quad (3.3)$$

$$\varepsilon_t = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) \quad (3.4)$$

onde P é a carga axial aplicada no ensaio de tração. A_0 é a área da seção transversal do parafuso antes de sofrer qualquer deformação, A é a área atual do parafuso, correspondente à carga aplicada. Já δ é a parcela deformada do parafuso, L_0 é o comprimento original (inicial) do parafuso e L é comprimento atual, correspondente à carga aplicada.

Esta explicação é baseada em ensaios de estruturas de aço à tração. Algumas vezes, o gráfico de tensão é plotado com a curva tensão *versus* deformação obtida, dividindo a carga aplicada P pela área da seção transversal A_0 antes de sofrer qualquer deformação. Porém sabe-se que, em materiais dúcteis, como os tipos de aço estudados neste trabalho, depois que o escoamento é iniciado a seção transversal do aço é reduzida conforme a carga de tração aplicada aumenta. Portanto a curva plotada não representa a característica real do componente. A diferença entre tensão de engenharia e a tensão verdadeira, conforme equações (3.1) e (3.2) respectivamente, é que a última, em materiais dúcteis, começa a aparecer após a fase de escoamento ter sido iniciada. Enquanto a tensão de engenharia, que é diretamente proporcional à carga P aplicada, decresce após a tensão de escoamento; na tensão verdadeira σ_t , que é diretamente proporcional a P e inversamente proporcional a A , é observado um pequeno aumento até que a ruptura ocorra. Portanto, a tensão verdadeira continua aumentando depois de iniciado o escoamento, enquanto a tensão de engenharia decresce, isto pode ser observado na Figura 3-8.

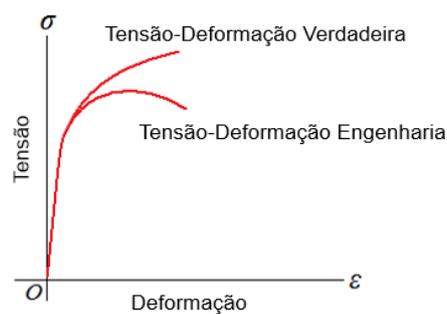


Figura 3-8 – Gráfico da tensão-deformação verdadeira e de engenharia

A razão pela qual não é recomendada a utilização da tensão de engenharia em problemas com grandes deslocamentos, é que, uma vez que a rigidez é próxima a zero (região quando está próximo à ruptura), ela introduzirá instabilidade na análise numérica, dificultando assim a convergência, e até mesmo trazendo resultados

inadequados. Lembrando que, segundo Gaertner & Bortoli (2006); a utilização da tensão de engenharia é recomendada para problemas de pequenos deslocamentos.

3.3.2. Definição da Curva Tensão-Deformação no Ansys

No Ansys, estão disponíveis várias formas para representação do comportamento plástico dos materiais. Neste trabalho, tendo em vista que estão sendo tratadas ligações aparafusadas de aço baseadas em análises numéricas com grandes deslocamentos, será tratado somente a representação com endurecimento isotrópico multilinear. Este comportamento é baseado na utilização de mais de duas linhas para a plotagem do gráfico de tensão deformação, isto é, toma-se uma série de pontos com o par de valores: tensão e sua respectiva deformação. As principais referências foram, para os materiais dos perfis e chapas (ASTM A572 e ASTM A36) foi utilizado Atlas of Stress-Strain Curve, ASM International (2002). Lembrando que neste, foi retirada a curva de tensão de engenharia e transformada para a curva de tensão verdadeira. Já para o material dos parafusos (ASTM A325), foi utilizada a curva de tensão *versus* deformação verdadeira apresentada por Eldemerdash et al. (2012).

O cálculo da resposta elastoplástica depende do histórico de tensões e deformações. A hipótese usual para caracterizar o aço é como material elastoplástico e o critério de resistência de Von-Mises atende eficientemente às características deste material. Uma breve introdução sobre a metodologia envolvida em MEF com não-linearidade do material é feita nesta seção com base em Borst et al (2012).

Admite-se a decomposição de deformação ε em duas componentes. Uma componente elástica ε^e e outra componente plástica ε^p , tal que, $\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p$. As tensões e deformações elásticas são relacionadas na forma incremental como $\sigma = D \varepsilon$.

As deformações plásticas ocorrem quando é verificada a condição de escoamento, ou seja, as tensões atuantes se igualam a tensão de escoamento. Para tanto é necessária uma análise incremental da resposta não-linear. Assim, o carregamento deve ser aplicado com pequenos incrementos de carga (passos) até, finalmente, alcançar a carga total aplicada.

As relações constitutivas dos materiais dos perfis da coluna e da viga, foram elaboradas, basicamente, relacionando os pares tensão-deformação para o material atribuído. A Tabela 3-2 indica os valores do módulo de elasticidade longitudinal E , do coeficiente de Poisson ν , da tensão de escoamento f_y e da tensão de ruptura f_u , bem como os pares correspondentes de tensão de engenharia σ e deformação de engenharia elástica ε com suas respectivas tensão e deformação verdadeira. Lembrando que as deformações são separadas em deformações elástica ε_e e deformações plástica ε_p .

Tabela 3-2 – Relação Tensão-deformação para Viga e Coluna (ASTM A572 G50).

ASTM A572	σ (MPa)	ε (in/in)	ε_t (in/in)	σ_t (MPa)	ε^e (in/in)	ε^p (in/in)
E = 200.000MPa $\nu = 0,3$ $f_y = 345$ Mpa $f_u = 450$ Mpa	0,0	0,00000	0,00000	0,0	0,00000	0,00000
	348,3	0,00192	0,00192	349,0	0,00174	0,00164
	353,8	0,02039	0,02018	361,0	0,00181	0,01838
	395,7	0,02965	0,02922	407,4	0,00204	0,02719
	431,0	0,03820	0,03749	447,5	0,00224	0,03526
	479,9	0,07564	0,07292	516,2	0,00258	0,07034
	487,0	0,10192	0,09705	536,6	0,00268	0,09437
	487,7	0,10926	0,10369	541,0	0,00270	0,10099

Os dados de tensão vs deformação de engenharia para o aço das chapas de extremidade são conforme Atlas of Stress-Strain Curve, ASM International (2002) e pode ser observado na Tabela 3-3.

Tabela 3-3 – Relação Tensão-deformação para a Chapa de Extremidade (ASTM A36).

ASTM A36	σ (MPa)	ε (in/in)	ε_t (in/in)	σ_t (MPa)	ε^e (in/in)	ε^p (in/in)
E = 200.000MPa $\nu = 0,3$ $f_y = 250$ MPa $f_u = 400$ MPa					0	0,00000
	249,2	0,0018	0,0018	249,6	0,0012	0,0012
	268,8	0,0167	0,0166	273,3	0,0014	0,0152
	295,1	0,0206	0,0204	301,2	0,0015	0,0188
	310,8	0,0234	0,0232	318,0	0,0016	0,0216
	333,0	0,0277	0,0273	342,2	0,0017	0,0256
	352,7	0,0327	0,0322	364,3	0,0018	0,0304
	370,8	0,0391	0,0384	385,3	0,0019	0,0364
	401,6	0,0770	0,0741	432,5	0,0022	0,0720
	407,7	0,1143	0,1082	454,3	0,0023	0,1060

As características dos materiais dos parafusos foram estabelecidas conforme apresentado por Eldemerdash et al. (2012). Os dados estão na Tabela 3-4.

Tabela 3-4 – Relação Tensão-deformação para os parafusos (ASTM A325).

ASTM A325	ϵ_t (in/in)	σ_t (MPa)	ϵ^e (in/in)	ϵ^p (in/in)
E = 200000MPa $\nu = 0,3$ $f_y = 635$ MPa $f_u = 825$ MPa	0,00000	0,0	0,0000	0,0000
	0,00350	634,7	0,0032	0,0000
	0,00368	651,9	0,0033	0,0004
	0,00381	665,4	0,0033	0,0005
	0,00396	679,7	0,0034	0,0006
	0,00463	725,5	0,0036	0,0010
	0,00492	743,8	0,0037	0,0012
	0,00519	759,1	0,0038	0,0014
	0,00569	786,6	0,0039	0,0018
	0,00601	798,8	0,0040	0,0020
	0,00636	812,5	0,0041	0,0023
	0,00687	829,3	0,0041	0,0027
	0,00732	846,1	0,0042	0,0031
	0,00821	867,5	0,0043	0,0039
	0,00872	876,7	0,0044	0,0043

3.4. Definição da Malha de Elementos Finitos

Dentro desta família de elementos, existem dois tipos de elementos, o primeiro com 8 nós, nomenclatura *SOLID185* no Ansys, e o segundo com 20 nós, o qual é chamado de *SOLID186* no Ansys. Como a ligação parafusada de aço com chapa de extremidade apresenta uma geometria simétrica, neste trabalho foram escolhidos elementos hexaédricos com 20 nós.

3.4.1. Elemento *SOLID186*

Através da teoria de elementos finitos, sabe-se que quanto maior o número de nós dos elementos, maiores serão suas funções de forma. Entre os elementos do tipo hexaédrico, o elemento *SOLID186* possui a maior ordem numérica, dessa maneira exibe uma interpolação do campo de deslocamento quadrática. A opção de utilizar elementos quadráticos se dá pelo fato de se ter uma alta concentração de tensão nos parafusos, assim como na região dos furos na chapa de extremidade e nos perfis.

O fator predominante, pelo qual optou-se por elementos com 20 nós (*SOLID186*), foi devido ao refinamento da malha na região dos furos nas chapas, onde se tem pontos de concentração de tensões. Porque os elementos *SOLID186* suportam superfícies curvas, ao passo que os demais elementos hexaédricos não suportam, se

fazendo necessário uma malha extremamente refinada, e um esforço computacional maior.

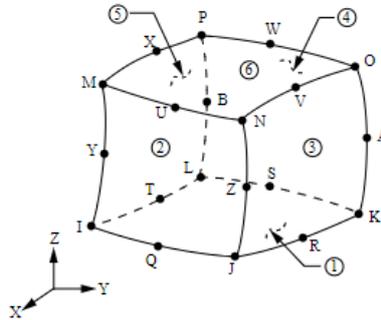


Figura 3-9 – Elemento finito *SOLID186* (ANSYS, 2014).

3.4.2. Elementos *Conta174* e *Targe170*

As ligações aparafusadas rígidas ou semirrígidas, em sua maioria dependem do comportamento das superfícies de contato. Isto é, as regiões em que há compressão ou afastamento entre os componentes da ligação tem alta influência na rigidez das ligações aparafusadas. Principalmente em ligações aparafusadas viga-pilar, é previsível a identificação das regiões em que potencialmente pode haver compressão entre chapa de extremidade e mesa do pilar (no caso deste estudo, a região inferior comprimida), assim como onde pode haver o afastamento entre as superfícies (regiões superiores tracionadas).

Essas superfícies de contato devem ser modeladas numericamente no *Ansys* com a utilização de elementos de contato entre as regiões que potencialmente pode ocorrer compressão (contato) e conseqüentemente, podendo vir a ocorrer penetração de um componente em relação a outro, violando a condição física do problema. Definido os elementos de contato, novos termos na matriz de rigidez são estabelecidos. Termos que possuem rigidez somente quando se tem compressão entre superfícies de contato. Em casos de afastamento entre as superfícies, estes termos possuem rigidez zero.

Para análise numérica, optou-se pelo elemento de contato *CONTA174*, existente no *Ansys*, o qual representa o contato e o deslizamento entre superfícies de elementos tridimensionais. Além disso, como os elementos finitos de contato são modelados numericamente em pares, para cada elemento *CONTA174* existe um elemento *TARGE170* (Figura 3-10). Os elementos *CONTA174* são compostos por 8 nós,

conforme Figura 3-10(a), já os elementos TARGE170 são compostos por 6 nós, ver Figura 3-10(b). Ambos elementos são localizados nas superfícies dos elementos finitos sólidos em contato. Portanto, os elementos atuam em pares em todas as superfícies de contato dos componentes da ligação.

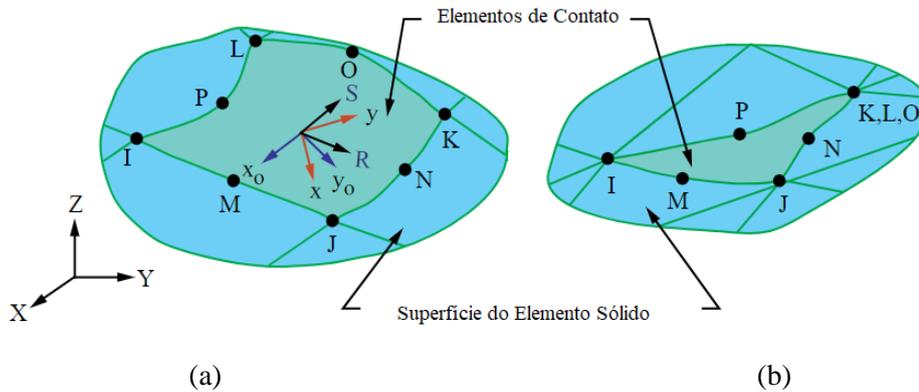


Figura 3-10 – Elementos finitos de contato: (a) CONTA174 e (b) TARGE170.

Na Figura 3-10(a) observa-se os eixos S e R que representam os eixos axiais dos elementos para atrito isotrópico, isto é, o mesmo coeficiente de atrito em ambas as direções. A definição da malha de elementos finitos é essencial para a análise numérica. Desde o tipo do elemento, até o tamanho e a quantidade de elementos utilizadas no modelo.

3.4.3. Discretização dos Perfis e Chapas

A discretização da chapa de extremidade e da mesa do pilar, Bursi & Jaspart (1998) recomendam a utilização de, no mínimo, 3 linhas de elementos ao longo da espessura dos componentes a serem modelados, isto, segundo os autores já é o suficiente para a obtenção de bons resultados para a flexão oblíqua na chapa de extremidade. Dessa maneira, foi utilizada uma malha com 3 linhas de elementos na espessura da chapa de extremidade e 4 linhas de elementos na espessura da mesa do pilar. Esta discretização é ilustrada na Figura 3-11.

Outro ponto importante que se deve observar é o refinamento de malha utilizado à medida que se aproxima da ligação, ou da região do apoio, quanto maior o grau de refinamento mais facilmente se dá convergência. Dessa maneira, na Figura 3-11 pode-se observar que nas regiões centrais do pilar e da viga, aumentou-se o número de elementos, visando diminuir o tempo de processamento do modelo, tendo em vista que

nessa região não se tem concentração de tensões, possibilitando então um menor refinamento de malha de elementos finitos.

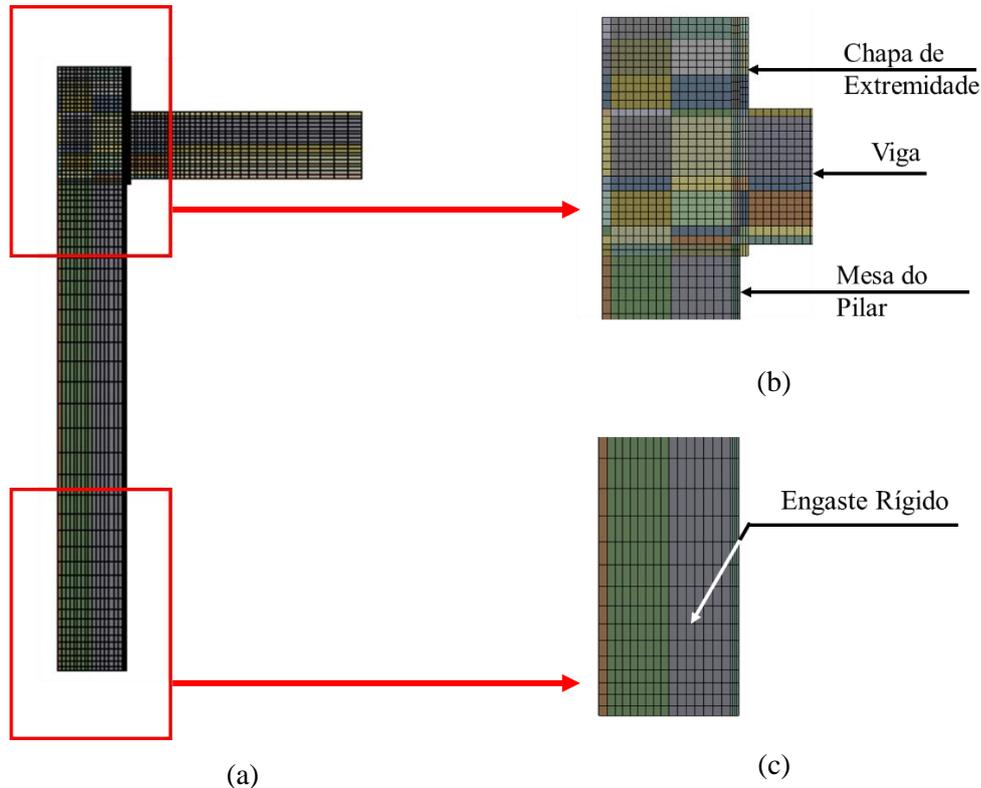


Figura 3-11 – Malha de Elementos Finitos para Pilar e Chapa de Extremidade:
(a) Geral (b) Ligação Parafusada e (c) Base do Pórtico.

Na região dos furos para a passagem dos parafusos, deve-se ter especial atenção, pois trata-se de uma geometria circular. A malha utilizada nos furos, foi aplicada tanto para a chapa de extremidade, como para a mesa do pilar em contato com a mesma. Com o objetivo de evitar elementos distorcidos nessa região dos furos, optou-se por circundar as arestas circulares por um quadrado, o qual regulariza a malha com as demais áreas dos componentes da ligação. A Figura 3-12 mostra que foi utilizada uma divisão de malha radial. Partiu-se de uma malha circular, na região do furo, para uma malha quadrada, na região circundada. Este refinamento de malha se deu devido à divisão do círculo do furo, e das arestas do quadrado serem divididos em números iguais de elementos. As arestas foram divididas em 5 partes iguais, dessa maneira o quadrado do contorno resulta em 20 divisões. Com isso, divide-se o círculo do furo em 20 partes, resultando em uma malha de elementos finitos radial e regular, colaborando assim para a convergência do modelo numérico.

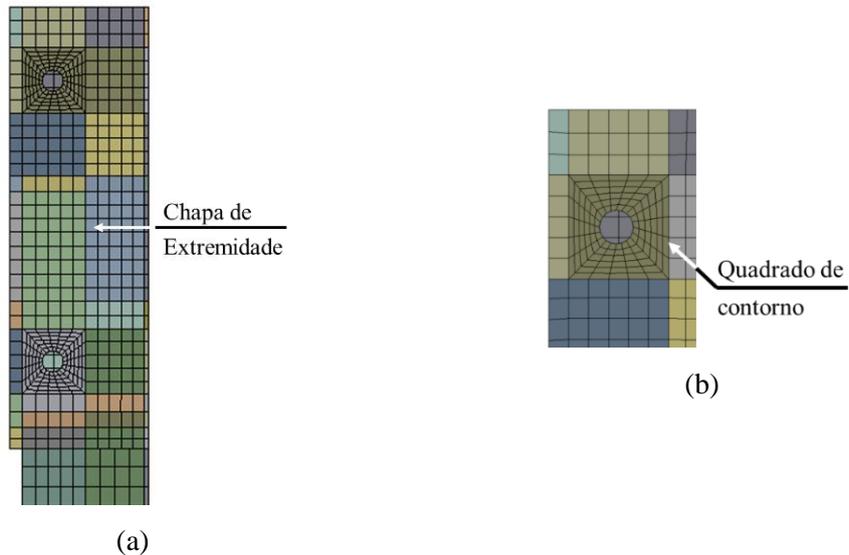


Figura 3-12 – Malha de Elementos Finitos para região dos furos:
 (a) Vista frontal da Malha (b) Região do furo e quadrado de contorno.

Nessa região do furo, onde é utilizado o quadrado de contorno, o refinamento de malha deve ser obrigatoriamente utilizado devido ao contato entre a cabeça do parafuso e a mesa do pilar, assim como o contato entre a porca e a chapa de extremidade.

O parafuso e a porca foram discretizados utilizando o mesmo tipo de elemento citado no item 3.4.1. A Figura 3-13 apresenta a malha adotada para os parafusos, na qual se observam os detalhes da cabeça sextavada, fuste e porca, modelados utilizando o compartilhamento de tipologia. Foi aplicada da mesma maneira que foi utilizado na geração das geometrias da viga e chapa de extremidade citada anteriormente. Ao longo da espessura da cabeça sextavada do parafuso e da porca foram utilizados 3 elementos, atendendo as recomendações mínimas, conforme indicado na Figura 3-13.

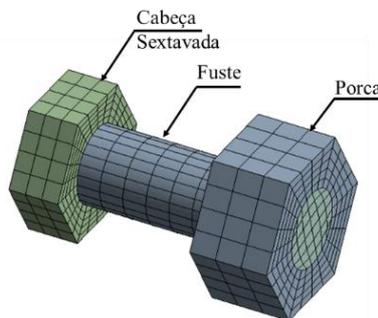


Figura 3-13 – Malha de Elementos Finitos para os parafusos.

Uma hipótese deste trabalho é a modelagem do diâmetro do fuste circular correspondente à área bruta do parafuso. Lembrando, que isto pode ter influência na resposta dos parafusos quanto à capacidade resistente, já que não é simulado a redução de área na região da rosca.

3.4.4. Teste de convergência

A validação da malha de elementos finitos se dá através do teste de convergência, o qual é elaborado através da comparação dos resultados da simulação numérica com os diferentes graus de refinamento de malha. Portanto, foi elaborado um gráfico deslocamento na direção Y no ponto localizado na face superior do eixo do perfil da viga (Figura 3-14) versus número de elementos do modelo apresentado na Figura 3-14.

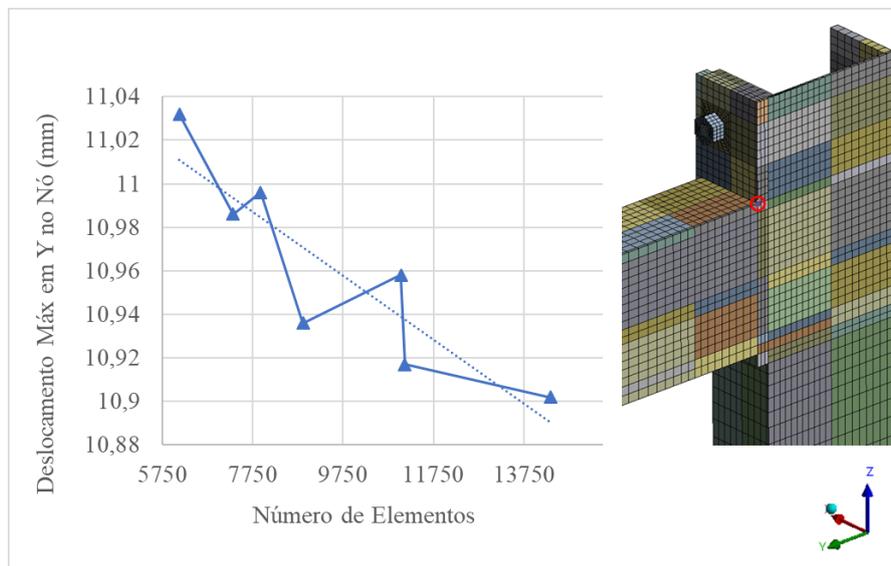


Figura 3-14 – Teste de convergência de malha de elementos finitos.

Portanto, observa-se que a partir de 10.000 elementos o modelo passa a apresentar uma variação de deslocamento reduzida, validando assim o grau de refinamento de malha que está sendo utilizado.

3.5. Análise Incremental

Para solução da análise incremental foi utilizada técnica clássica de Newton-Raphson padrão. O tratamento básico em uma solução incremental passo-a-passo assume que a solução para um instante t é conhecida e que a solução para o instante $t+\Delta t$ é calculada, onde Δt é um incremento de tempo adequado escolhido. Então,

considera que no instante $t+\Delta t$ tem-se ${}^{t+\Delta t}\mathbf{R} = {}^{t+\Delta t}\mathbf{F} = \mathbf{0}$. Desde que a solução no instante t , pode escrever ${}^{t+\Delta t}\mathbf{F} = {}^t\mathbf{F} + \mathbf{F}$, onde \mathbf{F} é o incremento de forças no ponto nodal correspondente ao incremento de deslocamento e tensões do elemento do instante t para o instante $t+\Delta t$. Neste trabalho, foi definido um número mínimo de 10 passos de incremento de carga para fase de protensão, e 20 passos para a fase de carregamento. Além disso, foi estabelecido um número máximo de passos de incremento de carga igual a 100. Para se ter a avaliação da convergência da solução, foi utilizada uma tolerância de erro de 0,5%.

3.6. Gráfico Momento *versus* Curvatura

Para comparar os resultados entre os modelos numéricos, o momento fletor e a rotação relativa entre viga e pilar foram utilizados como parâmetros de referência. Para isso, deve-se resolver um problema de contato entre os diversos componentes da ligação. Portanto a relação momento *vs.* rotação para uma ligação semirrígida é não linear. Isto provoca uma irregularidade nas rotações relativas dos componentes. Dessa maneira, para um nó de um pórtico com ligação semirrígida, a rotação do nó φ é calculada conforme indicado na Figura 3-15.

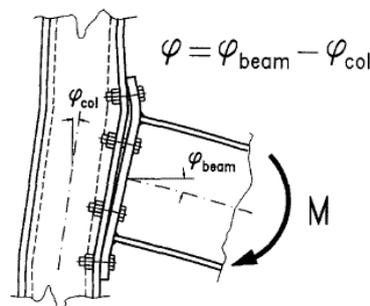


Figura 3-15 – Definição de rotação de um nó (Bursi & Jaspart, 1997).

Portanto, a medição da rotação do nó foi feita em função dos deslocamentos dos elementos no eixo dos componentes. Em função disso, a malha de elementos finitos foi gerada com o objetivo de, a linha de eixo do pilar e da viga existissem continuidade de nós dos elementos finitos.

O momento M transferido da viga para o pilar é calculado através do diagrama de momento fletor do pilar. A base do pilar foi considerada engastada, portanto as reações de momento fletor M_{base} e força horizontal R_h são conhecidas. Porém, a resultante do

esforço de momento fletor na base do pilar pode variar em função da rigidez da conexão. Dessa maneira, o momento fletor na base do pilar M_{base} é somado ao produto da reação horizontal da base R_h pela altura do pórtico H_p . Isto é, quando a conexão é rígida, o momento na base do pilar é igual ao momento transferido da viga para o pilar. À medida que a rigidez diminui, este momento é reduzido. Portanto, a estimativa de momento resulta da equação (3.5).

$$M_{ligação} = M_{base} + R_h H_p \quad (3.5)$$

onde $M_{ligação}$ é o momento na ligação parafusada, H_p é a altura do pórtico (no caso, $H_p=2m$); e R_h é a reação horizontal na base do pilar.

4. PROCEDIMENTOS E RESULTADOS

4.1. Descrição dos Modelos Utilizados

No pórtico estudado, foram definidos três diferentes detalhes de ligação, nos quais as dimensões utilizadas são ilustradas na Figura 4-1. A seção transversal dos pilares e vigas é W250x80. Conforme descrito item 3.3.2, os parafusos de aço são ASTM A325 (tensão de escoamento e resistência à ruptura, 635 MPa e 825 MPa), os perfis são de aço ASTM A572 (tensão de escoamento de 345 MPa e resistência de ruptura de 450MPa) e as chapas de extremidade de aço ASTM A36 (tensão de escoamento de 250MPa e tensão de ruptura de 400 MPa).

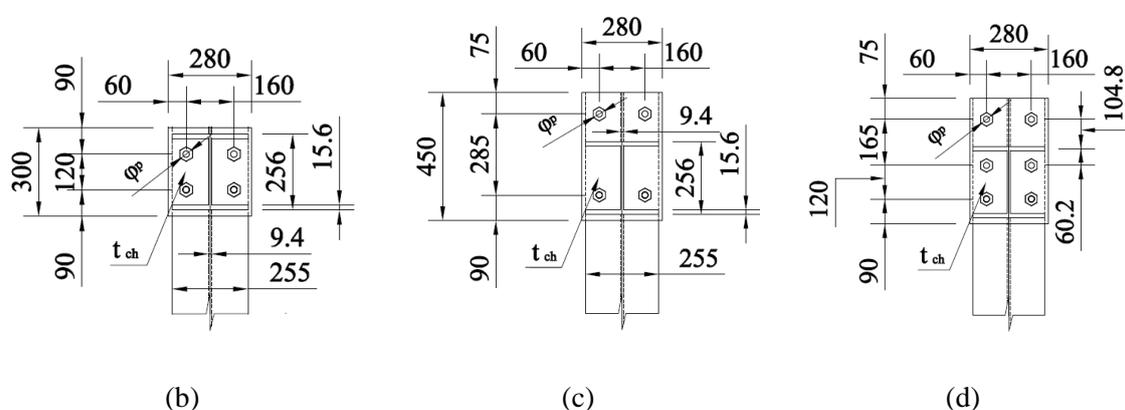


Figura 4-1 – Detalhe das ligações aparafusadas: (a)D120 (b)DP285 (c)2DP285

Os parâmetros a serem analisados são diâmetro dos parafusos ϕ_p e espessura da chapa de extremidade t_{ch} . A Tabela 4-1 apresenta a identificação dos modelos analisados com os dados t_{ch} , ϕ_p e d_p usados em cada modelo. Além disso, indiretamente, o número de linhas de parafusos à tração também está sendo analisado.

A nomenclatura utilizada foi adotada conforme nomenclatura de protótipos experimentais em Maggi (2000). Além disso, para as distâncias entre parafusos foram levadas em consideração distâncias mínimas entre parafusos, assim como as distâncias mínimas suficiente para dar o torque nos parafusos através de chave específica.

Tabela 4-1 – Parâmetros dos Modelos Numéricos.

Modelo	t_{ch} (mm)	ϕ_p (mm)	d_p (mm)
DP285-T160-P160	16	16	285
DP285-T160-P190	16	19	285
DP285-T160-P220	16	22	285
DP285-T190-P160	19	16	285
DP285-T190-P190	19	19	285
DP285-T190-P220	19	22	285
DP285-T220-P160	22	16	285
DP285-T220-P190	22	19	285
DP285-T220-P220	22	22	285
DP120-T160-P160	16	16	120
DP120-T160-P190	16	19	120
DP120-T160-P220	16	22	120
DP120-T190-P160	19	16	120
DP120-T190-P190	19	19	120
DP120-T190-P220	19	22	120
DP120-T220-P160	22	16	120
DP120-T220-P190	22	19	120
DP120-T220-P220	22	22	120
2DP285-T160-P160	16	16	260
2DP285-T160-P190	16	19	260
2DP285-T160-P220	16	22	260
2DP285-T190-P160	19	16	260
2DP285-T190-P190	19	19	260
2DP285-T190-P220	19	22	260
2DP285-T220-P160	22	16	260
2DP285-T220-P190	22	19	260
2DP285-T220-P220	22	22	260

4.2. Resultados Obtidos

Neste capítulo apresentam-se os resultados referente à análise numérica. Tendo em vista o número de modelos, foram selecionados os modelos mais utilizados no ambiente prático de Engenharia e que possibilitassem a verificação do seu comportamento, principalmente sobre o aspecto da rigidez e distribuição de tensões, portanto a análise de resultado de tensões serão demonstrados apenas os resultados dos detalhes 2DP285-T190-P190, o qual tem suas dimensões pré-definidas ilustradas na Figura 4-1(c). Com isso, será avaliada a influência dos parâmetros espessura de chapa de extremidade t_{ch} e diâmetro de parafuso φ_p na rigidez dos 3 detalhes pré-definidos (ver Figura 4-1).

Além disso, na apresentação dos resultados da análise numérica serão adicionados, quando necessário, resultados analíticos provenientes da teoria clássica de resistência dos materiais, assim como o cálculo analítico de ligações aparafusadas com chapa de extremidade baseada no Eurocode 3 de 2010.

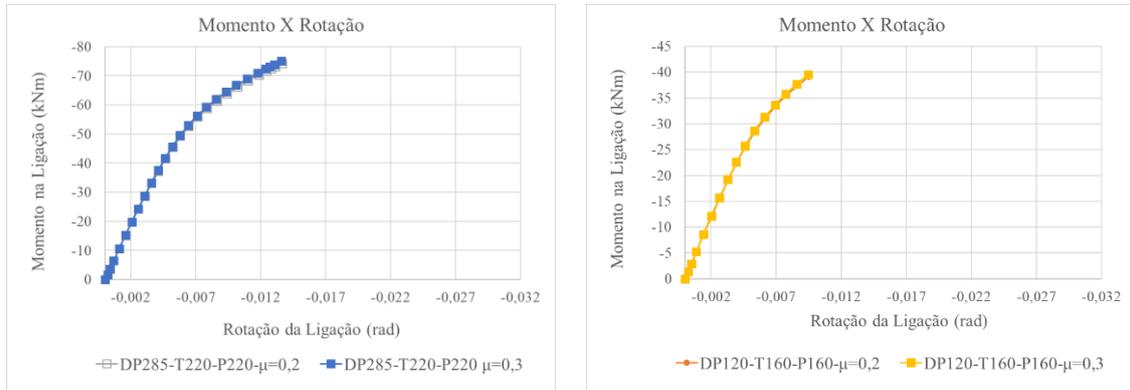
Seguindo o enfoque de comparação entre os resultados dos modelos numéricos, será apresentado como foi definido o coeficiente de atrito entre as superfícies em contato, depois os deslocamentos relativos entre chapa de extremidade e mesa do pilar, forças de tração e deformação nos parafusos e as distribuições de tensões na viga.

4.2.1. Coeficiente de Atrito

Os experimentos realizados por Gaertner e Bortoli (2006) resultaram pequenas variações de tensões apenas para coeficientes de atrito superiores a 0,3. Entretanto, o manual do programa Ansys recomenda um coeficiente de atrito máximo de 0,2, uma vez que valores superiores demanda maior esforço computacional. Neste estudo, foi elaborada uma análise comparativa entre os resultados obtidos para coeficientes de atrito 0,2 e 0,3. Foram selecionados os modelos do tipo DP285-T220-P220 e DP120-T160-P160, os quais são, respectivamente, o modelo com maior rigidez e o modelo mais flexível analisados neste trabalho.

Na Figura 4-2(a) e (b) são ilustradas as curvas momento vs. rotação para coeficientes de atrito 0,2 e 0,3 avaliados nos modelos DP285-T220-P220 e DP120-T160-P160, respectivamente. Em ambos os modelos, quando se alterou o coeficiente de

atrato de 0,2 para 0,3, não houve alteração nos resultados, que está em concordância com o manual do programa Ansys. Dessa maneira, foi utilizado o coeficiente de atrito de 0,2 em todos os contatos analisados neste trabalho.



(a)

(b)

Figura 4-2 – Definição do coeficiente de atrito de contato:

(a) modelo DP285-T220-P220 (b) modelo DP120-T160-P160.

4.2.2. Distribuição de tensões na Viga

A análise dos resultados de distribuição de tensões na viga tem como principal objetivo, comparar os valores obtidos nas análises numéricas com os valores analíticos esperados, obtidos por meio da teoria tradicional da resistência dos materiais. Além disso, é possível observar os mecanismos de plastificação das seções transversais da viga e os possíveis modos de ruptura apresentados na Figura 2-6.

Para isso, serão apresentados os resultados referentes à distribuição de tensões de Von Mises na mesa da viga, assim como as tensões normais na alma da viga. Já as tensões transversais serão apresentadas somente na alma da viga.

4.2.2.1. Distribuição de tensões Normais

A distribuição de tensões na mesa superior da viga será apresentada na intersecção da viga com a chapa de extremidade e na seção $H/2$, conforme ilustrado na Figura 4-3.

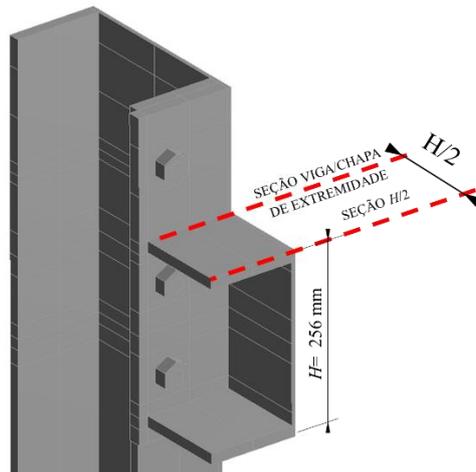


Figura 4-3 – Posição das seções transversais horizontais da mesa da viga.

Analisando a distribuição de tensões na intersecção da mesa superior da viga com a chapa de extremidade, ilustrada na Figura 4-4, observam-se a concentração de tensões, dados por picos de tensão na região da extremidade da mesa da viga. Por se tratar de uma ligação amplamente utilizada em projeto de estruturas de aço, as análises de tensões são feitas apenas para o modelo 2DP285-T190-P190 ($d_p = 285$ mm; $t_{ch} = 19$ mm; $\phi_p = 19$ mm).

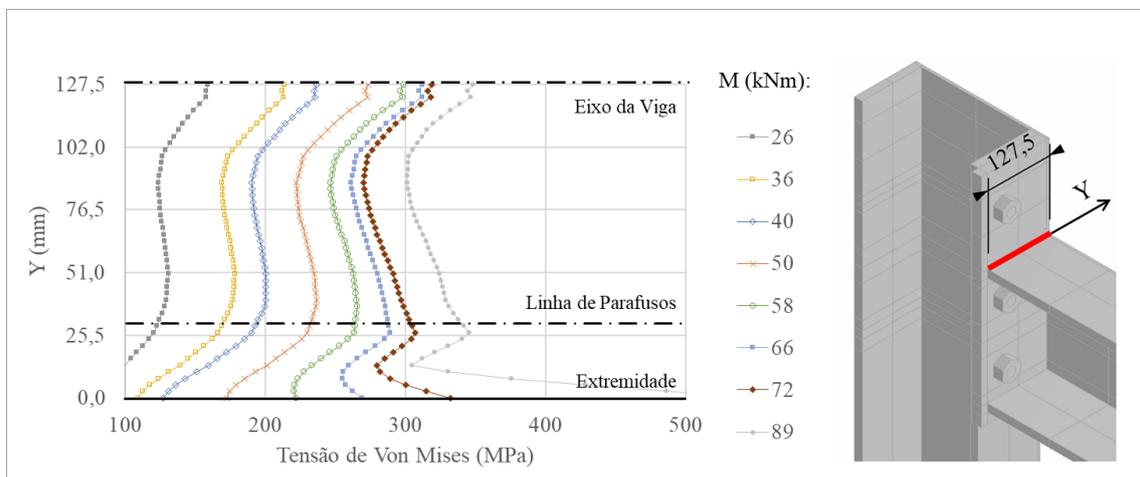


Figura 4-4 – Distribuição de tensões de Von Mises na mesa superior da viga na seção de intersecção viga/chapa de extremidade.

Na Figura 4-4 observa-se que o primeiro ponto a atingir a tensão de escoamento localiza-se na extremidade da mesa do perfil da viga. Isto se dá pelo fato de não estar sendo considerado enrijecedor na alma do pilar que por sua vez deforma, e em função da rigidez causada pela presença da chapa de topo, a tensão limite é atingida.

Por outro lado, a distribuição de tensões na seção $H/2$ tem comportamento inverso, onde as maiores tensões ocorrem no plano médio da viga. A partir da seção $H/2$ as tensões na mesa superior da viga tornam-se praticamente uniformes para todos os níveis de solicitação.

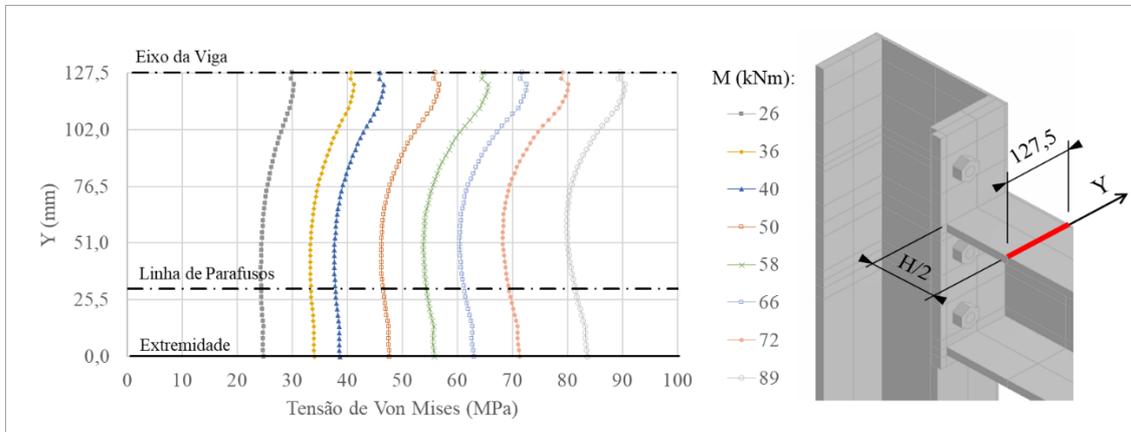


Figura 4-5 – Distribuição de tensões de Von Mises na mesa superior da viga na seção a uma distância da chapa de extremidade de $H/2$.

As tensões médias para a seção $H/2$, observadas na Figura 4-6, são coincidentes com a tensão teórica calculada pela teoria da flexão simples, que é dada pela divisão do momento fletor na ligação M pelo módulo elástico de resistência a flexão da seção do perfil da viga W . Deve-se alertar que neste estudo, está se fazendo uso de planos de simetria, portanto o momento fletor resultante das análise numéricas devem ser duplicados para comparação com as propriedades geométricas dos perfis.

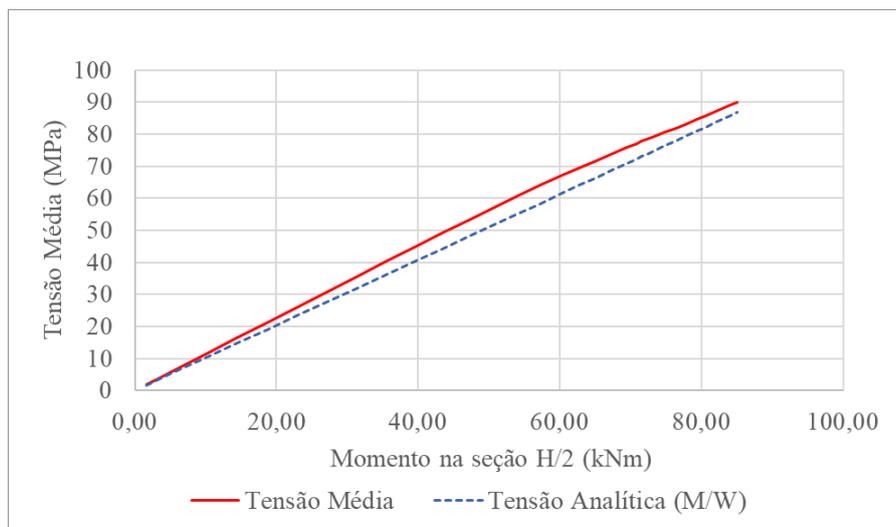


Figura 4-6 – Comparação entre Tensão Analítica e Tensão Média em gráfico Tensão *versus* Momento na seção $H/2$ do Modelo Numérico.

Analisando a influência do parâmetro espessura de chapa de extremidade t_{ch} na distribuição de tensões, foram comparados os modelos 2DP285-T160-P190, 2DP285-T190-P190 e 2DP285-T220-P190, os quais possuem espessuras de chapa de extremidade 16, 19 e 22 mm, respectivamente. A Figura 4-7 representa as tensões médias para os modelos citados acima.

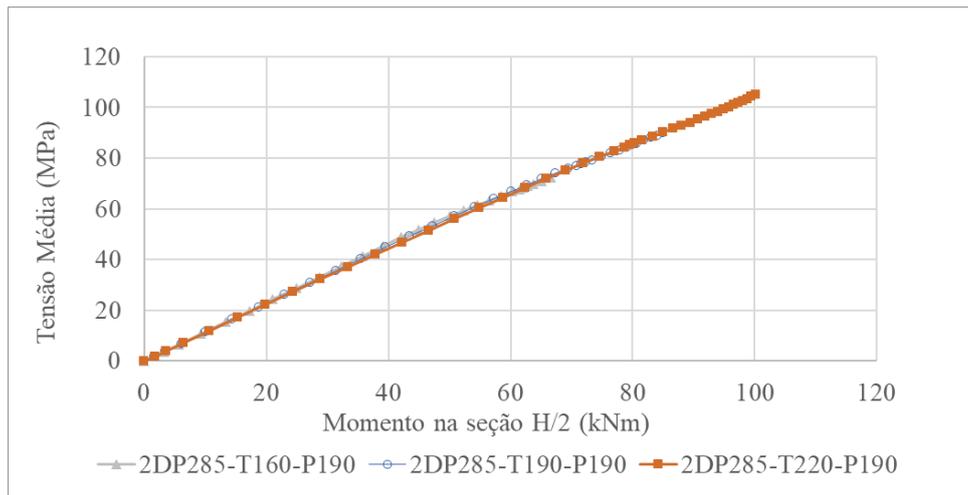


Figura 4-7 – Influência da variação da espessura da chapa de extremidade t_{ch} no gráfico tensão média *versus* momento na seção $H/2$.

Analisando a Figura 4-7, observa-se que a espessura da chapa de extremidade não influencia na distribuição de tensões normais médias na mesa superior da viga na seção $H/2$.

Foi analisada, também a influência do diâmetro de parafuso, para φ_p de 16, 19 e 22mm, conforme observa-se na Figura 4-8, houve variação na distribuição de tensões na mesa da viga em função da redução do diâmetro dos parafusos para 16mm. Em função da redução da rigidez da ligação, obteve-se uma redução na inclinação da reta tensões *versus* momento.

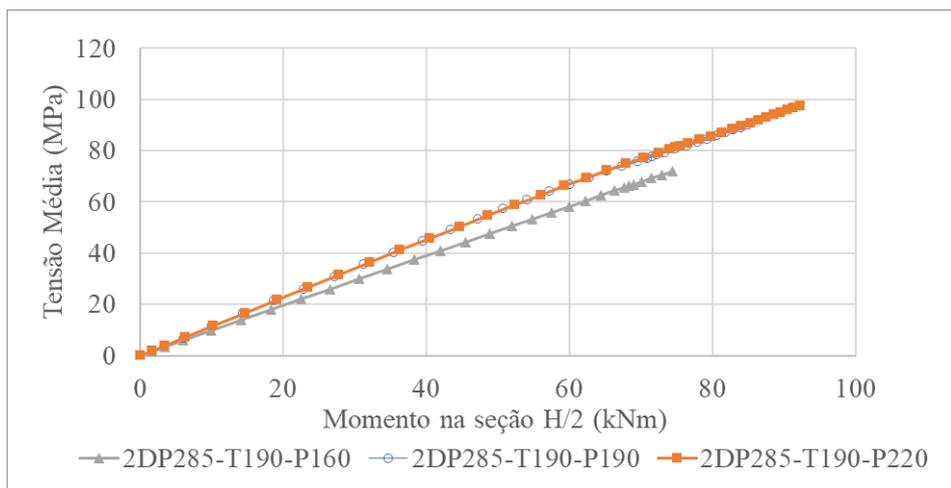


Figura 4-8 – Influência da variação do diâmetro de parafuso φ_p no gráfico tensão média *versus* momento na seção $H/2$.

Assim como verificou-se a distribuição de tensões na mesa superior da viga, obteve-se a distribuição das tensões normais na alma da viga, ao longo da sua altura. É importante ressaltar que, não foi analisada a distribuição de tensões de Von Mises, tendo em vista que as tensões transversais serão analisadas separadamente, e tem total influência nas tensões de Von Mises.

Na Figura 4-9 observa-se que a medida que a solicitação aumenta, as tensões normais na alma da viga aumentam. Além disso, na região de intersecção da viga com a chapa de extremidade, observa-se uma distorção das tensões, em função da rigidez da chapa de extremidade e da mudança de direção dos componentes, gerando assim um ponto de concentração de tensões. Além disso, nesta intersecção, na prática, se encontra o filete de solda entre viga e chapa de extremidade.

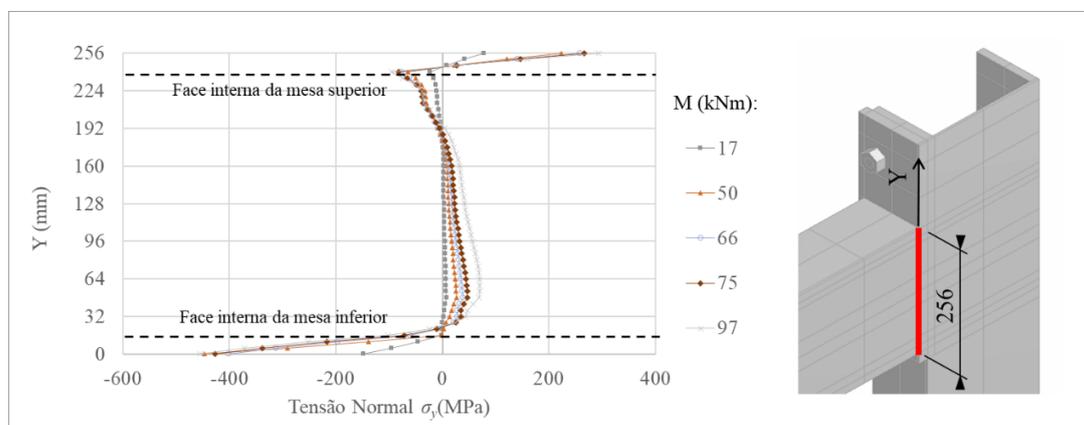


Figura 4-9 – Distribuição de tensões normais na alma da viga na seção de intersecção viga/chapa de extremidade – Modelo 2DP285-T190-P190.

Analisando a Figura 4-10, pode-se notar que para solicitações de até 50 kNm, tem-se uma distribuição de tensões linear ao longo da altura da alma da viga. Para esforços acima de 50 kNm, observa-se uma não linearidade, isto se dá em função do início da plastificação, que é dada inicialmente nos parafusos, que será detalhado no item 4.2.4.

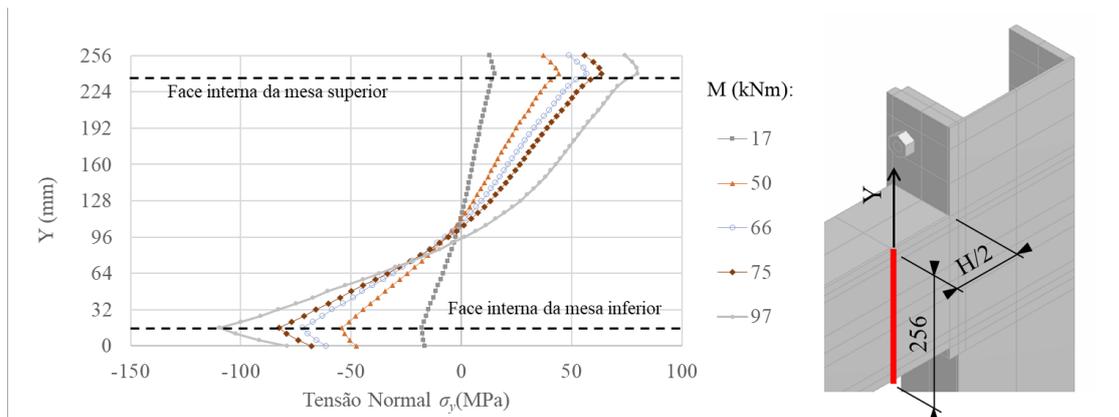


Figura 4-10 – Distribuição de tensões normais na alma da viga na seção $H/2$.

Além disso, observa-se que a linha neutra da seção é dada abaixo da linha de eixo do perfil da viga. Isto pode ser explicado, em função da distância entre a linha de parafusos superior e a face superior da mesa da viga não ser simétrica em relação a linha de parafusos abaixo da mesa superior da viga. Esta situação foi considerada propositalmente com o objetivo da seção da viga ser em sua maioria tracionada. Lembrando que neste estudo não foram considerados esforços axiais na ligação. Outro ponto a ser observado é que a tensão máxima é inferior à tensão de escoamento do aço do perfil. Com isso fica claro que a seção do perfil pode ser reduzida em função dessa distribuição de parafusos, ou o número de parafusos pode ser aumentado até atingir a tensão de escoamento do perfil da viga, ou seja, a geometria e a disposição dos parafusos tem alto impacto na ligação parafusada com chapa de extremidade.

Na Figura 4-11 identifica-se claramente que o diâmetro do parafuso tem maior influência na região da mesa superior do perfil. Isto se dá pelo fato do aumento da rigidez na região tracionada da ligação, em função do aumento do diâmetro dos parafusos ϕ_p . Por sua vez, este aumento de rigidez, causa uma alteração na posição da linha neutra do perfil da viga. Dessa maneira, a seção do perfil da viga passa a ser mais solicitada com o aumento do diâmetro dos parafusos, o que significa que a ligação está economicamente melhor dimensionada.

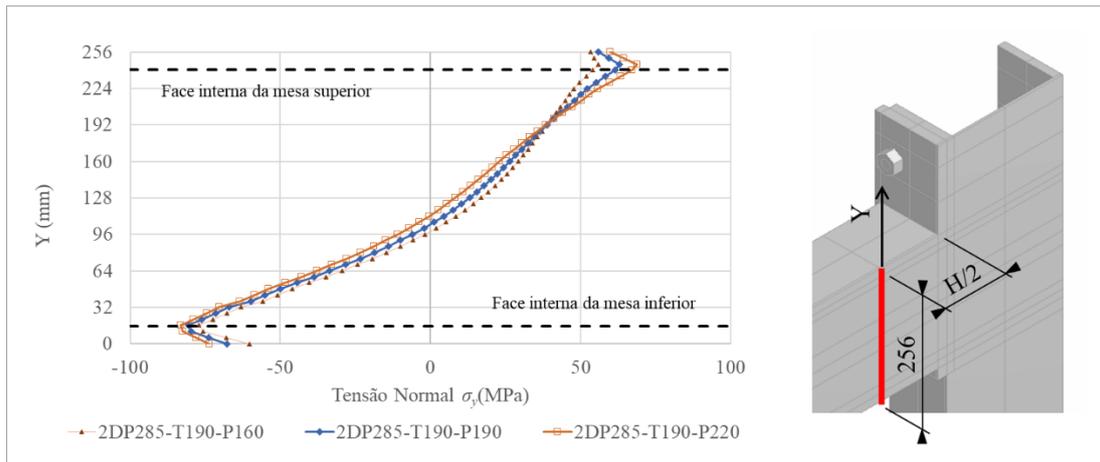


Figura 4-11 –Influência do diâmetro do parafuso ϕ_p na distribuição de tensões normais σ_y na alma da viga na seção $H/2$ para momento fletor na ligação de 75 kNm.

Com a variação da espessura da chapa de extremidade t_{ch} , para esta ligação, com esta disposição de parafusos, não foram observadas mudanças significativas na distribuição de tensões ao longo da alma da viga na seção $H/2$, conforme é apresentada na Figura 4-12. Portanto, conclui-se que nestes modelos de ligações aparafusadas de aço, com este perfil de viga específico, o diâmetro dos parafusos ϕ_p tem maior impacto na distribuição de tensões que a espessura da chapa de extremidade t_{ch} .

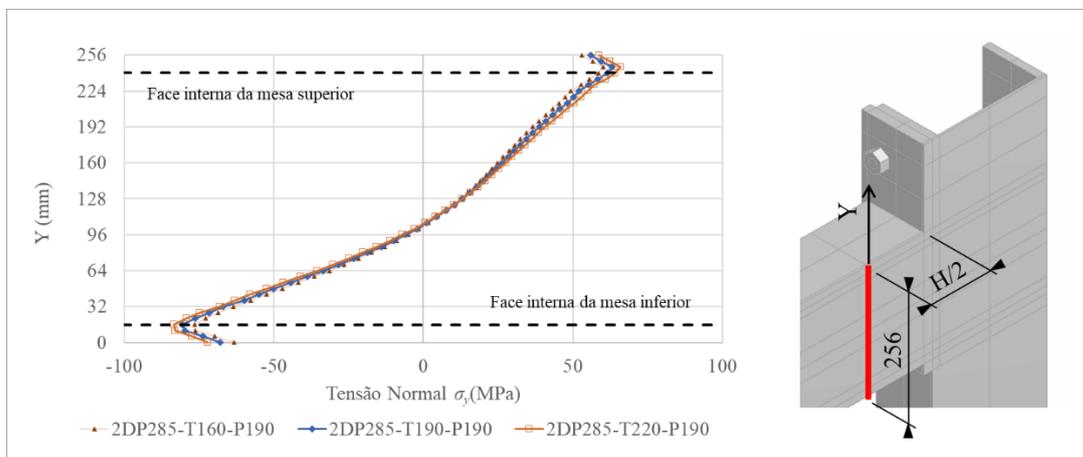


Figura 4-12 – Influência da espessura da chapa de extremidade t_{ch} na distribuição de tensões na alma da viga na seção $H/2$ para momento fletor na ligação de 75 kNm.

4.2.2.2. Distribuição de Tensões Transversais

Em função das distorções citadas anteriormente na intersecção com a chapa de extremidade, foram analisados os resultados em seções da alma a uma distância $H/2$, H

e $3H/2$ da face da chapa de extremidade, onde H é dado pela altura do perfil da viga. Estas seções, são observadas na Figura 4-13.

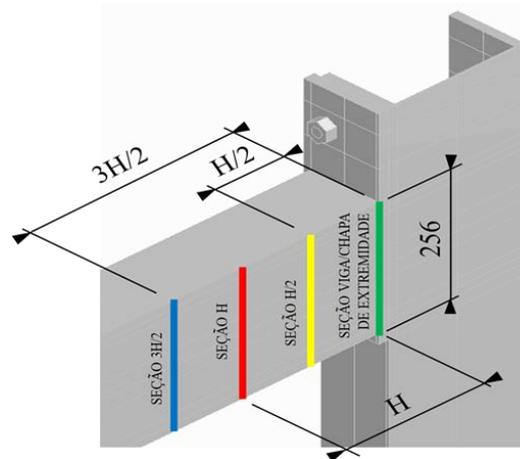


Figura 4-13 – Posição das seções transversais verticais da alma da viga.

Como citado anteriormente, em função do carregamento vertical são geradas tensões transversais na alma da viga devido à força cortante ao longo da altura da alma. De maneira semelhante ao que ocorreu nas tensões na mesa da viga, observa-se nas tensões transversais da alma, conforme apresentado na Figura 4-14, uma concentração de tensões na intersecção da viga com a chapa de extremidade, gerando então distorções na distribuição de tensões transversais. Em função disso, foram analisadas as tensões nas demais seções distantes em $H/2$, H e $3H/2$ da chapa de extremidade.

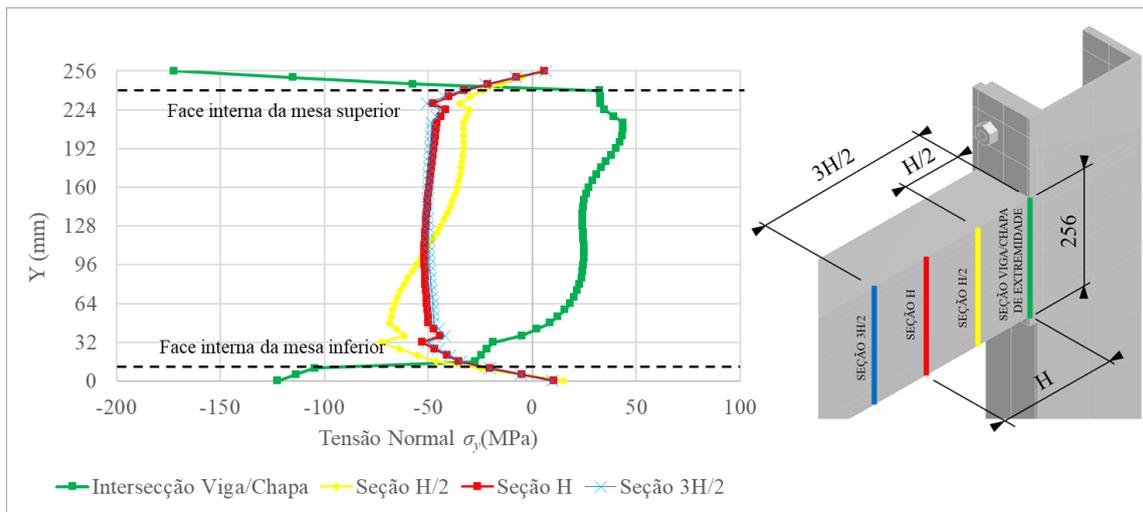


Figura 4-14 – Distribuição de tensões transversais na alma da viga para momento na ligação de 89 kNm.

A partir da seção H, nota-se uma distribuição de tensões transversais conforme o comportamento previsto na teoria clássica da resistência dos materiais, apresentando valores máximos na altura média da viga. Na Figura 4-14 observa-se a tensão transversal média de -42,59 MPa ao longo da alma. Esse valor, multiplicado pela área total da seção transversal da alma (25,6 x 0,94 cm), resulta numa força de 102 kN que representa aproximadamente a força cortante na seção transversal. Esta, pela teoria da resistência dos materiais é obtida através da divisão do momento fletor na seção $3H/2$, de 89 kNm pela distância até a aplicação do carregamento, que é de 0,422m, depois multiplicando-se por 2 devido à utilização da simetria, resulta em 105kN, que validam os resultados obtidos.

4.2.3. Distribuição de Tensões na Chapa de Extremidade e Mesa do Pilar

A Figura 4-15 ilustra as deformadas da chapa de extremidade e da mesa do pilar para 3 modelos, variando espessura da chapa de extremidade t_{ch} para os modelos do tipo 2DP285. As deformadas apresentadas são devidas ao momento total aplicado na ligação. Lembrando que o momento fletor na ligação varia conforme a rigidez dos componentes da ligação parafusada com chapa de extremidade.

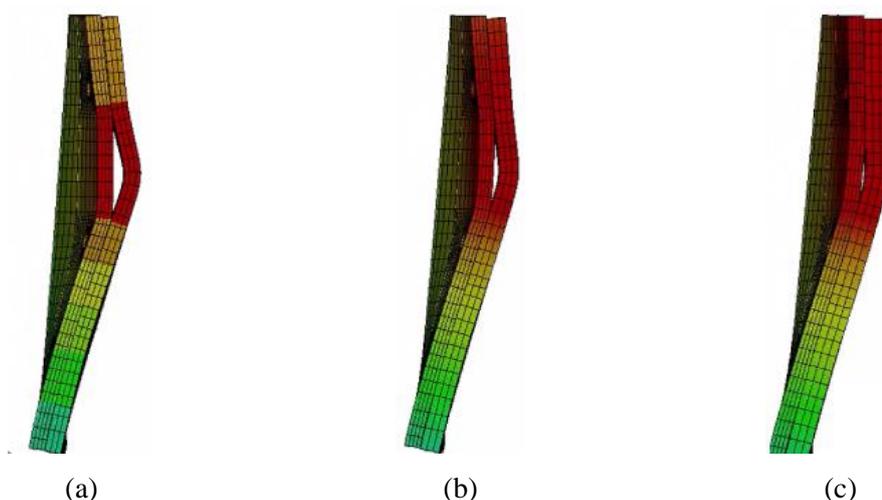


Figura 4-15 – Deformação da Chapa de extremidade e da mesa do pilar: (a) 2DP285-T160-P190 (b) 2DP285-T190-P190 e (c) 2DP285-T220-P190.

Com o objetivo de ilustrar e quantificar o comportamento observado na Figura 4-15, foram definidas algumas seções na chapa de extremidade. Assim como nos resultados anteriores, serão apresentados graficamente os resultados para o modelo 2DP285-T190-P-160. Na Figura 4-16 são apresentadas as seções a serem analisadas.

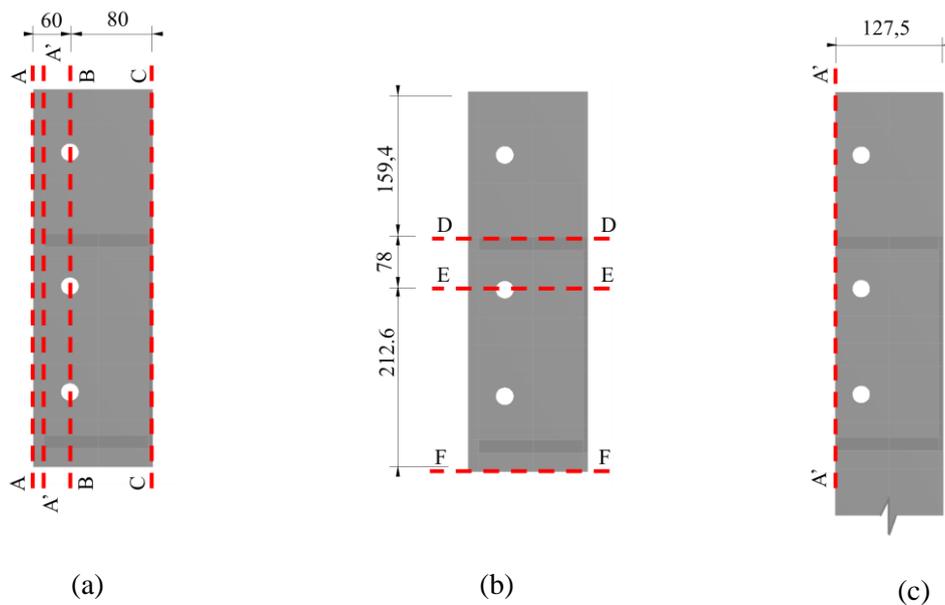


Figura 4-16 –Seções na chapa de extremidade: (a) verticais, (b) horizontais e na (c) mesa do pilar

Na Figura 4-17 observa-se um ponto de fundamental importância na análise de estruturas de aço. Em momentos fletores acima de 66kNm, tem-se deslocamentos da chapa de extremidade superiores a 10mm. Porém, conforme NBR 8800 (2008), o deslocamento horizontal no topo de pilares do tipo engastado/livre deve ser limitado conforme equação (4.1).

$$\delta = \frac{H_p}{200} \tag{4.1}$$

onde H_p é a altura do pórtico em cm e δ é o deslocamento admissível em cm.

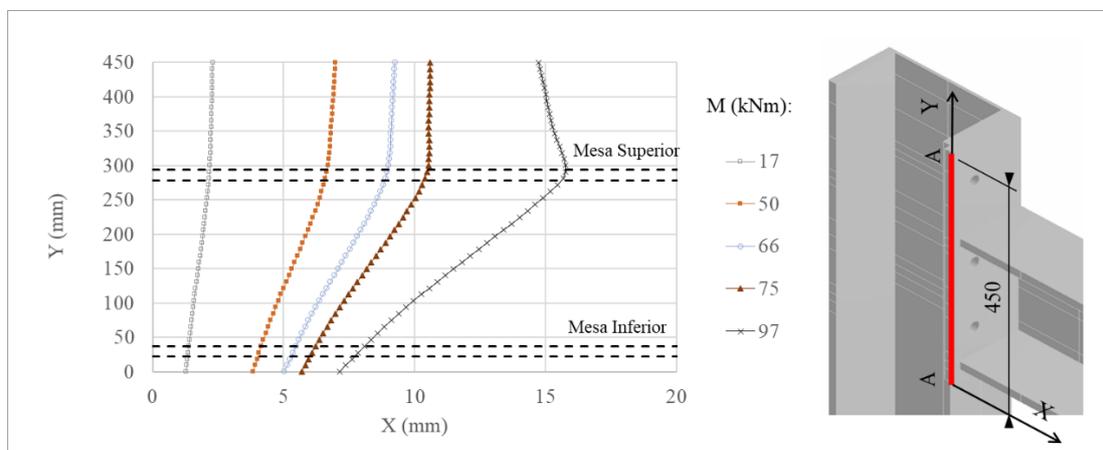


Figura 4-17 –Deslocamentos na chapa de extremidade e mesa do pilar na seção A-A

Porém, neste trabalho não está sendo estudada a análise global do pórtico. Dessa maneira, o impacto da rigidez das ligações aparafusadas com chapa de extremidade na estabilidade global da estrutura é um assunto sugerido para futuros trabalhos.

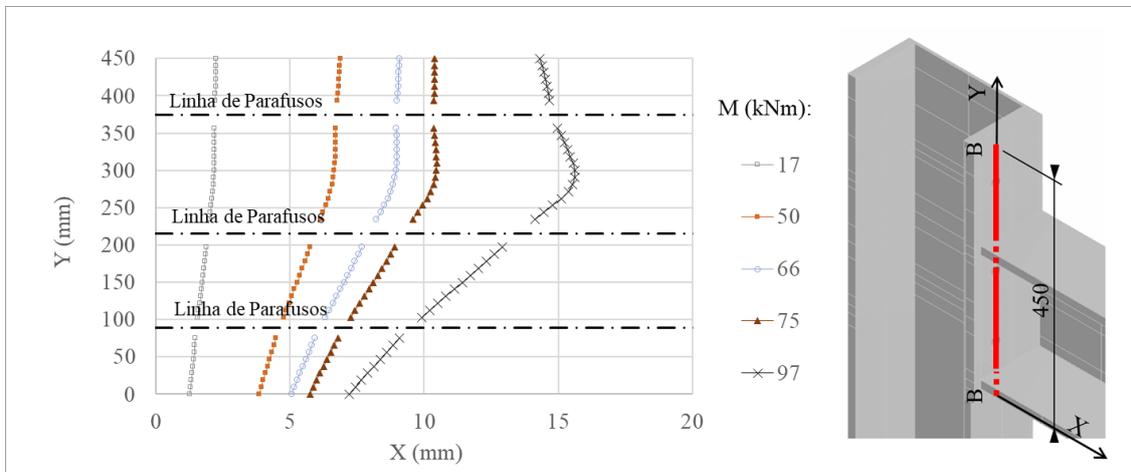


Figura 4-18 –Deslocamentos na Chapa de extremidade na seção vertical B-B.

Outro ponto que pode ser observado na Figura 4-18 é que não se tem simetria entre os deslocamentos das linhas de parafuso, aparecendo uma defasagem entre elas que não se pode concluir se é diretamente impactada pela falta de simetria entre a distância das linhas de parafuso a mesa superior da viga.

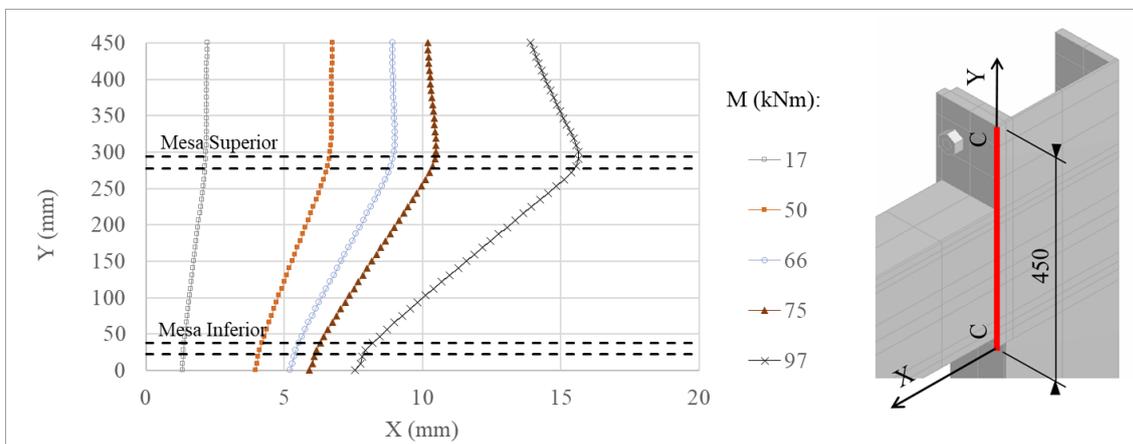


Figura 4-19 –Deslocamentos na chapa de extremidade e mesa do pilar na seção C-C.

Outra observação é a ordem de grandeza dos deslocamentos da chapa de extremidade, que claramente possui grande rigidez à flexão, portanto comporta-se como um corpo rígido, ou seja, as deformações são reduzidas. Além disso, o deslocamento da chapa de extremidade ocorre somente nas regiões dos parafusos e mesa superior da

viga, nas demais regiões, o deslocamento se dá em função dos deslocamentos da mesa do pilar. Por isso, obteve-se o gráfico de deslocamentos relativos entre a mesa do pilar e a chapa de extremidade na seção A'-A'. Estes dados são apresentados na Figura 4-20, com um comparativo em função da variação da espessura da chapa de extremidade.

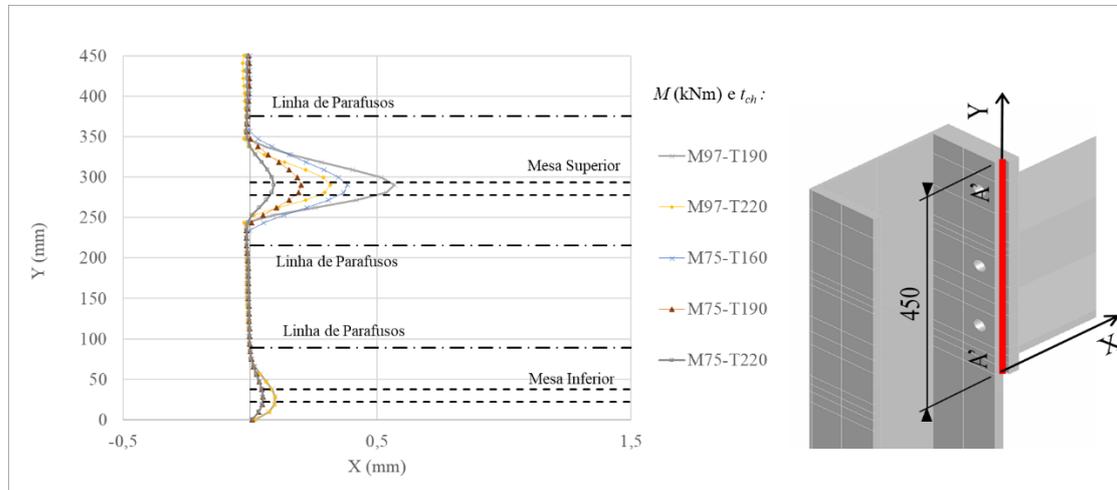


Figura 4-20 – Influência da espessura da chapa de extremidade t_{ch} nos deslocamentos relativos entre Chapa de extremidade e mesa do pilar na seção vertical A'-A'

Na Figura 4-20 observa-se que o deslocamento da chapa de extremidade em relação a mesa do pilar ocorre somente na região da mesa superior da viga e não ao longo do comprimento da chapa de extremidade como parecia estar ocorrendo nas Figura 4-18 e Figura 4-19. Estes resultados, mostram o impacto da mesa do pilar na rigidez das ligações aparafusadas com chapa de extremidade, quando comparados com estudos anteriores como Sherbourne (1994), onde foram utilizados enrijecedores no pilar. Porém, neste trabalho não foram considerados enrijecedores na mesa do pilar, consequentemente o deslocamento da chapa de extremidade se dá em função do deslocamento da mesa do pilar, conforme é observado na Figura 4-20.

Comparando a Figura 4-17 e a Figura 4-21 para momentos fletores de 75 e 106 kNm, observa-se que os deslocamentos da chapa de extremidade e da mesa do pilar são muito próximos, o que foi comprovado através da Figura 4-20.

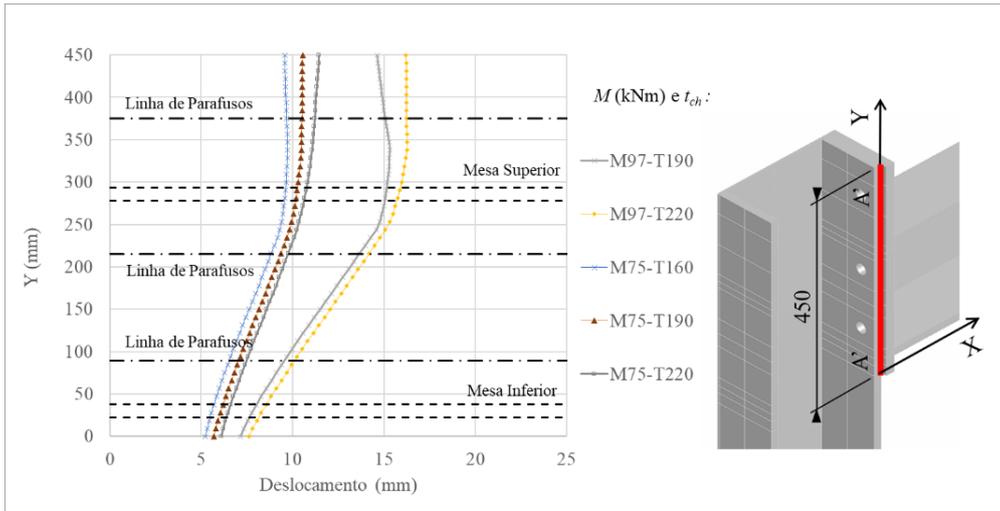


Figura 4-21 – Influência da espessura da chapa de extremidade t_{ch} nos deslocamentos da mesa do Pilar na seção vertical A'-A'.

Nas Figura 4-22 a Figura 4-24 são apresentados os gráficos referentes às seções horizontais da chapa de extremidade.

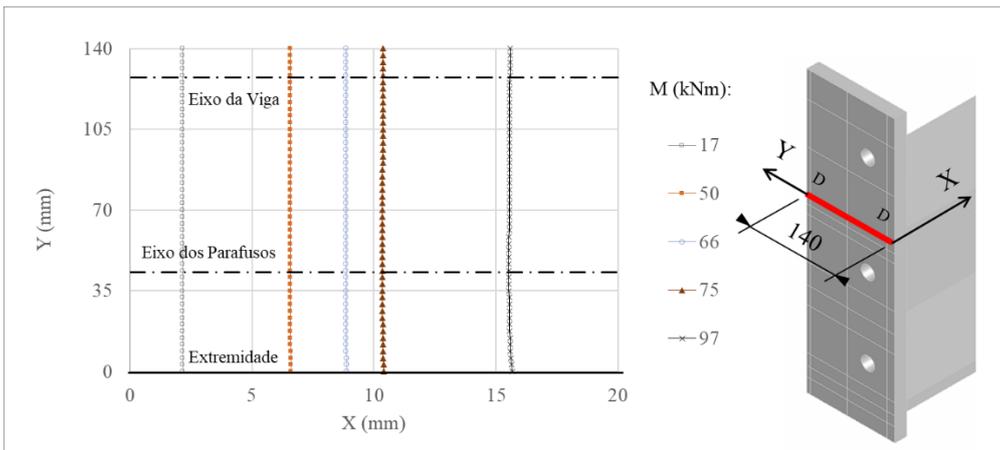


Figura 4-22 –Deslocamentos na chapa de extremidade na seção horizontal D-D.

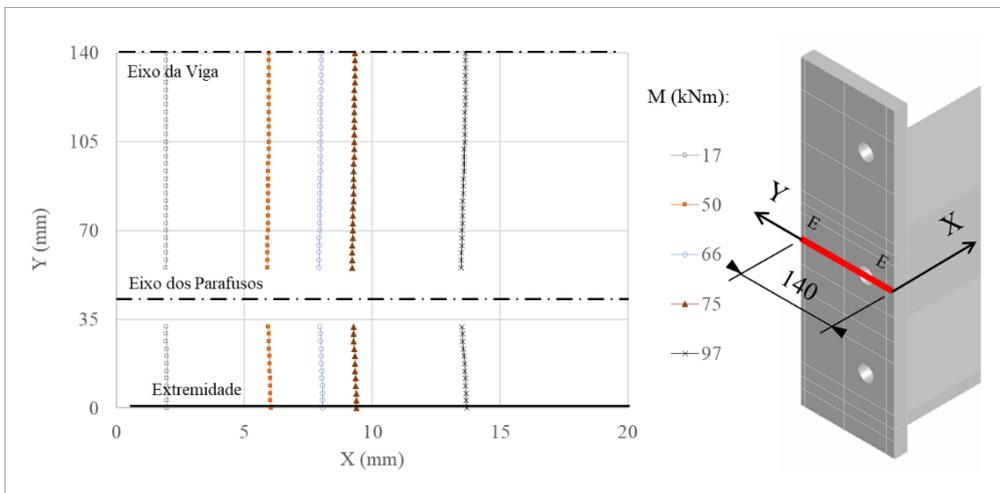


Figura 4-23 –Deslocamentos na chapa de extremidade na seção horizontal E-E.

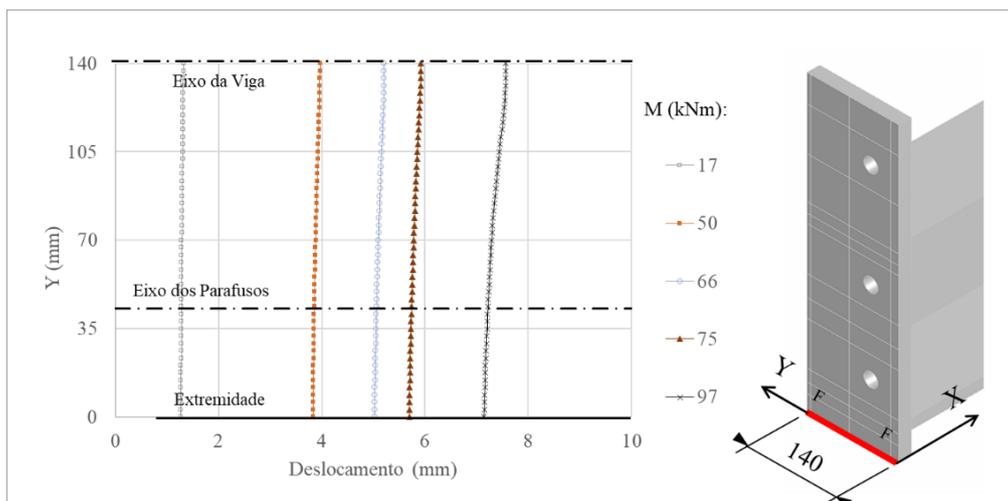


Figura 4-24 –Deslocamentos na chapa de extremidade na seção horizontal F-F.

Na Figura 4-24 observa-se que o tipo de ruptura da ligação parafusada em análise é dada através do segundo modo de ruptura, no qual os parafusos e a chapa de extremidade rompem. Este fato é explicado em função do deslocamento máximo se dar no eixo da viga e o mínimo na extremidade. Estes modos de rupturas serão demonstrados no item 4.2.5.

Já na seção F-F, ilustrada na Figura 4-24, a variação de deslocamento na chapa de extremidade com momento fletor de 66 kNm é menor que 5mm que é justificado pelo aumento da rigidez nessa região em função da alma dos perfis da viga e do pilar. Nas Figura 4-25 e Figura 4-26 são apresentados os deslocamentos relativos entre mesa do pilar e chapa de extremidade, com o objetivo de confirmar as conclusões anteriores e analisar possíveis efeitos alavanca criados na região dos parafusos.

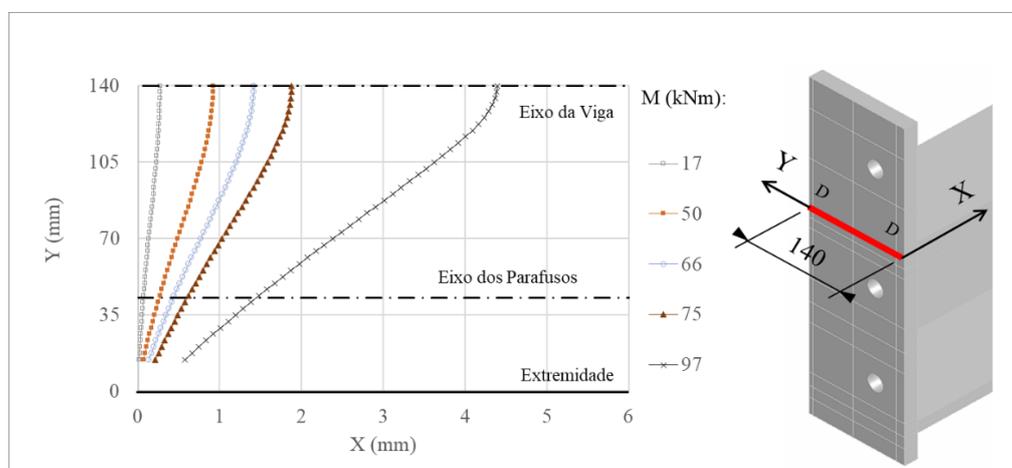


Figura 4-25 –Deslocamentos relativos entre chapa de extremidade e mesa do Pilar na seção D-D.

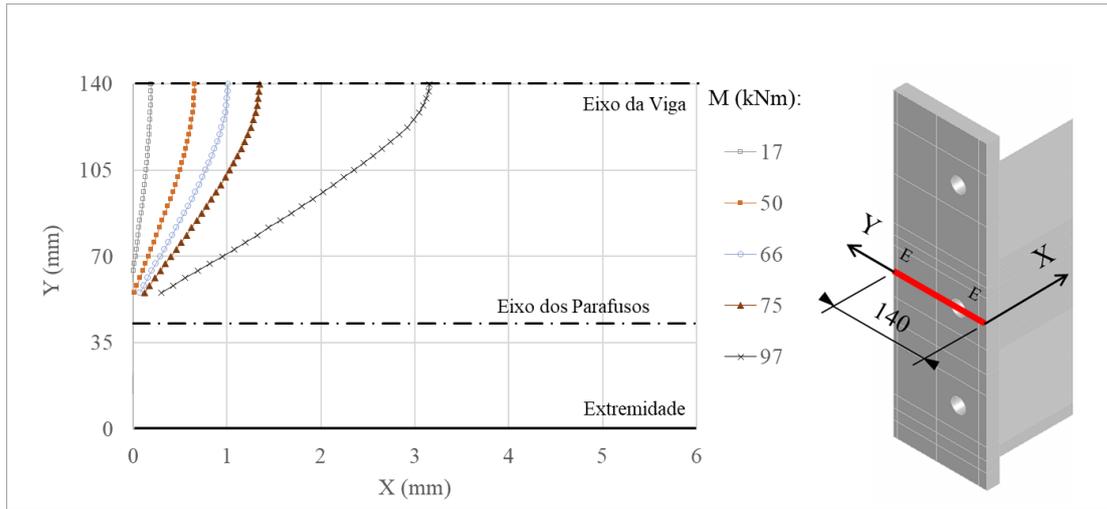


Figura 4-26 –Deslocamentos relativos entre Chapa de extremidade e Mesa do Pilar na seção horizontal E-E.

Observou-se na Figura 4-25, e mais claramente na Figura 4-26 que da extremidade da mesa do pilar até a região dos parafusos, tem-se o contato entre a mesa do pilar e a chapa de extremidade (deslocamento relativo igual a zero). Assim surgem as forças provenientes do chamado “efeito alavanca”. Ainda assim, foi elaborada uma comparação entre modelos com diferentes diâmetros de parafusos e chapas de extremidade, apresentados na Figura 4-27 e Figura 4-28, respectivamente.

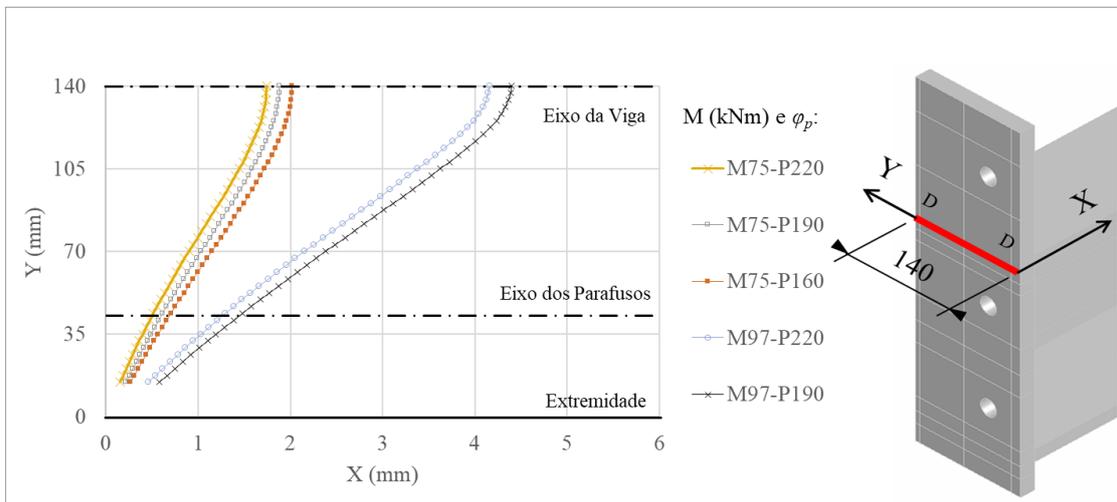


Figura 4-27 – Influência do diâmetro do parafuso φ_p nos deslocamentos relativos entre chapa de extremidade e mesa do Pilar na seção horizontal D-D.

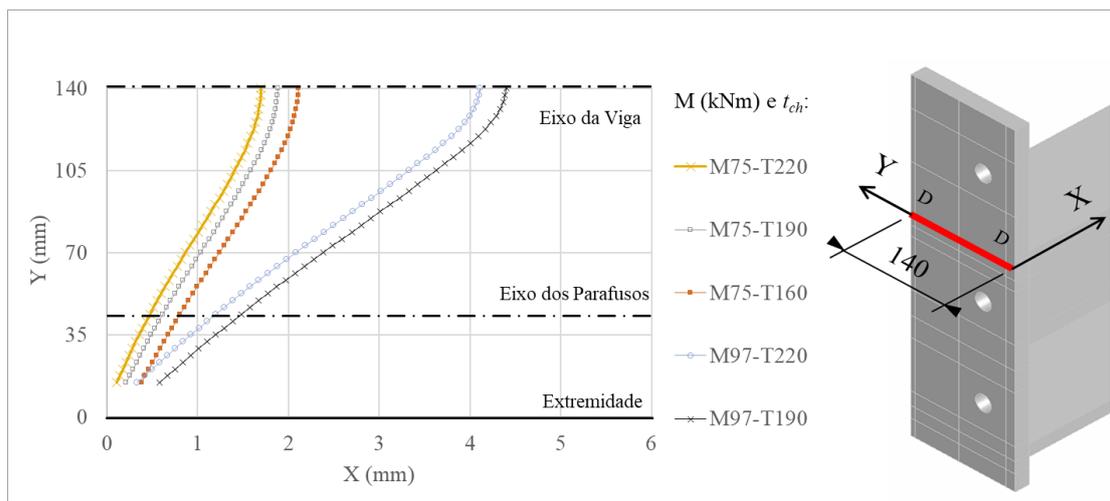


Figura 4-28 – Influência da espessura da chapa de extremidade t_{ch} nos Deslocamentos relativos entre Chapa de extremidade e Mesa do Pilar na seção horizontal D-D.

Na Figura 4-28 observa-se que a redução da espessura da chapa de extremidade t_{ch} possui maior impacto no aumento dos deslocamentos da chapa de extremidade, quando comparado com a redução do diâmetro de parafuso ϕ_p . Este impacto é demonstrado através das maiores distâncias entre as curvas na Figura 4-28 que a distância entre curvas na Figura 4-27. Além disso, ambas as figuras mostram que, quanto maior os esforços na ligação, maior o impacto da alteração de ambos os parâmetros.

Na Figura 4-29 é apresentada a distribuição de tensões normais σ_y na chapa de extremidade para o modelo 2DP285-T160-P160, o qual possui menor espessura de chapa de extremidade t_{ch} .

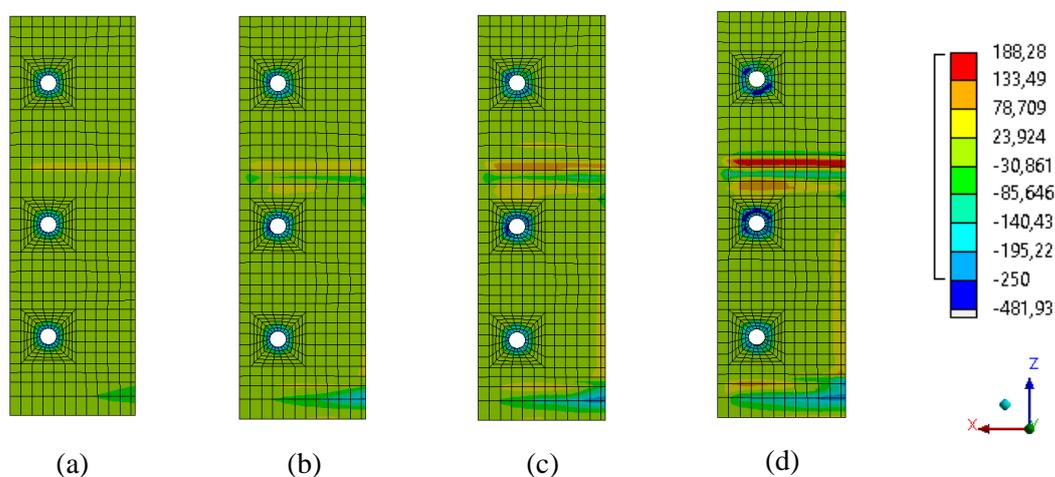


Figura 4-29 – Tensões σ_y na chapa de extremidade (MPa), para momentos (kNm) de: (a) M17, (b) M50, (c) M75 e (d) M106 para o modelo 2DP285-T160-P160

Na Figura 4-29 observa-se a complexidade da distribuição de tensões nas regiões em torno dos parafusos das ligações aparafusadas. Com isso são geradas as forças conhecidas na literatura como “*prying actions*”, as quais são responsáveis pelo efeito alavanca das ligações aparafusadas com chapa de extremidade. Além disso, observa-se também, o que foi apresentado anteriormente na Figura 4-10 graficamente, que a linha neutra se localiza abaixo da linha de eixo do perfil da viga. Portanto, a região onde se tem à compressão da chapa de extremidade na mesa do pilar encontra-se basicamente na área inferior da chapa de extremidade. Esse resultado se deve ao fato que a rigidez gerada pela geometria e a disposição dos parafusos é insuficiente comparado à rigidez do perfil, ou seja, o perfil estaria superdimensionado para a ligação em estudo aplicada no vão de 1m analisado.

4.2.4. Análise dos Parafusos

O comportamento das ligações aparafusadas com chapa de extremidade se dá, principalmente, em função das condições de contato entre os componentes. Com grande importância, inclui-se o comportamento dos parafusos que estão em contato, tanto com a chapa de extremidade como com a mesa do pilar.

De maneira geral, nos métodos analíticos conhecidos sabe-se que hipóteses básicas são adotadas para o dimensionamento das ligações e não é considerada a complexidade dos parafusos. Um exemplo, é a consideração que as forças de tração da ligação são transmitidas apenas pela mesa do perfil da viga, e que a distribuição das forças de tração se dá igualmente a todos parafusos da região tracionada.

Outro ponto de fundamental importância nas ligações aparafusadas com chapa de extremidade é a consideração de que os parafusos são solicitados apenas à tração na direção do seu eixo longitudinal, ao passo que as solicitações de flexão a que estão sendo submetidas são desconsideradas.

Na Tabela 4-2 são apresentados os resultados da distribuição de tensão longitudinal nos parafusos para os modelos 2DP-T160-P160 e 2DP-T160-P220 que possuem espessura de chapa de extremidade de 16mm, parafusos de diâmetro 16 e 22mm respectivamente. As tensões são analisadas desde o estado final da protensão dos parafusos até esforços de momento de 106 kNm. Na Tabela 4-2, observa-se que, a medida que as solicitações aumentam, as fibras superiores e inferiores do fuste dos

parafusos apresentam uma variação no valor da tensão longitudinal. Como neste estudo não estão sendo considerados enrijecedores no pilar, como foi considerado em Sherbourne, 1994, os deslocamentos dos parafusos acompanham as deformações da mesa do pilar. Portanto a deformação localizada do fuste do parafuso fica reduzida.

Na Tabela 4-2 fica claro que há grande concentração de tensões na região das extremidades do fuste, principalmente na região em contato com a porca. No método dos elementos finitos, sabe-se que em mudança brusca de direção é normal ocorrerem concentrações de tensão. Porém, nesta situação é explicada pela importância da utilização de arruelas, com o objetivo de diminuir a concentração de tensões, assim como distribuir melhor os esforços gerados devido ao torque inicial dos parafusos.

Para facilitar o entendimento e a verificação dos resultados, serão apresentados os gráficos separadamente para cada modelo numérico da Tabela 4-2. Além disso, os resultados serão comparados com as hipóteses básicas consideradas analiticamente, onde é considerada a mesma força de tração para cada parafuso, resultante do binário de forças gerado pelo momento fletor resultante na ligação.

Na Figura 4-30 observa-se que a força de tração nos parafusos internos ao perfil da viga, no seu maior valor é aproximadamente 25% maior que a força de tração nos parafusos externos.

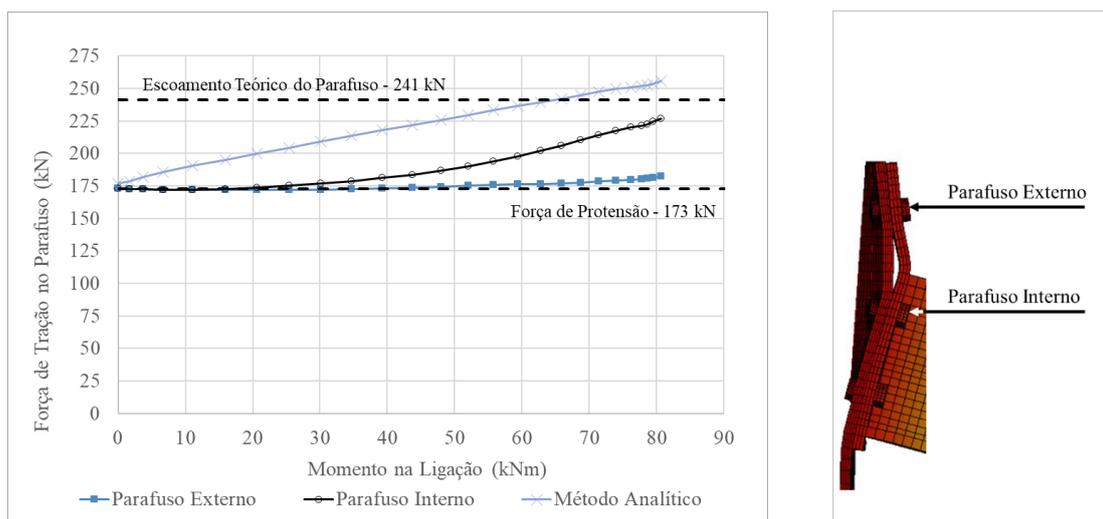
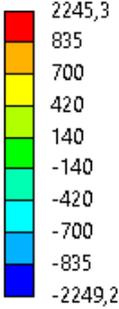
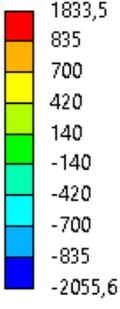
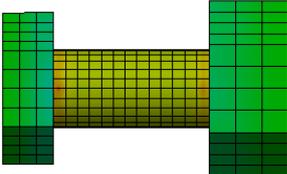
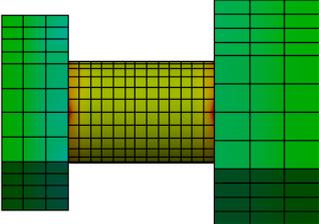
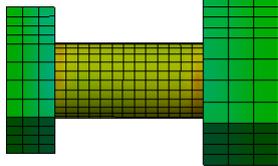
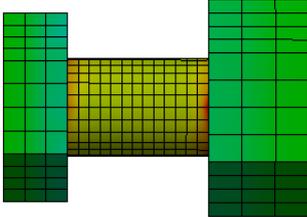
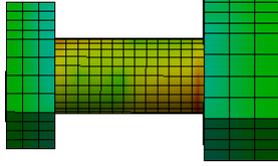
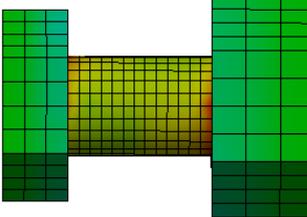
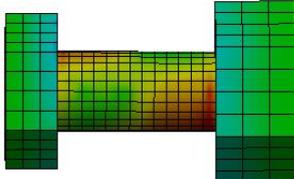
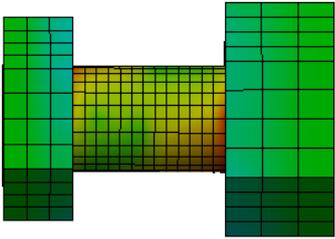
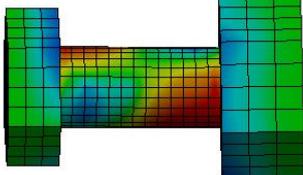
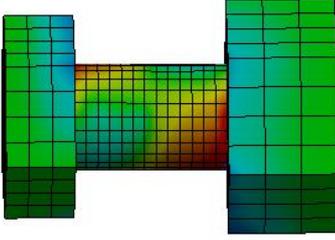


Figura 4-30 –Força de tração nos parafusos externo e interno para o modelo 2DP285-T160-P220.

Tabela 4-2 – Distribuição de tensões normais nos parafusos.

		2DP-T160-P160 PARAFUSO EXTERNO	2DP-T160-P220 PARAFUSO EXTERNO
Tensões Normais σ_y (MPa)		 <p>2245,3 835 700 420 140 -140 -420 -700 -835 -2249,2</p>	 <p>1833,5 835 700 420 140 -140 -420 -700 -835 -2055,6</p>
Momento na Ligação (kNm)	0 Final da Protensão		
	M17		
	M50		
	M75		
	M106		

Esta diferença é explicada em função dos parafusos internos estarem mais próximos a mesa superior do perfil da viga do que os parafusos externos. Isto mostra que, dependendo da disposição dos parafusos, as hipóteses básicas consideradas analiticamente não são aplicáveis, como é o caso das ligações estudadas neste trabalho. Outro ponto que pode ser analisado é que a flexibilidade da mesa do pilar provoca um aumento antecipado das forças de tração nos parafusos, no caso de enrijecimento do pilar, pode-se ter uma postergação do aumento das forças de tração nos parafusos, o que provoca um aumento na resistência da ligação parafusada, porém este parâmetro não está sendo analisado neste trabalho. Portanto, tem-se que disposição ou distância entre parafusos tem grande impacto na distribuição de esforços do mesmo, assim como na resistência das ligações aparafusadas com chapa de extremidade.

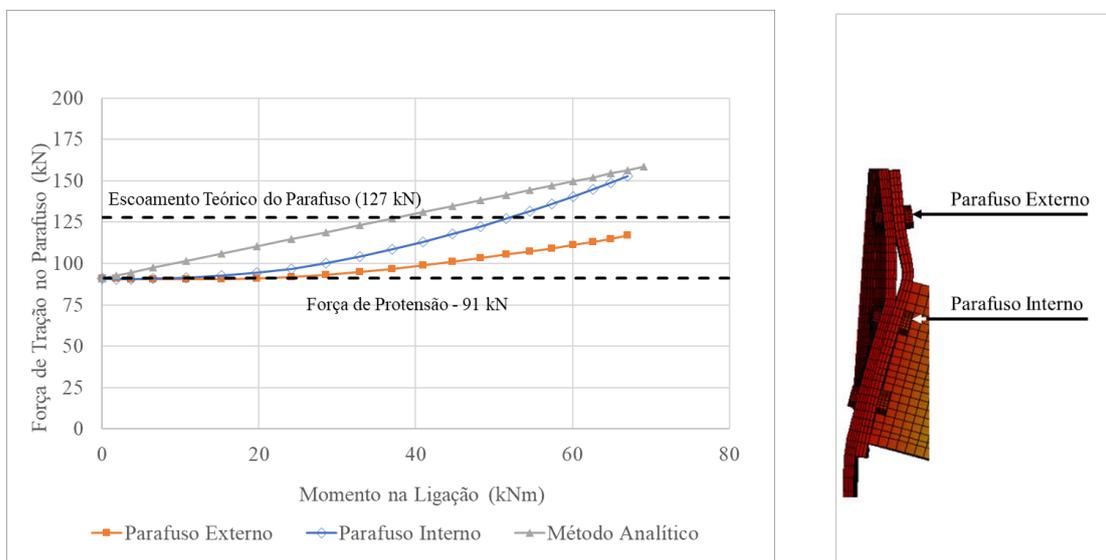


Figura 4-31 –Força de tração nos parafusos externo e interno para o modelo 2DP285-T160-P160.

Em relação as Figura 4-30 e Figura 4-31 observa-se que no método analítico, quando acrescentada a força de protensão inicial dos parafusos, a força de tração resultante dessa hipótese teórica se aproxima das forças de trações obtidas nos modelos numéricos, mesmo assim, a diferença entre os valores para parafusos externos e internos deve ser levada em consideração em função da disposição dos parafusos.

Comparando a Figura 4-31 com a Figura 4-30, observa-se que há redução das forças de tração nos parafusos para os mesmos valores de momento fletor. Isso é resultado da diminuição da rigidez dos parafusos. Observa-se que uma redução de duas

classes de diâmetros comerciais de parafusos, ou seja, de 22mm para 16mm, provoca uma redução de 33% do momento resistente. Para os modelos com parafusos de 22mm de diâmetro, o momento resistente é de 90kNm, já nos modelos com diâmetros de parafusos de 16mm, esse valor reduz para 60kNm.

Portanto, o aumento da resistência da ligação parafusada com chapa de extremidade através de aumento do diâmetro do parafuso, em termos de custo benefício, é altamente recomendado, tendo em vista que o preço dos parafusos é semelhante.

4.2.5. Rigidez da ligação: curva momento versus rotação e Eurocode

A metodologia utilizada para verificação da rigidez da ligação através da capacidade resistente versus a rigidez rotacional das ligações aparafusadas com chapa de extremidade demonstrada no item 5 do Eurocode (2010) foi apresentado no item 2.5. O Eurocode (2010) prevê verificações de todos os componentes da ligação parafusada, assim pode-se ter claramente a análise dos parafusos, da chapa de extremidade e do pilar de apoio separadamente ou em conjunto.

Para a medição da rotação da viga foram executadas medições de deslocamentos verticais da viga em seções distantes da chapa de extremidade de valor $H/2$, H e $3H/2$; sendo H a altura da seção do perfil da viga. Já as rotações do pilar foram medidas dividindo o deslocamento horizontal no eixo do pilar pela altura do perfil da viga, conforme ilustrado na Figura 4-32.

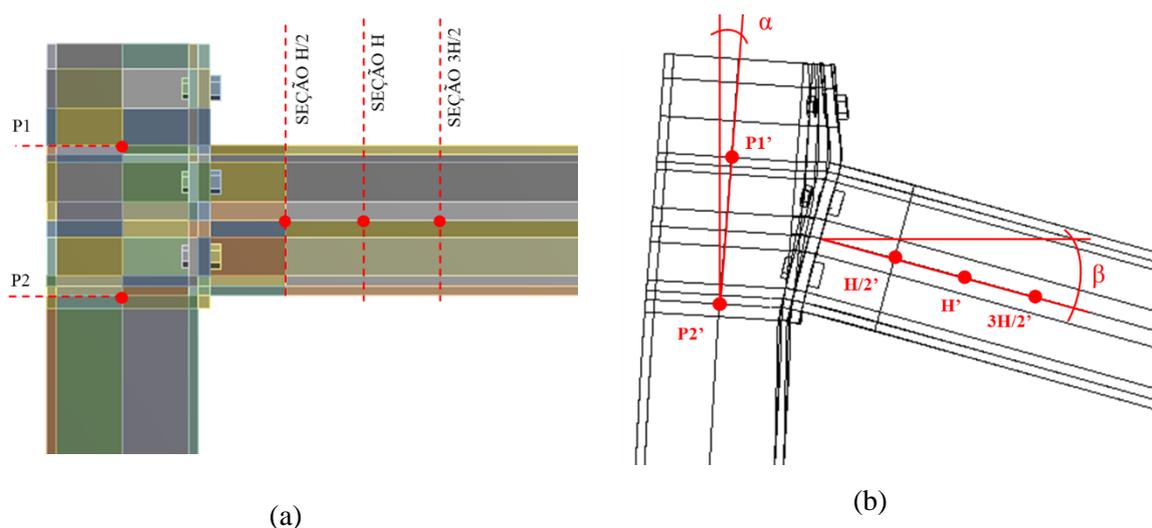


Figura 4-32 – Medição da rotação da ligação: (a) posição dos pontos da estrutura não deformada e (b) pontos nas posições deformadas

As medições executadas foram comparadas com o formato de medição sugerido por Bursi & Jaspart, 1997, onde são utilizados os deslocamentos da chapa de extremidade. Esta comparação é ilustrada na Figura 4-33.

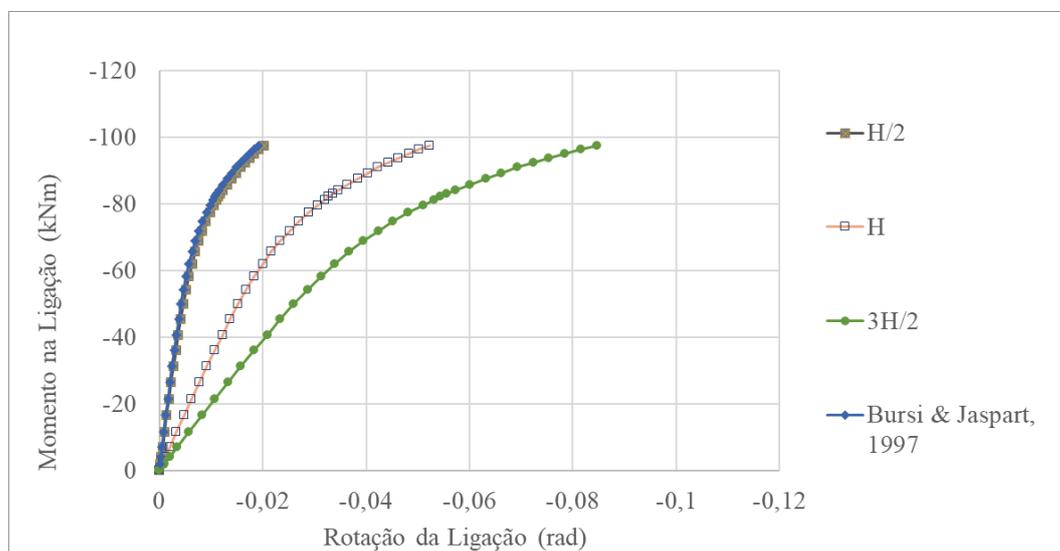


Figura 4-33 – Gráfico momento *versus* rotação do modelo 2DP285-T190-P190 para definição da seção para medição da rotação da ligação.

Analisando os gráficos da Figura 4-33, observa-se que o ponto para medição da rotação da viga deve ser na seção H/2, portanto nas próximas análises de resultados, todas rotações de vigas foram medidas na seção H/2 de acordo com os mesmos valores sugeridos por Bursi & Jaspart, 1997. Cabe salientar que, na sugestão de Bursi & Jaspart, 1997 é acrescentada a rigidez rotacional do parafuso, pois a mesa do pilar é enrijecida. Neste estudo, não se tem enrijecedores no pilar, portanto o parafuso acompanha a deformação da mesa do pilar. Com isso a parcela da rotação em função dos parafusos é reduzida, o que faz com que as curvas da Figura 4-33 sejam coincidentes.

Depois disso, as curvas de rigidez momento versus rotação de todos modelos deste estudo foram comparadas com a classificação das ligações conforme seção 5.2.2.5 do Eurocode (2010), onde as ligações são classificadas em flexível, semirrígidas e rígida. A classificação é baseada no vão da viga na qual será aplicada a ligação estudada, assim como no momento de inércia da seção da viga, nos contraventamentos envolvidos no pórtico, e no módulo de elasticidade do aço dos perfis, conforme já explicado no item 2.3.3. Essa comparação, para vãos de 4m de comprimento, foi apresentada em gráficos, de maneira crescente em relação a rigidez, iniciando pelo

modelo numérico com ligação mais flexível (DP120-T160-P160) ao modelo com ligação mais rígida (2DP285-T220-P220). Os resultados para os modelos com distância entre parafusos igual 120mm (DP120) estão apresentados na Figura 4-34.

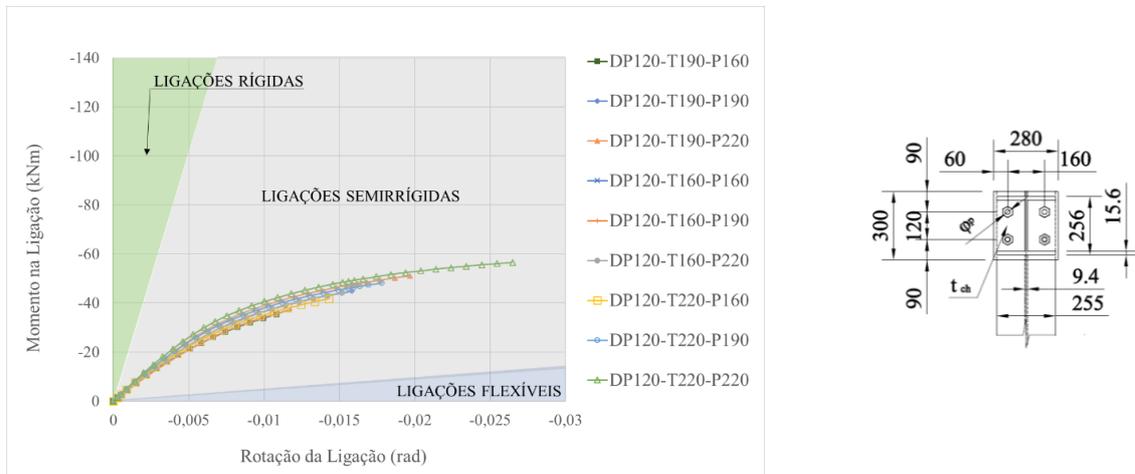


Figura 4-34 – Gráfico momento X rotação das ligações do tipo DP120.

Observa-se na Figura 4-34, que os modelos numéricos do tipo *DP120* apresentam um comportamento muito próximo a ligações flexíveis, segundo o Eurocode (2010), mas ainda assim resistem a uma parcela de momento fletor, o que na prática, muitas vezes é desconsiderado. Portanto, mesmo em se tratando de ligações aparafusadas flexíveis, esta possui uma parcela de rigidez que pode colaborar com a rigidez global da estrutura. Este impacto no comportamento global da estrutura não será discutido neste trabalho.

Na Figura 4-35 são apresentados os gráficos momento versus rotação para os modelos numéricos do tipo DP285.

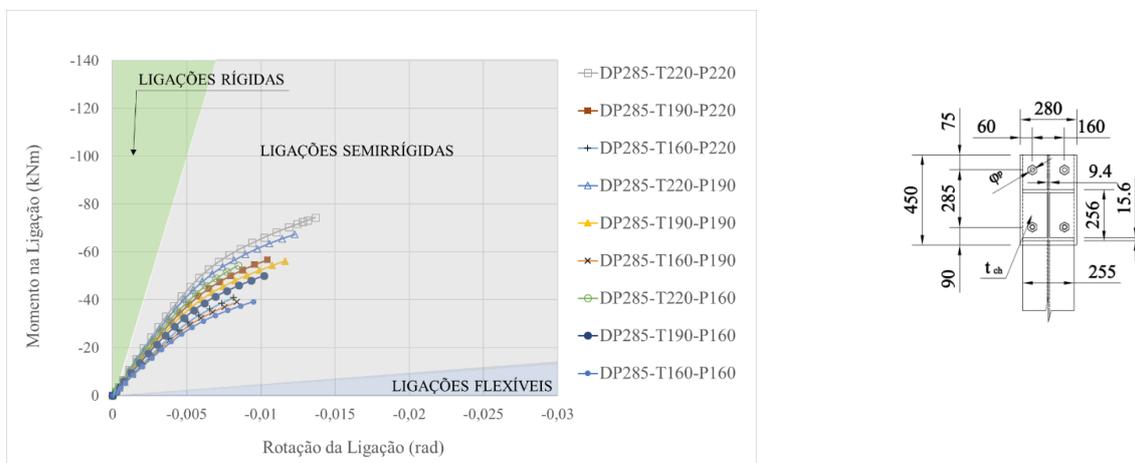


Figura 4-35 – Gráfico momento X rotação das ligações do tipo DP285.

Na Figura 4-36 observa-se um aumento de rigidez em função da primeira linha de parafusos estar acima da mesa superior da viga, suportando assim a esforços de tração maior que os modelos numéricos apresentados anteriormente. Com o aumento da rigidez nas ligações aparafusadas com chapa de extremidade, fica claro que o impacto dos parâmetros analisados na rigidez da ligação aumenta. Com isso fica claro que, para os modelos do tipo “DP-285”, a redução de uma espessura t_{ch} comercial de chapa de extremidade tem um impacto muito maior do que a redução de um diâmetro φ_p comercial de parafuso. Portanto, a diminuição da espessura de chapa de extremidade deixa a ligação parafusada mais flexível do que quando se reduz o diâmetro dos parafusos. Na Figura 4-36 são demonstrados os gráficos para os modelos numéricos com mais de uma linha de parafuso trabalhando à tração, com distância entre linhas de parafusos d_p igual 120 e 165mm.

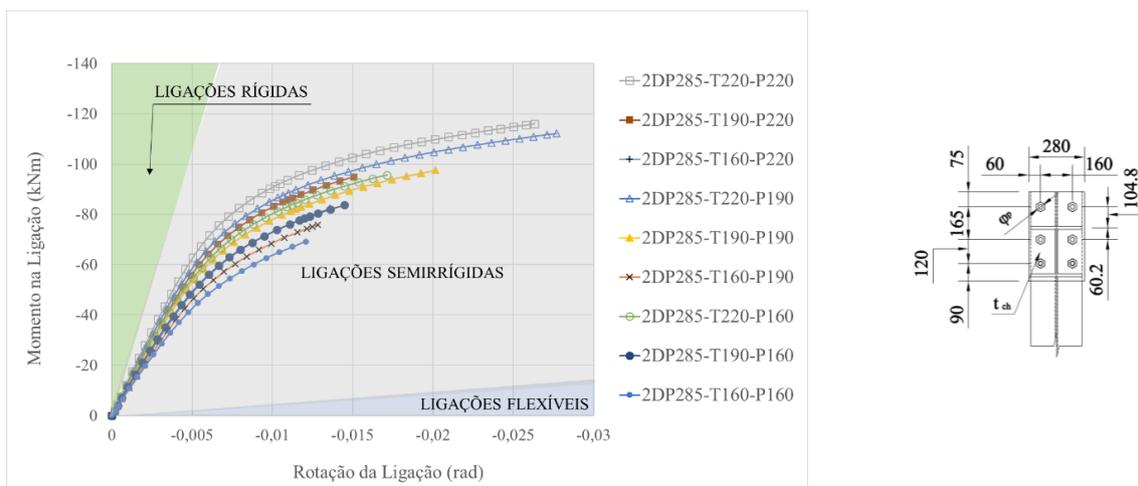


Figura 4-36 – Gráfico momento X rotação das ligações do tipo 2DP285.

Na Figura 4-36 observa-se um aumento de rigidez próximo a 20% quando comparado com os gráficos da Figura 4-35. Já quando comparados com os modelos numéricos de distância entre parafusos d_p de 120mm a rigidez é o dobro apresentado na Figura 4-34. Mesmo assim, os 27 modelos analisados neste trabalho comportam-se como ligações semirrígidas.

Portanto para ligações aparafusadas com chapa de extremidade deve-se tomar muito cuidado com as classificações como rígida ou flexível, nestes casos, por exemplo, ambas as considerações de ligações não demonstrariam o real comportamento da conexão. Outra possibilidade seria alterar a disposição dos parafusos da ligação, tendo

em vista que a disposição estudada possui rigidez muito pequena quando comparado com a rigidez do perfil da viga. Outra opção, seria reduzir o perfil da viga para uma seção mais adequada a rigidez dos componentes da ligação. Pois nos modelos numéricos estudados obteve-se momentos máximos nas ligações entre 40 e 90kNm quando o momento plástico da viga W250x80 estudada neste trabalho é de 380 kNm. Portanto, a rigidez dos componentes da ligação parafusada com chapa de extremidade, assim como a distribuição dos parafusos na conexão devem resultar em rigidez maior ou igual a rigidez do perfil da viga para se ter uma ligação parafusada com chapa de extremidade adequadamente dimensionada.

De maneira geral, o aumento da espessura da chapa de extremidade t_{ch} provoca uma diminuição no ângulo de rotação da viga, consequentemente um aumento de rigidez. O mesmo acontece com o aumento do diâmetro dos parafusos φ_p . Para possibilitar a medição desses impactos, a seguir serão comparadas as rigidezes dos modelos numéricos variando a espessura da chapa de extremidade t_{ch} e os diâmetros de parafusos φ_p separadamente. Inicialmente serão comparados os modelos com duas linhas de parafusos trabalhando à tração (modelos do tipo “2DP285”) e distância entre parafusos d_p de 285mm. Posteriormente, serão analisadas as influências dos parâmetros espessura de chapa de extremidade t_{ch} e diâmetros de parafusos φ_p em modelos com distância entre parafusos d_p de 120mm (modelos do tipo “DP120”).

Na Figura 4-37 são apresentados os gráficos de momento versus rotação dos modelos 2DP285-P220, variando somente a espessura da chapa de extremidade.

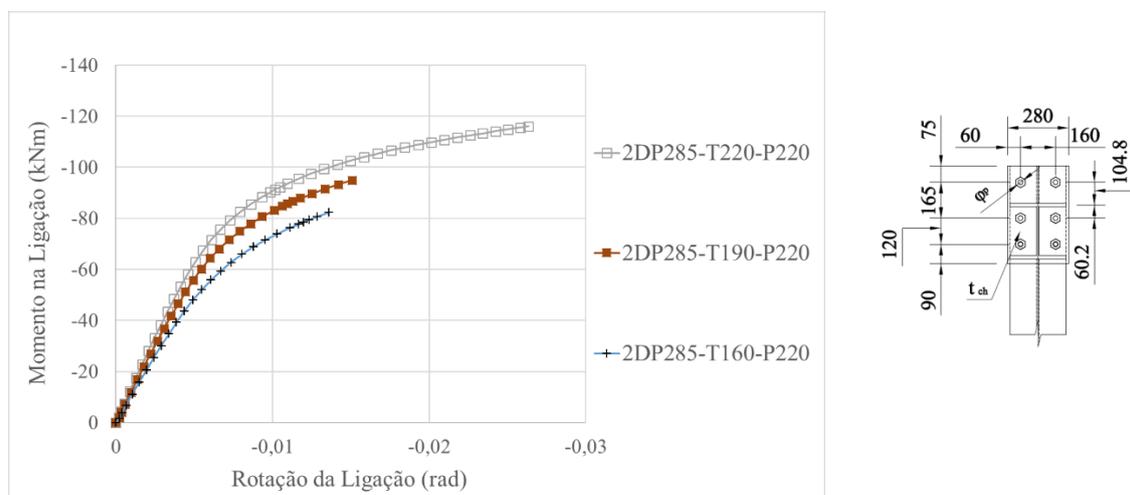


Figura 4-37 – Gráfico com a variação da espessura da chapa de extremidade t_{ch} nos modelos 2DP285-T-P220.

Pode-se observar que o impacto da redução da espessura da chapa de 22mm para 19mm na rigidez da ligação é de 15%. O mesmo impacto é observado quando se mede a rotação da viga no modelo com parâmetro t_{ch} igual a 19mm e compara-se com o modelo com espessura de chapa de extremidade de 16mm.

Na Figura 4-38 são apresentados os gráficos momento versus rotação para os modelos 2DP285-T220, variando somente o parâmetro diâmetro de parafuso ϕ_p .

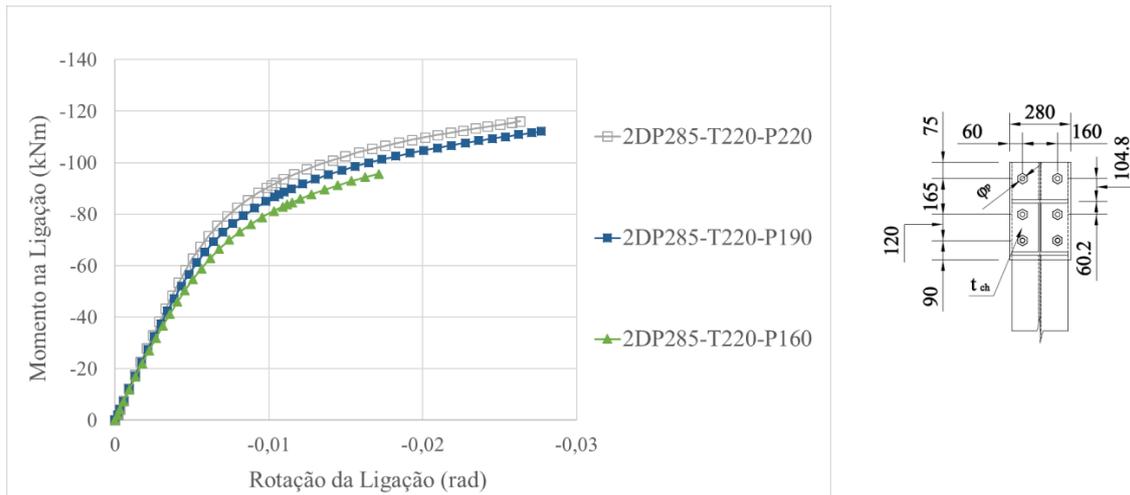


Figura 4-38 – Gráfico com a variação do diâmetro de parafuso ϕ_p nos modelos 2DP285-T220-P.

Observa-se que a redução do diâmetro dos parafusos de 22mm para 19mm, provoca a redução da rigidez em torno de 7%, assim como a diferença obtida quando compara a rigidez das ligações com diâmetro de parafusos 19 e 16mm. Portanto, conclui-se que o impacto do diâmetro dos parafusos na rigidez das ligações aparafusadas com a disposição de parafusos proposta pelos modelos do tipo “2DP285” é a metade do impacto provocado pela espessura da chapa de extremidade t_{ch} .

Na Figura 4-37 são apresentados os gráficos de momento versus rotação dos modelos numéricos DP120-P220, variando somente a espessura da chapa de extremidade.

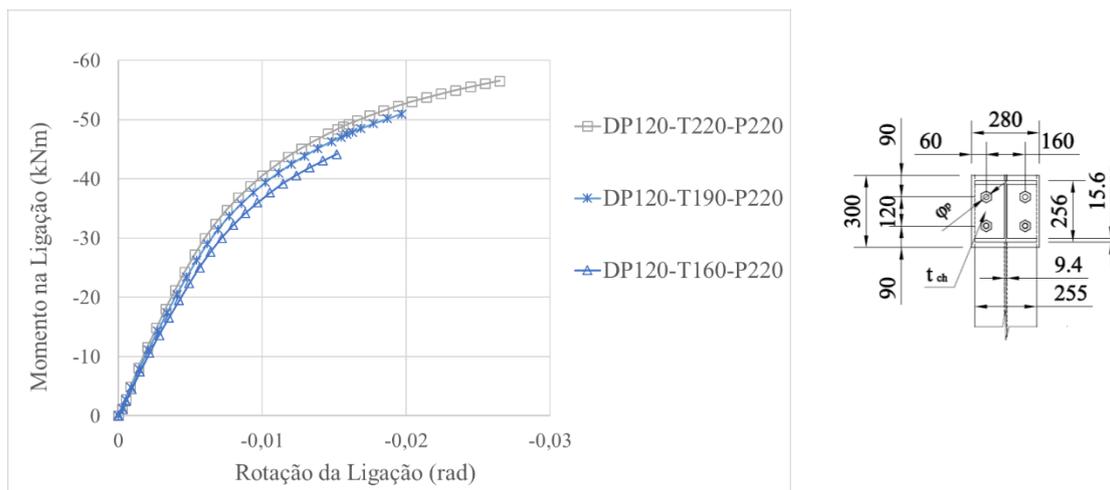


Figura 4-39 – Gráfico com a variação da espessura da chapa de extremidade t_{ch} nos modelos DP120-T-P220.

Observa-se que o impacto da redução da espessura da chapa de 22mm para 19mm na rigidez da ligação é mínimo, quando comparado aos resultados apresentados na Figura 4-37. Por outro lado, quando comparada a a rigidez da ligação no modelo com parâmetro t_{ch} igual a 19mm com o modelo com espessura de chapa de extremidade de 16mm, a rigidez reduz em torno de 6%.

Na Figura 4-40 são apresentados os gráficos momento versus rotação para os modelos DP120-T220, variando somente o parâmetro diâmetro de parafuso ϕ_p .

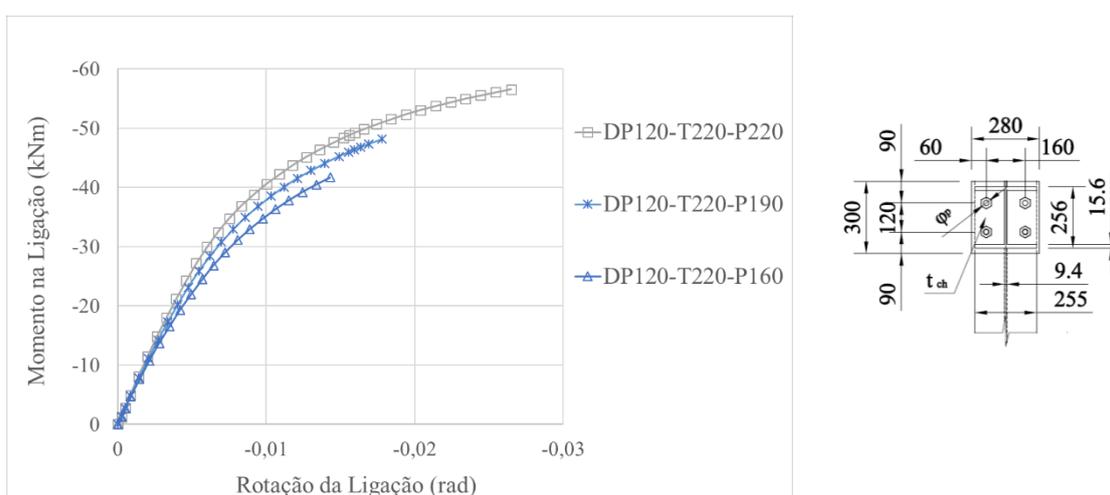


Figura 4-40 – Gráfico com a variação do diâmetro de parafuso ϕ_p nos modelos DP120-T220-P.

Observa-se que a redução do diâmetro dos parafusos de 22mm para 19mm, provoca a redução da rigidez em torno de 6%, assim como a diferença obtida quando comparada a rigidez das ligações com diâmetro de parafusos 19 e 16mm. Portanto, conclui-se que o impacto do diâmetro dos parafusos na rigidez das ligações

aparafusadas com a disposição de parafusos proposta pelos modelos do tipo “DP120” é maior que a influência da espessura da chapa de extremidade t_{ch} .

Para comparar os resultados em relação as classificações das ligações como semirrígidas segundo o Eurocode (2010), a seguir apresentam-se os gráficos de momento versus rotação resultantes das análises numéricas comparados com os gráficos traçados analiticamente baseado no momento resistente e na rigidez rotacional sugeridas pelos itens 6.1.2.2 e 6.1.2.3 do Eurocode (2010). Na Figura 4-41 é apresentada a comparação citada para o modelo DP285-T190-P190.

Lembrando, que segundo o Eurocode (2010), a ligação tende a ter um comportamento elástico linear até 2/3 do momento resistente da ligação. Após este limite, o comportamento passa a ser não linear, devido à plasticidade dos materiais dos componentes da ligação. Além disso, deve-se lembrar que os materiais da chapa de extremidade, dos parafusos e dos perfis de aço são diferentes, resultando em um comportamento plástico complexo.

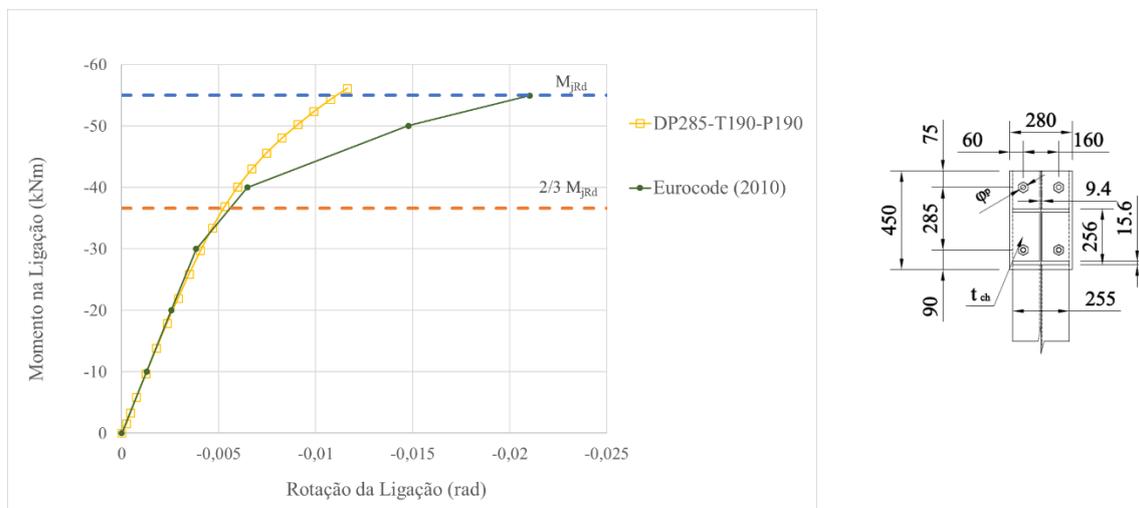


Figura 4-41 – Gráfico momento *versus* rotação comparativo do modelo DP285-T190-P190 com o Eurocode (2010).

Observa-se na Figura 4-41 que na análise numérica, resulta em um gráfico linear até o início da plasticidade, portanto, o comportamento é dado de maneira elástica. A partir de valores para momento da ordem de 2/3 do momento resistente da ligação, inicia-se o comportamento plástico da ligação. A diferença encontrada pode ser explicada em função das características dos materiais, os quais foram utilizados dados

de referência bibliográfica. A seguir, na Figura 4-42 são apresentados os resultados para o modelo 2DP285-T190-P190

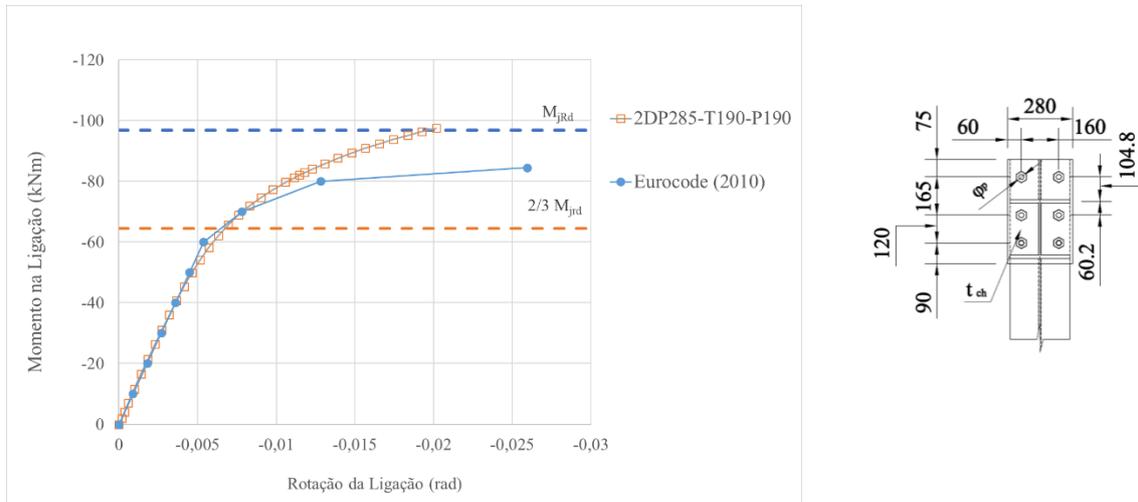


Figura 4-42 – Gráfico momento *versus* rotação comparativo do modelo 2DP285-T190-P190 com o Eurocode (2010).

Observa-se um comportamento semelhante ao apresentado na Figura 4-41, ou seja, inicialmente, até $2/3$ do momento resistente da ligação, observa-se um comportamento elástico linear, em seguida inicia o comportamento elastoplástico e por fim atingindo o escoamento dos materiais, através do comportamento plástico. Deve-se ressaltar que o acréscimo de dois parafusos à tração provoca um aumento de 50% do momento resistente da ligação parafusada. Portanto, como sugerido anteriormente, os modelos numéricos com maior rigidez são mais bem aproveitados que os demais. Já em relação a influência dos parâmetros espessura de chapa de extremidade t_{ch} e diâmetro de parafusos φ_p , observou-se uma grande diferença quando comparados qual o impacto de cada parâmetro na rigidez das ligações analisadas neste trabalho.

Nas Figura 4-43 e Figura 4-44 observa-se a influência da variação da espessura da chapa de extremidade t_{ch} e diâmetro de parafusos φ_p nos modelos do tipo DP285 e DP120, respectivamente.

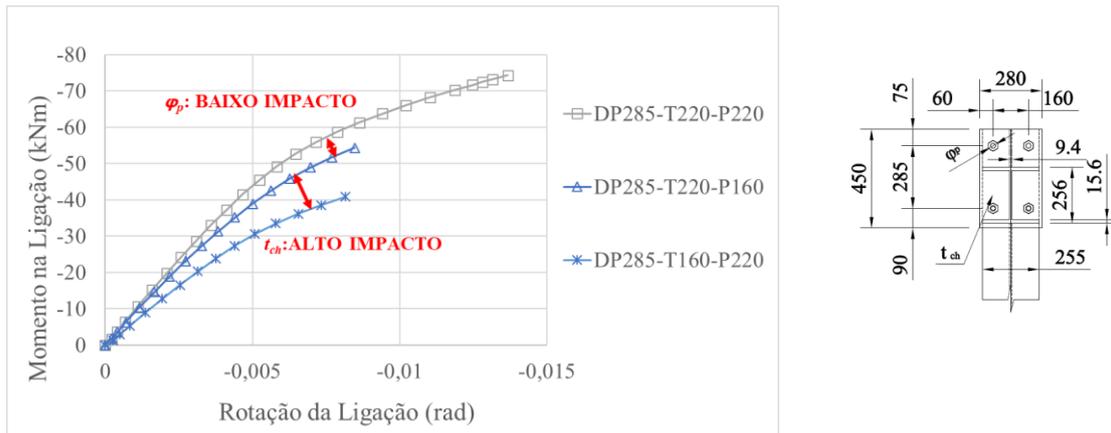


Figura 4-43 Influência dos parâmetros t_{ch} e ϕ_p no gráfico momento *versus* rotação nos modelos DP285.

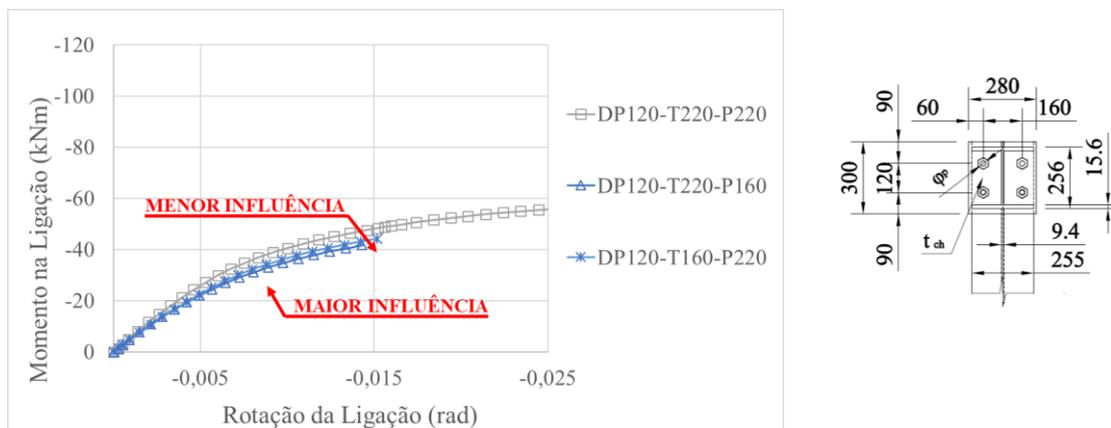


Figura 4-44 Influência dos parâmetros t_{ch} e ϕ_p no gráfico momento *versus* rotação nos modelos DP120.

Anteriormente foram comparadas as curvas momento *versus* rotação dada pela análise dos modelos numéricos com a curvas sugeridas pelo Eurocode (2010). Além disso, nas análises de distribuição de tensões dos parafusos, evidenciou-se que os modelos estão coerentes com o apresentado no Eurocode (2010). Na Figura 4-45 observa-se os modos de falha proposto pelo Eurocode (2010).

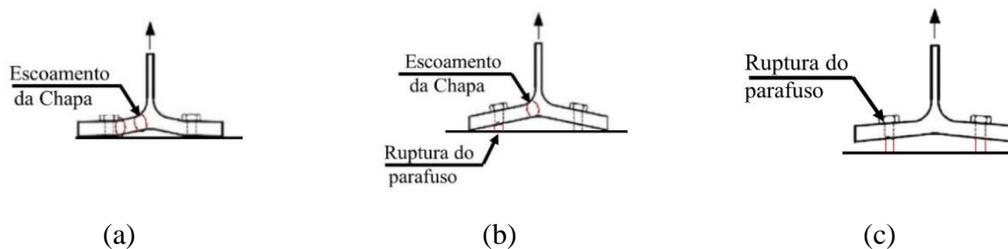


Figura 4-45 – Modos de de falha: (a) modo 1 (b) modo 2 e (c) modo 3.

Com isso, devido às características dos modelos analisados, assim como perfil da seção do pilar e da viga, observaram-se diferentes modos de falha. Portanto, constatou-se que nenhum dos modelos atinge o escoamento devido exclusivamente a ruptura dos parafusos, conforme observa-se na Tabela 4-3.

Tabela 4-3 – Modos de falha dos modelos numéricos.

Modelo	<i>LINHA DE PARAF.</i>	<i>MODO DE FALHA</i>
DP285-T160-P160	1	CHAPA
DP120-T220-P220	2	CHAPA +PARAFUSO
2DP285-T160-P160	1	CHAPA
	2	CHAPA +PARAFUSO
2DP285-T220-P220	1	CHAPA
	2	CHAPA +PARAFUSO

De maneira geral, os resultados das análises de elementos finitos estão coerentes com os resultados normativos esperados. As diferenças encontradas na zona plástica das curvas momento versus rotação das análises numéricas podem ter causas como características dos materiais utilizados no Eurocode (2010) são simplificadas, ou por outro lado, na análise de elementos finitos devem ser utilizadas características de materiais ensaiados em laboratório, podendo se tratar de sugestões para trabalhos futuros.

Portanto, no capítulo 5 serão apresentadas as conclusões finais das análises e resultados apresentados, assim como a sugestão para trabalhos futuros.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O objetivo principal deste trabalho foi a análise paramétrica da rigidez de ligações aparafusadas de aço, qual foi dada comparando os conceitos normativos utilizados no Eurocode-3 (2010) com os modelos numéricos analisados. Portanto, concluiu-se que os modelos tridimensionais das ligações parafusadas com chapa de extremidade apresentaram um comportamento próximo ao esperado para ligações semirrígidas.

Durante a elaboração da geometria dos modelos numéricos, observou-se a importância do modelo geométrico nas análises de elementos finitos. Concluiu-se que, a definição de sub-regiões nos componentes da ligação facilita a geração de uma malha com elementos mais uniformes, portanto melhor a qualidade da malha gerada. Além disso, mais rapidamente o refinamento da malha em pontos de concentração de tensões é executado, o que faz com que a análise demande um esforço computacional menor, levando a resultados mais satisfatórios.

Depois de concluído o modelo geométrico e definida a malha de elementos finitos, observou-se que a metodologia utilizada de aplicação das forças de protensão nos parafusos mostrou-se adequada ao comportamento dos parafusos. Com isso, as simplificações dos problemas de contato, através do Método de Lagrange Aumentado, utilizando forças de protensão mínima sugerida pela NBR8800 (2008) e o coeficiente de atrito 0,2 mostraram-se coerentes, aproximando o comportamento dos modelos numéricos as curvas de rigidez sugeridas pelo Eurocode (2010). Por outro lado, observou-se que reduzindo as forças de protensão mínima dos parafusos sugerida pela NBR8800 (2008), o coeficiente de atrito passa a ter maior impacto nas ligações aparafusadas de aço. Dessa maneira, surge uma comparação que pode ser analisada em trabalhos futuros, forças de protensão mínimas dos parafusos versus coeficiente de atrito entre regiões de contato.

Analisando os três tipos de geometrias analisadas, mostrou-se que, mesmo com a disposição dos parafusos dada entre a mesa superior e inferior do perfil da viga, a ligação parafusada com chapa de extremidade ainda assim apresenta uma rigidez considerável. Ao passo que nas análises teóricas simplificadas esta rigidez não é considerada, isto é, simplifica-se que a ligação parafusada de aço com parafusos

localizados entre as mesas superior e inferior do perfil da viga é uma rótula perfeita. Portanto, a depender do grau de complexidade e magnitude dos esforços do projeto de estruturas de aço, esta rigidez pode ser considerada. Com isso, o dimensionamento das estruturas de aço, com ligações aparafusadas com chapa de extremidade, torna-se mais econômico do ponto de vista capacidade versus utilização dos perfis.

Ainda em relação aos parafusos das ligações com esta geometria, constatou-se que a variação do diâmetro dos parafusos φ_p tem maior impacto em ligações aparafusadas com chapa de extremidade de menor rigidez, quando comparado com o impacto do parâmetro espessura da chapa de extremidade t_{ch} . Isto é, a influência do diâmetro dos parafusos é maior do que a influência da espessura da chapa de extremidade em ligações mais flexíveis (menores distâncias entre parafusos d_p). Já em ligações aparafusadas de aço com chapa de extremidade onde a rigidez é maior (maior distância entre parafusos d_p), a influência da espessura da chapa de extremidade é maior do que a influência do diâmetro dos parafusos.

Dessa maneira, visando a ampliação e continuidade de estudos referentes ao comportamento das ligações aparafusadas de aço, sugere-se algumas alterações e considerações adicionais para modelagem numérica, assim como sugestões para futuros trabalhos:

- Consideração das soldas entre perfil da viga e chapa de extremidade;
- Avaliar a possível redução das forças mínimas de protensão estabelecidas em normas;
- Consideração de curvas reais de tensão-deformação dos materiais;
- Ensaios experimentais dos modelos numéricos analisados;
- Aplicar o estudo com outros perfis;
- Considerar enrijecedores no pilar e analisar qual a influência destes;
- Analisar pórticos compostos, considerando o acoplamento de elementos de barra e elementos sólidos;
- Analisar a influência da consideração dos parafusos como elementos sólidos ou elementos de barra;
- Considerar a influência da rigidez das ligações no comportamento global da estrutural.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION, *Manual of Steel Construction. 8.ed.* Chicago, United States, 1980.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION, *Manual of Steel Construction: load and resistance factor design.* Chicago, United States, 1986.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS, *Atlas of Stress-Strain Curves. 2.ed.,* United States, 2002.

ANSYS (R), Product Launcher Release 15.0. **ANSYS 15.0 Help**, United States, 2014.

BAHAARI, MR.; SHERBOURNE, A.N. *Computer modeling of na extended end-plate bolted connection.* Computer & Structures, v.52, n.5, p.879-893., United States, 1994.

BATHO, C.; BATHEMAN, E.H. *Investigations on bolts and bolted joints.* Steel Structures Research Committee, 2nd Report. London, 1934.

BORST, R., CRISFIELD, M. A., REMMERS, J. J. C., VERHOOSSEL, C. V., *Non-Linear Finite Element Analysis of Solids and Structures.* Second Edition. United Kingdom, 2012.

BRITISH STANDRAD, *High strength friction grip bolts for structural engineering. Part 1: General grade Bolts,* United Kingdom, 1959.

BRITISH STANDRAD, *The use of high strength friction grip bolts in structural steel-work. Part 1: General grade Bolts,* United Kingdom, 1960.

BURSI, O., S., JASPART, J., P., *Basic issues in the finite element simulation of extended end plate connections.* Computers and Structures, Volume 69, Pages 361-382, April 1998, Liège, Belgium.

ELDEMERDASH, M., ABU-LEBDEH, T., NASRA, M., A., *Finite Element Analysis of Large Capacity End-plate Steel Connections.* Journal of Computer Science, Volume 8, Pages 482-493, 2012, Montgomery, United States, 2012.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, *EN 1992-1-8:1992 – Eurocode 3: Design of steel Structures - Part 1-1: General Rules and rules for buildings*, ECS. Brussels, 1992.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, *EN 1993-1-8:2010 – Eurocode 3: Design of steel Structures - Part 1-8: Design of joints*, ECS. Brussels, 2010.

FORTIN, M. & GLOWISKI, R., *Augmented Lagrangian Methods: Applications to the Numerical Solution of Boundary-Value Problems*. Elsevier Science Publisher, 1983.

GAERTNER, E., L. & BORTOLI, M., G., D., *Some Aspects for the Simulation of a Non-Linear Problem with Plasticity and Contact*. Ansys Conference 134, Brasil, 2006.

KRISHNAMURTHY, N. *Modelling and Prediction of steel bolted connection behavior*. Computers & Structures, Volume 11, Pages 75-82, June 1979, Alabama, USA, 1979.

KULAK, G. L., FISHER, J. W. & STRUIK, J. H. *Guide to Design Criteria for Bolted na Riveted Joints. 2nd. Ed.* Chicago, United States of America, 2001.

LIMA, L. R. O. *Comportamento de Ligações com Placa de Extremidade em Estruturas de Aço Submetidas a Momento Fletor e Força Axial*. Tese de Doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2003.

MAGGI, Y. I. *Análise numérica, via M.E.F, do comportamento de ligações aparafusadas viga-coluna com chapa de topo*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, 2000.

MCCORMARC, J. C. & CSERNAK, S. F. *Structural Steel Design. 5th.ed.* New Jersey, United States of America, 2012.

NUNES, P. C. L. *Análise paramétrica de ligações com placa de extremidade em estruturas de aço submetidas a momento fletor e força axial*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil 2006.

PIETRZAK, G. & CURNIER, A., *Large deformation frictional contact mechanics: continuum formulation and augmented Lagrangian treatment*. Computer Methods in applied mechanics and engineering, Lausanne, Switzerland, 1998.

PRELORENTZOU, P. A. *Um Estudo sobre ligações viga-coluna em estruturas de aço*. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, 1991.

BORST, DE, R., CRISFIELD, M. A., REMMERS, J.J.C.; VERHOOSSEL, C.V., *Non-linear finite element analysis of solid and structures*. Wiley series in computational mechanics. Second Edition, Chichester, 2012.

RIBEIRO, L. F. *Estudo do comportamento estrutural de ligações parafusada viga-couna com chapa de topo: análise teórico-experimental*. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, 1998.

7. SÍTIOS DA INTERNET

AMERICAN BRIDGE (AB), *Constructional Company*. Disponível em <http://www.americanbridge.net/wp-content/uploads/Mackinac-Truss-8.jpg>. Pittsburgh, United States, 1954.