CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNÓLOGICA DE MINAS GERAIS

Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

GUILHERME HENRIQUE LEITE VIANA

VERIFICAÇÃO DE LIGAÇÕES PARAFUSADAS COM CHAPA DE EXTREMIDADE ESTENDIDA CONSIDERANDO AS NÃO LINEARIDADES DO SISTEMA

Orientador: Profª. Drª. Cristina Almeida Magalhães

Linha de Pesquisa: Eficiência em Sistemas e Processos Mecânicos

Belo Horizonte
2023

Guilherme Henrique Leite Viana

Verificação de ligações parafusadas com chapa de extremidade estendida considerando as não linearidades do sistema.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Profa. Dra. Cristina Almeida Magalhães

Linha de Pesquisa: Eficiência em Sistemas e Processos Mecânicos

Belo Horizonte
2023

Viana, Guilherme Henrique Leite
V614v Verificação de ligações parafusadas com chapa de extremidade estendida considerando as não linearidades do sistema / Guilherme Henrique Leite Viana. – 2023.
93 f. : il., gráfs, tabs, fotos.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.
Orientadora: Cristina Almeida Magalhães.
Banca examinadora: Cristina Almeida Magalhães, Sandro Cardoso Santos, Pedro Américo Almeida Magalhães Júnior.
Bibliografia: f. 92-93.
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

1. Ligações parafusadas – Teses. 2. Chapas de metal – Teses. 3. Método dos elementos finitos – Teses. 4. EN1993 Eurocódigo 3 (Padrão) – Teses. 5. Normas técnicas (Engenharia) – Teses. 6. Parafusos e porcas – Testes – Teses. I. Magalhães, Cristina Almeida. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título.

CDD 620.0042

Elaboração da ficha catalográfica pela bibliotecária Jane Marangon Duarte, CRB 6ª 1592 / Cefet/MG

Guilherme Henrique Leite Viana

Verificação de ligações parafusadas com chapa de extremidade estendida considerando as não linearidades do sistema.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Linha de Pesquisa: Eficiência em Sistemas e Processos Mecânicos

Belo Horizonte, _____/_____/_____

Resultado;_____

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Cristina Almeida Magalhães

PPGEM / CEFET-MG

Prof. Dr. Sandro Cardoso Santos

PPGEM / CEFET-MG

Prof. Dr. Pedro Américo Almeida Magalhães Júnior

PUC-MG

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a toda a minha família que sempre me apoiou e incentivou a dar continuidade a esta pesquisa. Em especial, dedico este trabalho aos meus pais, minha noiva e minha filha, que me deram forças para nunca desistir.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus e aos meus pais por me darem forças para seguir estudando e trilhando no meio acadêmico e acreditaram em mim mesmo quando eu já não acreditava.

Agradeço ao CEFET-MG, instituição onde estive deste o ensino médio até a conclusão desta pesquisa, e que me possibilitou grande desenvolvimento pessoal e profissional. Em especial, agradeço aos amigos que fiz durante o ensino médio, aos companheiros que estiveram ao meu lado na equipe Cefast Baja e aos professores Diego Fernandes da Cruz e Cristina Almeida Magalhães.

Por fim, agradeço a minha noiva, Izabela Cerqueira Sousa, e a minha filha, Laura Cerqueira Leite Viana, por me motivarem e estarem ao meu lado nesta reta final do desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

Estruturas em aço são comumente utilizadas em construções civis e em máquinas de grande porte existentes no setor de bens primários. Para a construção de tais estruturas é necessária a conexão entre os perfis estruturais e, um dos principais modos de conexão é através da ligação parafusada entre os componentes. Neste trabalho é apresentado um estudo do comportamento estrutural das ligações parafusadas com chapa de extremidade estendida, enfatizando a fundamentação teórica, os métodos de dimensionamento sugerido por normas e a avaliação das ligações por meio de modelos computacionais. O objetivo desta pesquisa é o desenvolvimento de um modelo numérico considerando as não linearidades do sistema, validado por meio de testes experimentais, para comparação com as metodologias analíticas sugeridas por normas a fim de avaliar as principais divergências entre o dimensionamento pelo método dos elementos finitos e pelos métodos normativos sugeridos pelo EUROCODE 3 (2005) e pela NBR 8800 (2008). Através dos diferentes modelos avaliados, com variação das dimensões de chapa e dos parafusos, pode-se levantar as principais divergências e pontos de atenção dos métodos normativos, além de se avaliar os modos de falha das ligações, os momentos máximos resistentes e a presença do efeito alavanca em alguns tipos de ligações estudados.

Palavras-chave: (Ligações parafusadas com chapa de topo estendida; Método dos elementos finitos; EUROCODE 3; NBR 8800; Efeito alavanca).

ABSTRACT

Steel structures are commonly used in civil construction and large machinery. For the construction of such structures, it is necessary to joint the structural profiles and, one of the main modes of connection is through the bolted connection. This work presents a study of the structural behavior of extended end plate bolted connections, emphasizing the theoretical foundation, the design methods suggested by standards and the evaluation of connections through computational models. The objective of this research is the development of a numerical model considering the nonlinearities of the system, validated through experimental for comparison with the analytical methodologies suggested by standards in order to evaluate the main divergences between the design by the finite element method and the normative methods suggested by EUROCODE 3 (2005) and NBR 8800 (2008). Through the different models evaluated, with variation of the dimensions of plate and screws, one can raise the main divergences and points of attention of the normative methods, in addition to evaluating the failure modes of the connections, the maximum resistant moments and the presence of the prying action in some types of connections studied.

Keywords: (Extended end plate connections; Finite Element; EUROCODE 3; NBR 8800; Prying action).

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 16
1.1 Justificativa 17
1.2 Objetivos 18
1.2.1 Objetivo geral 18
1.2.2 Objetivos específicos 18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 19
2.1 Histórico 19
2.2 Conceitos fundamentais 22
2.3 Classificação das ligações 24
2.3.1 BJORHOVDE et al (1990) 24
2.3.2 NETHERCOT et al (1998) 25
2.3.3 EUROCODE 3 (1992) 30
2.3.4 EUROCODE 3 (2005) 31
2.3.5 AISC/LFRD (1978/1986/2005/2010) 31
2.3.6 ABNT 8800 (2008) 32
2.3.7 BUONICONTRO (2017) 32
3 PROCEDIMENTOS DE CÁLCULO 33
3.1 Procedimento de cálculo proposto pelo EUROCODE 3 (2005) 34
3.1.1 Identificação dos componentes 36
3.1.2 Momento resistente 37
3.1.3 Rigidez inicial 39
3.1.4 Capacidade de rotação 40
3.1.5 Verificação dos componentes 40
3.2 Procedimento de cálculo proposto pelo NBR 8800 (2008) 45
3.2.1 Recomendações geométricas para ligações com chapa de extremidade 45
3.2.2 Força resistente de cálculo 46
3.2.3 Efeito alavanca e forças solicitantes de tração 47

4 MODELOS NUMÉRICOS 47
4.1 Modelagem das ligações 48
4.2 Considerações e condições de contorno 51
4.2.1. Não linearidade física 51
4.2.2. Não linearidade geométrica 53
4.2.3. Propriedade dos materiais 54
4.2.4. Restrições 56
4.3 Discretização do modelo 57
4.3.1. Elementos tridimensionais 57
4.3.2. Elementos de contato 58
4.4 Aplicação de cargas 60
4.4.1 Aplicação da protensão inicial 60
4.4.1 Aplicação da carga na extremidade da viga 62
5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS 63
5.1 Curvas Força x Deslocamento 63
5.1.1 Modelos com parafusos de 12 mm 64
5.1.2 Modelos com parafusos de 16 mm 65
5.1.3 Modelos com parafusos de 25 mm 67
5.2 Curvas Momento x Rotação 68
5.2.1 Modelos com parafusos de 12 mm 69
5.2.2 Modelos com parafusos de 16 mm 69
5.2.3 Modelos com parafusos de 12 mm 70
5.3 Análise da chapa 71
5.3.1 Deformadas da chapa de extremidade 71
5.3.2 Avaliação da deformação na chapa e do efeito alavanca 72
5.3.3 Avaliação das tensões atuantes na chapa 83
5.3.4 Comparação com modelos experimentais e nterpretação dos resultados 84
5.4 Análise dos parafusos 86
5.4.1 Modelos com parafusos de 12 mm 86

5.4.2 Modelos com parafusos de 16 mm 88

5.4.3 Modelos com parafusos de 25 mm 88

5.5 Modos de falhas e dimensionamento segundo o EUROCODE 3 (2005) 88

6. CONCLUSÃO 90

7. REFERÊNCIAS 92

8. ANEXO A: AVALIAÇÃO DAS LIGAÇÕES ATRAVÉS DA METODOLOGIA PROPOSTA PELO EUROCODE (2005) ..... **Erro! Indicador não definido.**

Lista de Figuras

Figura 1: Classificação da ligação conforme a rigidez - Adaptado de EN 1993-1-8 (2005) 17
Figura 2: Ligação viga/coluna com chapa de extremidade – SHERBOURNE apud MENDES, 2017 20
Figura 3: (a) Ligação rígida; (b) Ligação flexível – Adaptado de FAKURY (2016) 23
Figura 4: (a) Não linearidade das ligações semirrígidas; (b) Diagrama bilinear, simplificando o comportamento da ligação – Adaptado de MAGGI (2000) 23
Figura 5: Classificação das ligações – BJORHOVDE et al, Apud, MENDES (2017) .. 25
Figura 6: Rigidez relativa entre os elementos conectados x Rigidez necessária – Estado limite último - GONÇALVES, Apud, TRISTÃO (2006) 27
Figura 7: Rigidez relativa entre os elementos conectados x Rigidez necessária – Estado limite de serviço - GONÇALVES, Apud, TRISTÃO (2006) 28
Figura 8: Classificação BUONICONTRO (2017) –MENDES (2017), Apud BUONICONTRO (2017) 33
Figura 9: Distribuição dos esforços: a)método da alavanca; b) método dos componentes – BERGAMASCO (2012), Apud MAGGI (2004) 34
Figura 10: Ligação viga-pilar com chapa de extremidade – BERGAMASCO (2012), Apud MAGGI (2004) 35
Figura 11: Componentes da ligação viga-pilar – Adaptado de MENDES (2017) 36
Figura 12: Associação dos elementos de ligação – Adaptado MENDES (2017) 37
Figura 13: Esforços nas linhas de parafusação – Adaptado MENDES (2017) 38
Figura 14: Combinações das linhas de parafuso – MENDES (2017) 38
Figura 15: Tração da alma do pilar – MENDES (2017), apud EUROCODE 3 (2005) . 41
Figura 16: Modelo *T-stub* – MENDES (2017) 42
Figura 17: Modos de falha do modelo *T-stub* – BERGAMASCO (2012) 42
Figura 18: Modelos *T-stubs* para a chapa de topo– EUROCODE 3 (2005) 43
Figura 19: Esforços de tração na alma e compressão/tração nas mesas – Adaptado de MENDES (2017) 44
Figura 20: Modelo inicial desenvolvido no SOLIDWORKS– Do próprio autor 49
Figura 21: Perfil transversal dos perfis considerados – Do próprio autor 49
Figura 22: Geometria das chapas de extremidade – Do próprio autor 50
Figura 23: Dimensões padrão de parafusos e porcas – Catálogo Ciser 51
Figura 24: Configuração dos modelos e principais dimensões – Do próprio autor 51
Figura 25: Curvas multilineares de tensão x deformação (a) para as chapas (b) para os parafusos– MAGGI (2004) 52

Figura 26: Contatos dos componentes de ligações parafusadas com chapa de extremidade – Do próprio autor 53
Figura 27: Diagrama multilinear do material de chapas e perfis metálicos – Do próprio autor 55
Figura 28: Diagrama multilinear do material de chapas e perfis metálicos – Do próprio autor 56
Figura 29: Restrições de movimento aplicadas na coluna – Do próprio autor 56
Figura 30: Elemento Hexaédrico *SOLID95* – BERGAMASCO (2012) 58
Figura 31: Elemento *TARGE170* – BERGAMASCO (2012) 59
Figura 32: Elemento *CONTA174* – BERGAMASCO (2012) 59
Figura 33: Ilustração da ferramenta de protensão – Tutorial ESSS 61
Figura 34: Considerações de modelagem para aplicação de protensão – Tutorial ESSS 62
Figura 35: Aplicação de deslocamentos na extremidade da viga – Do próprio autor .. 62
Figura 36: Força x deslocamento para modelos com parafusos de 12 mm – Do próprio autor 64
Figura 37: Força x deslocamento para modelos com parafusos de 16 mm – Do próprio autor 65
Figura 38: Comparação entre resultados de MAGGI e do presente estudo (parafusos 16 mm) – Do próprio autor 66
Figura 39: Força x deslocamento para modelos com parafusos de 25 mm – Do próprio autor 68
Figura 40: Força x deslocamento para modelos com parafusos de 12 mm – MAGGI (2004) 68
Figura 41: Momento x rotação para modelos com parafusos de 12 mm – Do próprio autor 69
Figura 42: Momento x rotação para modelos com parafusos de 16 mm – Do próprio autor 70
Figura 43: Momento x rotação para modelos com parafusos de 25 mm – Do próprio autor 71
Figura 44: Deformadas (aumentada 5x) de todos os modelos avaliados – Do próprio autor 72
Figura 45: Seções avaliadas quanto ao deslocamento relativo – Do próprio autor 73
Figura 46: Deslocamento relativo da chapa do modelo C12-P12 (seção AA) – Do próprio autor 74
Figura 47: Deslocamento relativo da chapa do modelo C12-P12 (seção BB) – Do próprio autor 74

Figura 48: Deslocamento relativo da chapa do modelo C12-P12 (seção CC) – Do próprio autor 75
Figura 49: Deslocamento relativo da chapa do modelo C12-P12 (seção DD) – Do próprio autor 75
Figura 50: Deslocamento relativo da chapa do modelo C19-P12 (seção AA) – Do próprio autor 76
Figura 51: Deslocamento relativo da chapa do modelo C12-P12 (seção BB) – Do próprio autor 76
Figura 52: Deslocamento relativo da chapa do modelo C12-P12 (seção CC) – Do próprio autor 77
Figura 53: Deslocamento relativo da chapa do modelo C12-P12 (seção DD) – Do próprio autor 77
Figura 54: Deslocamento relativo da chapa do modelo C12-P16 (seção AA) – Do próprio autor 78
Figura 55: Deslocamento relativo da chapa do modelo C12-P16 (seção BB) – Do próprio autor 78
Figura 56: Deslocamento relativo da chapa do modelo C12-P16 (seção CC) – Do próprio autor 79
Figura 57: Deslocamento relativo da chapa do modelo C12-P16 (seção DD) – Do próprio autor 79
Figura 58: Deslocamento relativo da chapa do modelo C12-P25 (seção AA) – Do próprio autor 80
Figura 59: Deslocamento relativo da chapa do modelo C12-P25 (seção BB) – Do próprio autor 80
Figura 60: Deslocamento relativo da chapa do modelo C12-P25 (seção CC) – Do próprio autor 81
Figura 61: Deslocamento relativo da chapa do modelo C12-P25 (seção DD) – Do próprio autor 81
Figura 62: Deslocamento relativo da chapa do modelo C19-P25 (seção AA) – Do próprio autor 82
Figura 63: Deslocamento relativo da chapa do modelo C19-P25 (seção BB) – Do próprio autor 82
Figura 64: Deslocamento relativo da chapa do modelo C19-P25 (seção CC) – Do próprio autor 83
Figura 65: Deslocamento relativo da chapa do modelo C19-P25 (seção DD) – Do próprio autor 83
Figura 66: Distribuição das tensões de Von Mises – Do próprio autor 84

Figura 67: Comparação entre análises práticas e numéricas para o modelo C19-P16 – Do próprio autor 85
Figura 68: Comparação entre análises práticas e numéricas para o modelo C25-P16 – Do próprio autor 85
Figura 69: Tração nos parafusos (modelo C12-P12) – Do próprio autor 87
Figura 70: Tração nos parafusos (modelo C19-P12) – Do próprio autor 87
Figura 71: Tração nos parafusos (modelo C25-P12) – Do próprio autor 87
Figura 72: Tração nos parafusos (modelo C12-P16) – Do próprio autor 88

Lista de Tabelas

Tabela 1: Classificação das ligações quanto a resistência e rotação 25
Tabela 2: Classificação das ligações quanto a rigidez 32
Tabela 3: Classificação das ligações quanto a resistência 33
Tabela 4: Componentes da ligação viga-pilar 36
Tabela 5: Dados de tensão x deformação dos perfis e chapas – Adaptado de BERGAMSCO (2012) 54
Tabela 6: Dados de tensão x deformação dos parafusos – Adaptado de BERGAMSCO (2012) 55
Tabela 7: Força de protensão mínima em parafusos ASTM – Adaptado de NBR 8800 (2008) 60
Tabela 8: Classificação das ligações quanto a resistência e rotação 64
Tabela 9: Força aplicada e deslocamento observado na extremidade da viga (modelos com parafusos de 16 mm e chapa de 19 mm) 66
Tabela 10: Força aplicada e deslocamento observado na extremidade da viga (modelos com parafusos de 16 mm e chapa de 25 mm) 67
Tabela 11: Avaliação das ligações segundo as normas brasileira e europeia 89

1 INTRODUÇÃO

As estruturas de aço são comumente utilizadas em construções civis, máquinas de grande porte e galpões industriais. Para a construção de estruturas em aço é necessário que perfis metálicos sejam conectados e, para isso, são utilizadas soldas, rebites e parafusos.

Durante o projeto estrutural, as análises convencionais pressupõem um conjunto de barras unidimensionais (representando os perfis metálicos) interligadas por elementos nodais, sendo essas ligações representadas como pontos completamente rígidos ou flexíveis.

As ligações completamente rígidas indicam que os conectores (soldas, rebites, parafusos, chapas de ligação, etc.) transmitem todos os esforços entre os elementos e que existe continuidade rotacional entre os perfis conectados, ou seja, o ângulo entre dos perfis se mantêm o mesmo independente da força aplicada. Por outro lado, as ligações flexíveis aceitam a variação angular entre dois perfis durante a aplicação de forças externas, caracterizando uma região sem continuidade rotacional.

A principal maneira de descrever e classificar o comportamento da ligação é através da relação momento-rotação, analisando a rotação relativa entre os elementos e o momento fletor atuante no sistema. Quanto menor o deslocamento angular de uma ligação, para um dado momento aplicado, maior sua rigidez e, a partir disso surge o conceito de rigidez rotacional.

Levando em conta o conceito de rigidez rotacional a norma EN 1993-1 (EUROCODE 3) propõe uma classificação determinando limites para se considerar uma ligação rígida ou flexível. Na Figura 1 é possível ver que existe uma grande região indefinida, no qual não se pode considerar as ligações como completamente rígidas ou rotuladas.

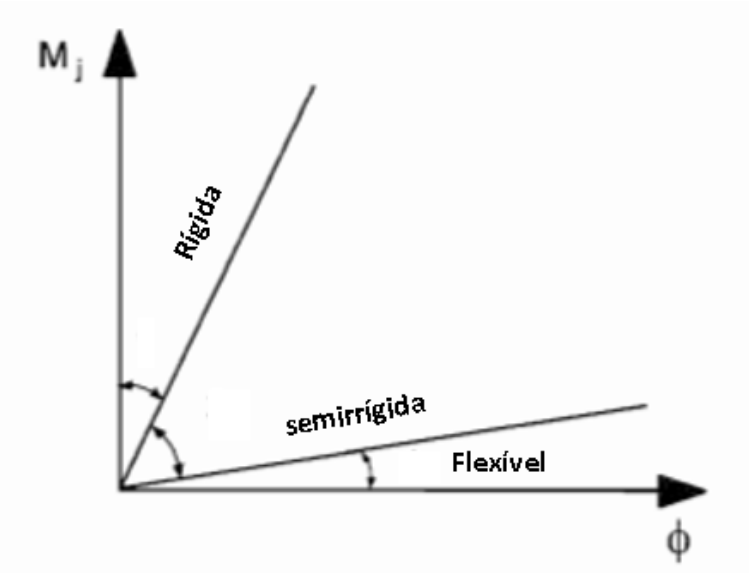


Figura 1: Classificação da ligação conforme a rigidez - Adaptado de EN 1993-1-8 (2005)

1.1 Justificativa

Apesar das hipóteses de ligações rígidas e flexíveis simplificarem a análise e dimensionamento estrutural, diversos estudos desenvolvidos ao longo das últimas décadas indicam que tratar os conectores como elementos rígidos ou flexíveis pode ser uma consideração conservadora e até mesmo inadequada, uma vez que muitas ligações podem apresentar um comportamento intermediário, sendo essas ligações definidas como semirrígidas.

Inicialmente, diversos pesquisadores desenvolveram trabalhos experimentais com o objetivo de traçar as curvas momento-rotação de ligações parafusadas e, dessa forma, comprovar o comportamento semirrígido dos conectores. RIBEIRO (1998) realiza uma série de ensaios para descrever o comportamento de ligações parafusadas em perfis estruturais soldados.

Com o avanço da tecnologia e desenvolvimento dos softwares, o método dos elementos finitos passa a ser utilizado para estudar e analisar o comportamento das ligações parafusadas com chapas de extremidade. MAGGI (2000) utilizou os resultados experimentais de RIBEIRO (1998) como forma de comparação para seu modelo em elementos finitos, comprovando a precisão dos métodos computacionais para representação de ligações semirrígidas. Contudo, o método dos elementos finitos requer grande investimento em recursos computacionais e tempo para o processamento dos resultados, o que levou ABOLMAALI et al. (2005), KONG et al (2020) e ÖZKILIÇ & TOPLAYA (2021) a utilizarem os

resultados obtidos em softwares para o desenvolvimento de equações que descrevam o comportamento semirrígidos de alguns tipos de ligação parafusada.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Considerando todo o contexto e pesquisas desenvolvidas ao longo dos anos, o presente trabalho foi realizado com o objetivo de contribuir na análise de ligações semirrígidas através do método dos elementos finitos, desenvolvendo um modelo numérico com auxílio do ANSYS *Workbench* e comparando os resultados com os obtidos ao se utilizar a norma NBR 8800, a fim de avaliar as principais divergências entre os dois métodos.

1.2.2 Objetivos específicos

Para que os objetivos gerais sejam atingidos, os seguintes objetivos específicos devem ser alcançados:

- Desenvolver um modelo em elementos finitos para a verificação de ligações parafusadas com chapas de extremidade;
- Validar o modelo numérico com a utilização dos resultados experimentais obtidos por e MAGGI (2004);
- Comparar os resultados obtidos pelos métodos numéricos e os resultados obtidos pela norma NBR 8800, descrevendo as principais divergências e similaridades dos métodos;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Durante o estudo das ligações parafusadas com chapas de extremidade, este trabalho tem como foco as ligações viga-coluna. Segundo MAGGI (2000) a ligação viga-coluna representa a união ente elementos metálicos nos quais uma viga é conectada à mesa do pilar através da sua alma e/ou mesa.

As ligações viga-coluna têm grande influência no dimensionamento de estruturas metálicas, uma vez que estas conexões geram descontinuidades na transmissão de esforços, exigindo maior atenção durante o dimensionamento. Conforme PRELORENTZOU (Apud BERGAMASCO, 2012), este tipo de ligação não garante o caráter monolítico a estrutura, como ocorre com concreto armado, sendo necessário projetar ligações capazes de conectar os elementos e garantir a transmissão de esforços.

Este capítulo apresentará um breve histórico sobre as pesquisas relacionadas a ligações parafusadas de chapas de extremidade, situando o leitor dos avanços conquistados ao longo do último século até os avanços mais recentes. Além disso, serão apresentados as principais classificações de ligações e os conceitos fundamentais sobre o tema.

2.1 Histórico

SANTOS (1998), RIBEIRO (1998), BERGAMASCO (2012) e MENDES (2017) apresentam um breve histórico das pesquisas sobre ligações parafusadas desenvolvidas ao longo dos anos, incluindo pesquisas desde o começo do século XX até pesquisas realizadas nos anos 2010. Além de exibir o histórico coletado pelos pesquisadores citados, esta seção complementa esta coletânea com os estudos atuais.

Segundo SANTOS (1998), o estudo das ligações viga-coluna teve início no começo do século XX, com a realização de testes experimentas, feitos por WILSON & MOORE, para entender a relação entre momento e rotação das ligações. Após este estudo, diversos outros pesquisadores desenvolveram trabalhos nesta linha, mas somente nos anos 1960 os estudos das ligações passaram a ser mais comum entre os estudiosos.

Na metade dos anos 1930, BATHO & BATHEAN (Apud RIBEIRO, 1998) levantaram a hipótese de substituição dos rebites por parafusos de alta resistência. Ainda nos anos 30 WILSON E THOMAS (Apud MAGGI, 2000) realizaram estudos sobre fadiga em ligações rebitadas e reafirmaram a viabilidade do uso de parafusos de alta resistência.

Seguindo os estudos elaborados ao longo dos anos 30, o *Resarch Councilon Riveted and Bolted Structural Joints* elaborou, no ano de 1949, uma especificação para a utilização de parafusos de alta resistência, permitindo a troca de rebites por parafusos.

LIGHTFOOT & BAKER (Apud SANTOS, 1998) desenvolveram um modelo computacional para analisar pórticos com ligações elásticas, utilizando o método dos deslocamentos. A partir deste estudo, diversos outros pesquisadores desenvolveram modelos computacionais e pesquisas com auxílios de softwares para entender o comportamento das ligações. Um ponto a ser observado neste momento é a limitação computacional existente no período, impedindo o desenvolvimento de grandes soluções auxiliadas por computador.

Outro estudo de grande relevância, desenvolvido no começo dos anos 1960, foi publicado por SHERBOURNE (Apud RIBEIRO, 1998) que descreve as ligações de chapa estendida (Figura 2), muito comuns nos dias atuais.

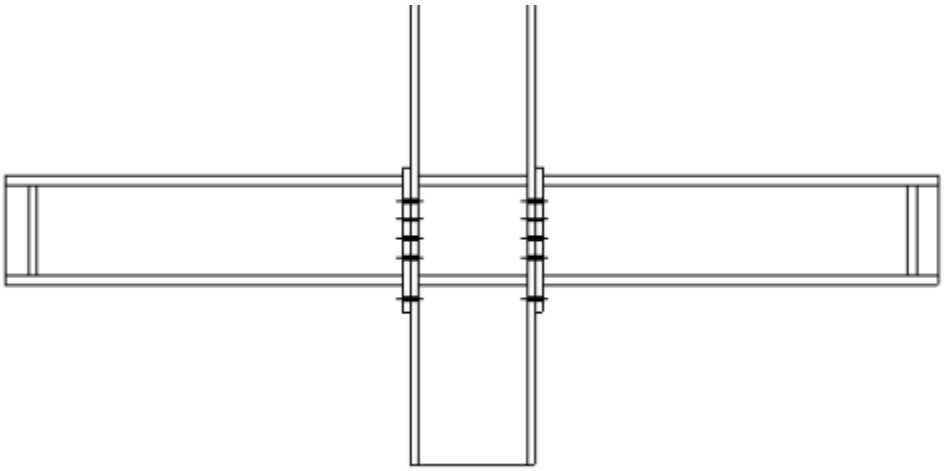


Figura 2: Ligação viga/coluna com chapa de extremidade – SHERBOURNE apud MENDES, 2017

Com o avanço dos computadores e softwares de engenharia, mais estudos foram desenvolvidos com auxílio de ferramentas computacionais. KRISHNAMURTHY (Apud MAGGI, 2000) desenvolveu diversos trabalhos baseados em análises em elementos finitos e comparou seus resultados com os obtidos em outros experimentos desenvolvidos em laboratório. Além disso, o seu trabalho sobre o efeito alavanca e a concentração de esforços nas ligações serviu de base para o desenvolvimento da norma AISC.

Já na segunda metade dos anos 1980, GOVERDHAM (Apud RIBEIRO, 1998) e KISHI & CHEN (Apud RIBEIRO, 1998) desenvolveram um grande banco de dados com informações relativas ao comportamento das ligações e curvas de momento x rotação para diversas geometrias.

No fim dos anos 1980, CHEN & LUI (Apud MAGGI, 2000) constataram que ligações parafusadas, com adição de nervuras e chapas soldadas, podem apresentar resistências ao momento fletor maior do que o momento resistente de ligações soldadas.

No Brasil, RIBEIRO (1998) desenvolveu um trabalho teórico-prático ensaiando diversas ligações viga-coluna, com variações na espessura das chapas de extremidade e diâmetro dos parafusos. Através da variação desses parâmetros, o autor compara quais variáveis tem maior influência na rigidez de ligações com chapa de extremidade.

Assim como RIBEIRO (1998), MAGGI (2000) desenvolveu análises numéricas, utilizando o método dos elementos finitos, para analisar a rigidez das ligações e sua relação com a espessura das chapas e diâmetro dos parafusos. Posteriormente, MAGGI (2004) desenvolveu um novo estudo teórico prático buscando replicar os ensaios laboratoriais realizados por RIBEIRO (1998) e sugerir novas adequações aos modelos numéricos, de forma a melhor representar o comportamento real das ligações.

ABOLMAALI et al (2005) realizaram estudos similares a MAGGI (2000), desenvolvendo modelos em elementos finitos, validados através de experimentos desenvolvidos ao longo dos anos 80. Além disso, os autores utilizaram os resultados obtidos para desenvolverem equações que descrevem o comportamento de ligação parafusadas com chapas de extremidade de forma a considerar as não linearidades inerentes das interações entre os elementos da ligação.

Buscando aprimorar os estudos das ligações parafusadas com auxílio dos métodos numéricos, BERGAMASCO (2012) deu continuidade aos estudos desenvolvidos por RIBEIRO (1998) e MAGGI (2004) implementando novas considerações aos modelos computacionais, tornando-os mais fiéis ao comportamento real.

DIAZ et al (2012) aborda os aspectos econômicos relacionados ao dimensionamento das ligações parafusadas de chapa de extremidade. Para isso, foi desenvolvido um modelo por aproximação, utilizando como base os dados de experimentos anteriores, que aponta a ligação de chapa de extremidade “ideal” de acordo com as características da estrutura.

PIRMOZ et al (2016) analisou as ligações utilizadas em travamentos entre vigas e colunas para explicar a influência da rigidez destas conexões durante as falhas devido a cargas cíclicas, como as proporcionadas por terremotos.

KONG et al (2020) desenvolveu modelos computacionais de ligações de chapas de extremidade, variando a espessura das chapas de topo, posição e diâmetro dos parafusos, e

comparou os resultados do modelo numérico com os obtidos através da metodologia sugerida pela AISC. Após a comparação, comprovou-se o conservadorismo da norma e o autor propõe novas equações para o cálculo da rigidez inicial e momento resistente de ligação com chapa de extremidade.

OZKLIÇ et al (2021) construíram um banco de dados com diversas ligações parafusadas com chapa de extremidade, variando suas principais dimensões, para comparar os resultados obtidos ao se utilizar o dimensionamento proposto pela AISC e pelo Eurocode com o dimensionamento através dos elementos finitos. Os autores concluem que, para alguns casos, as normas podem apresentar resultados até 30% mais conservadores.

2.2 Conceitos fundamentais

Como mencionado no começo desta seção, as ligações estruturais exigem grande atenção de projetista, visto que o comportamento das conexões tem influência nos esforços transmitidos entre perfis.

O principal modo de descrever o comportamento de uma ligação é pela relação entre o momento fletor transmitido pelas conexões e a rotação relativa entre viga e coluna. Na Figura 3, FAKURY (2016) exibe os dois comportamentos ideais de uma ligação, sendo elas:

- Ligações rígidas: O ângulo entre a viga e a coluna não se altera, independente do esforço aplicado nos elementos conectados. Neste tipo de ligação, pode-se dizer que todo o esforço é transmitido entre os perfis estruturais;
- Ligações flexíveis: Existe variação angular entre viga e coluna, sendo que a variação é proporcional a variação dos esforços aplicados nos perfis. Além disso, a transmissão de momento fletor permitida por esta ligação é muito pequena.

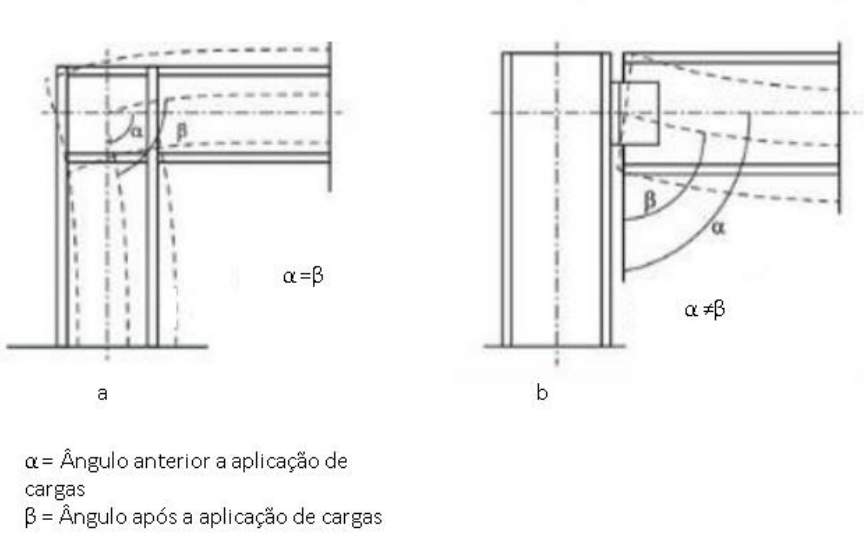


Figura 3: (a) Ligação rígida; (b) Ligação flexível – Adaptado de FAKURY (2016)

Os dois tipos de ligação, descritos até aqui, apresentam comportamento idealizado e podem ser consideradas boas aproximações. Entretanto, MAGGI (2000) diz que as ligações rígidas e flexíveis representam uma parcela pequena de todas as conexões existentes, sendo necessário entender o conceito de ligações semirrígidas.

As ligações semirrígidas consideram o comportamento real das conexões, existindo a variação do ângulo entre viga e coluna de acordo com a variação da carga aplica e de acordo com algumas características geométricas das ligações viga-coluna. Ao considerar a variação angular de acordo com a força aplicada, pode-se dizer que as não linearidades da descontinuidade gerada pela ligação estão sendo consideradas. É muito comum que estas não linearidades sejam representadas de forma gráfica, e que estes gráficos sejam simplificados em diagramas bilineares, conforme exibe a Figura 4.

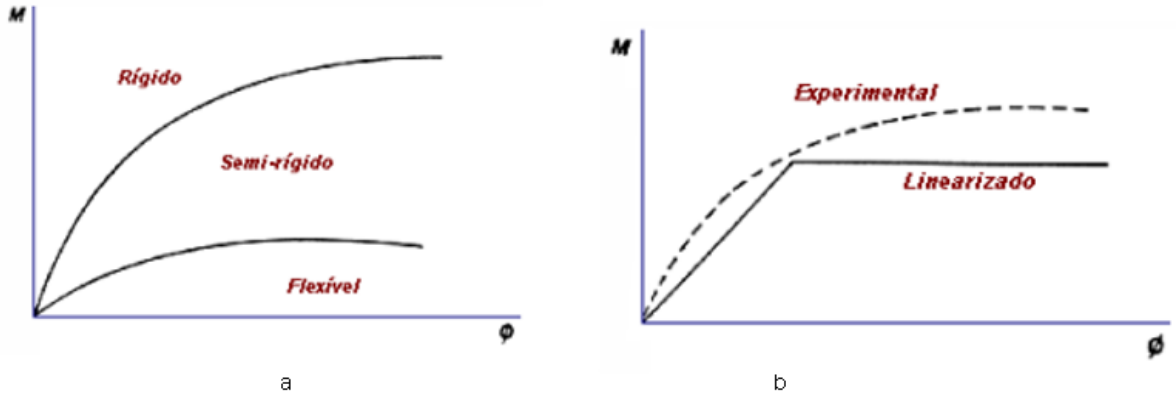


Figura 4: (a) Não linearidade das ligações semirrígidas; (b) Diagrama bilinear, simplificando o comportamento da ligação – Adaptado de MAGGI (2000)

2.3 Classificação das ligações

A seguir serão expostas as principais normas e metodologias utilizadas para classificar e dimensionar as ligações entre perfis metálicos, com foco nas ligações parafusadas de chapa de extremidade.

Segundo BERGAMASCO (2012), os sistemas de classificação mais adotados na análise estrutural de ligações são o AISC/LFRD, EUROCODE 3 (2005) e NETHERCOT (1998). Além dessas metodologias, também deve-se levar em consideração os trabalhos desenvolvidos por BJORHOVDE et al (1990), BUONICORTO (2017) e a NBR 8800 (2008).

2.3.1 BJORHOVDE et al (1990)

O sistema proposto por BJORHOVDE et al (1990) utiliza de parâmetros adimensionais (m e θ) para classificar as ligações quanto a resistência e capacidade de rotação. A classificação é definida em flexível, semirrígida e rígida.

Os parâmetros m e θ são obtidos a partir das equações 1 e 2. Conhecendo o valor desses parâmetros, a ligação pode ser classificada, através da interpretação da curva exibida na Figura 5.

$$m = \frac{M}{M_p} \tag{1}$$

$$\theta = \frac{\theta_r}{\theta_p} \tag{2}$$

$$\theta_p = \frac{5d * M_p}{E * I_b} \tag{3}$$

Onde Mp é o momento de plastificação, M o momento fletor, θr a rotação relativa da ligação, 5d o comprimento de referência da viga ligada a coluna, Ib o momento de inércia da seção transversal da viga e R o módulo de elasticidade do aço.

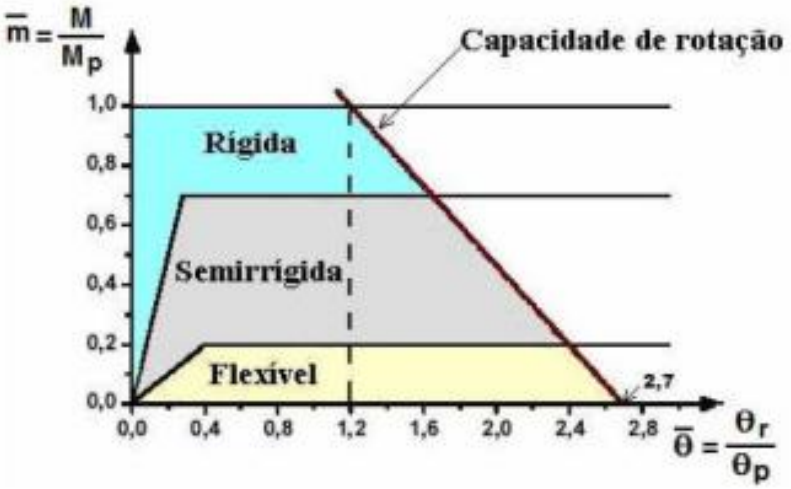


Figura 5: Classificação das ligações – BJORHOVDE et al, Apud, MENDES (2017)

Além disso, BJORHOVDE et al (1990) desenvolveram uma expressão empírica para o cálculo da capacidade rotacional da ligação, conforme equação 4.

$$m = \frac{5{,}4 - 2\theta}{3} \qquad (4)$$

Um dos principais pontos da classificação proposta por BJORHOVDE et al (1990) é que a mesma ligação pode apresentar diferentes comportamentos ao ser analisada pela rotação e pelo momento resistente. A Tabela 1 exibe as faixas limites para as classes rígida, semirrígida e flexível, tanto para a rotação quanto para o momento resistente.

Tabela 1: Classificação das ligações quanto a resistência e rotação

Classificação	Momento resistente	Rotação
Rígida	m ≥ 0,7	m ≥ 2,5Θ
Semirrígida	0,2 ≤ m ≤ 0,7	0,5Θ ≤ m ≤ 2,5Θ
Flexível	m ≤ 0,2	m ≤ 0,5Θ

2.3.2 NETHERCOT et al (1998)

Diferentemente do modelo apresentado por BJORHOVDE (1990), NETHERCOT et al (1998) trouxeram uma classificação no qual a rigidez e a resistência são consideradas de forma simultânea.

Este sistema de classificação foi proposto para evitar as ambiguidades existentes em estudos anteriores, e apresenta quatro categorias, sendo ligações totalmente conectas, parcialmente conectas, flexíveis e não-estruturais.

Além de desenvolver um sistema que evite a ambiguidade, NETHERCOT et al (1998) propôs que o sistema abrangesse tanto as análises considerando o estado limite último, quanto o estado limite de serviço. Para isso, as principais variáveis de classificação do estado limite último são a capacidade de transmissão de momento fletor, rigidez mínima e máxima. Já o estado limite de serviço considera apenas a rigidez da ligação.

Cada uma das classes de ligação será descrita para os dois estados limites considerados por NETHERCOT et al (1998):

2.3.2.1 Ligações totalmente conectadas

1. Estado limite último: O momento resistente é superior ao momento de plastificação da viga que está conectada ao pilar. Dessa forma, as ligações totalmente conectadas, para o estado limite último, podem ser dimensionadas conforme os métodos tradicionais e usando a ideia de ligação completamente rígida.

   Contudo, é necessário verificar a classificação da ligação a sua rigidez, levando em conta os elementos de conexão existentes. A equação 5 é utilizada para calcular a rigidez mínima necessária para se considerar uma ligação como totalmente conectada.

$$S_j = \frac{38*\alpha}{(2+\alpha)} * \frac{E*I_b}{L_b} \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{K_c}{\frac{E*I_b}{L_b}} \quad (6)$$

   Onde EI_b/L_b representa a rigidez da viga conectada ao pilar, α é a taxa de rigidez rotacional entre viga e pilar e K_c representa a soma da rigidez dos elementos conectores e dos elementos do pilar (mesa e alma).

   A Figura 6 exibe a relação entre rigidez necessária e a rigidez rotacional da ligação, considerando o estado limite último.

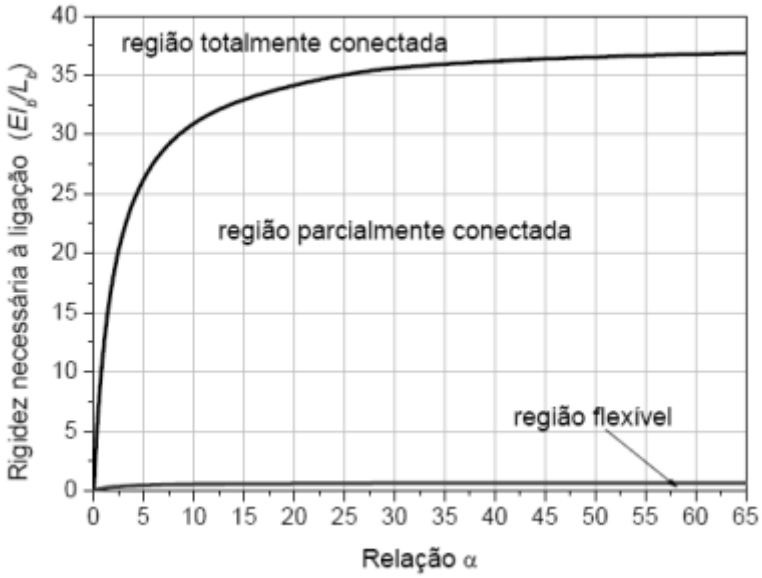


Figura 6: Rigidez relativa entre os elementos conectados x Rigidez necessária – Estado limite último - GONÇALVES, Apud, TRISTÃO (2006)

2. Estado limite de serviço:

   Para o estado limite de serviço, a ligação deve apresentar rigidez superior à obtida através da equação 7.

$$S_j = \frac{70*\alpha^2 - 20*\alpha}{(20+12*\alpha+\alpha^2)} * \frac{E*I_b}{L_b} \qquad (7)$$

   A Figura 7 exibe a relação entre rigidez necessária e a rigidez rotacional da ligação, considerando o estado limite de serviço.

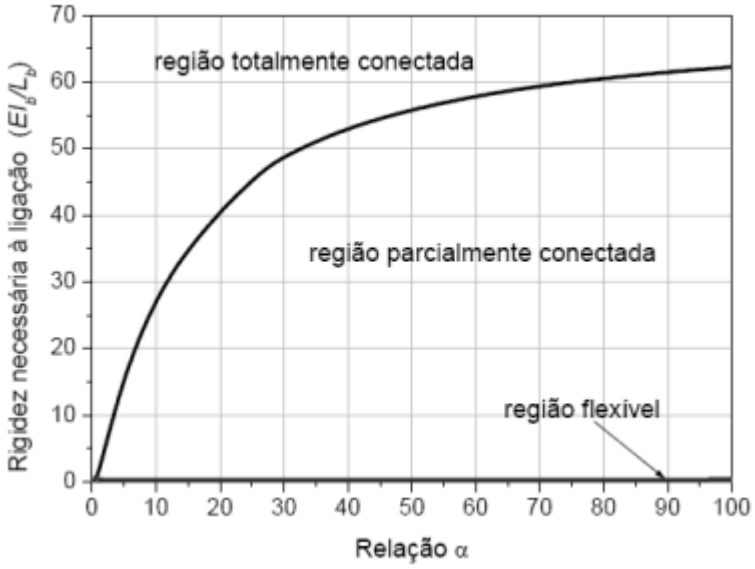


Figura 7: Rigidez relativa entre os elementos conectados x Rigidez necessária – Estado limite de serviço - GONÇALVES, Apud, TRISTÃO (2006)

2.3.2.2 Ligações Flexíveis

1. Estado limite último: Segundo GONÇALVES (2012, as ligações flexíveis apresentam apenas 25% da capacidade de absorção de momentos apresenta pelas ligações totalmente conectadas. Visto isso, a rigidez máxima de uma ligação flexível é obtida através da equação 8.

$$S_j = \frac{0{,}67*\alpha}{(2+\alpha)} * \frac{E*I_b}{L_b} \quad (8)$$

Como as ligações flexíveis apresentam baixa capacidade de absorção dos momentos solicitantes, é necessário que a capacidade rotacional seja suficiente para garantir o deslocamento desse tipo de conexão. NETHERCOT et al (1998) define a mínima capacidade rotacional através da equação 9.

$$\theta_r = \left[0{,}344 + 0{,}561 * \left(\frac{M_d - M_y}{M_p - M_y}\right)^2\right] * \frac{M_d * L_b}{E * I_b} \quad (9)$$

Das variáveis exibidas na equação 9, tem-se M_c igual ao momento de cálculo da ligação, M_d sendo o momento de cálculo solicitando, M_y o momento de escoamento e M_p o momento de plastificação.

2. Estado limite de serviço: Assim como para o estado limite último, nesta condição as ligações devem ser capazes de absorver, no máximo, 25% do momento

solicitante. Visto isso, a rigidez máxima de uma ligação é obtida através da equação 10.

$$S_j = \frac{2*\alpha}{(7\alpha-2)} * \frac{E*I_b}{L_b} \quad (10)$$

A capacidade rotacional mínima para a ligação flexível, considerando o estado limite de serviço, é obtida através da equação 11.

$$\theta_r = \frac{M_d*L_b}{3*E*I_b} \quad (11)$$

2.3.2.3 Ligações parcialmente conectadas

1. Estado limite último: São as ligações que apresentam comportamento intermediário, entre as ligações totalmente conectadas e as ligações flexíveis. Além disso, devem apresentar a capacidade rotacional mínima definida por NETHERCOT et al (1998) através da equação 12:

$$\theta_r = \left[0{,}344 - 0{,}212 * \frac{M_c}{M_d} + 0{,}561 * \left(\frac{M_d - M_y}{M_p - M_y}\right)^2 * \frac{1}{\sqrt{1+\frac{M_c}{M_d}}}\right] * \frac{M_d*L_b}{E*I_b} \quad (12)$$

Das variáveis exibidas na equação 12, tem-se M_c igual ao momento de cálculo da ligação, M_d sendo o momento de cálculo solicitando, M_y o momento de escoamento e M_p o momento de plastificação.

2. Estado limite de serviço: Para essa condição, as premissas são as mesmas expostas para o estado limite último, alterando apenas o método para se obter a capacidade rotacional mínima, conforme exibido na equação 13.

$$\theta_r = \frac{2-R'}{6} * \frac{M_d*L_b}{E*I_b} \quad (13)$$

Sendo R' a relação entre o momento da ligação e o momento da viga no estado limite de serviço.

2.3.2.4 Ligações não estruturais

NETHERCOT et al (1998) define as ligações não estruturais como aquelas que não apresentam comportamento que seja possível de classificar nas outras classes descritas pelo pesquisador. MAGGI (2000) acrescenta que este tipo de ligação não apresenta capacidade rotacional adequada para serem classificadas nas outras categorias.

Por fim, NETHERCOT et al (1998) diz que ligação não estruturais podem ser entendidas como ligações que foram mal dimensionadas e, dessa forma, precisam ser verificadas novamente.

2.3.3 EUROCODE 3 (1992)

No ano de 1992, o EUROCODE propôs um método de classificação baseado no comportamento global da estrutura, na capacidade de absorver carga dos elementos estruturais e da rigidez da ligação. Por avaliar o comportamento global, este tipo de classificação varia para estruturas contraventada e não contraventada.

Para a classificação das ligações são utilizados os parâmetros m e Θ, definidos a partir das equações 14 e 15:

$$m = \frac{M}{M_p} \quad (14)$$

$$\theta = \frac{\theta_r}{\theta_p} \quad (15)$$

Com Θ_p igual:

$$\theta_p = \frac{M_p * L}{E * I} \quad (16)$$

Das variáveis exibidas na equação 16, tem-se Θ_p igual rotação da ligação, Mp igual ao momento de plastificação da viga, I sendo o momento de inércia da seção transversal do perfil, L o comprimento da viga e E o módulo de elasticidade.

O EUROCODE (1993) define curvas que relacionam a rigidez e resistência das ligações, através dos adimensionais apresentados nas equações 14 e 15. Estas curvas de rigidez podem ser visualizadas no EN-1993-1-1, seção 6.9.6.3, Fig. 6.9.8.

Essas curvas delimitam a fronteira entre ligação semirrígidas e rígidas. As equações que descrevem as curvas de fronteira do comportamento das ligações são apresentadas na seção 6.9.6.3 da norma EM-1993-1-1.

O entendimento da curva m x Θ, e das equações que as definem, possibilitam uma melhor interpretação da característica não linear das ligações, conforme apontado por pesquisadores ao longo dos anos.

2.3.4 EUROCODE 3 (2005)

A seção 1.8 do EUROCODE (2005) apresenta as ligações classificadas em simples, contínua e semi-contínua.

As ligações simples têm características similares as ligações flexíveis, definidas por NETHERCOT et al (1998), não transmitindo momentos entre os elementos conectados, atuando como uma rótula. Já as ligações contínuas podem ser comparadas as ligações totalmente conectadas, também definidas por NETHERCOT et al (1998), apresentando transmissão dos esforços e alta rigidez.

As ligações semi-contínuas têm comportamento intermediário entre as contínuas e as simples, sendo necessário a analisar o comportamento global da estrutura para o estudo da ligação em si.

Quanto a rigidez da ligação, a classificação apresentada no EUROCODE (2005) é similar a descrita no EUROCODE (1992), não sendo necessárias maiores explicações. Além da classificação quanto a rigidez, a versão da norma europeia apresentada em 2005 traz a classificação das ligações quanto a resistência:

1. Completamente resistente: São as ligações em que o momento resistente é superior, ou igual, ao momento resistente dos elementos conectados (viga e pilar).
2. Flexível: São as ligações cujo momento resistente é menor do que 25% do momento de plastificação total necessário para a ligação ser considerada completamente resistentes.

2.3.5 AISC/LFRD (1978/1986/2005/2010)

No ano de 1978, foi publicada uma norma americana, a qual foi mantida até 1986, que classificava as ligações em rígidas, flexíveis e semirrígidas.

As ligações rígidas garantiam a continuidade da estrutura, não ocorrendo rotação relativa entre os elementos conectados. De forma contrária, as ligações flexíveis permitiam a rotação relativa entre os elementos conectados pela ligação, e as ligações semirrígidas apresentavam um comportamento intermediário.

Após revisão de conceitos, a AISC passou por alterações e em 1986 introduziu a classificação das ligações baseada no estado limite dos elementos. Dessa forma, as ligações passam a ser classificadas como completamente restringidas (FR) e parcialmente restringidas (PR).

Segundo BERGAMASCO (2012), as ligações FR são similares as ligações rígidas, descritas pela AISC em 1976, enquanto as ligações PR unem os grupos de ligações flexíveis e semirrígidas. A classificação PR abrange todas ligações com rigidez insuficiente para impedir o movimento relativo entre viga e pilar.

Por fim, a revisão da AISC publicada em 2005 traz alterações relativas ao método de determinação dos limites para se classificar uma ligação como PR ou FR. Estes limites podem ser determinados através do momento fletor atuante e da relação momento x rotação da ligação. As equações e curvas para a determinação do tipo de equação são exibidas na figura C-B3.3 da AISC 360-10.

2.3.6 ABNT 8800 (2008)

A ABNT NBR 8800 (2008) classifica as ligações de estruturas metálicas segundo análise elástica entre elementos de barras, através da rigidez da conexão. As equações que estabelecem os limites para se definir uma ligação rotulada e uma ligação rígida são apresentadas na seção 6.1.2.1 da norma brasileira.

MENDES (2017) esclarece que a consideração de ligação rígida deve ser realizada apenas quando a equação 17 for atendida. Caso a relação não seja atendida, a NBR 8800 (2008) sugere que a ligação seja classificada como semirrígida e a metodologia de cálculo proposta pelo EUROCODE 3 (2005) seja aplicada.

$$\frac{\frac{I_{viga}}{L_{viga}}}{\frac{I_{pilar}}{L_{pilar}}} \geq 0{,}1 \qquad (17)$$

2.3.7 BUONICONTRO (2017)

BUONINCONTRO (2017) desenvolveu um sistema considerando três diferentes tipos de classificação das ligações. Estes tipos são definidos através da rigidez e resistência das ligações, tendo seus limites definidos e apresentados nas Tabela 2 e Tabela 3.

Tabela 2: Classificação das ligações quanto a rigidez

Classificação	Limite (kN*m/rad)
Rígida	$K_i \geq 2{,}5x10^5$
Semirrígida	$5{,}0x10^3 \leq K_i \leq 2{,}5x10^5$
Rotulada	$K_i \leq 5{,}0x10^3$

Tabela 3: Classificação das ligações quanto a resistência

Classificação	Momento resistente
Rígida	$M_u \geq M_p$
Semirrígida	$0{,}15M_p \leq M_u \leq M_p$
Flexível	$M_u \leq 0{,}15M_p$

O sistema apresenta curvas não lineares definindo os limites de classificação, através de um gráfico momento x rotação. A Figura 8 apresenta o gráfico que descreve a classificação proposta por BUONICONTRO (2017)

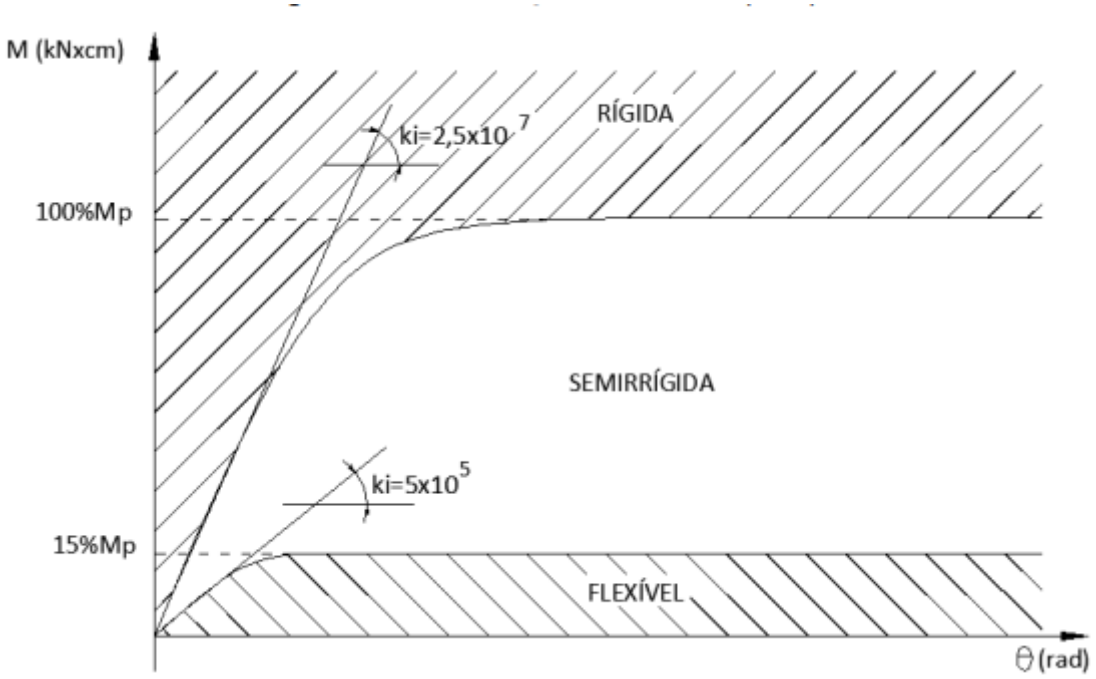


Figura 8: Classificação BUONICONTRO (2017) –MENDES (2017), Apud BUONICONTRO (2017)

3 PROCEDIMENTOS DE CÁLCULO

A seguir, serão apresentadas as propostas de dimensionamento para ligações com chapas de extremidade estendidas propostos pelo EUROCODE 3 (2005) e pela ABNT NBR 8800 (2008).

3.1 Procedimento de cálculo proposto pelo EUROCODE 3 (2005)

A metodologia de cálculo apresentada no EUROCODE (2005), foi proposta em 1993 e posteriormente sofreu alterações até chegar no conceito atual. O modelo mecânico de cálculo considera o comportamento de cada componente individualmente, para então explicar o comportamento global da ligação.

Esta metodologia também é conhecida como método dos componentes e, segundo MENDES (2017) neste método os componentes são representados por molas translacionais, podendo ser linear ou não linear, formando sistemas capazes de simular o comportamento momento x rotação das ligações.

De acordo com BESSA (Apud BERGAMASCO, 2012), o método se baseia principalmente na distribuição plástica das forças de tração em cada linha de parafusos, sendo assim cada linha de parafuso apresenta uma resistência potencial, diferentemente do método clássico que considera o braço de alavanca em relação ao centro de rotação para o cálculo das resistências da ligação. A Figura 9 apresenta uma comparação entre o método da alavanca e o método dos componentes.

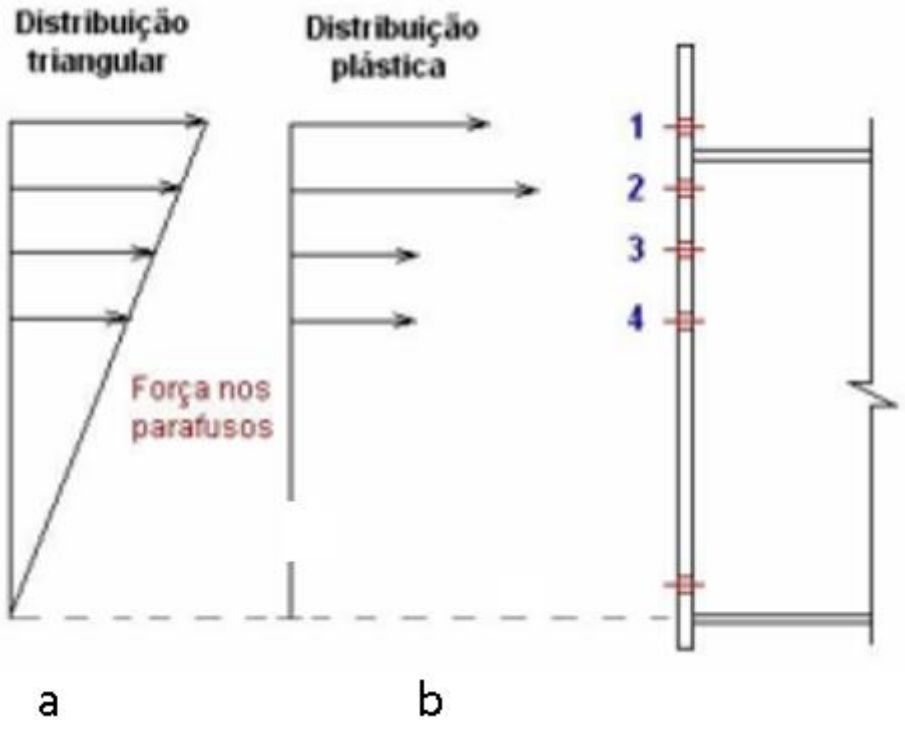


Figura 9: Distribuição dos esforços: a)método da alavanca; b) método dos componentes – BERGAMASCO (2012), Apud MAGGI (2004)

Para que o método dos componentes seja utilizado de forma correta, deve-se realizar uma análise da transferência dos esforços internos das ligações. Visto isso BERGAMASCO (2012) faz algumas recomendações:

1. As forças internas e os momentos fletores resistentes da ligação devem estar em equilíbrio com as solicitações externas;
2. Cada elemento da ligação deve ter resistência suficiente para resistir aos esforços solicitantes e as deformações existentes;
3. A distribuição dos esforços internos deve ser definida de acordo com a rigidez de cada elemento;

Por fim, o EUROCODE 3 (2005) estabelece as seguintes definições para a utilização do método dos componentes:

1. Nó: Intersecção dos eixos da viga e do pilar, onde ocorre a transmissão dos esforços internos;
2. Zona nodal: Nó e extremidades dos elementos conectados (viga e pilar);
3. Elementos de ligação: São os elementos conectores (parafusos, soldas, chapas, etc.);
4. Ligação: Região que engloba a zona nodal, elementos de ligação e o painel da alma do pilar;
5. Propriedades estruturais do nó: Resistencia aos esforços internos, rigidez e capacidade de rotação.

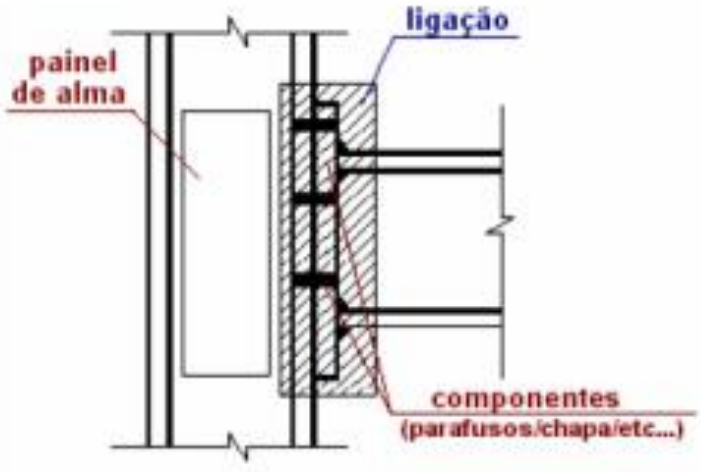


Figura 10: Ligação viga-pilar com chapa de extremidade – BERGAMASCO (2012), Apud MAGGI (2004)

3.1.1 Identificação dos componentes

O EUROCODE (2005) apresenta as principais características de resistência e rigidez para os componentes básicos utilizados em ligações com chapas de extremidade. A Figura 11 exibe um exemplo de ligação com chapa de extremidade, enquanto a Tabela 4 descreve os componentes dessa ligação e os esforços aos quais este componente é solicitado.

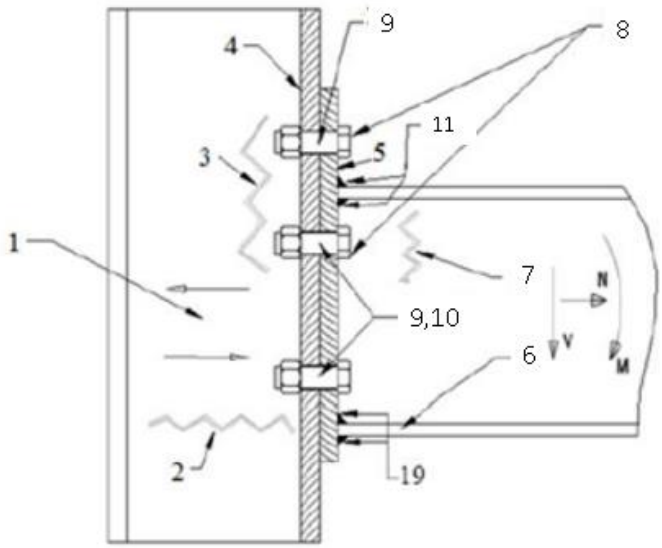


Figura 11: Componentes da ligação viga-pilar – Adaptado de MENDES (2017)

Tabela 4: Componentes da ligação viga-pilar

Item	Componentes
1	Alma do pilar sob cisalhamento
2	Alma do pilar sob compressão
3	Alma do pilar sob tração
4	Mesa do pilar sob flexão
5	Chapa de topo sob flexão
6	Mesa e alma da viga sob compressão
7	Alma da viga sob tração
8	Parafusos sob tração
9	Parafusos cisalhando
10	Pressão de contato em furos
11	Solda

Conforme dito anteriormente, o método dos componentes consiste na análise individual de cada um dos elementos da ligação, para se entender o comportamento global da estrutura. Para isso, deve-se fazer a associação, em série e/ou paralelo, dos componentes para se avaliar a ligação de forma global.

Segundo MENDES (2017), nessa etapa cada componente é representado por uma mola translacional configurando um sistema mecânico capaz de simular uma mola rotacional e, a partir disso, pode-se determinar a resistência, rigidez e capacidade de rotação. A Figura 12 exibe a associação entre os componentes para o caso de ligação com chapas de extremidade estendida.

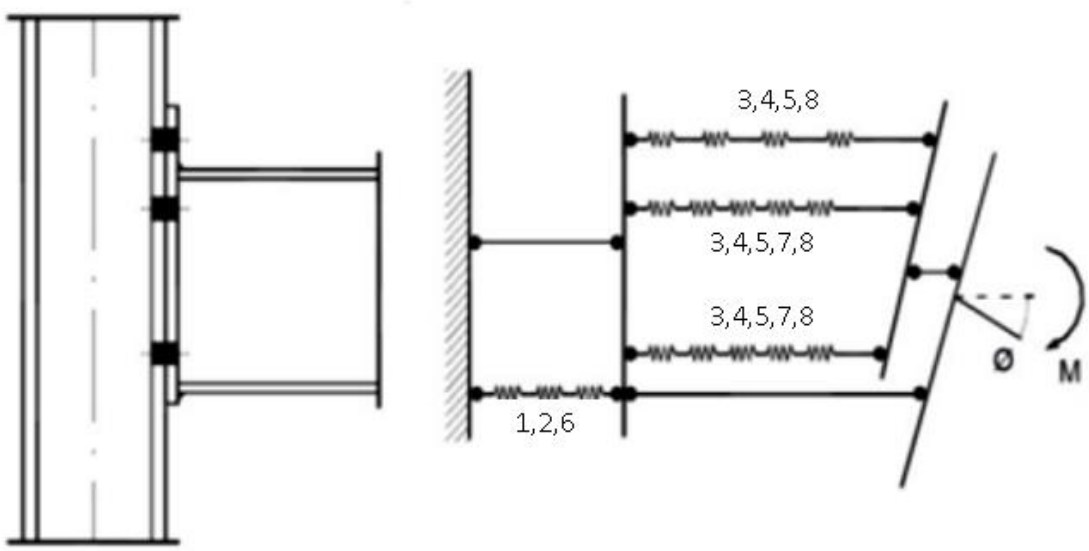


Figura 12: Associação dos elementos de ligação – Adaptado MENDES (2017)

3.1.2 Momento resistente

O momento resistente de cálculo das ligações de chapa estendida é avaliado por meio do equilíbrio de esforço das regiões submetidas a tração, regiões de compressão e de cisalhamento.

A análise da resistência da região tracionada deve ser feita em etapas, considerando individualmente a resistência potencial de cada fileira de parafusos. Para isso, deve-se considerar os esforços atuando na linha do parafuso a ser analisado e avaliar o momento considerando a distância entre esta linha e o ponto de compressão, conforme ilustrado na Figura 13.

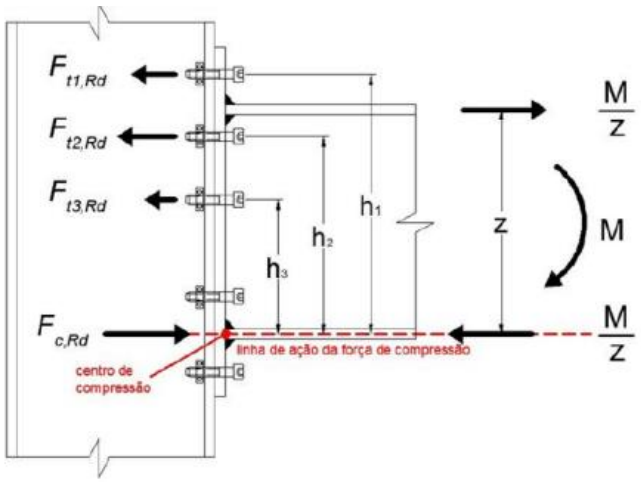
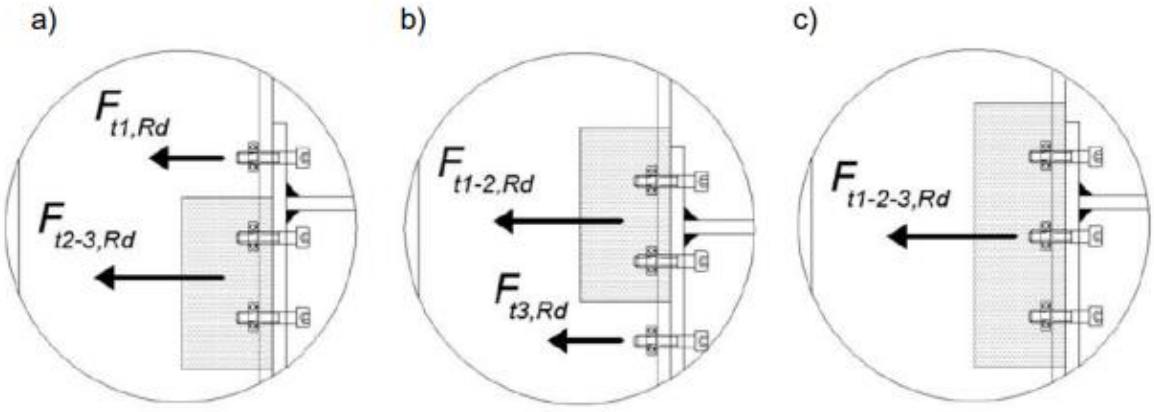


Figura 13: Esforços nas linhas de parafusação – Adaptado MENDES (2017)

Após se obter a resistência individual para cada linha de parafusos, deve-se analisar todas as possíveis combinações de resistência entre as linhas com parafusos, ou seja, as resistências de cada linha não devem ser avaliadas apenas de forma individual. Além disso, deve-se atentar para o fato de que além dos parafusos, outros elementos influenciam na resistência a tração (alma do pilar tracionada, alma da viga sob flexão, mesa do pilar e chapa de extremidade sob flexão).

A Figura 14 exibe um exemplo de combinação das resistências proporcionadas pelas linhas de parafusação.



Legenda: a) Linha 1 isolada e linhas 2 e 3 integrantes do grupo 2-3
b) Linha 3 isolada e linhas 1 e 2 integrantes do grupo 1-2
c) Linha 1, 2 e 3 integrantes do grupo 1-2-3

Figura 14: Combinações das linhas de parafuso – MENDES (2017)

Após todos os procedimentos de análise listados, MENDES (2017) traz algumas importantes considerações sobre a resistência efetiva de uma linha de parafusos:

1. A resistência potencial da região tracionada deve ser reduzida para atender a hipótese de equilibro do sistema. Com isso, a resistência da região tracionada é limitada ao menor valor das regiões de compressão e cisalhamento;
2. Caso necessário, a resistência de uma linha de parafusos pode ser reduzida de forma que não seja superior a resistência do grupo de linhas que pertence subtraído da resistência da linha do parafuso isolada pertencente ao mesmo grupo. A equação 18 exemplifica esta consideração.

$$F_{t1,Rd} \leq F_{t1-2,Rd} - F_{t2,Rd} \quad (18)$$

3. A resistência efetiva da linha de parafuso também deve ser reduzida quando a resistência efetiva da próxima linha for superior a 1,9 vezes a resistência a tração da linha de parafusos analisada.

Seguindo devidamente todos os passos e recomendações expostos no EURCODE 3 (2005) e descritos por MENDES (2017), o momento resistente da ligação pode ser obtido, conforme mostra a equação (19).

$$M_{j,Rd} \leq \sum h_r * F_{tr,Rd} \quad (19)$$

Sendo $M_{j,Rd}$ o momento resistente, h_r a distância entre o ponto de compressão e linha r de parafusos e $F_{tr,Rd}$ a força de tração na linha analisada.

3.1.3 Rigidez inicial

A rigidez rotacional de uma ligação pode ser entendida como a associação da rigidez dos vários elementos existentes na conexão. Além disso, os parâmetros de rigidez individuais devem atender a relação de força e deslocamento, similar ao exposto pela lei de Hooke, conforme exibe a equação 20.

$$F_i = \mathrm{E} * k_i * \Delta_i \quad (20)$$

Sendo k_i a rigidez do elemento e Δ_i o deslocamento gerado pela força F_i aplicada.

MENDES (2017) apresenta um passo a passo de forma a simplificar a metodologia para o cálculo da rigidez rotacional de uma ligação com várias linhas de parafuso:

1. Verificar a rigidez de cada elemento da mesma linha de parafusos, associa-las em série e calcular a rigidez efetiva da linha (k_{eff}), conforme a seção 6.3.3.1 do EN-1993-1-8.

2. Associar em paralelo as rigidezes de cada linha de parafusos, considerando que a rotação ocorre de forma rígida (sem deformação dos elementos) e no centro da mesa inferior da viga.
3. Determinar a rigidez rotacional, combinando os parâmetros de rigidez equivalente da região de tração, compressão e cisalhamento, conforme apresentado no EN-1993-1-8, seção 6.3.1.

3.1.4 Capacidade de rotação

A capacidade de rotação está diretamente relacionada com a ductilidade da ligação e de seus componentes. A verificação da ductilidade é feita através da análise do momento resistente da ligação e, caso o momento resistente ($M_{j,Rd}$) seja elevado, a ligação possui capacidade de rotação suficiente para a operação.

Além da verificação do momento resistente, o EUROCODE 3 (2005) propõe uma inequação para verificação da espessura máxima da mesa do pilar que proporcionará a rotação adequada da ligação. Esta inequação é exibida na seção 6.4.2 da norma europeia.

3.1.5 Verificação dos componentes

Esta seção apresenta os parâmetros e metodologias para verificação dos componentes da ligação parafusadas de chapa de extremidade, conforme os critérios dispostos no EUROCODE 3 (2005).

A norma europeia apresenta coeficientes de segurança que são utilizados ao longo da verificação dos componentes. Tais coeficientes podem ser encontrados na tabela 2.1 do EM-1993-1-8.

3.1.5.1 Alma do pilar sob cisalhamento

O cisalhamento do painel é provocado pela combinação da força de cisalhamento do próprio pilar (pode ser percebido através da análise global da estrutura) e das forças horizontais geradas pelo binário de forças que solicitam as mesas da viga quanto ao momento fletor.

Resistência

O primeiro passo para o cálculo da resistência da alma do pilar sob cisalhamento é a verificação da esbeltez desta região, realizada com auxílio da equação exposta no item 1 da seção 6.2.6.1 do EUROCODE 3 (2005):

Atendendo a verificação de esbeltez, o cálculo da resistência plástica ao cisalhamento da alma do pilar ($V_{wp,Rd}$) é dado pela equação do item 2 a seção 6.2.61 do EN-1993-1-8.

Caso o pilar apresente enrijecedores na região da ligação, estes devem ser considerados e a resistência da alma sob cisalhamento é dada no item 4 da seção 6.2.6.1 da norma europeia.

Rigidez

A rigidez da alma do pilar sob cisalhamento é dada pela equação exposta na tabela 6.11 do EUROCODE 3 (2005).

3.1.5.2 Alma do pilar sob compressão

A compressão da alma do pilar é provocada pelas tensões de tração geradas devido ao momento fletor da viga, conforme exibido na Figura 15.

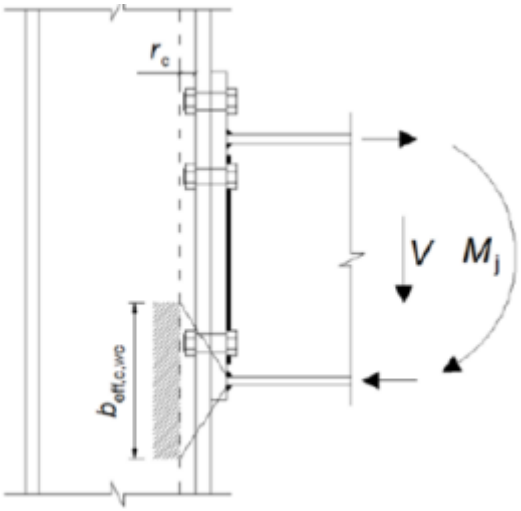


Figura 15: Tração da alma do pilar – MENDES (2017), apud EUROCODE 3 (2005)

Resistência

A resistência à compressão da alma do pilar é calculada a partir da equação apresentada no item 1 da seção 6.2.6.2 do EN-1993-1-8.

Rigidez

A rigidez da alma do pilar sob compressão é dada pela equação exposta na tabela 6.11 do EUROCODE 3 (2005).

3.1.5.3 Alma do pilar sob tração

Resistência

A tração da alma do pilar ocorre na região onde os parafusos se encontram tracionados e pode ser calculada de acordo com o item 1 da seção 6.2.6.3 do EUROCODE 3 (2005).

Rigidez

A rigidez da alma do pilar sob tração é dada pela equação exposta na tabela 6.11 do EUROCODE 3 (2005).

Caso o pilar possua enrijecedores sua rigidez pode ser considerada extremamente alta, tendendo ao infinito para fins de cálculo.

3.1.5.4 Mesa do pilar sob flexão

A revisão da norma europeia, feita em 2005, adiciona o modelo *T-stub,* utilizado para o cálculo da resistência da mesa do pilar sob flexão. Este modelo considera as linhas de parafuso atuando de forma isoladas e combinadas, conforme exibido na Figura 16.

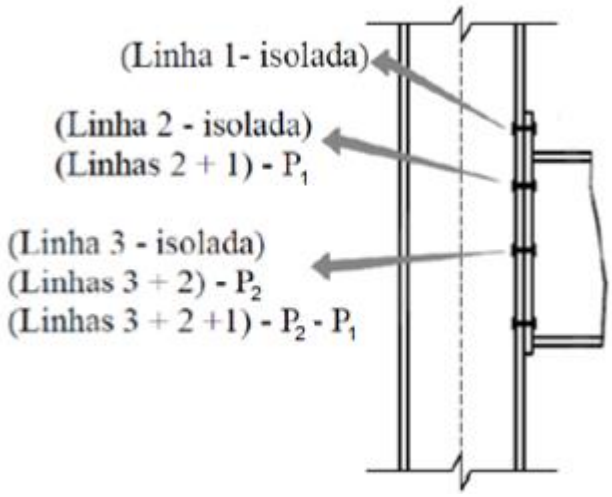


Figura 16: Modelo *T-stub* – MENDES (2017)

Resistência

Para análise da flexão de mesas ou chapas de extremidade, o modelo *T-stub* propõe três possíveis modos de falhas, conforme Figura 17.

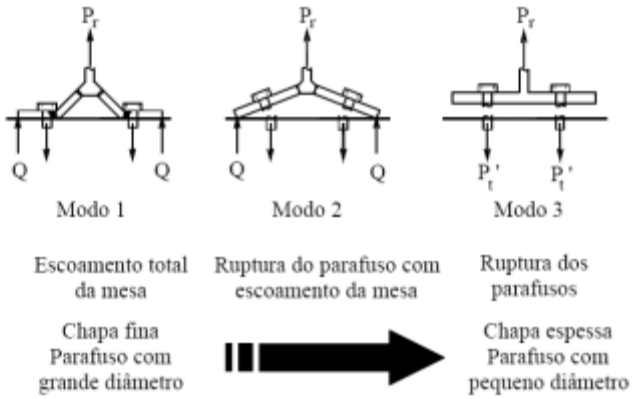


Figura 17: Modos de falha do modelo *T-stub* – BERGAMASCO (2012)

As resistências para todos os três possíveis modos de falha são apresentadas na tabela 6.2 da seção 6.2.4 do EN-1993-1-8.

Rigidez

A rigidez da mesa sob flexão é dada pela equação exposta na tabela 6.11 do EUROCODE 3 (2005).

3.1.5.5 Chapa de extremidade sob flexão

Resistência

Assim como o cálculo da mesa do pilar sob flexão, a verificação da chapa de extremidade segue a metodologia *T-stub*, com algumas diferenças nas definições da geometria.

A parte superior da chapa de extremidade estendida e a parte entre as mesas da viga são modeladas como dois *T-stubs* diferentes e as variáveis m e e são substituídas por m_x e e_x, conforme exibido na Figura 18.

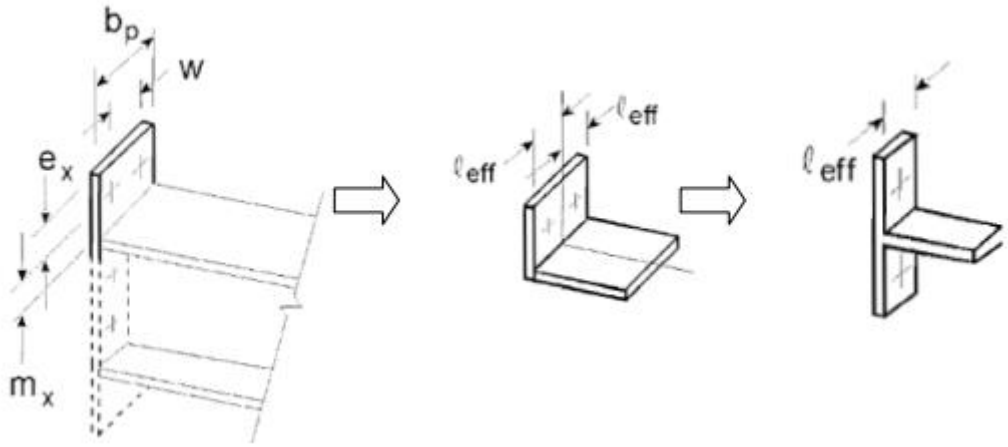


Figura 18: Modelos *T-stubs* para a chapa de topo– EUROCODE 3 (2005)

Rigidez

A rigidez da chapa de topo sob flexão pode ser obtida na tabela 6.11 do EUROCODE 3 (2005).

3.1.5.6 Tração na alma da viga

A tração da alma da viga ocorre devido ao binário de forças atuantes nas extremidades do perfil estrutural, que também é responsável pela tração e compressão das mesas do componente conforme mostra a Figura 32.

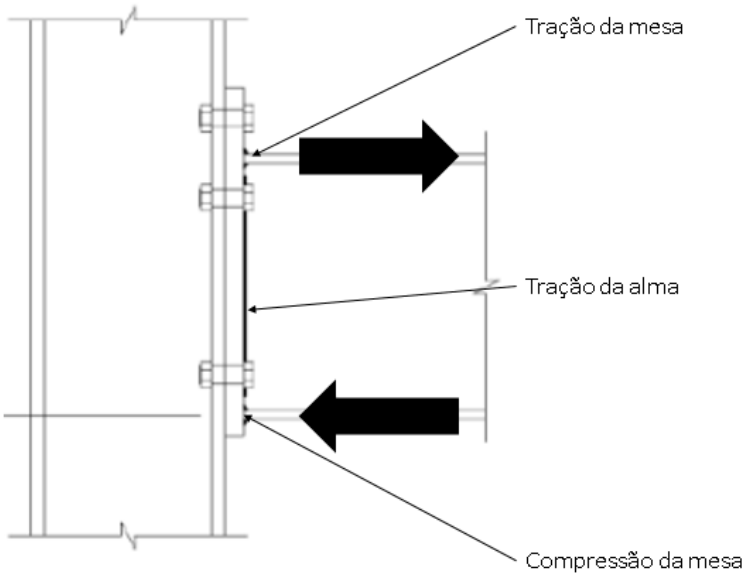


Figura 19: Esforços de tração na alma e compressão/tração nas mesas – Adaptado de MENDES (2017)

Resistência

A resistência à tração da alma da viga é obtida das equações apresentadas na seção 6.2.6.8 do EUROCODE 3 (2005).

Rigidez

O EUROCODE (2005) não descreve a metodologia de cálculo da rigidez relativa a alma da viga. Contudo, de acordo com MENDES (2017), tanto a alma quanto a mesa da viga possuem elevada resistência rigidez e, para fins de cálculo, pode-se considerar que o componente possui rigidez infinita.

$$k_8 = \infty \quad (56)$$

3.1.5.7 Tração nos parafusos

Resistência

Para a avaliação da resistência dos parafusos à tração, pode-se utilizar o modelo *T-stub* equivalente, assim como feito para a verificação da mesa do pilar e da chapa de extremidade submetidos a flexão (ver seções 2.4.1.5.4 e 2.4.1.5.5). A força resistente a tração dos parafusos pode ser determinada através da equação apresentada na seção 6.2.4 do EN-1993-1-8.

Rigidez

A rigidez das linhas de parafusos submetidos a tração pode ser calculada com auxílio da tabela 6.11 do EUROCODE 3 (2005).

3.1.5.8 Cisalhamento dos parafusos

Resistência

A força resistente de cisalhamento do parafuso pode ser calculada através da equação apresentada na tabela 3.4 da seção 3.6.1 do EN-1993-1-8.

Rigidez

Com exceção de parafusos protendidos, que possuem rigidez extremamente elevada (considerada infinita para os cálculos), a rigidez dos parafusos ao cisalhamento pode ser através da equação exposta na tabela 6.11 do EUROCODE 3 (2005).

3.2 Procedimento de cálculo proposto pelo NBR 8800 (2008)

A metodologia de cálculo apresentada na ABNT NBR 8800 (2008) é similar a descrita pelo EUROCODE3 (2005), com complementos de outras normas nacionais. Dessa forma tanto o cálculo de rigidez, quanto o de resistência se assemelham muito aos já expostos anteriormente. Visto isso, a metodologia e equações de rigidez não serão apresentadas nesta seção.

A seguir serão apresentadas recomendações relativas a geometria e construção das ligações parafusadas com chapa de extremidade. Posteriormente será apresentada a metodologia para o cálculo das resistências conforme a NBR 8800 (2008)

3.2.1 Recomendações geométricas para ligações com chapa de extremidade

Filetes de solda

A fixação das chapas de extremidade e enrijecedores, caso existam, é feita através da soldagem das vigas com a chapa de extremidade. A NBR 8800 (2008) sugere que a dimensão dos filetes de solda seja definida com base na espessura das chapas de extremidade a serem utilizadas, conforme exibe a tabela 9, seção 6.2.6.1, da NBR 8800.

Espaçamento mínimo entre furos

De acordo com a NBR 8800 (2008), a distância mínima entre furos, sejam eles padrões ou alongados, não deve ser inferior a 2,7 d_b. Além disso, caso existam linhas de parafusos consecutivas, a distância entre estes furos não deve ser inferior a d_b.

Espaçamento mínimo entre furos

O espaçamento máximo entre parafusos que fazem a ligação entre chapas e perfis, em contato contínuo, devem seguir as seguintes recomendações da norma ABNT NBR 8800 (2008):

- Em elementos não sujeitos à corrosão, o espaçamento não pode exceder 24 vezes a espessura da parte ligada de menor espessura, nem 300 mm;
- Em elementos sujeitos à corrosão atmosférica, o espaçamento não pode exceder 14 vezes a espessura da parte ligada menos espessa, nem 180 mm.

Distância mínima entre furos e bordas

A distância do centro de um furo a qualquer borda das partes ligadas não deve ser inferior aos valores indicados na tabela 14, seção 6.3.11, da NBR 8800.

Distância máxima entre furos e bordas

Para qualquer borda das partes conectadas, a distância do centro do furo até a borda mais próxima não pode exceder 12 vezes a espessura da parte ligada analisada, nem 150 mm

3.2.2 Força resistente de cálculo

As forças resistentes apresentadas pela NBR 8800 (2008) possuem grande similaridade com as expostas pelo EUROCODE3 (2005), sendo muitas vezes equivalentes e levando aos mesmos resultados.

Tração dos parafusos

A força de tração resistentes dos parafusos é dada por equação similar a proposta pelo EN-1993-1-8 (seção 3.1.5.7). A principal diferença entre as equações propostas está na resistência a ruptura do parafuso (f_{ub}), sendo este valor proposto pela NBR 8800 conforme A.3 da norma brasileira.

Cisalhamento dos parafusos

A força de cisalhamento resistentes dos parafusos é dada pelas equações apresentadas na seção 6.3.3.2 da NBR 8800 (2008), sendo que as equações diferem entre si dependendo do plano de cisalhamento ser na região rosqueada ou na região lisa dos parafusos.

Tração e cisalhamento combinados

Para casos em que ocorram carregamentos de tração e cisalhamento simultaneamente, aa NBR 8800 (2008) apresenta a equação na seção 6.3.3.4.

Pressão de contato em furos

Além das forças resistentes similares as apresentadas no EUROCODE3 (2005), a NBR 8800 (2008) expõe a metodologia para a verificação da pressão máxima de contato nos furos de chapas de extremidade.

A força resistente à pressão na parede do furo, levando em conta a possibilidade de rasgamento entre furos consecutivos e entre furo e borda, é dada pela apresentada na seção 6.3.3.3 da norma brasileira.

3.2.3 Efeito alavanca e forças solicitantes de tração

Diferentemente do EUROCODE3 (2005) que leva em conta o efeito alavanca para o cálculo de momentos e esforços de flexão, a NBR 8800 (2008) faz considerações de forma a simplificar os cálculos para que os efeitos da alavanca sejam representados nas ligações a serem analisadas. A seguir são expostas simplificações propostas da norma brasileira:

- Para determinação das espessuras de chapas ligadas considerando como critério de falha o momento resistente plástico, deve-se reduzir a força resistente de tração em 33%;
- Para determinação das espessuras de chapas ligadas considerando como critério de falha o momento resistente elástico, deve-se reduzir a força resistente de tração em 25%.

4 MODELOS NUMÉRICOS

Com o desenvolvimento tecnológico e evolução dos computadores, a modelagem numérica vem se tornando uma poderosa ferramenta de análises estruturais, sendo muito usada para o estudo de ligações entre elementos metálicos.

Apesar de não apresentar resultados idênticos aos procedimentos experimentais, uma análise numérica calibrada e com as condições de contorno bem definidas pode apresentar resultados satisfatórios sem que seja necessário o desenvolvimento de diversos modelos experimentais e custos elevados, o que permite o estudo de ligações com diferentes geometrias e dimensões.

Um dos objetivos deste trabalho é desenvolver modelos numéricos para comparação com as normas europeia e brasileira, de forma a avaliar se as metodologias de cálculo analítico estão em conformidade com os resultados obtidos em *softwares* computacionais.

Os modelos computacionais foram desenvolvidos com auxílio dos *softwares* SOLIDWORKS® e ANSYS *Workbench*® e, dessa forma, serão apresentados conceitos básicos sobre os programas e algumas de suas funcionalidades.

Para que os modelos desenvolvidos possuam maior confiabilidade, foram avaliadas ligações similares as ensaiadas por MAGGI (2004), para que os resultados possam ser comparados de forma a validar os cálculos computacionais e a metodologia a ser apresentada neste trabalho.

Segundo MOAVENI (1999), as análises em elementos finitos podem ser divididas na fase de pré-processamento, processamento dos cálculos e o pós-processamento das informações. O pré-processamento é dividido em alguns passos básicos que devem ser seguidos de forma minuciosa, a fim de evitar erros de cálculo e interpretação dos resultados, e são eles:

- Desenvolvimento da geometria a ser avaliada;
- Definição das considerações e das condições de contorno do problema de estudo;
- Aplicação de cargas;
- Discretização e construção da matriz de rigidez global.

A seguir serão apresentadas as metodologias e passo a passo de cada uma das etapas do pré-processamento.

4.1 Modelagem das ligações

Durante a modelagem e desenvolvimento da geometria é necessário levar em conta a complexidade do comportamento estrutural das ligações e dos resultados a serem obtidos (rigidez da ligação, limites de resistência e modo de falha). Dessa forma, mesmo sendo possível a análise das ligações como cascas (corpos bidimensionais), este trabalho apresenta o estudo de modelos sólidos (tridimensionais) para que sejam obtidos resultados mais fiéis ao comportamento real das ligações avaliadas.

O modelo tridimensional foi desenvolvido no SOLIDWORKS® e posteriormente importado para o ANSYS *SpaceClaim*®, onde a geometria passou por simplificações e alterações, de forma a reduzir o gasto de recursos computacionais durante a análise. Além disso, a foram consideradas simplificações sugeridas por ZONG et al (2020), sendo a exclusão de grande parte da coluna do modelo tridimensional, apresentando apenas a região de contato com a chapa de extremidade.

A Figura 20 apresenta um modelo exemplo desenvolvido no SOLIDWORKS®.

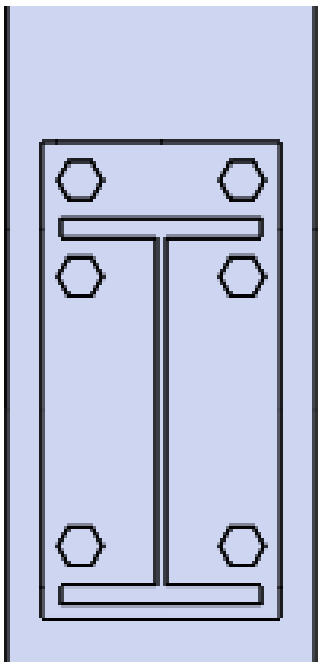


Figura 20: Modelo inicial desenvolvido no SOLIDWORKS– Do próprio autor

As dimensões foram definidas de acordo com os experimentos realizados por RIBEIRO (1998) e MAGGI (2004) e todos os modelos consideram vigas do perfil soldado VS 250x37 e pilares com perfil soldado CVS 300x70. A Figura 21 exibe as principais dimensões dos perfis considerados.

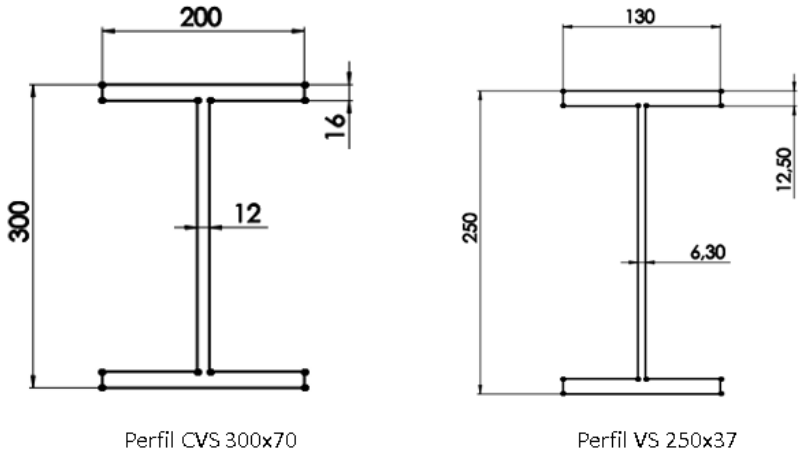


Figura 21: Perfil transversal dos perfis considerados – Do próprio autor

Com relação aos parafusos, MAGGI (2004) realizou experimentos com o modelo ASTM A325 e diâmetro de 16 mm. Buscando avaliar o efeito da variação das dimensões dos parafusos e das chapas, o presente estudo considera diâmetros de parafuso de 12,5 mm, 16

mm e 25,4 mm. Já para as chapas de topo, adotou-se espessuras de 12,5 mm, 16 mm, 19mm, 25 mm e 31,5 mm, assim como feito por MAGGI (2004) e BERGAMASCO (2012).

As demais dimensões das chapas de topo seguem as recomendações da NBR 8800 (2008) e dependem dos diâmetros dos parafusos. Dessa forma, modelou-se quatro diferentes geometrias de chapa de topo, que podem ser vistas na Figura 22.

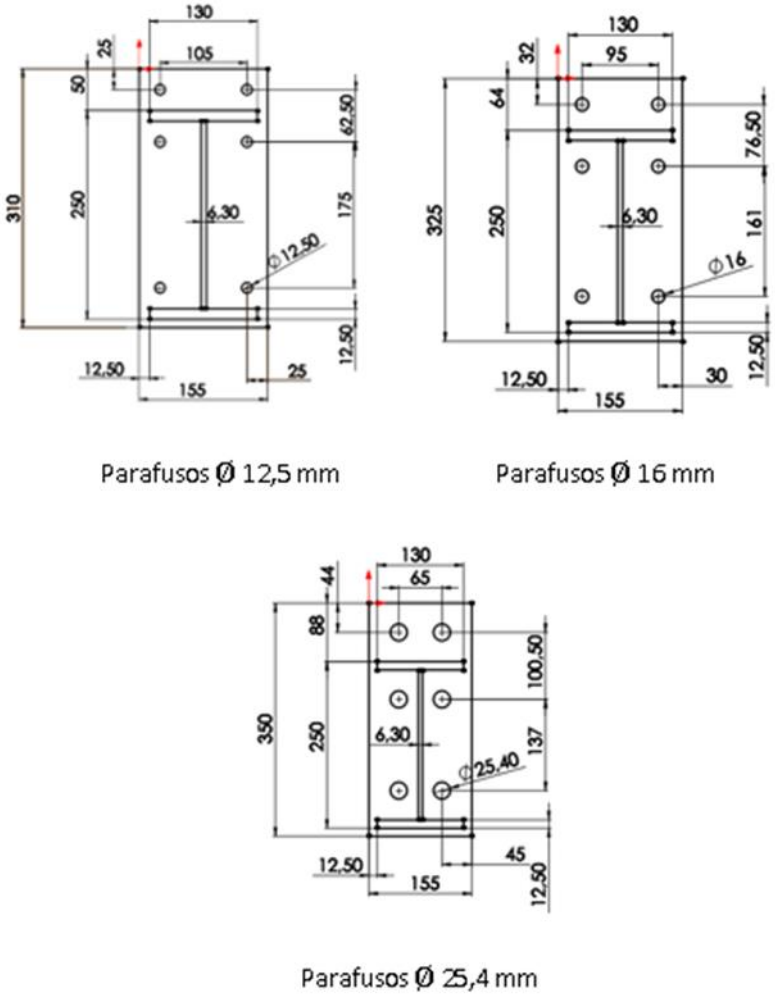
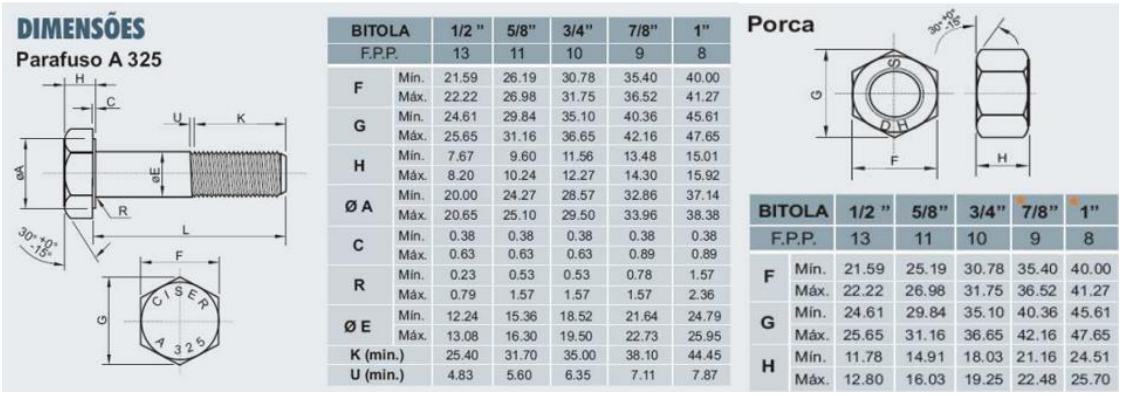


Figura 22: Geometria das chapas de extremidade – Do próprio autor

Com relação as dimensões dos parafusos e porcas e arruelas, buscou-se adotar as dimensões informadas no catálogo de fabricantes, conforme exibe a Figura 23.



BITOLA		1/2 "	5/8"	3/4"	7/8"	1"
F.P.P.		13	11	10	9	8
F	Mín.	21.59	26.19	30.78	35.40	40.00
	Máx.	22.22	26.98	31.75	36.52	41.27
G	Mín.	24.61	29.84	35.10	40.36	45.61
	Máx.	25.65	31.16	36.65	42.16	47.65
H	Mín.	7.67	9.60	11.56	13.48	15.01
	Máx.	8.20	10.24	12.27	14.30	15.92
Ø A	Mín.	20.00	24.27	28.57	32.86	37.14
	Máx.	20.65	25.10	29.50	33.96	38.38
C	Mín.	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38
	Máx.	0.63	0.63	0.63	0.89	0.89
R	Mín.	0.23	0.53	0.53	0.78	1.57
	Máx.	0.79	1.57	1.57	1.57	2.36
Ø E	Mín.	12.24	15.36	18.52	21.64	24.79
	Máx.	13.08	16.30	19.50	22.73	25.95
K (min.)		25.40	31.70	35.00	38.10	44.45
U (min.)		4.83	5.60	6.35	7.11	7.87

BITOLA		1/2 "	5/8"	3/4"	7/8"	1"
F.P.P.		13	11	10	9	8
F	Mín.	21.59	25.19	30.78	35.40	40.00
	Máx.	22.22	26.98	31.75	36.52	41.27
G	Mín.	24.61	29.84	35.10	40.36	45.61
	Máx.	25.65	31.16	36.65	42.16	47.65
H	Mín.	11.78	14.91	18.03	21.16	24.51
	Máx.	12.80	16.03	19.25	22.48	25.70

Figura 23: Dimensões padrão de parafusos e porcas – Catálogo Ciser

A Figura 24 apresenta a configuração final do modelo a ser analisado, com as dimensões consideradas para a viga e a coluna.

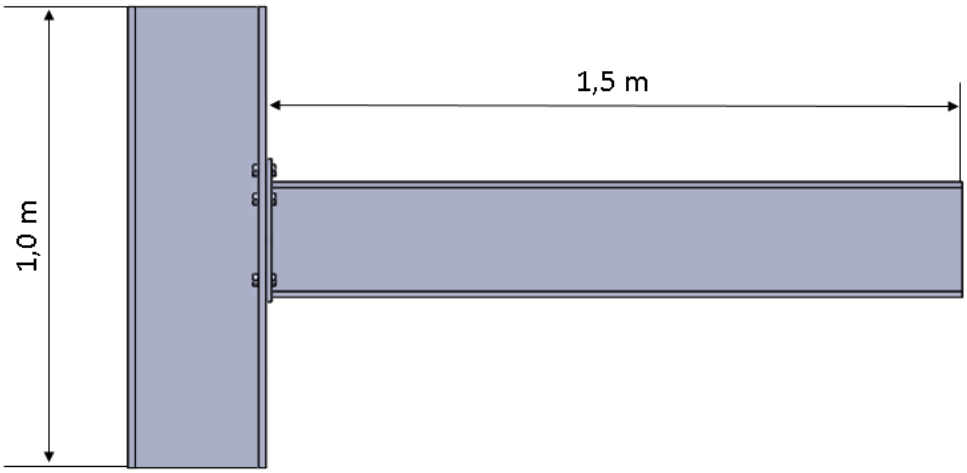


Figura 24: Configuração dos modelos e principais dimensões – Do próprio autor

4.2 Considerações e condições de contorno

Para que o modelo represente de forma fiel o comportamento da ligação quando exposta a solicitações, deve-se levar em conta as não linearidades existentes, sendo elas físicas ou geométricas.

4.2.1. Não linearidade física

Buscando aproximar o comportamento do material real, adotou-se diagramas multilineares para a representação da curva de tensão x deformação.

Segundo BERGAMASCO (2012), os diagramas multilineares isotrópicos (MISO) apresentam comportamento similar aos diagramas bilineares (BISO), com diferença na

separação entre o comportamento elástico e plástico do material, que se dá por meio de dois segmentos de reta, permitindo uma melhor representação do comportamento do aço quando submetido a esforços. A representação multilinear apresenta como principal vantagem a definição do ponto de início da plastificação e identificação das diferentes etapas de plastificação.

O ANSYS *Workbench*® possibilita a aplicação de diversos tipos de curvas multilineares, contudo, optou-se por seguir um modelo com encruamento isotrópico similar ao apresentado por MAGGI (2004) durante seus estudos para o aprimoramento das análises em elementos finitos de ligações com chapa de extremidade. O modelo com encruamento isotrópico é capaz de reproduzir a plasticidade do aço utilizando tensões equivalentes de Von Mises como critério de plastificação.

MAGGI (2004) apresenta duas curvas típicas para a representação da tensão x deformação do aço, que representam as configurações das curvas do aço das chapas e dos parafusos. Segundo MAGGI (2004) os modelos foram apresentados por BAHAARI e SHERBOURNE (1996) e KULAK et al (1987). Contudo, MAGGI (2004) propõe a adição de um ponto no trecho descendente ao final das curvas, de forma a representar o colapso da estrutura no momento de ruptura do material. A adição deste ponto leva o modelo a não convergir numericamente, o que representaria o colapso total da estrutura e, consequentemente, a ruptura da ligação. A Figura 25 apresenta as curvas propostas por MAGGI (2004).

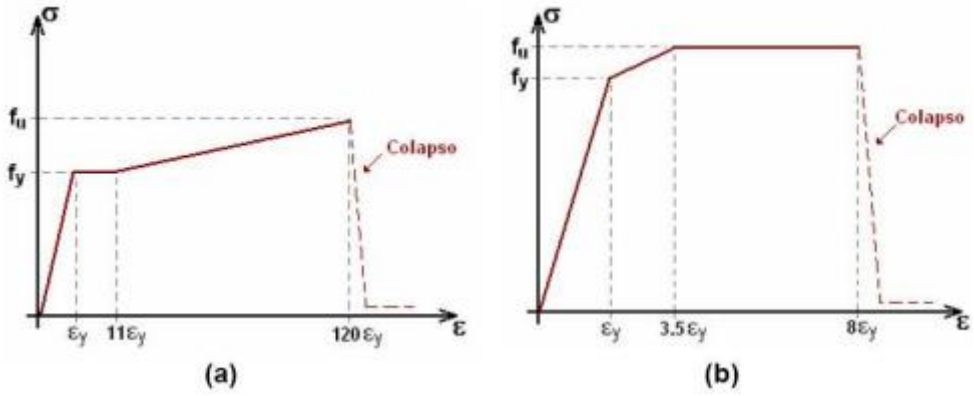


Figura 25: Curvas multilineares de tensão x deformação (a) para as chapas (b) para os parafusos– MAGGI (2004)

Visto que este trabalho busca comparar os resultados obtidos em norma com os resultados computacionais, a representação do diagrama tensão x deformação foi feita

apenas até o ponto limite de resistência a ruptura do material, não sendo considerado o colapso da estrutura, como feito por MAGGI (2004) e BERGAMASCO (2012).

4.2.2. Não linearidade geométrica

Considerando a grande quantidade de elementos que precisam ser agrupados para caracterizar uma ligação parafusada de chapa de extremidade, espera-se que este tipo de conexão apresente uma série de descontinuidades geométricas.

Dessa forma, é necessário que as não linearidades inerentes da descontinuidade geométrica sejam representadas nos modelos numéricos. Tal representação foi realizada através de elementos finitos especiais conhecidos como elementos de contato, que representam as interações entre as interfaces dos componentes que formam a ligação.

A Figura 26 apresenta todas as regiões onde deve-se representar os contatos entre os componentes, sendo estes:

- Contato entre a chapa de topo e a mesa da coluna;
- Contato entre a cabeça do parafuso e a chapa de extremidade;
- Contato entre o corpo do parafuso e os furos na chapa e na mesa do pilar;
- Contato entre a porca do parafuso e a mesa da coluna.

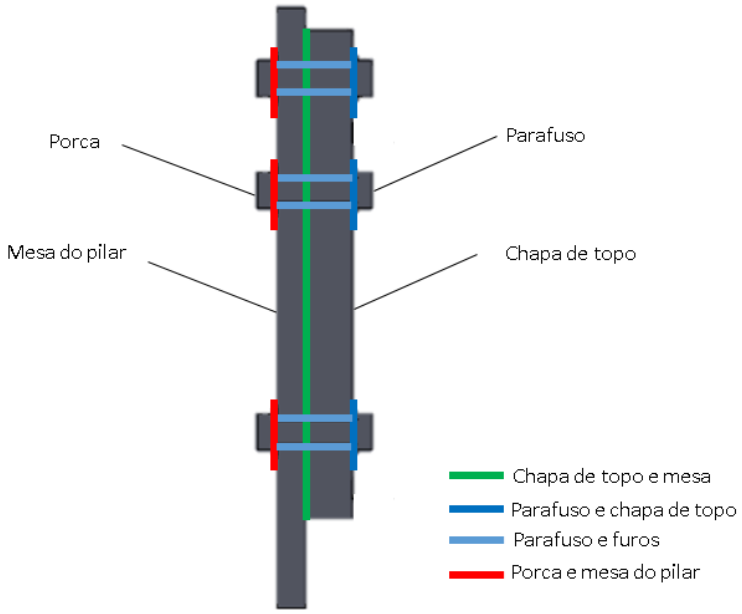


Figura 26: Contatos dos componentes de ligações parafusadas com chapa de extremidade – Do próprio autor

Ressalta-se que as simulações realizadas possuem restrições apenas no pilar e, dessa forma, os componentes não possuem vínculos iniciais. Após a aplicação das cargas, os

elementos de contato atuam e geram restrições na chapa de extremidade e na viga por meio dos parafusos conectados ao pilar, garantindo assim a estabilidade do modelo.

Para os contatos em que se considera o atrito, o ANSYS *Workbench*® considera a teoria de Mohr-Coulomb, atribuindo um coeficiente de atrito estático igual à 0,3 para as regiões de contato.

4.2.3. Propriedade dos materiais

Visto que comumente o material dos parafusos é diferente do material das chapas e perfis metálicos, definiu-se dois materiais para a aplicação no modelo numérico. A definição dos materiais consiste na apresentação das propriedades mecânicas (módulo de elasticidade, limite de escoamento e limite de ruptura) e do diagrama multilinear que define o comportamento tensão x deformação do material.

Conforme definido por MAGGI (2004), o módulo de elasticidade para ambos os materiais é igual a 205 GPa.

Ressalta-se que todas as propriedades dos materiais são iguais as exibidas por RIBEIRO (1998) e MAGGI (2004), o que facilita a comparação dos resultados obtidos neste trabalho com os encontrados por ambos os autores.

Chapas e perfis metálicos

Para as chapas e perfis metálicos, considerou-se um limite de escoamento (fy) igual a 300 MPa e limite de resistência igual a 608 MPa. Com relação ao diagrama multilinear, o mesmo é representado pelos pontos exibidos na Tabela 5 e sua curva é apresentada na Figura 27.

Tabela 5: Dados de tensão x deformação dos perfis e chapas – Adaptado de BERGAMSCO (2012)

Tensão (MPa)	Deformação (mm/mm)
300	0,001462
303,8	0,012423
413,1	0,032230
534,1	0,086178
607,6	0,215111

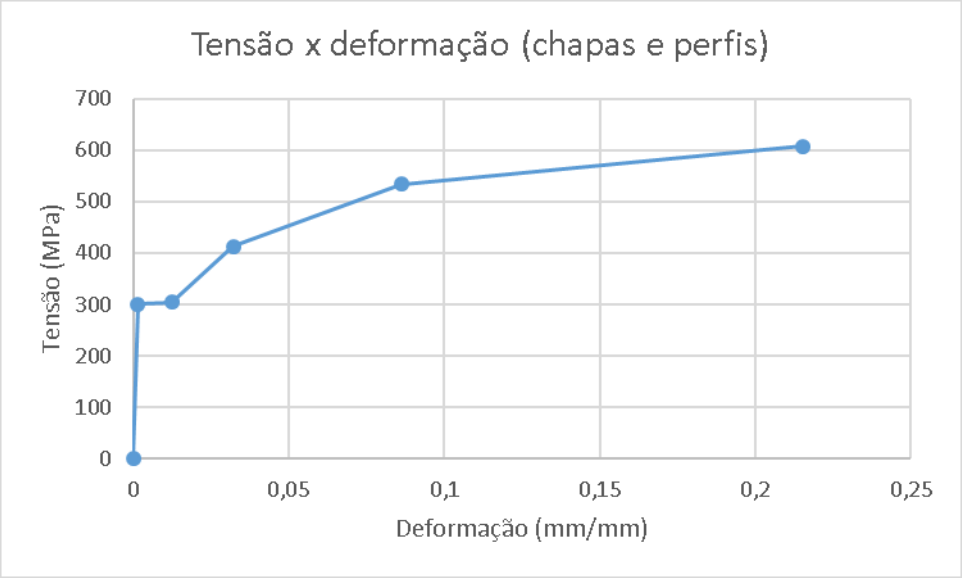


Figura 27: Diagrama multilinear do material de chapas e perfis metálicos – Do próprio autor

Parafusos

As propriedades mecânicas dos parafusos foram definidas conforme valores de referência expostos na NBR 8800 (2008), considerando modelo ASTM A325. Para este tipo de parafuso, tem-se um limite de escoamento (fy) igual a 635 MPa e limite de resistência igual a 825 MPa. Com relação ao diagrama multilinear, o mesmo é representado pelos pontos exibidos na Tabela 6 e sua curva é apresentada na Figura 28.

Tabela 6: Dados de tensão x deformação dos parafusos – Adaptado de BERGAMSCO (2012)

Tensão (MPa)	Deformação (mm/mm)
635,0	0,003097
737,5	0,020925
825,0	0,051908

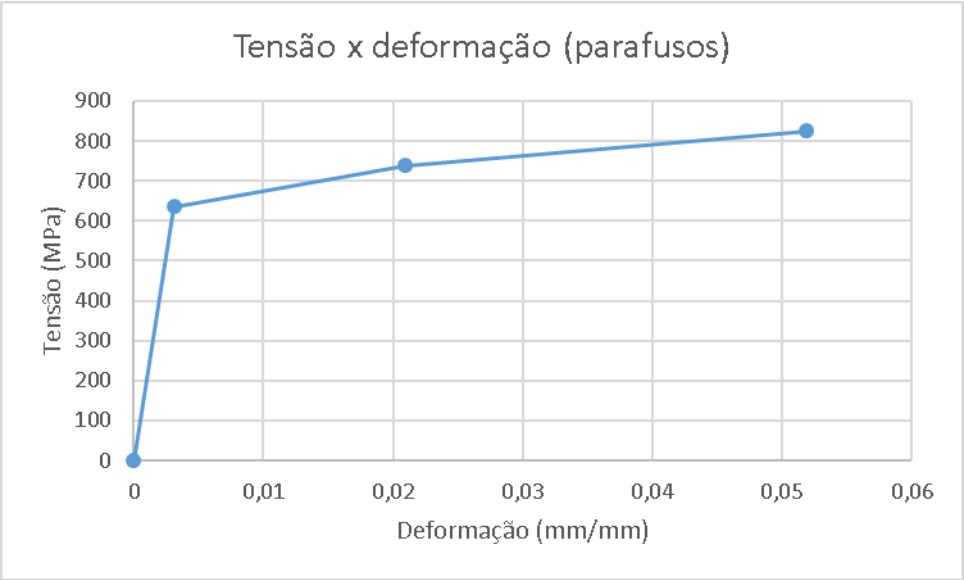


Figura 28: Diagrama multilinear do material de chapas e perfis metálicos – Do próprio autor

4.2.4. Restrições

Conforme citado na seção 4.2.3, todas as restrições aplicadas ao modelo sã representadas na coluna, uma vez que a aplicação dos elementos de contato garante a interação entre os componentes e, consequentemente, restringe o movimento da viga conectada ao pilar através da ligação com chapa de extremidade.

As faces superior e inferior da coluna foram impedidas de realizar movimentos de translação e rotação nos três eixos coordenados, conforme exposto na Figura 29.

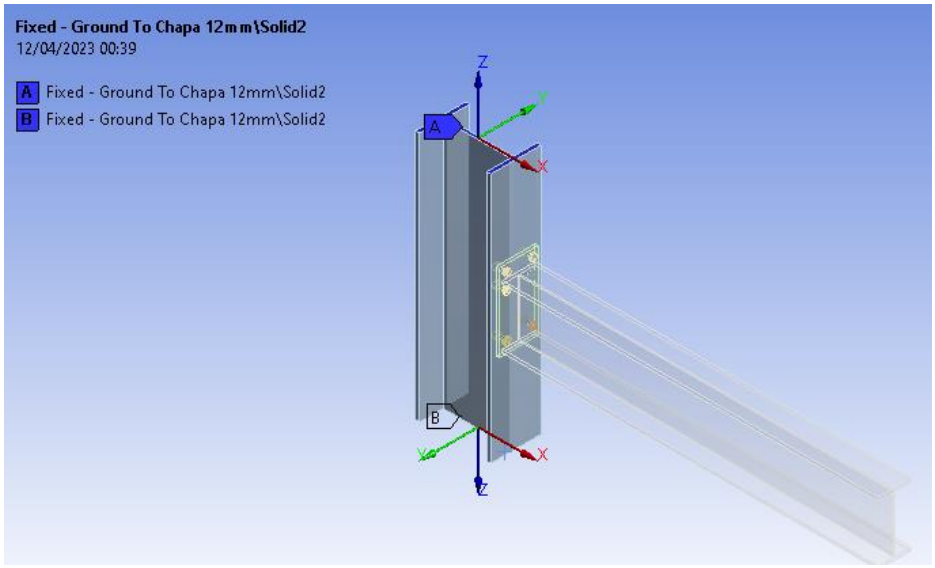


Figura 29: Restrições de movimento aplicadas na coluna – Do próprio autor

4.3 Discretização do modelo

A discretização da geometria a ser avaliada deve levar em conta os tipos de elementos a serem utilizados e a quantidade de elementos existentes ao longo dos componentes, pensando num equilíbrio entre o refinamento da malha e os gastos computacionais para o cálculo.

4.3.1. Elementos tridimensionais

A modelagem tridimensional implica na utilização de elementos volumétricos durante a elaboração da geometria e algumas considerações são feitas para a escolha do elemento volumétrico adequado. De acordo com MAGGI (2004), elementos hexaédricos com 8 nós e 3 graus de liberdade por nó possuem boa capacidade de representar as não linearidades existentes em ligações parafusadas de chapa de extremidade. Em contrapartida, o mesmo estudo diz que a utilização deste tipo de elemento pode ocasionar resultados desfavoráveis para situações em que se observa esforços por flexão, devido ao efeito numérico conhecido como *shear locking*, que provoca o aumento de rigidez do elemento finito.

MAGGI (2004) ainda diz que o *"shear locking"* pode ser minimizado com a aplicação de elementos com funções de interpolação quadrática, o que gera aumento da quantidade de nós no modelo. Porém, segundo BURSI & JASPART (Apud MAGGI, 2004), em casos de problemas que envolvem plasticidade, é necessário que os elementos apresentem descontinuidade no campo dos deslocamentos devido à plastificação e, consequentemente, elementos com interpolação linear apresentam resultados satisfatórios para este tipo de estudo.

Seguindo o que foi apresentado por MAGGI (2004), o elemento *SOLID45* (presente na biblioteca do ANSYS *Workbench*®) atende bem as necessidades dos estudos de ligações. Contudo, segundo BERGAMASCO (2012) durante a análise dos resultados de seus estudos, pôde-se perceber a perda de rigidez do material das chapas de extremidade durante o início da plastificação, o que diverge da realidade e da curva tensão x deformação definida para a análise.

BERGAMASCO (2012) explica esta incoerência física através da quantidade de nós existentes no *SOLID45*, que faz com que o elemento compute apenas a média das tensões nos oito vértices do sólido. Considerando a média das tensões dos nós, o elemento se plastifica como um todo, o que ocasiona a perda de rigidez no início do escoamento e torna a utilização do *SOLID45* inviável para o estudo a ser feito.

Através da utilização de elementos com mais nós, que permitem interpolações quadráticas, BERGAMASCO (2012) afirma que a curva tensão x deformação do modelo apresenta comportamento mais fiel a realidade e, dessa forma, o autor sugere a utilização do elemento *SOLID95*.

Considerando o histórico dos estudos desenvolvidos por MAGGI (2004) e BERGAMSCO (2012), além da evolução dos computadores e melhoria do desempenho computacional ao longo do tempo, optou-se pela utilização do elemento *SOLID95* (apresentados na Figura 30).

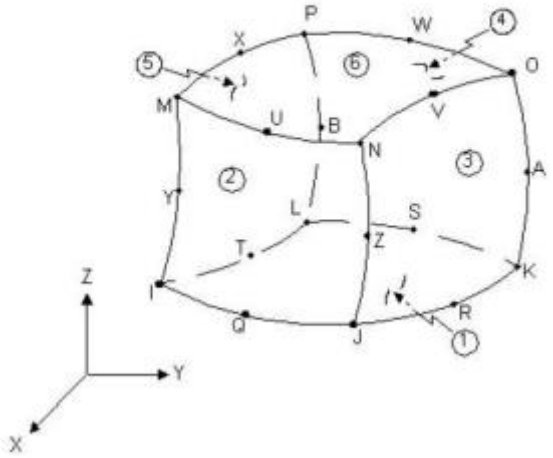


Figura 30: Elemento Hexaédrico *SOLID95* – BERGAMASCO (2012)

O *SOLID95* permite a modelagem de formatos irregulares sem perdas significativas na precisão dos resultados finais. Por ser um elemento de ordem superior ao *SOLID45*, este apresenta 20 nós com liberdade de translação nos três eixos coordenados principais. Além disso, o *SOLID 95*, apresenta capacidade de plasticidade, grandes deslocamentos, deformações e permite a consideração de diagramas multilineares (expostos na Figura 27).

4.3.2. Elementos de contato

Conforme descrito na seção 4.2.1, as não linearidades geométricas devem ser representadas através da aplicação de elementos de contato, que garantem a transmissão de esforços nas regiões onde existem interações de dois ou mais corpos da ligação de chapa de extremidade.

De acordo com BERGAMASCO (2012), os elementos de contato introduzem novos termos na matriz de rigidez, o que permite a consideração de esforços oriundos da tentativa

de penetração e separação de superfícies, devido as solicitações de compressão e tração dos componentes.

Considerando a utilização dos elementos *SOLID95*, os elementos de contato a serem utilizados devem ser o *CONTA174* e o *TARGE170*. Estes elementos são dispostos como pares, sendo que o elemento *CONTA174* é responsável por penetrar a superfície do elemento *TARGE170*, quando solicitado.

Por ser a superfície a ser penetrada, o elemento *TARGE170* representa as várias superfícies alvo para os elementos de contato associado (*CONTA*). A Figura 31 apresenta o elemento *TARGE170.*

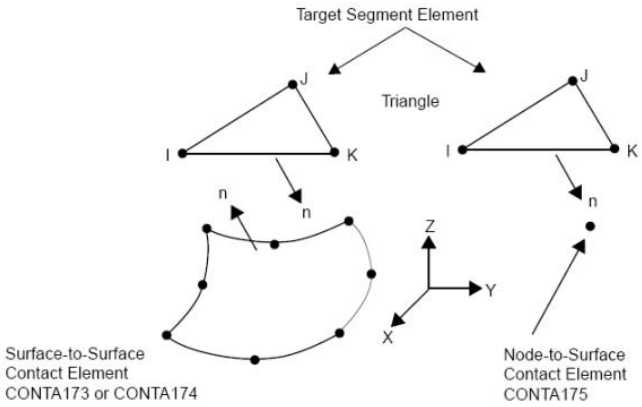


Figura 31: Elemento *TARGE170* – BERGAMASCO (2012)

Os elementos *CONTA174* são responsáveis por representar o contato e deslizamento entre as superfícies alvo e uma superfície deformável, a ser definida pelo próprio *CONTA174*. A Figura 32 ilustra o elemento de contato *CONTA174*.

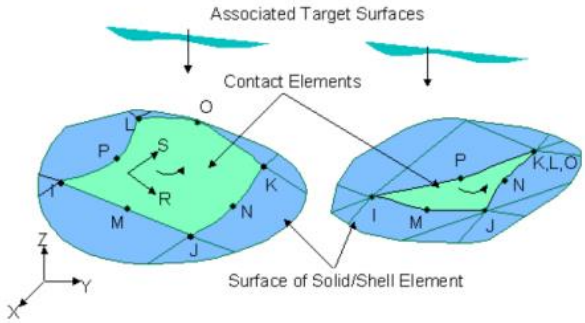


Figura 32: Elemento *CONTA174* – BERGAMASCO (2012)

Durante a definição dos pares de contato, se é necessário definir os valores de rigidez normal (FKN), rigidez tangencial (FKT) e o fator de tolerância de penetração (FTOLN).

A rigidez normal diz respeito a resistência à penetração das superfícies, sendo apresentada entre o intervalo de 0,01 a 1,00 no ANSYS *Workbench*®**.** Ressalta-se que o manual do *software* recomenda considerar esta rigidez igual a 1,00.

Quanto a rigidez tangencial, a mesma possui relação direta com a rigidez normal e o coeficiente de atrito entre superfícies (definido como 0,3, conforme apresentado na seção 4.2.1). Este fator caracteriza o efeito de deslizamento nas interfaces dos corpos em contato.

O fator de tolerância à penetração serve para determinar se a compatibilidade de penetração é satisfeita, sendo baseado na profundidade dos elementos subjacentes. A compatibilidade de contato é satisfeita se a penetração entre os elementos se encontra dentro da tolerância admissível, sendo 0,1 o fator de tolerância recomendado pelo manual do ANSYS *Workbench*®. Caso o software detecte penetrações acima do admissível, a solução não apresenta convergência mesmo que as forças residuais e incrementos de deslocamento respeitem seus respectivos critérios.

4.4 Aplicação de cargas

Seguindo as recomendações da NBR 880 (2008), a aplicação dos carregamentos foi dividia em duas etapas, sendo a aplicação da protensão inicial e o carregamento na extremidade da viga, com pequenos incrementos até o estado limite último da ligação verificada.

4.4.1 Aplicação da protensão inicial

De acordo com a NBR 8800 (2008), parafusos de alta resistência devem ser apertados de forma a se obter uma força mínima de protensão adequada para o diâmetro de parafuso adotado. A força de protensão mínima para parafusos ASTM equivale a aproximadamente 70% da força de tração resistente nominal de cada parafuso. Os valores podem ser vistos na Tabela 7.

Tabela 7: Força de protensão mínima em parafusos ASTM – Adaptado de NBR 8800 (2008)

Diâmetro (mm)	Força de protensão (kN)
12,5	53,0
16	91,0
25,4	227,0

No modelo numérico, as forças de protensão podem ser aplicadas através de diversas alternativas. MAGGI (2004) e BERGAMASCO (2012) utilizam a variação de temperatura de forma a gerar uma contração dos parafusos e pressionar a chapa e mesa da coluna ligada a viga e, dessa forma, aplicar a protensão nos modelos a serem analisados. Com a evolução dos softwares de análises estruturais, o ANSYS *Workbench* passou a disponibilizar uma ferramenta de protensão, que foi utilizada no presente trabalho.

De acordo com o tutorial “Análise de ligações parafusadas no ANSYS”, desenvolvido pela ESSS, A ferramenta de protensão divide o parafuso em duas partes, que serão unidas através de elementos especiais para esta aplicação (PRETS179). Após a aplicação da protensão, as duas metades do parafuso serão deslocadas de forma a se unir, conforme ilustra a Figura 33.

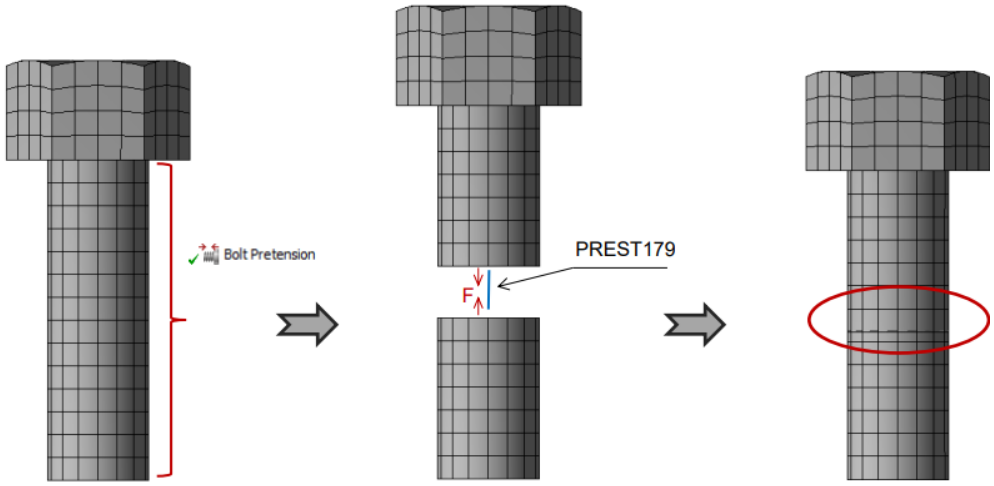


Figura 33: Ilustração da ferramenta de protensão – Tutorial ESSS

Ressalta-se que a aplicação deste tipo de carregamento requer algumas atenções quanto ao desenvolvimento do modelo para que as cargas de protensão não sejam transmitidas de forma incorreta a outros corpos em contato com os parafusos. De forma a evitar esta transmissão dos esforços, os parafusos devem ser divididos ao meio, para que as cargas de protensão sejam aplicadas entre as superfícies cilíndricas do corpo do parafuso, conforme exibe a Figura 34.

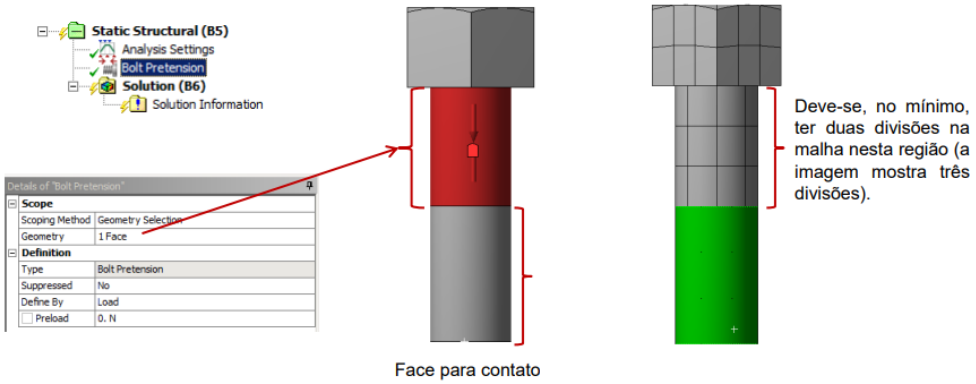


Figura 34: Considerações de modelagem para aplicação de protensão – Tutorial ESSS

4.4.1 Aplicação da carga na extremidade da viga

Buscando evitar deformações localizadas nas mesas superior e inferior da viga, MAGGI (2004) e BERGAMASCO (2012) acoplam os graus de liberdade de todos os nós da face da viga, de forma a garantir o deslocamento linear destes pontos. Para que o mesmo efeito seja atingido neste trabalho, as cargas que geram o deslocamento da extremidade da viga serão aplicadas em toda a face livre do componente, conforme exibe a Figura 35.

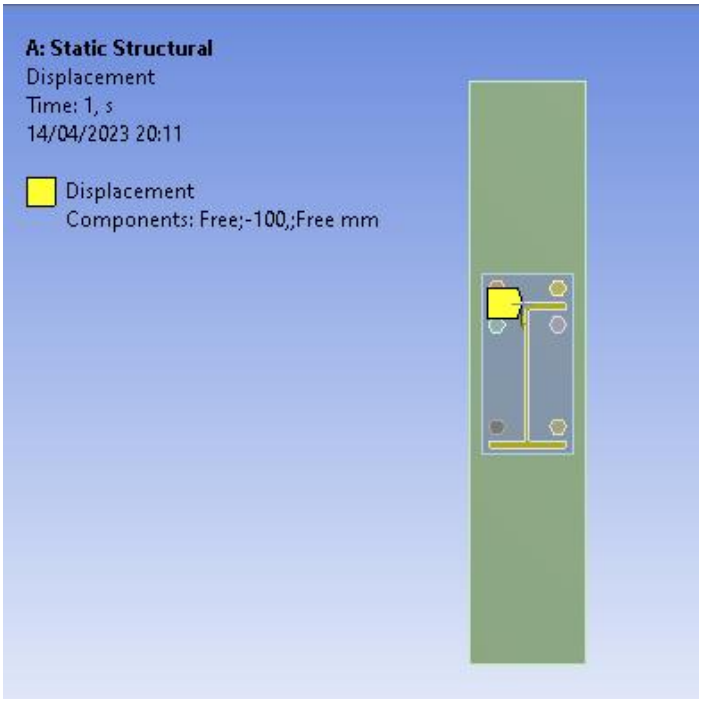


Figura 35: Aplicação de deslocamentos na extremidade da viga – Do próprio autor

De acordo com a NBR 8800 (2008), o deslocamento vertical máximo para vigas de piso deve ser igual a L/360. Para o modelo de estudo, o deslocamento máximo é igual a 9 mm. Contudo, um dos objetivos do estudo é a verificação das ligações até o seu modo de falha final, o que pode ocorrer em grandes deslocamentos da viga. Visto isso, o deslocamento máximo foi limitado pelo instante de falha da ligação, caracterizado pela não convergência da análise numérica.

5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados das análises numéricas realizadas com os modelos desenvolvidos através da metodologia proposta no capítulo 4, juntamente com a validação dos modelos numéricos com base nos resultados obtidos por MAGGI (2004) e BERGAMASCO (2012).

Após a validação dos modelos, realizou-se uma análise paramétrica a partir da variação das dimensões das chapas de extremidade e diâmetro dos parafusos dos modelos desenvolvidos. Os resultados obtidos serão comparados com os resultados dos métodos de dimensionamento propostos pelos códigos normativos (ABNT 8800, 2008 e EUROCODE 3, 2005).

Serão apresentadas curvas relacionando os esforços atuantes e o deslocamento vertical da viga, momento fletor e rotação da ligação, tensão e deformação da chapa de topo e as deformadas das ligações avaliadas. Além disso, será avaliado o efeito alavanca através dos deslocamentos relativos da chapa de extremidade, perpendiculares ao plano da mesa do pilar.

5.1 Curvas Força x Deslocamento

Nesta seção serão apresentadas as curvas de força x deslocamento da extremidade livre da viga. Os modelos avaliados foram divididos em relação ao diâmetro dos parafusos (12 mm, 16 mm e 25 mm. Ressalta-se que algumas configurações avaliadas são pouco utilizadas no dia a dia e servem apenas para comparação da influência da variação de dimensão dos parafusos e chapas em ligações de extremidade.

Para facilitar a identificação dos modelos, a Tabela 8 exibe o código criado para cada um deles:

Tabela 8: Classificação das ligações quanto a resistência e rotação

Código	Diâmetro dos parafusos	Espessura de chapa
C12-P12	12 mm	12 mm
C19-P12	12 mm	19 mm
C25-P12	12 mm	25 mm
C32-P12	12 mm	32 mm
C12-P16	16 mm	12 mm
C19-P16	16 mm	19 mm
C25-P16	16 mm	25 mm
C32-P16	16 mm	32 mm
C12-P25	25 mm	12 mm
C19-P25	25 mm	19 mm
C25-P25	25 mm	25 mm
C32-P25	25 mm	32 mm

5.1.1 Modelos com parafusos de 12 mm

Na Figura 36 são exibidas as curvas força x deslocamento para o ponto localizado na extremidade livre da viga dos modelos com parafusos de 12 mm.

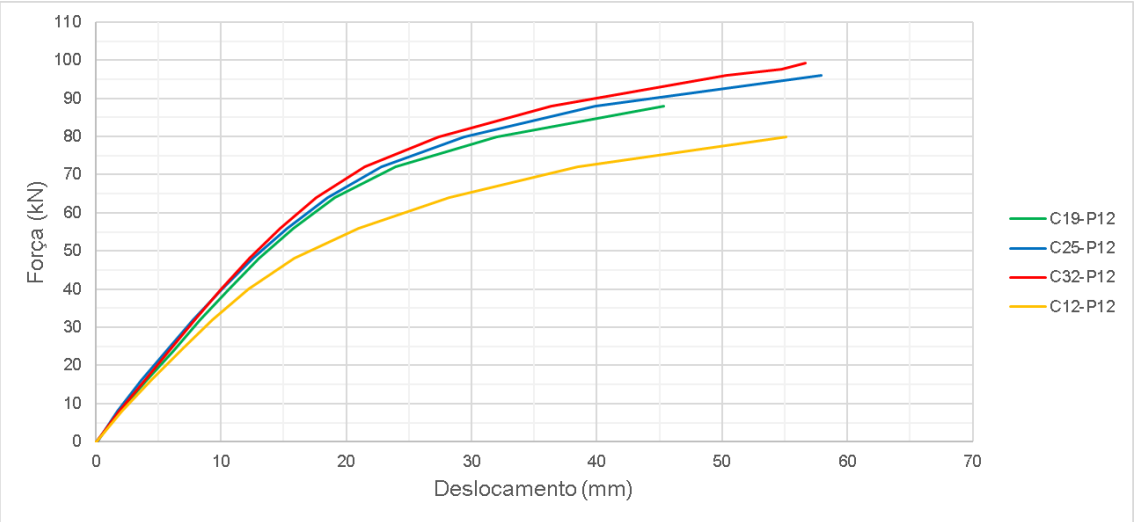


Figura 36: Força x deslocamento para modelos com parafusos de 12 mm – Do próprio autor

Pode-se observar que, para espessuras de chapa superiores a 19 mm, o comportamento das ligações é semelhante. Dessa forma, fica evidente a inviabilidade da utilização de chapas espessas em ligações com parafusos de diâmetro pequeno.

5.1.2 Modelos com parafusos de 16 mm

Na Figura 37 são exibidas as curvas força x deslocamento para o ponto localizado na extremidade livre da viga dos modelos com parafusos de 16 mm.

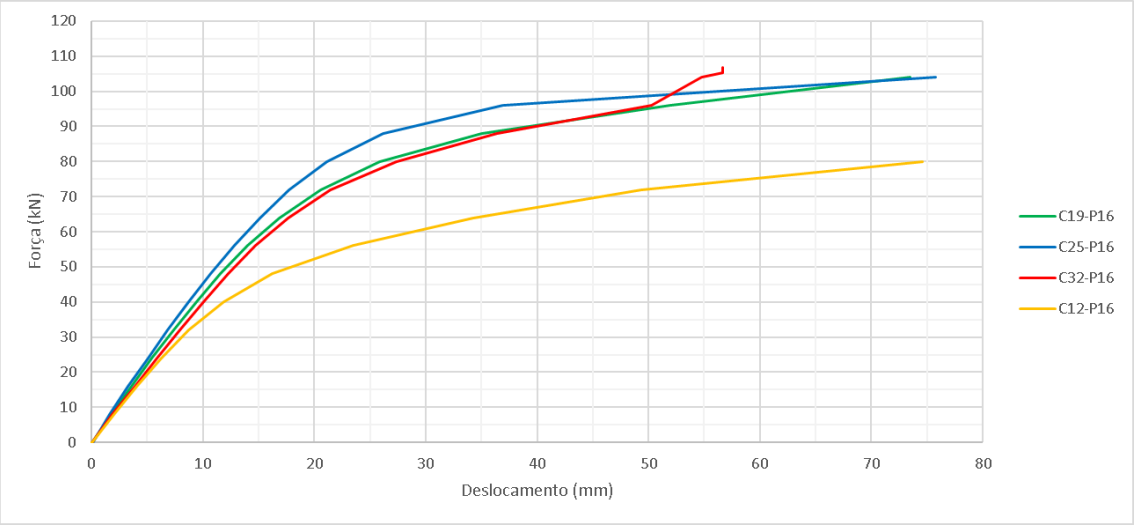


Figura 37: Força x deslocamento para modelos com parafusos de 16 mm – Do próprio autor

Pode-se observar que, para espessuras de chapa superiores a 19 mm, o comportamento das ligações é semelhante. Dessa forma, fica evidente a inviabilidade da utilização de chapas espessas em ligações com parafusos de diâmetro pequeno.

Os modelos com parafusos de 16 mm foram de extrema importância, visto que alguns deles podem ser comparados e validados a partir dos resultados experimentais obtidos por MAGGI (2004). Para a comparação serão considerados os protótipos com chapa de topo estendida e enrijecida (CTEE) com dimensões de 19 mm e 25 mm.

A Figura 38 apresenta a comparação entre os resultados observados por MAGGI (2004) e os obtidos no presente estudo para as chapas de 19 mm e 25 mm, respectivamente.

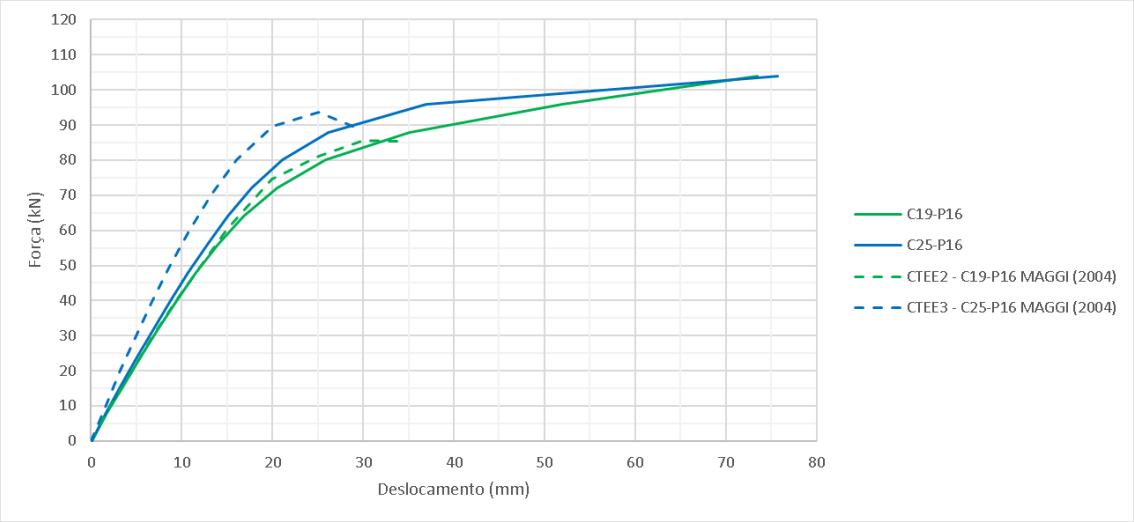


Figura 38: Comparação entre resultados de MAGGI e do presente estudo (parafusos 16 mm) – Do próprio autor

Conforme BERGAMSCO (2012), os resultados observados nas análises experimentais e nos modelos numéricos de MAGGI (2004) e nos modelos numéricos de BERGAMSCO (2012) são apresentados em tabelas a fim de facilitar a comparação e validação dos estudos.

Tabela 9: Força aplicada e deslocamento observado na extremidade da viga (modelos com parafusos de 16 mm e chapa de 19 mm)

Modelo	Força aplicada				
	0 kN	20 kN	40 kN	60 kN	80 kN
Experimental – MAGGI (2004)	0 mm	4,0 mm	9,0 mm	15,0 mm	25,5 mm
Numérico – BERGAMASCO (2012)	0 mm	4,0 mm	9,0 mm	14,0 mm	29,0 mm
Numérico – VIANA (2023)	0 mm	4,5 mm	9,5 mm	15,5 mm	26,0 mm

Tabela 10: Força aplicada e deslocamento observado na extremidade da viga (modelos com parafusos de 16 mm e chapa de 25 mm)

Modelo	Força aplicada				
	20 kN	20 kN	20 kN	20 kN	20 kN
Experimental – MAGGI (2004)	0 mm	3,5 mm	7,0 mm	11,0 mm	17,5 mm
Numérico – MAGGI (2004)	0 mm	2,5 mm	6,0 mm	8,5 mm	13,5 mm
Numérico – BERGAMASCO (2012)	0 mm	4,0 mm	8,5 mm	13,0 mm	26,0 mm
Numérico – VIANA (2023)	0 mm	4,0 mm	9,0 mm	14,0 mm	21,0 mm

Observa-se que os modelos numéricos desenvolvidos neste trabalho têm resultados muito similares aos obtidos em ensaios experimentais de MAGGI (2004). Além disso, pode-se observar similaridade entre o modelo do presente estudo e o desenvolvido por Bergamasco, visto que as considerações são similares, com exceção da permissão de deformação da mesa do pilar e do modo de aplicação da força de protensão.

Com relação as maiores deformações dos modelos numéricos, tal fato é justificado por não se existir uma curva de caracterização dos parafusos, mas apenas a teórica, levando a maior ductilidade dos componentes do que de fato se observa em testes práticos.

Por fim, conclui-se que os modelos apresentam boa similaridade com os fatos reais, validando, portanto, as análises e resultados apresentados neste trabalho.

5.1.3 Modelos com parafusos de 25 mm

Na Figura 39 são exibidas as curvas força x deslocamento para o ponto localizado na extremidade livre da viga dos modelos com parafusos de 25 mm.

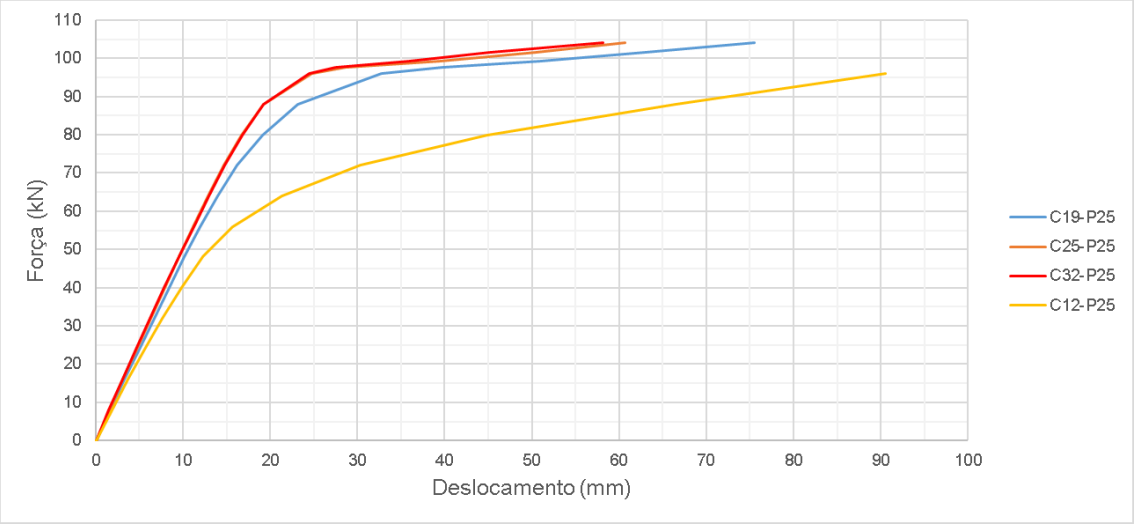


Figura 39: Força x deslocamento para modelos com parafusos de 25 mm – Do próprio autor

Pode-se observar que, para espessuras de chapa superiores a 25 mm, o comportamento das ligações é semelhante. Dessa forma, fica evidente a inviabilidade da utilização de chapas com espessuras muito superiores ao diâmetro do parafuso.

5.2 Curvas Momento x Rotação

A relação entre momento fletor atuante e rotação das ligações é obtida de forma indireta, a partir da avaliação dos esforços atuantes, comprimento de viga e deslocamentos horizontais da chapa de extremidade. A rotação é obtida a partir da avaliação do ângulo formado entre a altura da chapa de topo e o deslocamento horizontal desse componente, como apresentado na Figura 40.

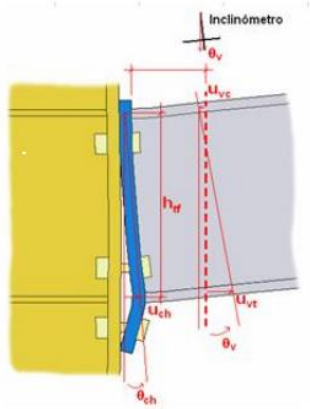


Figura 40: Força x deslocamento para modelos com parafusos de 12 mm – MAGGI (2004)

Destaca-se que o momento de plastificação da viga é igual a 139 kN.m, o que define se o colapso ocorre na ligação ou na viga. Para momentos resistentes da ligação inferiores ao momento de plastificação, o colapso ocorre na região das ligações.

5.2.1 Modelos com parafusos de 12 mm

Na Figura 41 são exibidas as curvas momento x rotação na chapa dos modelos com parafusos de 12 mm.

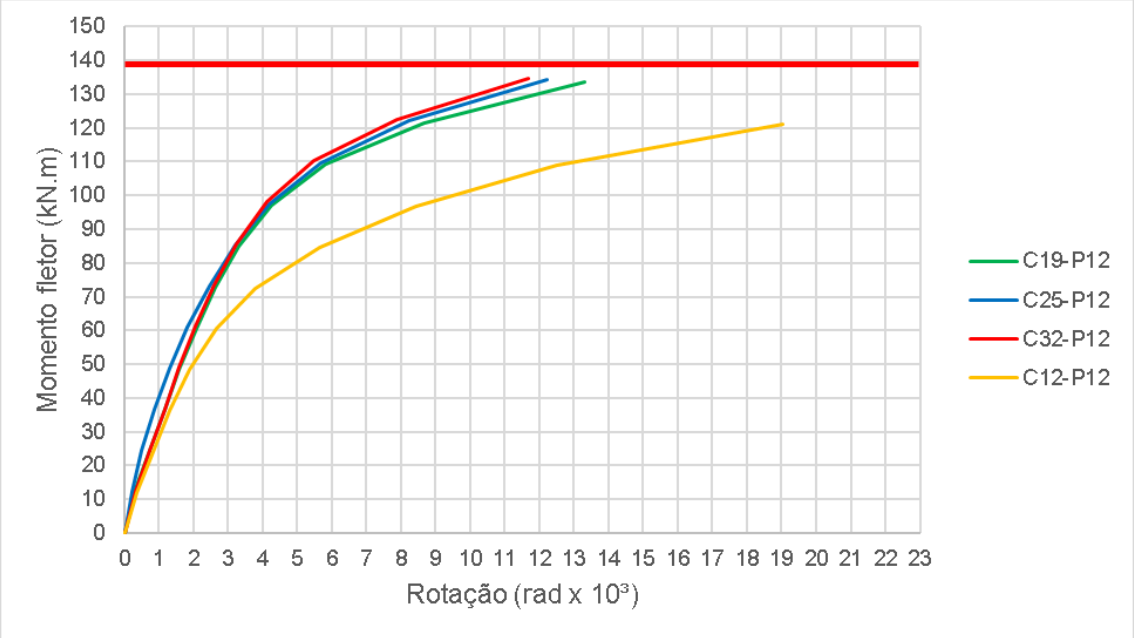


Figura 41: Momento x rotação para modelos com parafusos de 12 mm – Do próprio autor

Pode-se observar que nenhuma ligação com parafusos de 12 mm atingiu o momento de plastificação da viga e, dessa forma, o colapso da estrutura sempre ocorrerá com a ruptura dos parafusos. A ruptura dos parafusos, independente da espessura de chapa, mostra a inviabilidade da utilização de chapas espessas para parafusos pequenos, assim como observado na seção 5.1.1. Além disso, pode-se notar um pequeno aumento da rigidez inicial das ligações com o aumento da espessura de chapa.

5.2.2 Modelos com parafusos de 16 mm

Na Figura 41 são exibidas as curvas momento x rotação na chapa dos modelos com parafusos de 16 mm.

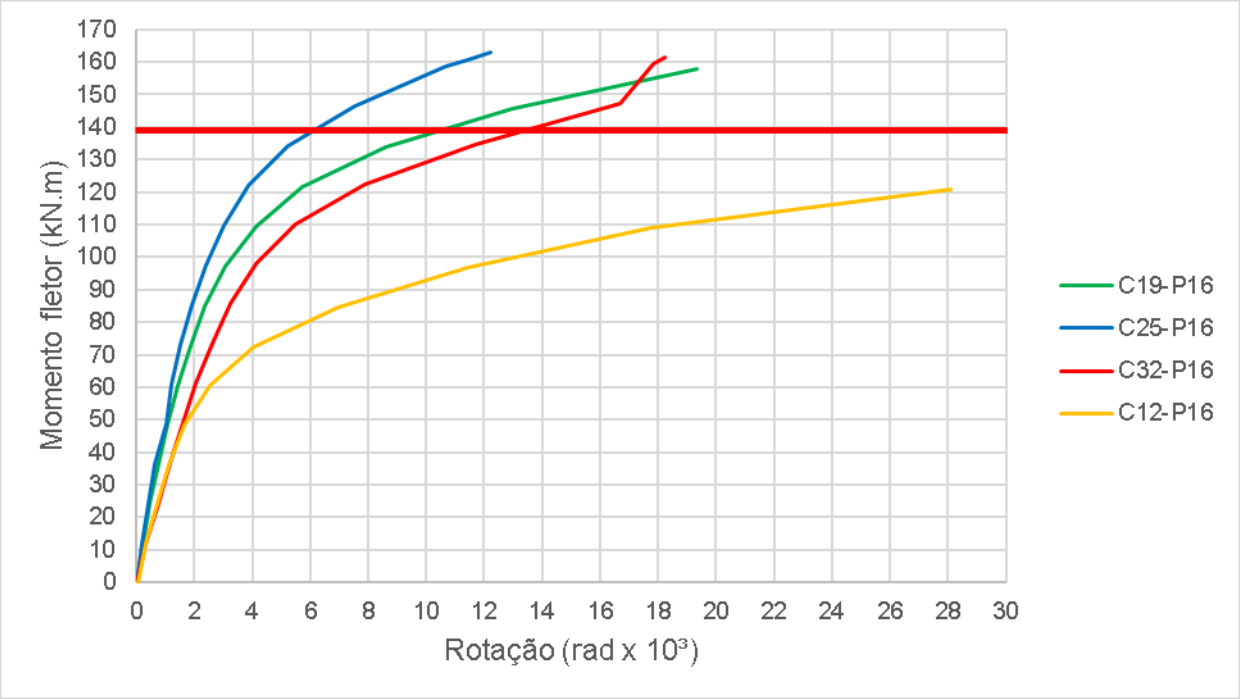


Figura 42: Momento x rotação para modelos com parafusos de 16 mm – Do próprio autor

Pode-se observar que apenas o modelo com chapa de 12 mm apresenta ligação com resistência inferior ao momento de plastificação dos perfis conectados e, dessa forma, para a maior parte dos modelos o colapso se dá pela falha dos perfis e não das ligações.

5.2.3 Modelos com parafusos de 12 mm

Na Figura 43 são exibidas as curvas momento x rotação na chapa dos modelos com parafusos de 25 mm.

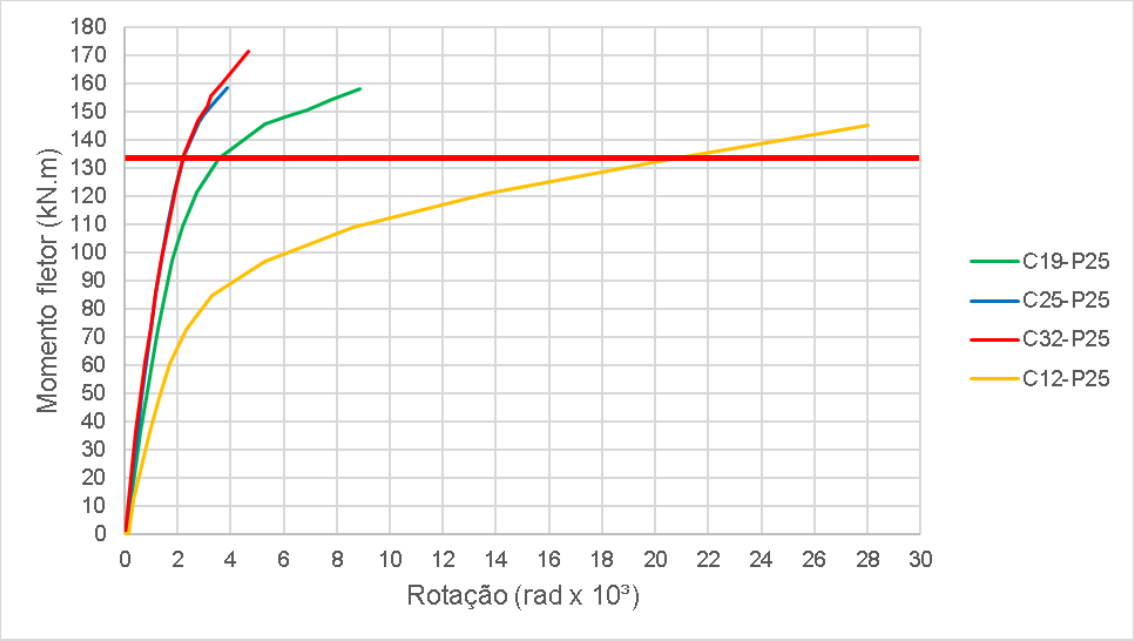


Figura 43: Momento x rotação para modelos com parafusos de 25 mm – Do próprio autor

Pode-se observar que todas as ligações com parafusos de 25 mm possuem resistência superior ao momento de plastificação da viga e, dessa forma, o colapso da estrutura sempre ocorrerá nos perfis. Além disso, pode-se notar a grande rigidez das ligações e a influência da espessura da chapa de topo na rigidez da ligação.

5.3 Análise da chapa

A análise das características e comportamentos das chapas de topo é uma das principais avaliações desta pesquisa. Nesta etapa serão apresentadas as tensões de Von Mises das chapas, as deformadas para a solicitação do momento de plastificação e também serão exibidos gráficos com o deslocamento relativo entre a chapa de topo e o pilar, na direção da largura da chapa de topo (esta avaliação será realizada para algumas ligações criteriosamente escolhidas) com o objetivo de identificar e avaliar o efeito alavanca nas ligações.

5.3.1 Deformadas da chapa de extremidade

Nesta seção são apresentadas as deformadas das ligações avaliadas no presente estudo.

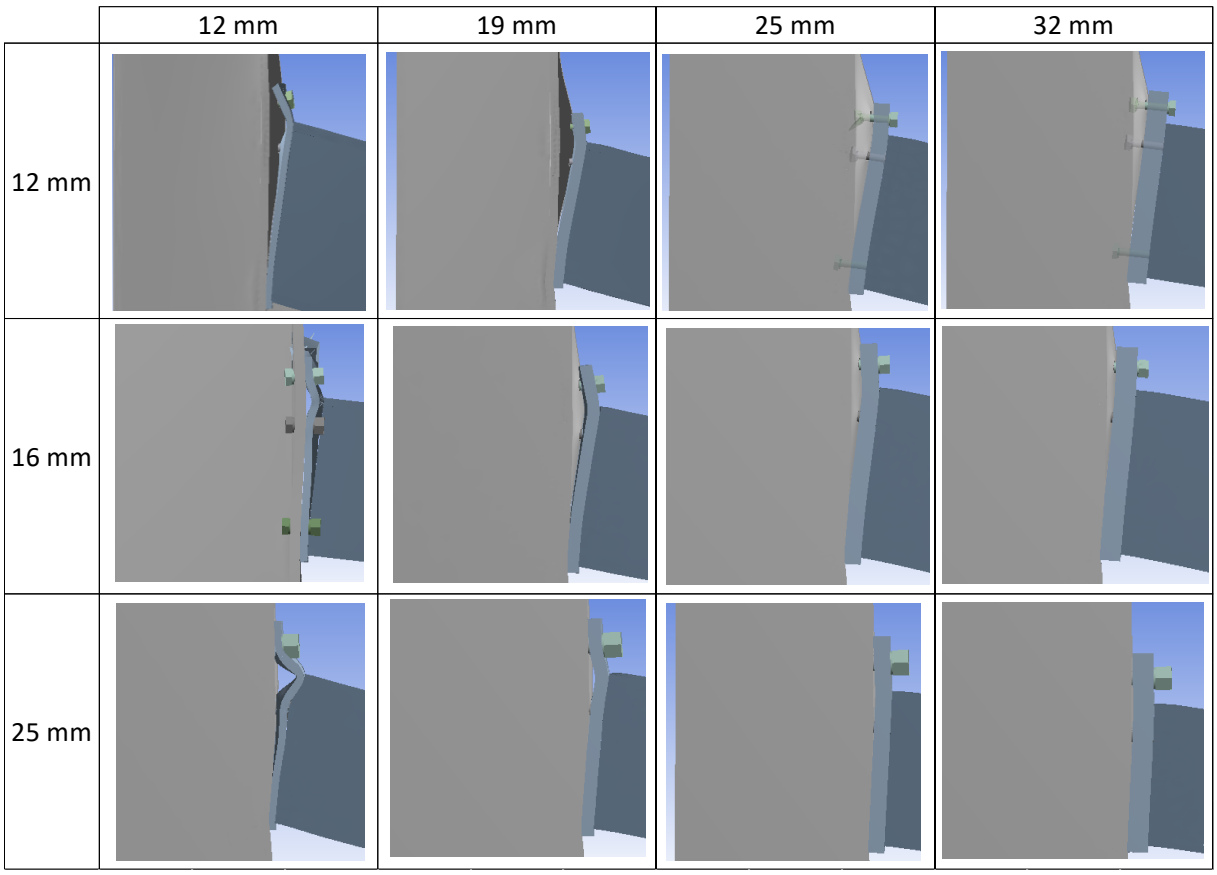


Figura 44: Deformadas (aumentada 5x) de todos os modelos avaliados – Do próprio autor

Através da Figura 44 pode-se observar que quanto menor a espessura das chapas de extremidade maior a deformação das chapas, o que significa que este componente pode ser um dos limitantes para a resistência da ligação e da estrutura como um todo. Por outro lado, para chapas espessas a limitação será devido à resistência última dos parafusos, uma vez que as chapas não apresentam grandes deformações e plastificações.

Outro ponto a ser observado é a presença do efeito alavanca em chapas finas, sendo mais perceptível a sua atuação nos modelos com parafusos de diâmetro superior a espessura das chapas, como por exemplo no modelo C12-P25.

5.3.2 Avaliação da deformação na chapa e do efeito alavanca

Buscando avaliar o efeito alavanca e o comportamento da chapa de topo quando exposta as solicitações, avaliou-se o deslocamento relativo entre este componente e a mesa do pilar em diferentes seções. A Figura 45 apresenta as seções para o qual os deslocamentos relativos foram avaliados.

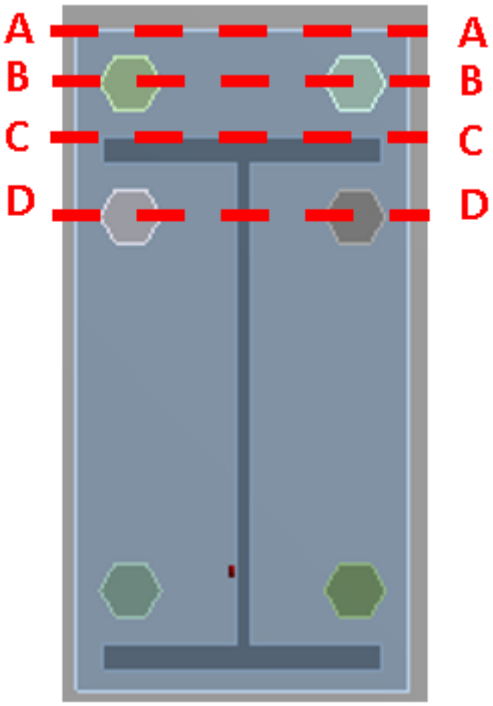


Figura 45: Seções avaliadas quanto ao deslocamento relativo – Do próprio autor

Ressalta-se que a seção inferior da chapa não foi avaliada por não ser esperado separação entre este ponto e a mesa do pilar. Por fim, todos os resultados apresentados se referem ao momento máximo aplicado em cada modelo.

Modelos com parafusos de 12 mm

Dentre os modelos com parafusos de 12 mm, apenas os C12-P12 e C19-P12 serão avaliados, uma vez que a utilização de chapas mais espessas não é viável, como exibido na seção 5.1.1.

Da Figura 46 a Figura 49 são apresentados os deslocamentos relativos para o modelo C12-P12, nas seções AA, BB, CC e DD (Face superior da chapa de topo, parafusos externos tracionados, seção de encontra da chapa com a mesa tracionada da viga e parafusos internos tracionados).

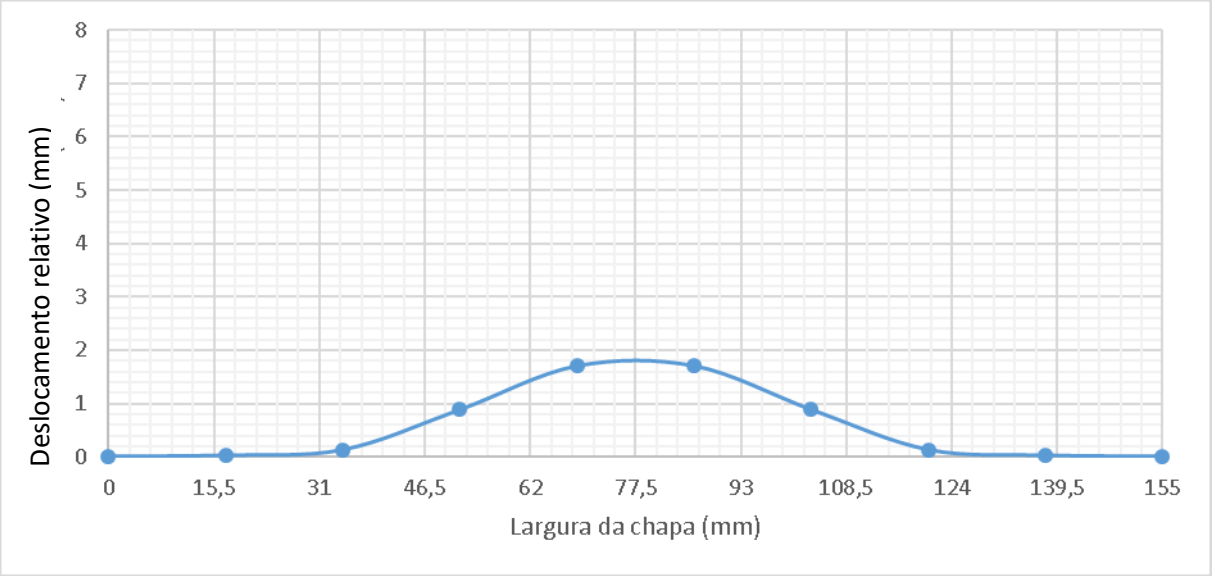


Figura 46: Deslocamento relativo da chapa do modelo C12-P12 (seção AA) – Do próprio autor

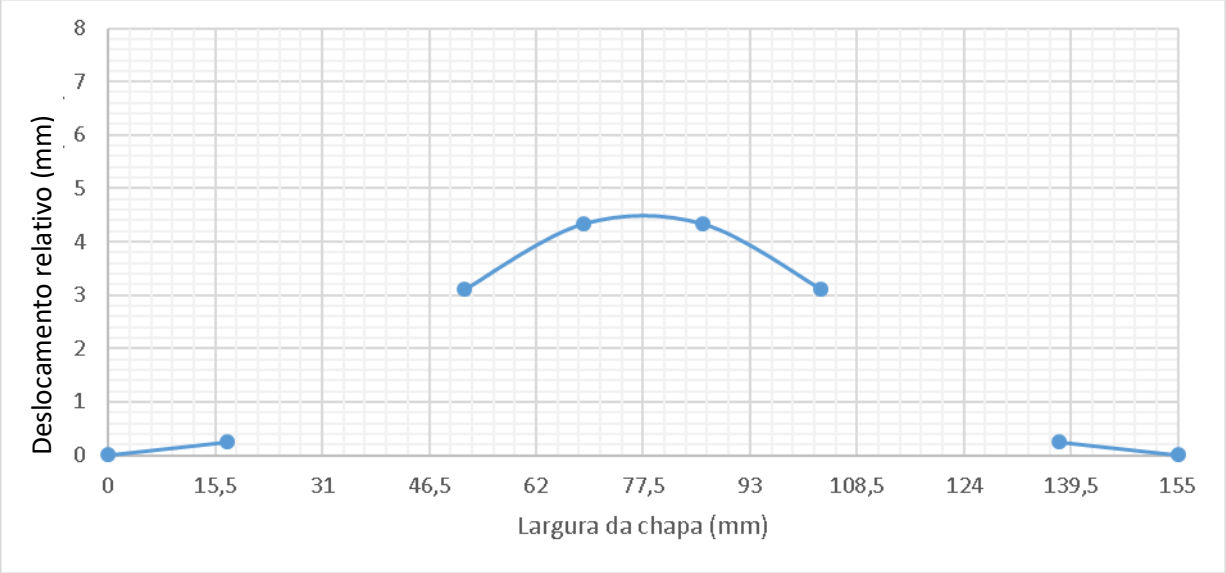


Figura 47: Deslocamento relativo da chapa do modelo C12-P12 (seção BB) – Do próprio autor

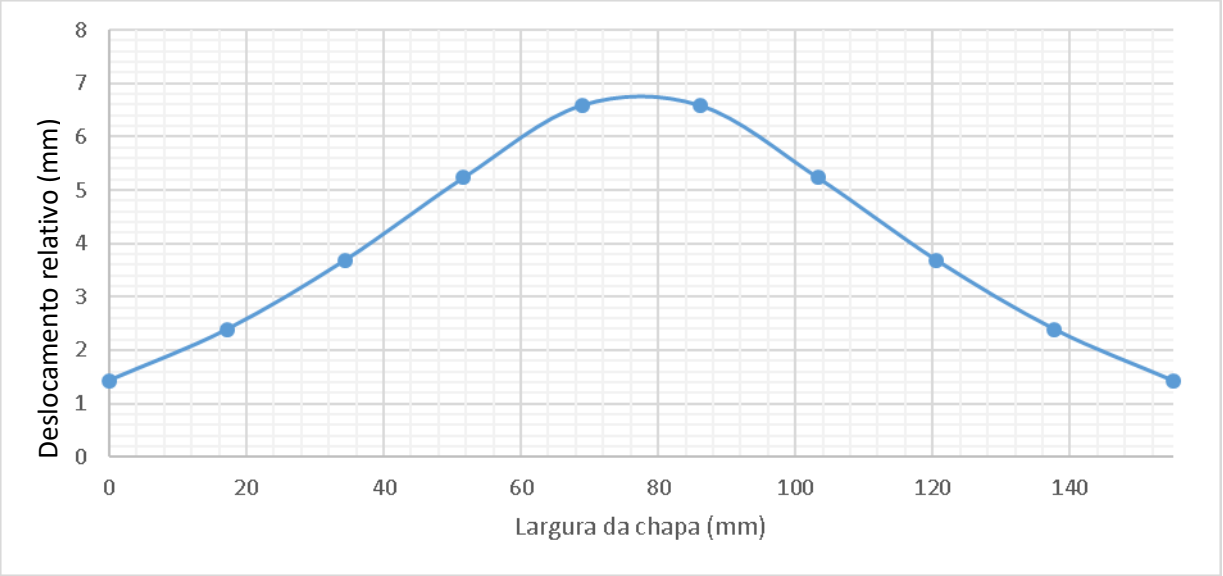


Figura 48: Deslocamento relativo da chapa do modelo C12-P12 (seção CC) – Do próprio autor

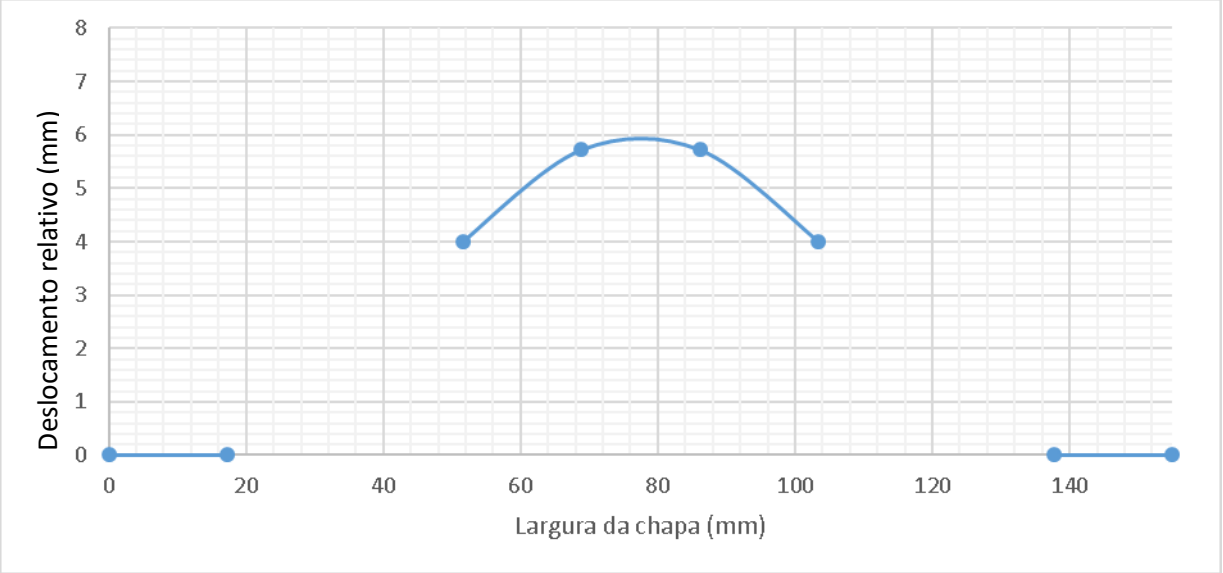


Figura 49: Deslocamento relativo da chapa do modelo C12-P12 (seção DD) – Do próprio autor

Da Figura 50 a Figura 53 são apresentados os deslocamentos relativos para o modelo C19-P12, nas seções AA, BB, CC e DD (Face superior da chapa de topo, parafusos externos tracionados, seção de encontra da chapa com a mesa tracionada da viga e parafusos internos tracionados).

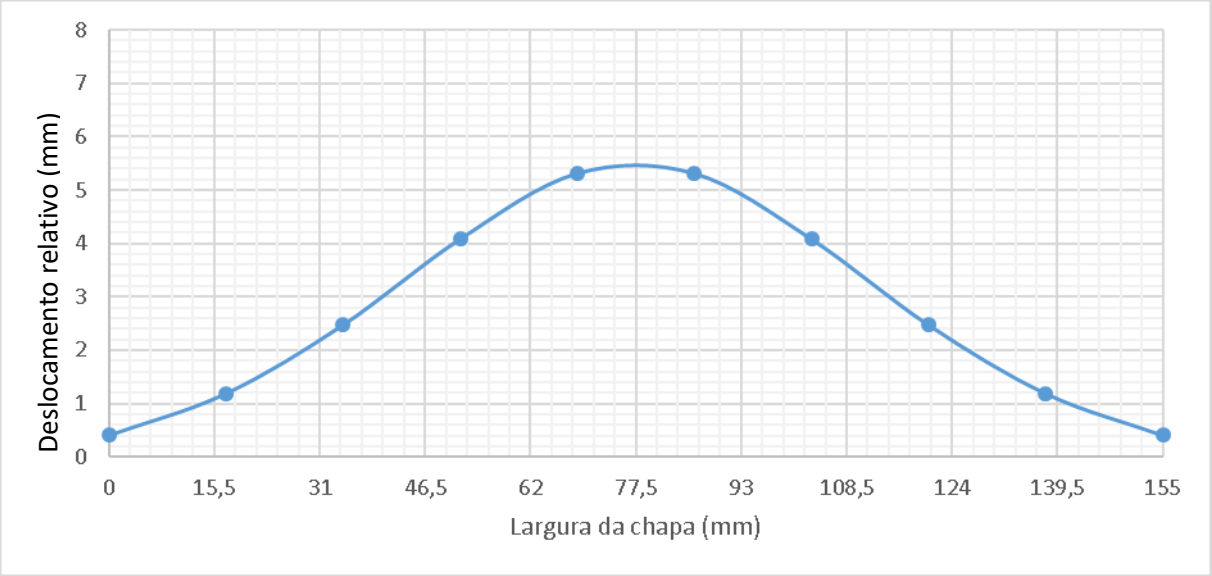


Figura 50: Deslocamento relativo da chapa do modelo C19-P12 (seção AA) – Do próprio autor

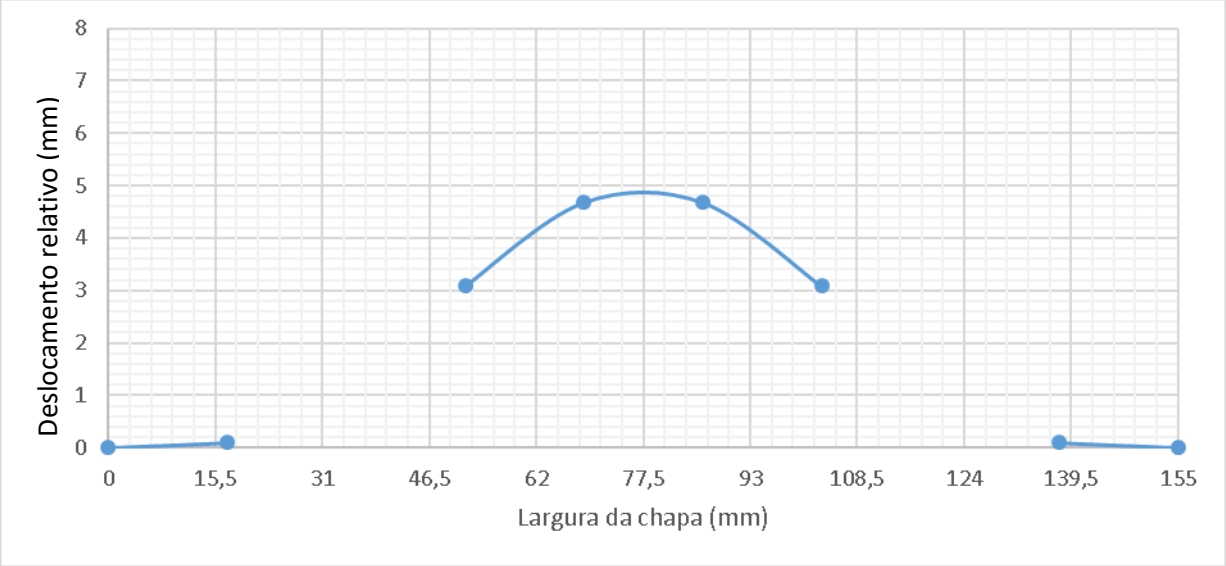


Figura 51: Deslocamento relativo da chapa do modelo C12-P12 (seção BB) – Do próprio autor

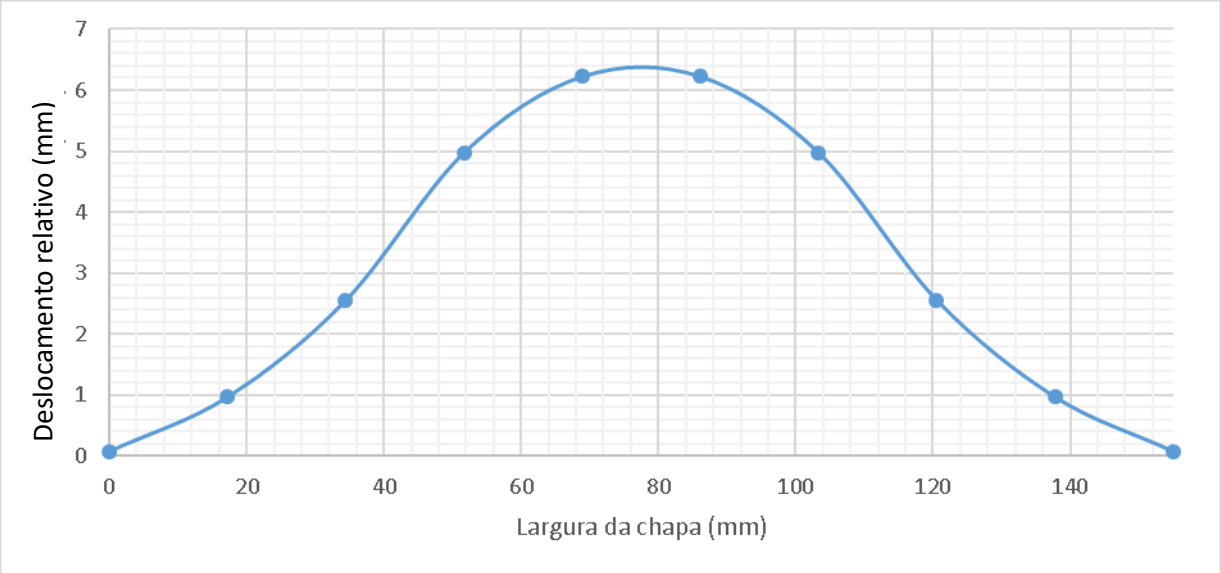


Figura 52: Deslocamento relativo da chapa do modelo C12-P12 (seção CC) – Do próprio autor

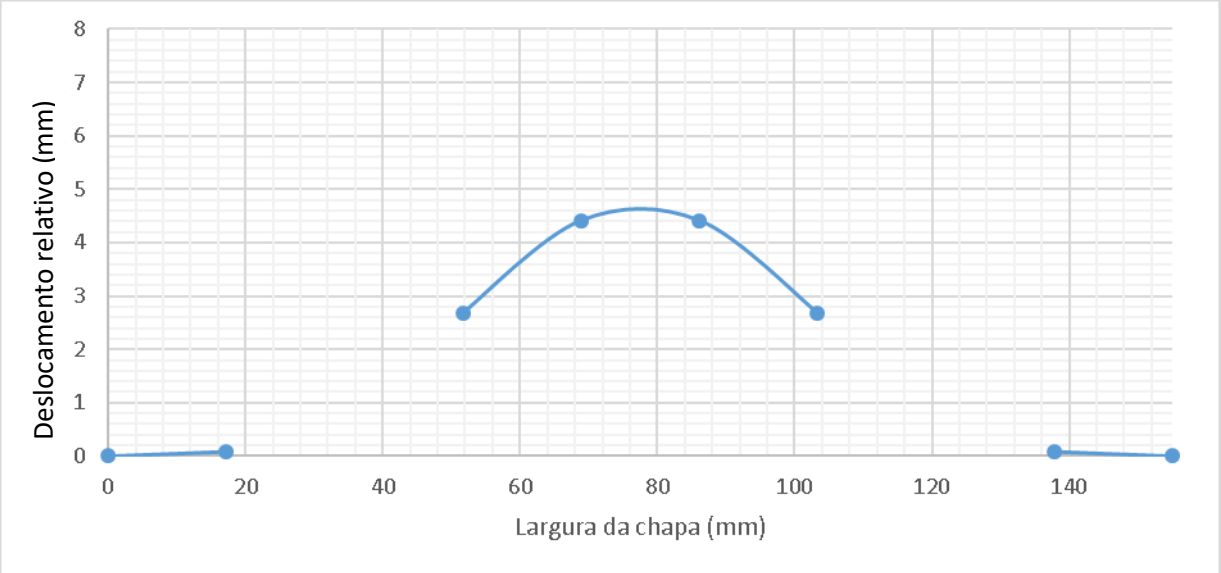


Figura 53: Deslocamento relativo da chapa do modelo C12-P12 (seção DD) – Do próprio autor

Modelos com parafusos de 16 mm

Dentre os modelos com parafusos de 16 mm, apenas o C12-P16 será avaliado, uma vez que os demais modelos apresentam falha nos perfis anteriormente a falha da ligação, como exibido na seção 5.1.1.

Da Figura 54 a Figura 57 são apresentados os deslocamentos relativos para o modelo C12-P16, nas seções AA, BB, CC e DD (Face superior da chapa de topo, parafusos externos

tracionados, seção de encontra da chapa com a mesa tracionada da viga e parafusos internos tracionados).

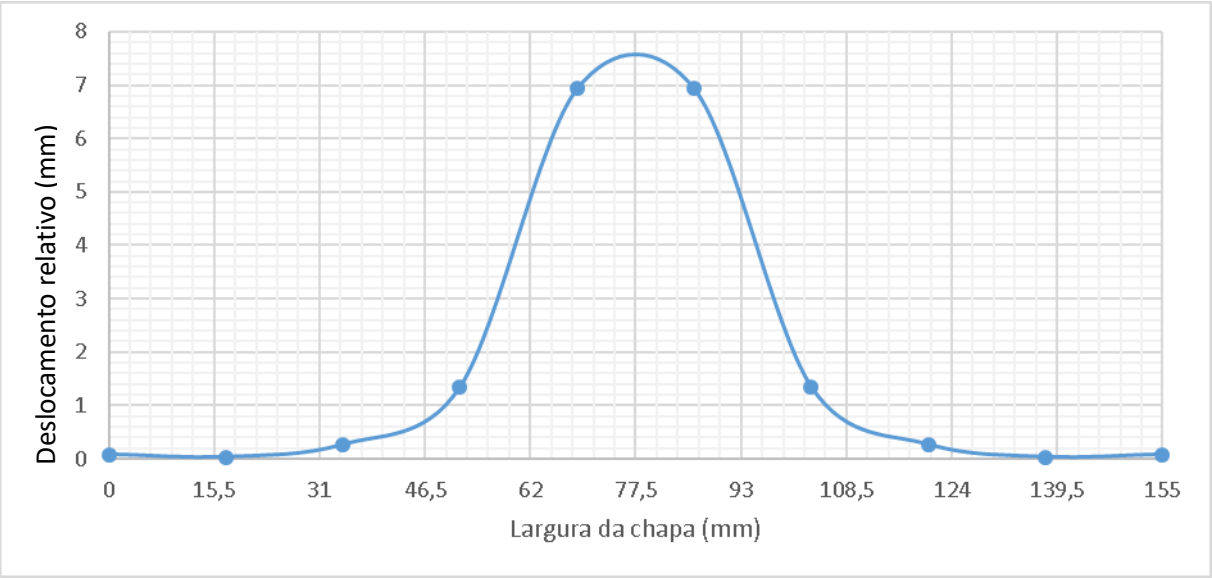


Figura 54: Deslocamento relativo da chapa do modelo C12-P16 (seção AA) – Do próprio autor

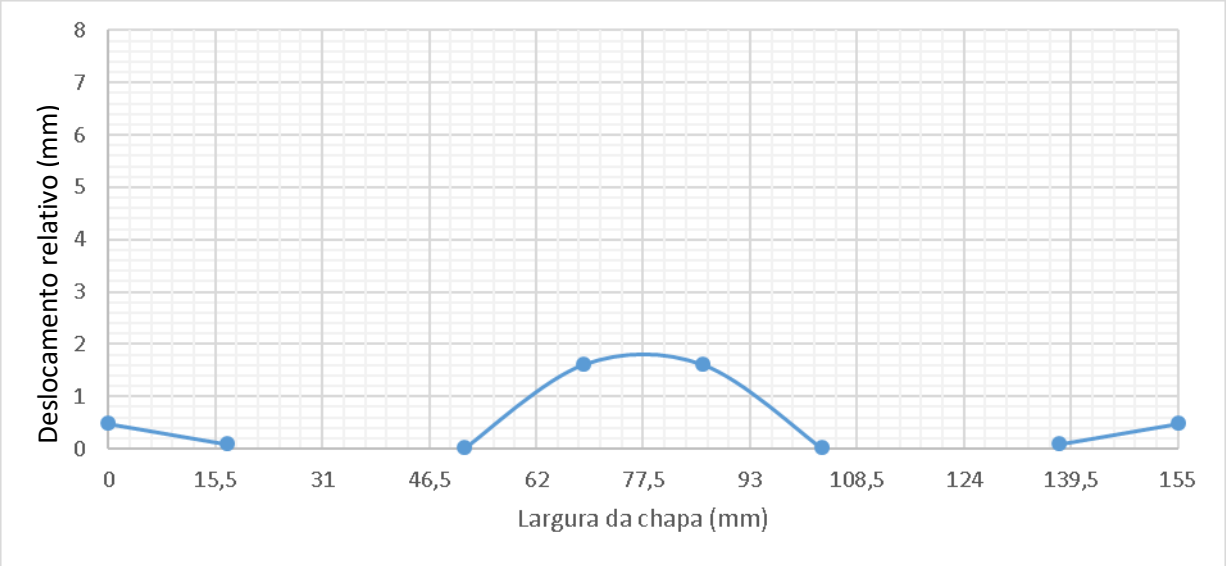


Figura 55: Deslocamento relativo da chapa do modelo C12-P16 (seção BB) – Do próprio autor

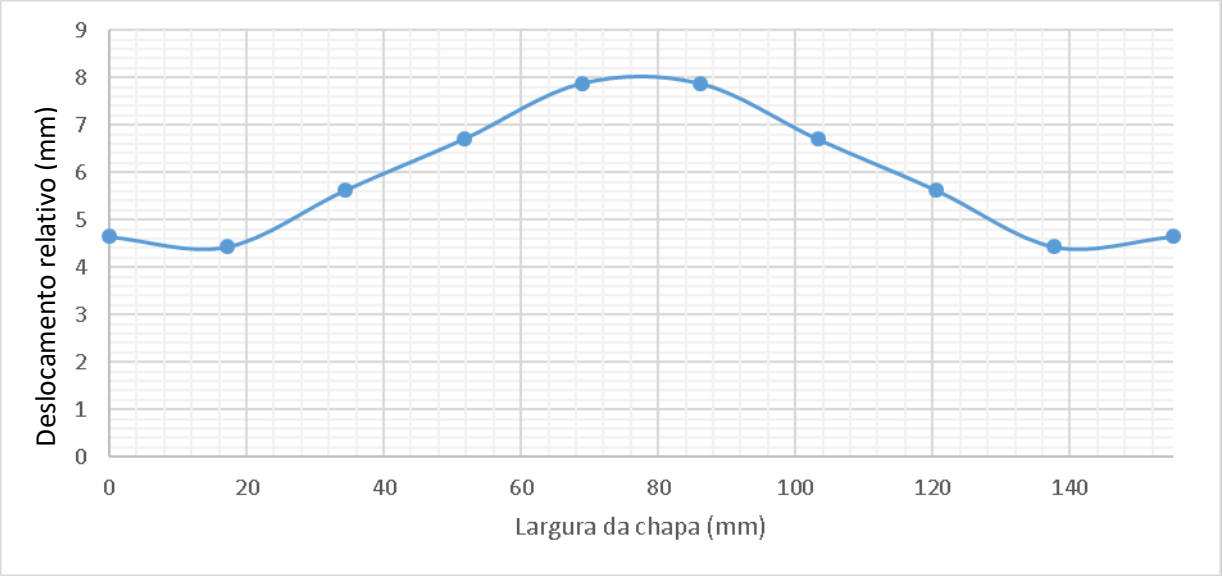


Figura 56: Deslocamento relativo da chapa do modelo C12-P16 (seção CC) – Do próprio autor

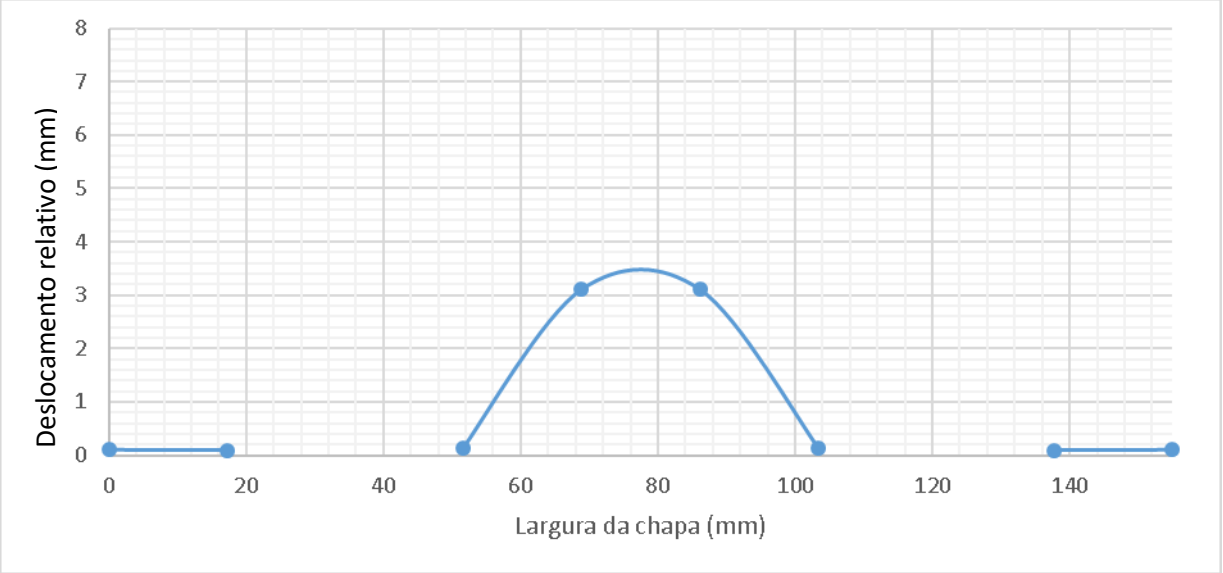


Figura 57: Deslocamento relativo da chapa do modelo C12-P16 (seção DD) – Do próprio autor

Modelos com parafusos de 25 mm

Dentre os modelos com parafusos de 25 mm, apenas o C12-P25 e C19-P25 serão avaliados, uma vez que os demais modelos apresentam alta rigidez e não se espera a ocorrência do Efeito alavanca.

Da Figura 58 a Figura 61 são apresentados os deslocamentos relativos para o modelo C12-P25, nas seções AA, BB, CC e DD (Face superior da chapa de topo, parafusos externos

tracionados, seção de encontra da chapa com a mesa tracionada da viga e parafusos internos tracionados).

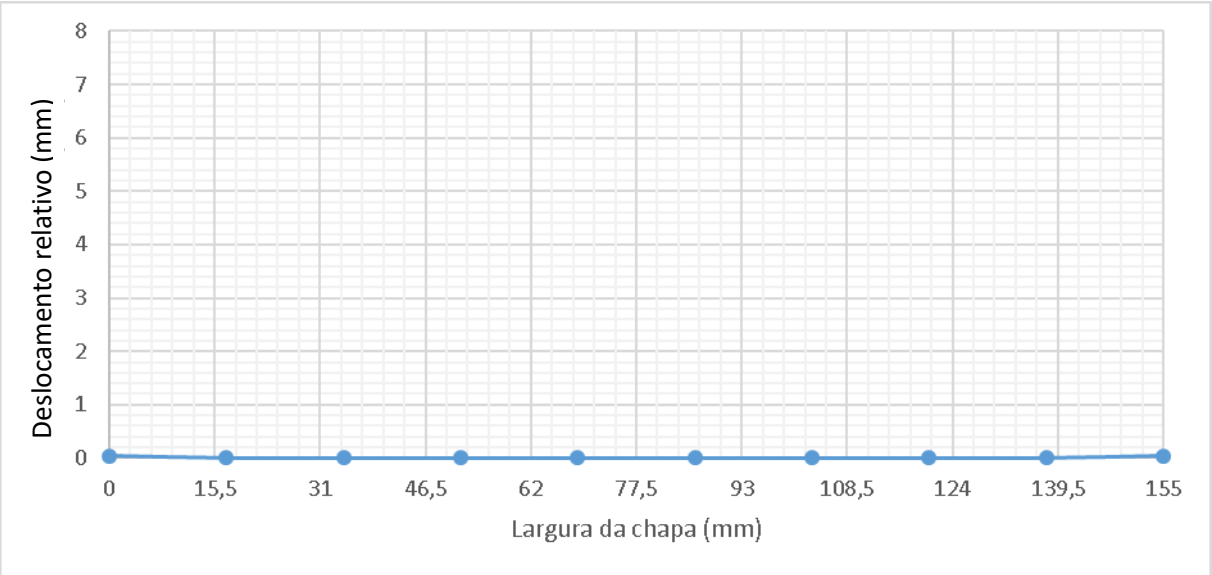


Figura 58: Deslocamento relativo da chapa do modelo C12-P25 (seção AA) – Do próprio autor

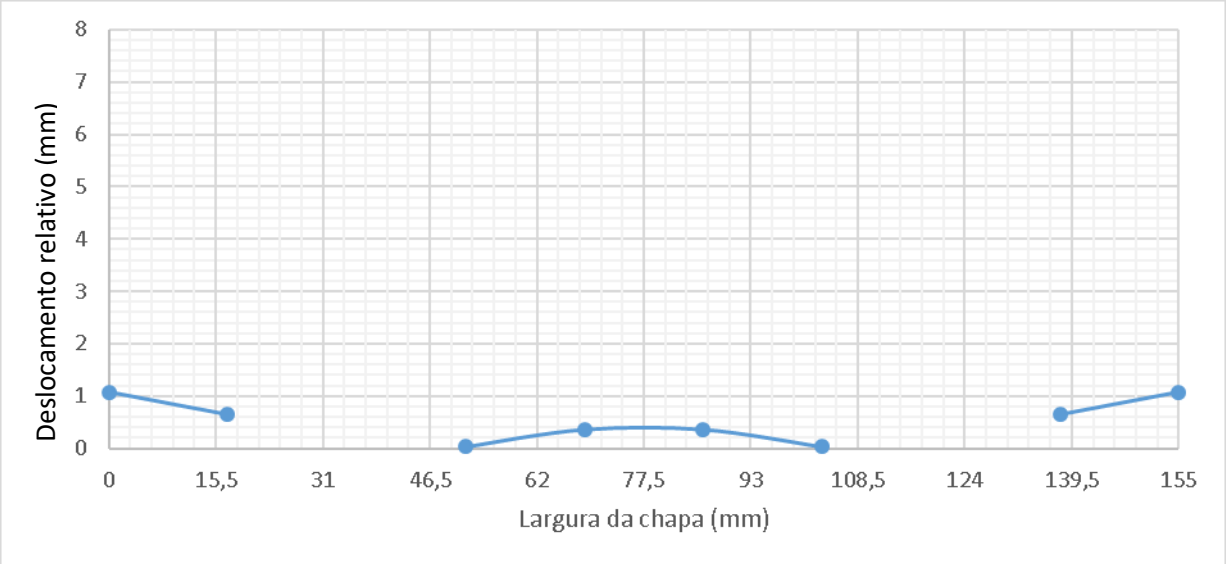


Figura 59: Deslocamento relativo da chapa do modelo C12-P25 (seção BB) – Do próprio autor

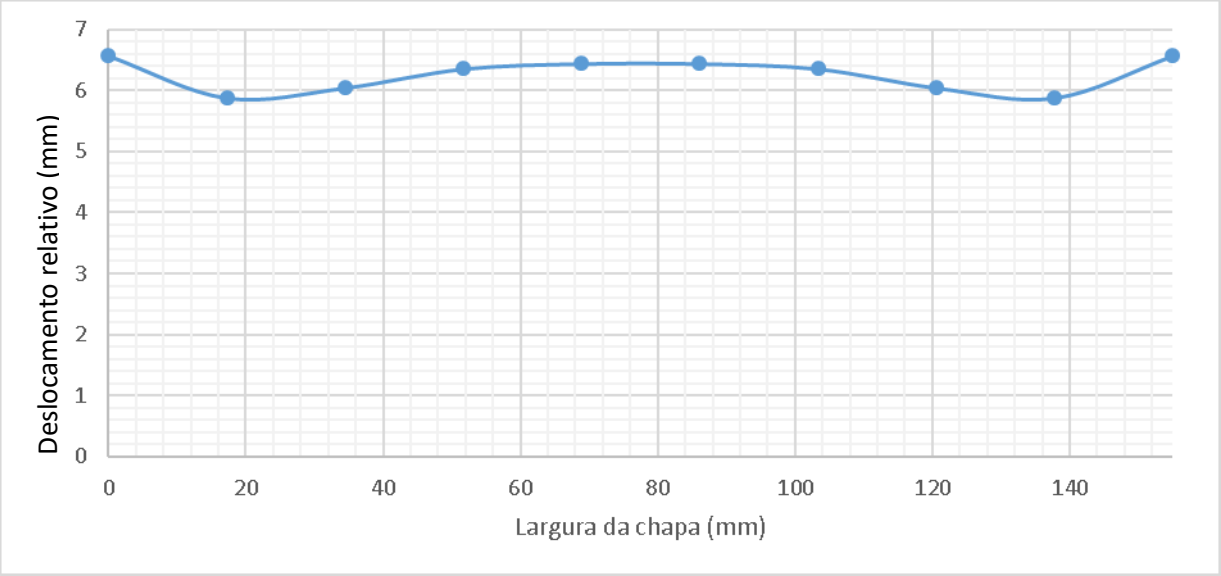


Figura 60: Deslocamento relativo da chapa do modelo C12-P25 (seção CC) – Do próprio autor

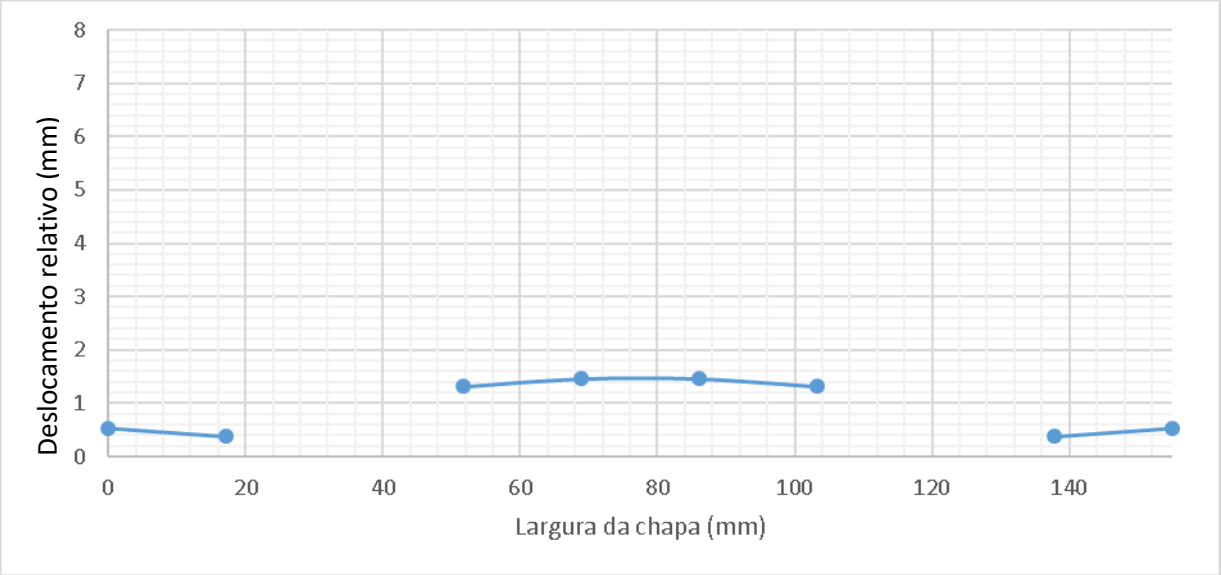


Figura 61: Deslocamento relativo da chapa do modelo C12-P25 (seção DD) – Do próprio autor

Da Figura 62 a Figura 65Figura 61 são apresentados os deslocamentos relativos para o modelo C12-P25, nas seções AA, BB, CC e DD (Face superior da chapa de topo, parafusos externos tracionados, seção de encontra da chapa com a mesa tracionada da viga e parafusos internos tracionados).

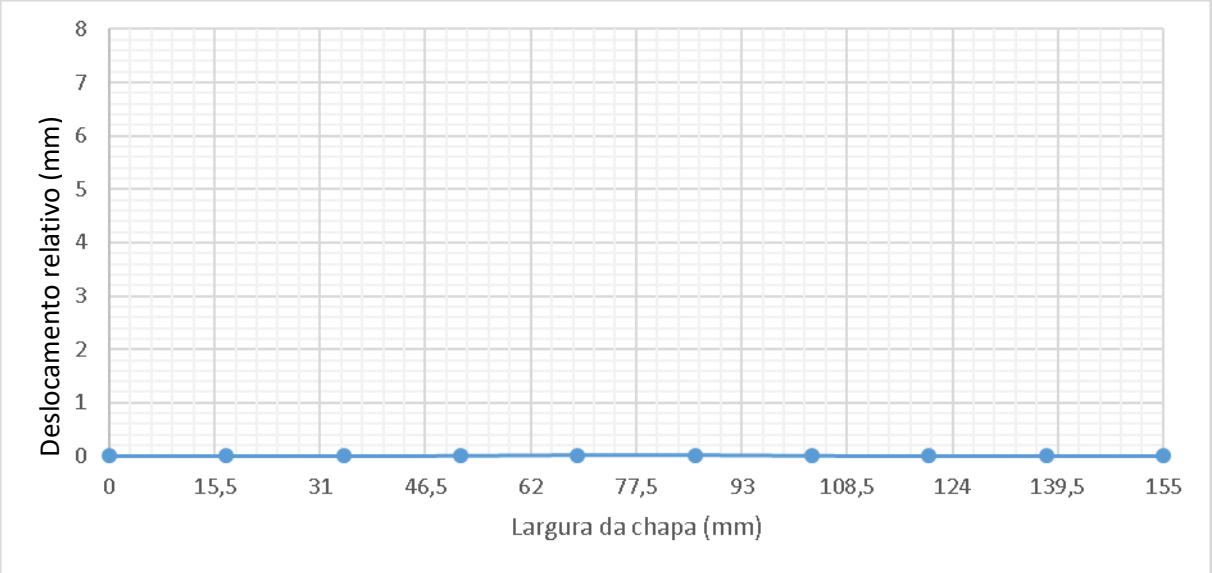


Figura 62: Deslocamento relativo da chapa do modelo C19-P25 (seção AA) – Do próprio autor

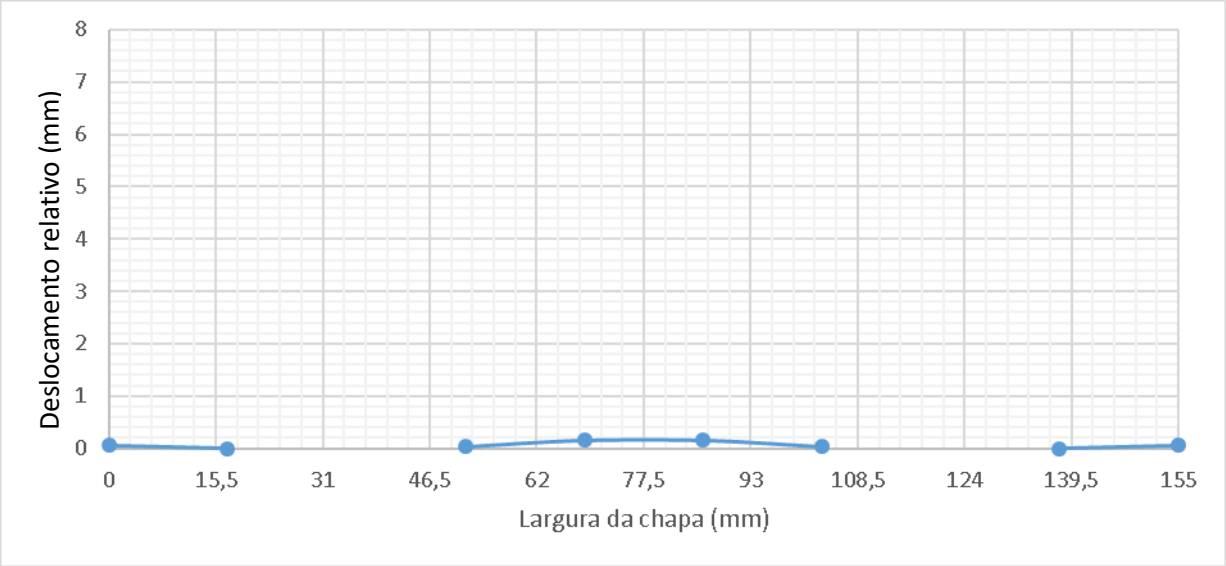


Figura 63: Deslocamento relativo da chapa do modelo C19-P25 (seção BB) – Do próprio autor

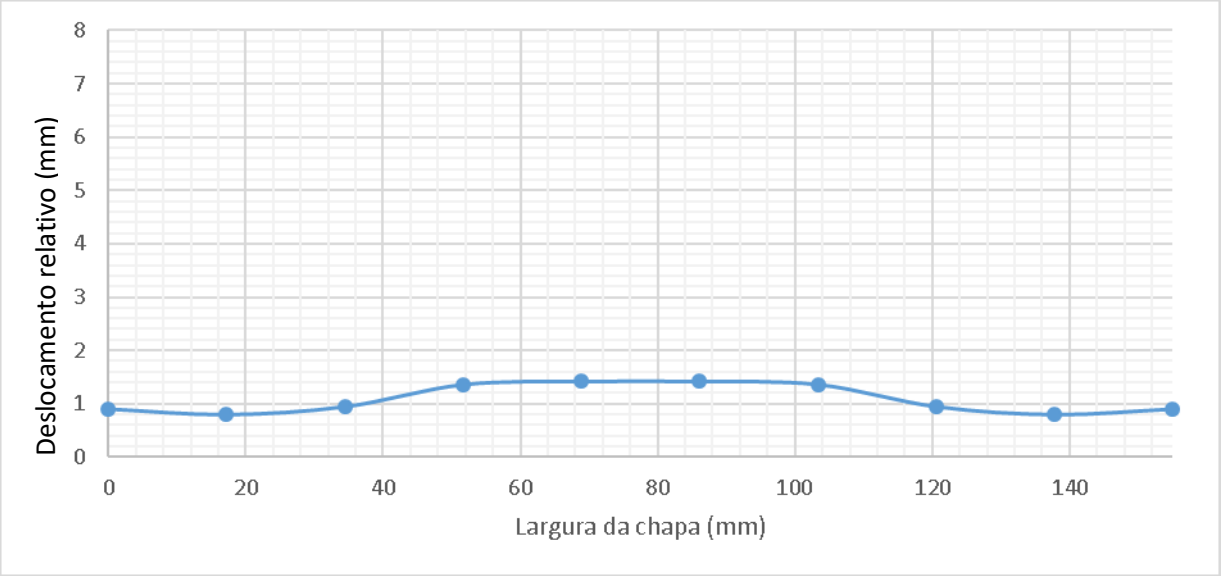


Figura 64: Deslocamento relativo da chapa do modelo C19-P25 (seção CC) – Do próprio autor

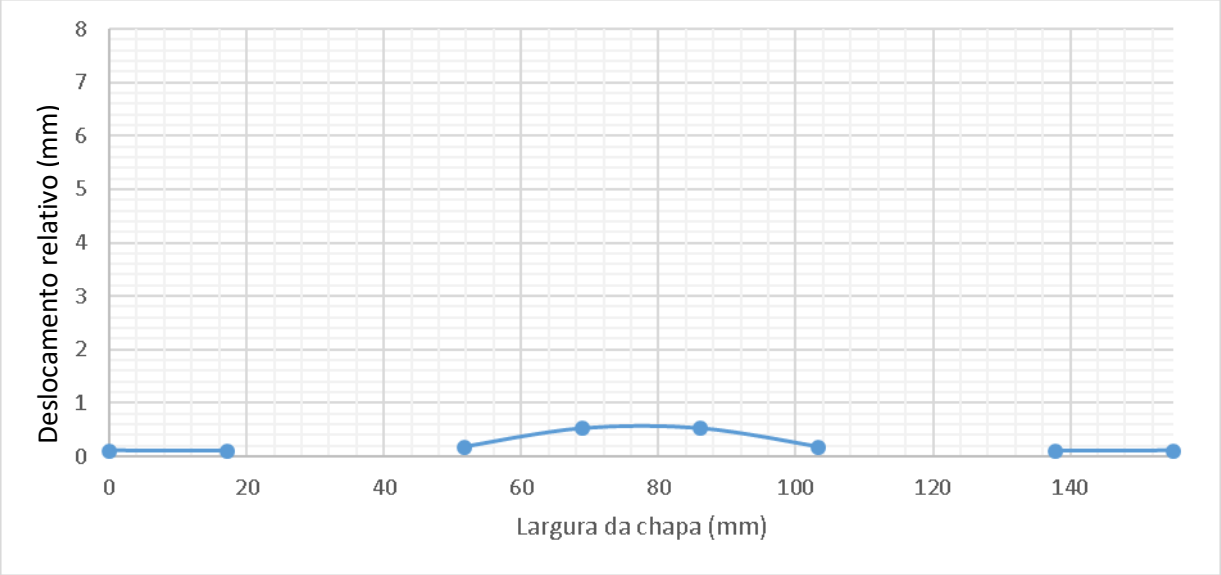


Figura 65: Deslocamento relativo da chapa do modelo C19-P25 (seção DD) – Do próprio autor

5.3.3 Avaliação das tensões atuantes na chapa

A Figura 66 apresenta a distribuição de tensões nas chapas de topo de todos os modelos avaliados no presente estudo, considerando a carga máxima aplicada em cada ligação.

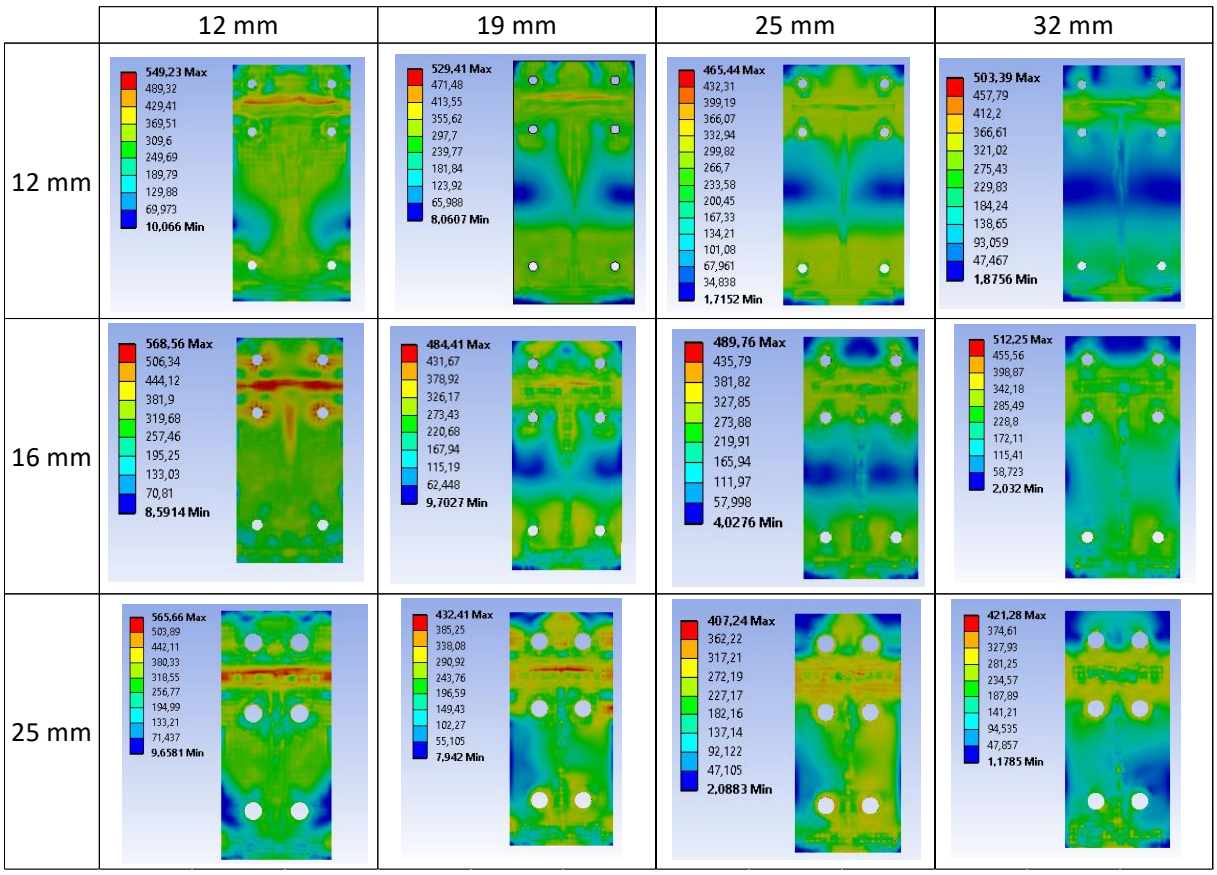


Figura 66: Distribuição das tensões de Von Mises – Do próprio autor

Como pode-se observar, todos os modelos apresentam tensões superiores ao limite de escoamento das chapas (300 MPa), mas não atingem o limite de ruptura (607,6 MPa) em nenhum momento, o que leva a interpretação de que em nenhuma das ligações será observado o modo de falha devido a ruptura das chapas, apenas ruptura dos parafusos ou escoamento parcial da chapa seguido de ruptura dos parafusos.

Outro ponto a ser observado são as elevadas tensões nas chapas menos espessas, o que pode significar em grandes deformações plásticas, o que levaria ao efeito alavanca e ao modo de falha devido a deformação das chapas seguido de ruptura dos parafusos. Tal comportamento não é observado em chapas com espessuras superiores a 25 mm, sendo estas ligações caracterizada pela falha devido a ruptura dos parafusos.

5.3.4 Comparação com modelos experimentais e nterpretação dos resultados

A título de comparação e validação dos modelos numéricos, as imagens dos ensaios laboratoriais serão apresentadas juntamente com as deformadas dos modelos equivalentes. As Figura 67 e Figura 68 apresentam a comparação entre os testes práticos e cálculos numéricos dos modelos C19-P16 e C25-P16, respectivamente.

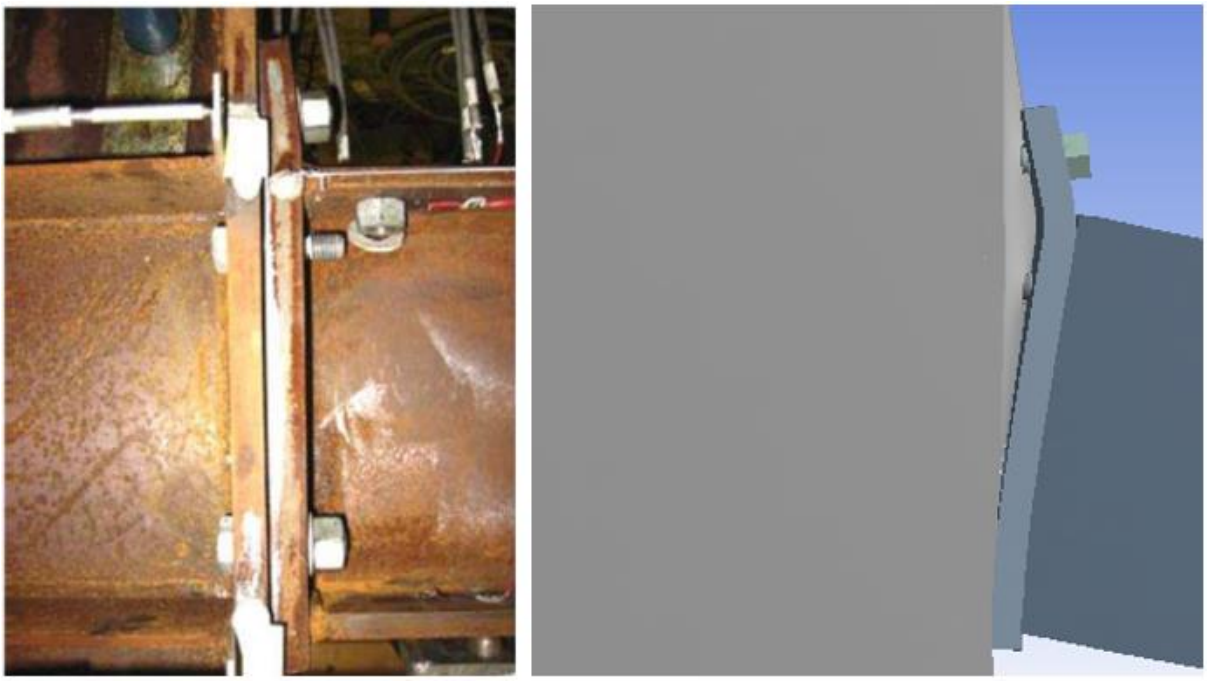


Figura 67: Comparação entre análises práticas e numéricas para o modelo C19-P16 – Do próprio autor

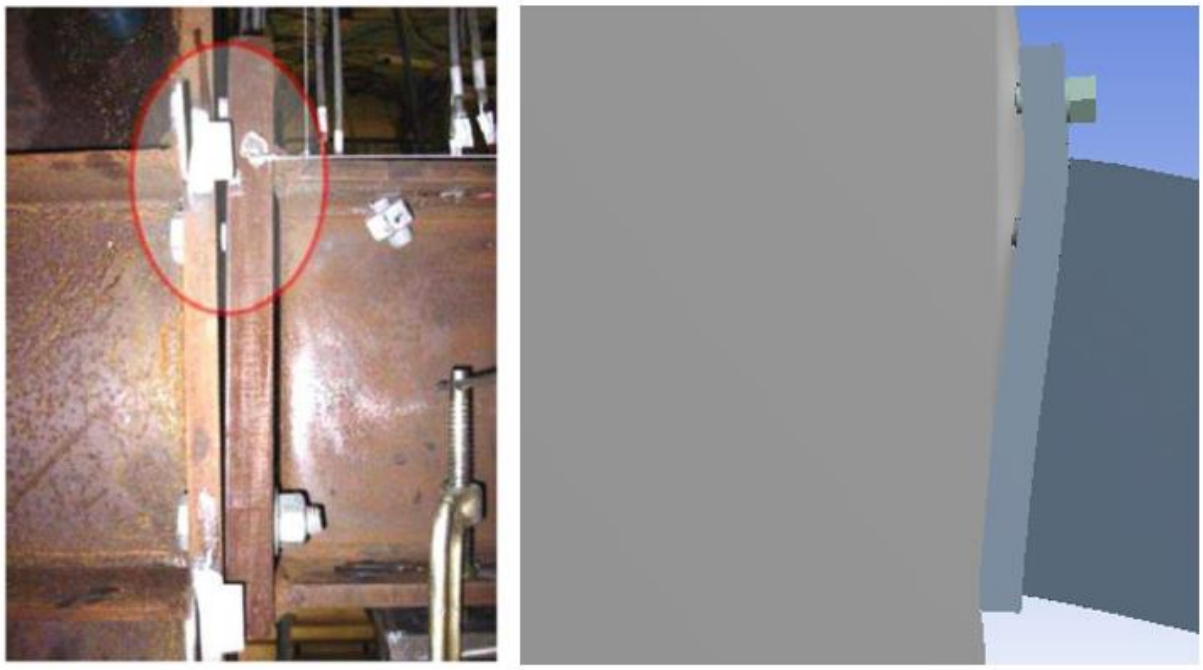


Figura 68: Comparação entre análises práticas e numéricas para o modelo C25-P16 – Do próprio autor

Através das imagens pode-se observar comportamento similar entre os ensaios em laboratório e os modelos computacionais, validando os modelos desenvolvidos. Além disso,

é possível fazer uma análise qualitativa sobre os modos de falhas para as ligações C19-P16 e C25-P16.

Para a ligação com chapa menos espessa é possível observar um princípio de deformação da chapa na região de contato com a viga, representando o efeito alavanca e consequente falha por deformação das chapas seguido de ruptura dos parafusos. Já para o modelo C25-P16 não se observa a deformação da chapa de topo, sugerindo uma falha devido a ruptura completa dos parafusos.

Além da validação dos modelos, as análises das chapas de extremidade permitem uma avaliação qualitativa do efeito alavanca. Tanto a deformada quanto a avaliação das tensões de Von Mises dos modelos com chapa de 12 mm apresentam indícios de efeito alavanca nestas ligações. Além disso, os modelos com chapas de 19 mm e parafusos superiores a 16 mm apresentam indícios do efeito alavanca. As demais configurações não apresentam deformações ou distribuição de tensões que permitam a identificação de tal efeito.

5.4 Análise dos parafusos

Esta seção apresenta as curvas de força de tração nos parafusos das linhas externas e internas das ligações a fim de avaliar os componentes quanto ao escoamento e a ruptura.

As forças atuantes foram obtidas com auxílio da ferramenta *Working Load* do software *Ansys Workbench.* Já as forças resistentes de escoamento e ruptura foram obtidas através da relação entre tensões resistentes e área do fuste dos parafusos.

5.4.1 Modelos com parafusos de 12 mm

A Figura 69 apresenta as a força de tração máxima, entre as linhas externas e internas, para o modelo C12-P12. Destaca-se que não foi considerada a protensão inicial dos parafusos.

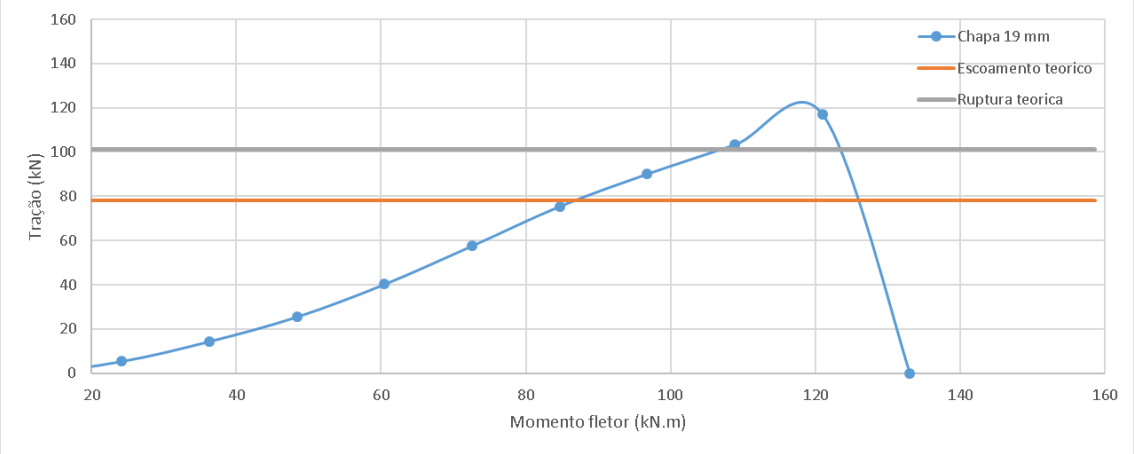


Figura 69: Tração nos parafusos (modelo C12-P12) – Do próprio autor

A Figura 70 apresenta as a força de tração máxima, entre as linhas externas e internas, para o modelo C19-P12. Destaca-se que não foi considerada a protensão inicial dos parafusos.

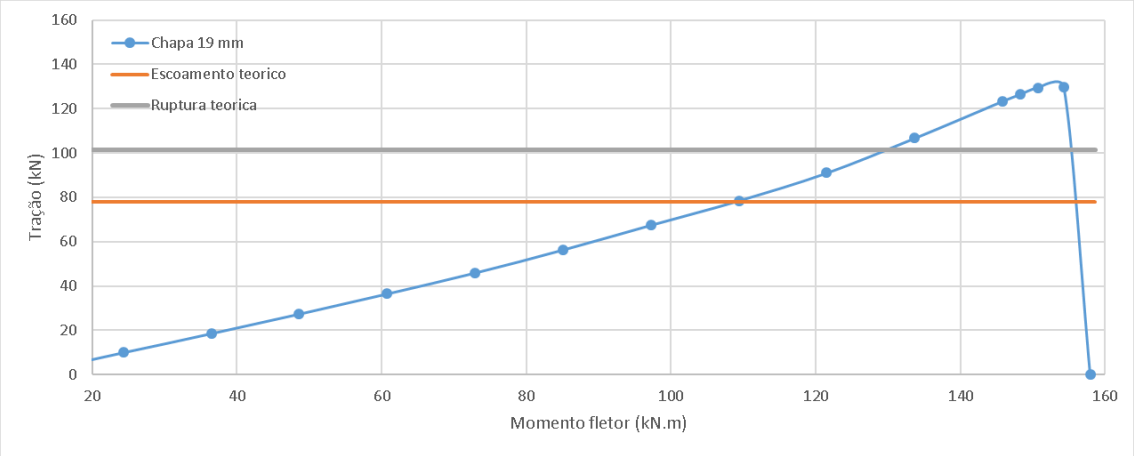


Figura 70: Tração nos parafusos (modelo C19-P12) – Do próprio autor

A Figura 71 apresenta as a força de tração máxima, entre as linhas externas e internas, para o modelo C25-P12. Destaca-se que não foi considerada a protensão inicial dos parafusos.

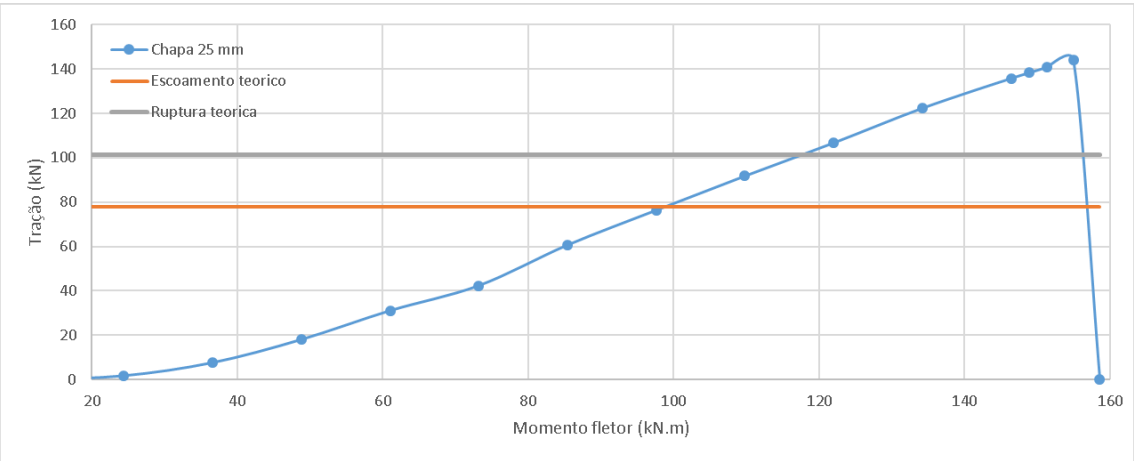


Figura 71: Tração nos parafusos (modelo C25-P12) – Do próprio autor

Com relação ao modelo C32-P12, as análises numéricas não apresentaram falhas dos parafusos. Isso pode ser explicado devido à dificuldade de convergência e grandes deformações dos parafusos que levam o software a paralisar a análise antes do colapso total da estrutura.

5.4.2 Modelos com parafusos de 16 mm

A Figura 72 apresenta as a força de tração máxima, entre as linhas externas e internas, para o modelo C12-P16. Destaca-se que não foi considerada a protensão inicial dos parafusos.

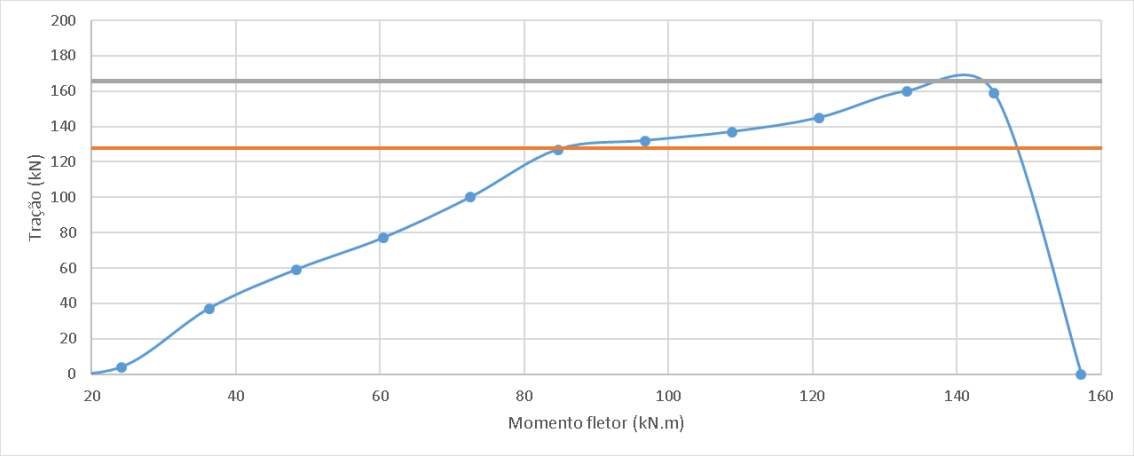


Figura 72: Tração nos parafusos (modelo C12-P16) – Do próprio autor

Com relação aos demais modelos, as análises numéricas não apresentaram falhas dos parafusos, visto que o momento de plastificação dos perfis é inferior a resistência das ligações, o que gera o colapso da estrutura antes de falhas nas ligações, como por exemplo a ruptura dos parafusos.

5.4.3 Modelos com parafusos de 25 mm

Para os modelos com parafusos de 25 mm, as análises numéricas não apresentaram falhas nas ligações, visto que o momento de plastificação dos perfis é inferior a resistência das ligações, o que gera o colapso da estrutura antes de falhas nas ligações, como por exemplo a ruptura dos parafusos. Dessa forma, as curvas de tração nos parafusos não serão avaliadas.

5.5 Modos de falhas e dimensionamento segundo o EUROCODE 3 (2005)

Todas as ligações avaliadas através dos modelos numéricos também foram verificadas através da metodologia proposta pela NBR 8800 (2008) e pelo EUROCODE 3 (2005), apresentadas na seção 3.

A Tabela 11 apresenta o modo de falha e a capacidade de cada uma das ligações avaliadas no presente estudo.

Tabela 11: Avaliação das ligações segundo as normas brasileira e europeia

Código	Modo de falha	$F_{t,Rd,ch}$ (kN)	$M_{J,Rd}$ (kN.m)
C12-P12	Modo 2 – EUROCODE 3 (2008)	70,07	39,62
C19-P12	Modo 2 – EUROCODE 3 (2008)	100,34	54,21
C25-P12	Modo 3 – EUROCODE 3 (2008)	134,36	63,28
C32-P12	Modo 3 – EUROCODE 3 (2008)	134,36	63,28
C12-P16	Modo 1 – EUROCODE 3 (2008)	79,58	45,77
C19-P16	Modo 2 – EUROCODE 3 (2008)	153,58	84,42
C25-P16	Modo 2 – EUROCODE 3 (2008)	192,60	100,27
C32-P16	Modo 3 – EUROCODE 3 (2008)	238,86	112,98
C12-P25	Modo 1 – EUROCODE 3 (2008)	124,63	78,65
C19-P25	Modo 2 – EUROCODE 3 (2008)	287,51	136,69
C25-P25	Modo 2 – EUROCODE 3 (2008)	363,56	200,27
C32-P25	Modo 2 – EUROCODE 3 (2008)	478,51	238,76

O EUROCODE 3 (2005) propõe um dimensionamento mais conservador, visto que leva em conta a resistência da mesa do pilar, da chapa de topo e dos parafusos, além dos fatores de majoração de carga existentes nas equações propostas pela norma. Dessa forma, todas as forças resistentes apresentadas na Tabela 11 são inferiores as observadas na seção 5.1 e os modos de falha encontrados através do dimensionamento normativo serão iguais ou mais conservadores do que os observados nas análises computacionais.

6. CONCLUSÃO

Esta seção apresenta as principais conclusões e observações relativas aos resultados obtidos através dos modelos numéricos e dos cálculos normativos, além de sugestões de trabalhos futuros.

A validade dos modelos computacionais desenvolvidos no presente estudo foi comprovada através da comparação entre os resultados obtidos através das análises numéricas e os obtidos através de ensaios experimentais realizados por MAGGI (2004). Além disso, os resultados obtidos através dos modelos desenvolvidos por BERGAMASCO (2012) também foram avaliados e comparados, sendo que os valores observados são similares nas três avaliações.

Visto que os modelos numéricos apresentam boa representatividade, a avaliação de ligações com dimensões diferentes as verificadas por MAGGI (2004) se torna possível, uma vez que os modelos numéricos têm sua confiabilidade comprovada através da comparação com os modelos práticos.

Outro ponto de atenção tanto no modelo experimental de MAGGI (2004) quanto nos modelos computacionais são a presença de deformações localizadas na chapa de topo, principalmente em regiões próximas a mesa tracionada da viga. Esta constatação evidencia a ocorrência do efeito alavanca, que foi observado em chapas finas e tem sua ocorrência reforçada pela avaliação dos deslocamentos relativos ao longo da largura da chapa em diferentes seções.

Por meio da avaliação global das ligações, com as curvas de momento x rotação e força x deslocamento, é possível verificar que o principal mecanismo de colapso das ligações é a ruptura dos parafusos, uma vez que mesmo com deformações localizadas da chapa de topo as ligações ainda apresentam resistência aos esforços aplicados nos modelos. Além disso, modelos com chapas mais espessas e parafusos mais robustos apresentam colapso nos perfis estruturais ao invés do colapso nas ligações, o que representa ligações superdimensionadas para a conexão de tais perfis.

Com relação a variação da espessura das chapas, pode-se verificar que em algumas situações existe um limite de ganho de rigidez e resistência com o aumento da espessura das chapas de topo, o que pode indicar um limite de espessura máxima indicada para que não se exista superdimensionamento e utilização de chapas espessas sem que se exista um real ganho.

Ao se comparar os momentos resistentes calculados através dos métodos normativos e dos métodos numéricos, pode-se observar divergência entre os resultados para ligações com chapas mais finas e parafusos de menor diâmetro, com os modelos computacionais apresentando ligações até 2,75 vezes mais resistente que o indicado em normas. Contudo, com o aumento da espessura das chapas, do diâmetro dos parafusos e redução do efeito alavanca, os resultados obtidos tendem a serem similares em ambos os métodos de cálculo. Para os casos extremos, com ligações muito robustas, tanto o EUROCODE 3 (2005), quanto os modelos desenvolvidos indicam ligações mais resistentes que os perfis estruturais conectados.

Pode-se concluir que a metodologia proposta pelo EUROCODE 3 (2005) permite classificar as ligações com modos de falha iguais ou mais conservadores do que os observados nas análises numéricas, garantindo a segurança de estruturas dimensionadas através dos métodos normativos.

Através das análises realizadas e das observações feitas o presente estudo alcançou os objetivos traçados, apresentando uma explicação detalhada sobre o comportamento das ligações parafusadas com chapa de extremidade estendida, descrevendo as metodologias de dimensionamento propostas por normas e comparando tais metodologias com os modelos numéricos desenvolvidos e validados através de testes práticos desenvolvidos por MAGGI (2004).

Como sugestões para trabalhos futuros e aprimoramento da pesquisa, ressaltam-se os seguintes tópicos:

- Avaliação experimental de ligações com chapas finas para estudo detalhado do efeito alavanca e avaliação da força resistente máxima destas ligações;
- Verificação da divergência entre a força resistente calculada através do EUROCODE 3 (2005) e da força resistente medida em ensaios experimentais. Caso as divergências se confirmem, sugere-se a proposição de novos métodos de dimensionamento para ligações parafusadas com chapa de extremidade;
- Avaliação de métodos para a otimização e redução do tempo gasto para o cálculo numérico de ligações parafusadas.

7. REFERÊNCIAS

AISCAMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. **ANSI/AISC 360-10: Specification for structural steel buildings.** Illinois, 2010.

ABOLMAALI, ALI.; MATTHYS, JOHN H.; FAROOQI, MOHAMMED; CHOI, YEOL. **Development of moment-rotation model equations for flush end-plate connections.** Journal of Contrutctional Steel Research, v.61, p.1595-1612, 2005.

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

BERGAMASCO, P. D. A. **Estudo do comportamento estrutural de ligações parafusadas viga-pilar com chapa de topo estendida: análise numérica.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas), Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

BJORHOVDE, R.; COLSON, A.; BROZZETTI, J. **Classification system for beam-to-column connections.** Journal of Structural Engineering, v.116, n.11, p.3059-3076, November, 1990.

BUONICONTRO, L. M. S. **Desenvolvimento de um sistema de classificação baseado nos parâmetros de rigidez e resistência de ligações viga-pilar de estruturas de aço.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas), Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

DIAZ, CONCEPCIÓN; VICTORIA, MARIANO; QUERIN, OSVALDO M.; MARTÍ, PASCUAL. **Optimum design of semi-rigid connection using metamodels.** Journal of Contrutctional Steel Research, v.78, p.97-106, July, 2012.

EN 1993-1-8: 2005 Eurocode 3: **Design of steel structures - Part 1-8: design of joints.** European Committee for Standardization. 2005.

ESSS. **Análise de ligações parafusadas no ANSYS *Mechanical***

FAKURI, RICAROD H.; CASTRO E SILVA, ANA LYDIA R.; CALDAS, RODRIGO B. **Dimensionamento de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto.** São Paulo, 2016.

KONGI, ZHENGYI; HONG, SHAOZHENG; VU, QUANG-VIET; CAO, XIANLEI; KIM, SEUNG-EOCK; YU, BO. **New equations for predicting initial stiffness and ultimate moment of flush end-plate connections.** Journal of Contrutctional Steel Research, v.175, September, 2020.

MAGGI, Y. I. **Análise numérica, via M.E.F, do comportamento de ligações parafusadas viga-pilar com chapa de topo.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas), Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

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

MENDES, F. T. C. **Determinação das propriedades mecânicas das ligações viga-pilar com chapas de extremidade estendida visando à análise pelo método dos componentes.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS, Belo horizonte, 2017.

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

ÖZKILIÇ, YASIN ONURALP; TOPKAYA, CEM. **The plastic and the ultimate resistance of four-bolt extended end-plate connections.** Journal of Contrutctional Steel Research, v.181, March, 2021.

PRIMOZ, AKBAR; AHADI, PARVIZ; FARAJKHAH, VAHID. **Finiter elemento analysis of extended stiffened end plate link-to-column connections.** Journal of Steel Construction, v.9, 2016.

RIBEIRO, L. F. L. **Estudo do comportamento estrutural de ligações parafusadas viga-pilar com chapa de topo: análise teórico-experimental.** Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas), Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

SANTOS, L. B. **Influência da rigidez das ligações em estruturas de aço.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas), Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.