

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

JOSÉ HENRIQUE DELABIO GONÇALVES

**ANÁLISE DE LIGAÇÃO SEMIRRÍGIDA LONGARINA-COLUNA DE
SISTEMAS DE ARMAZENAGEM INDUSTRIAL**

MARINGÁ

2021

JOSÉ HENRIQUE DELABIO GONÇALVES

**ANÁLISE DE LIGAÇÃO SEMIRRÍGIDA LONGARINA-COLUNA DE
SISTEMAS DE ARMAZENAGEM INDUSTRIAL**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Humberto Martins

MARINGÁ

2021

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá - PR, Brasil)

G635a

Gonçalves, José Henrique Delabio

Análise de ligação semirrígida longarina-coluna de sistemas de armazenagem industrial / José Henrique Delabio Gonçalves. -- Maringá, PR, 2021.
145 f. figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Humberto Martins.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2021.

1. Sistemas porta-paletes. 2. Método das Componentes. 3. Rigidez rotacional inicial. 4. Conexão semirrígida. I. Martins, Carlos Humberto, orient. II. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 23.ed. 624.1834

JOSÉ HENRIQUE DELABIO GONÇALVES

**ANÁLISE DE LIGAÇÃO SEMIRRÍGIDA LONGARINA-COLUNA
DE SISTEMAS DE ARMAZENAGEM INDUSTRIAL**

Dissertação de Mestrado apresentada no dia 26/08/2021. Julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL e aprovada em sua forma final, como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Carlos Humberto Martins
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Estadual de Maringá
Orientador



Prof. Dr. Alexandre Rossi
Departamento de Engenharia Civil
Universidade Estadual de Londrina



Prof. Dr. José Julio de Cerqueira Pituba
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Federal de Catalão

Aos meus pais, Claudécir e Terezinha, à minha namorada Aldrean, aos meus amigos/irmãos Alan, Vinícius e Willian e ao universo, sempre misterioso e perfeito.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente sou grato pela minha vida, pela saúde e disposição para tornar meus sonhos possíveis.

Agradeço aos meus pais Claudécir e Terezinha pela oportunidade de estar neste mundo, vivo, crescendo, me melhorando e aprendendo. A minha base desde sempre.

Ao meu professor, orientador e amigo Carlos Humberto que sempre me ajudou, apoiou e fez até o impossível para que as coisas dessem certo. Fica aqui minha eterna gratidão por esta pessoa.

Ao meu novo amigo e doutor Alexandre Rossi que sempre me auxiliou com muita disposição e excelência nas análises numéricas e no meu trabalho.

Ao meu amigo Arthur, que sempre esteve junto durante toda a jornada inicial do mestrado e enfrentou comigo todos os momentos bons e ruins. Não posso esquecer da boa companhia e das muitas conversas na estrada.

Ao meu gestor Edmur, sempre compartilhando conhecimento e experiência que me tornam um profissional cada vez melhor.

Ao Victor Hugo, grande amigo e parceiro de trabalho.

À minha namorada Aldrean que chegou na hora certa em minha vida e, sempre com um sorriso no rosto, compartilha comigo muita energia positiva, felicidade e amor, e me motiva a ter sede de viver.

Ao meu amigo/irmão Alan pela amizade verdadeira e pela admiração e respeito que temos um pelo outro.

Ao meu amigo/irmão Vinícius por estar diariamente compartilhando e redobrando nossa alegria. E pelo cuidado e preocupação para entregar seu melhor em nossa amizade.

Ao meu amigo/irmão Willian que sempre esteve presente em todos os meus momentos, sejam bons ou ruins, e que sempre garantiu meu riso solto.

A todos os outros amigos e amigas que tenho e que estão elencados por serem importantes e não por ordem de importância: primo Eduardo, Aurélio, Liz, Nathália Cantu, Mirele, Bruno Almeida, Guilherme Nicoleti, Gustavo, Bia, Jú, Nathália Spagiari, Susane, Claudio, Guilherme Terra, Marcelle, Christopher e Flávio.

“A vida não é fácil para nenhum de nós. Mas e daí? Temos que ter perseverança, e acima de tudo, confiança em nós mesmos. Temos de sentir que somos dotados para realizar uma determinada coisa e que temos de alcançá-la, custe o que custar!”

Marie Curie

RESUMO

As conexões longarina x coluna em sistemas porta-paleta seletivo ou convencional desempenham importante função na estabilidade global dessas estruturas metálicas. O conhecimento de suas características e propriedades permitem a realização de cálculos estruturais acurados e otimizados. Sua característica semirrígida torna a obtenção dos parâmetros de semirrigidez e resistência complexa. Portanto, ensaios laboratoriais e análises numéricas podem ser realizadas de modo a obter esses parâmetros. As normas brasileira (NBR 15524-2:2007) e europeia (EN 15512:2009) preconizam o ensaio *cantilever test* através do qual pode-se gerar uma curva momento fletor x rotação e, com ela, encontrar os parâmetros relativos à rigidez inicial ($S_{j,ini}$ ou k_0), rigidez secante (S_j) e momento fletor resistente (M_{Rd} ou $M_{u,num}$) da conexão. Neste trabalho realizou-se três análises para o estudo de uma conexão típica de um fabricante. São elas: análise mecânica através do Método das Componentes, análise numérica e ensaio experimental simplificado onde não foi possível obter condições laboratoriais ideais para realização do ensaio. Os resultados das três análises foram satisfatórios já que valores muito próximos de rigidez rotacional inicial e momento fletor resistente foram obtidos. Concluiu-se que o Método das Componentes quando adaptado para ligações não parafusadas pode ser uma ferramenta alternativa para prever características e propriedades de ligações semirrígidas de sistemas de armazenagem industrial.

Palavras-chave: Sistemas porta-paletes, Conexão semirrígida, Rigidez rotacional inicial, Método das Componentes, Momento fletor resistente.

ABSTRACT

Beam-column connections in selective or conventional pallet racking systems play an important role in the global stability of these steel structures. Knowledge of its characteristics and properties allows for the realization of accurate and optimized structural calculations. Its semi-rigid characteristic makes obtaining the semi-rigidity and resistance parameters complex. Therefore, laboratory tests and numerical analyzes can be carried out in order to obtain these parameters. Brazilian (NBR 15524-2:2007) and European (EN 15512:2009) standards recommend the cantilever test through which a bending moment x rotation curve can be generated and, with that, parameters related to the initial stiffness ($S_{j,ini}$ or k_0), secant stiffness (S_j) and resistant bending moment (M_{Rd} or $M_{u,num}$) of the connection can be found. In this work, three analyzes were carried out to study a typical connection of a manufacturer. They are: mechanical analysis using the Component Method, numerical analysis and simplified experimental testing where it was not possible to obtain ideal laboratory conditions for carrying out the test. The results of the three analyzes were satisfactory since amounts very close to initial rotational stiffness and resistant bending moment were obtained. It was concluded that the Component Method when adapted for non-bolted connections can be an alternative tool to predict characteristics and properties of semi-rigid connections in industrial storage systems.

Key words: Steel storage pallet racks, Semi-rigid connection, Initial rotational stiffness, Component Method, Resistant bending moment.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1.	JUSTIFICATIVA.....	3
1.2.	OBJETIVOS.....	3
1.2.1.	OBJETIVO GERAL.....	3
1.2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
1.3.	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	4
2.	REVISÃO DA LITERATURA.....	5
2.1.	PERFIS FORMADOS A FRIO.....	5
2.2.	SISTEMAS DE ARMAZENAGEM INDUSTRIAL.....	5
2.2.1.	COMPONENTES DOS PORTA-PALETES.....	9
2.2.1.1.	COLUNA.....	10
2.2.1.2.	LONGARINA.....	11
2.2.1.3.	CONECTOR.....	12
2.3.	NORMATIZAÇÃO.....	13
2.3.1.	NORMA AMERICANA - <i>RACK MANUFACTURERS INSTITUTE</i> (RMI).....	13
2.3.2.	NORMA EUROPEIA - EN 15512.....	15
2.3.2.1.	ENSAIO DE FLEXÃO NOS CONECTORES DAS LONGARINAS.....	15
2.4.	CONEXÃO ENTRE LONGARINA E COLUNA.....	18
2.4.1.	ANÁLISES EXPERIMENTAIS.....	22
2.4.2.	ANÁLISES NUMÉRICAS.....	23
2.4.3.	ANÁLISE MECÂNICA (MÉTODO DAS COMPONENTES).....	26
2.4.3.1.	MOMENTO FLETOR RESISTENTE DA CONEXÃO.....	29
2.4.3.1.1.	SOLDA (<i>Fwel</i>).....	29
2.4.3.1.2.	MESA DA LONGARINA EM TRAÇÃO E EM COMPRESSÃO (<i>Fbf, t</i> e <i>Fbf, c</i>).....	30
2.4.3.1.3.	ALMA DO CONECTOR EM TRAÇÃO E EM COMPRESSÃO (<i>Fcow, t</i> e <i>Fcow, c</i>).....	32
2.4.3.1.4.	CONECTOR EM FLEXÃO (<i>Mco, b</i>).....	33
2.4.3.1.5.	ABAS DO CONECTOR EM FLEXÃO E CISALHAMENTO (<i>Ft, s</i>).....	33
2.4.3.1.6.	RASGAMENTO DA ALMA DA COLUNA (<i>Fcw, p</i>).....	34
2.4.3.1.7.	AMASSAMENTO DA ALMA DA COLUNA (<i>Fcw, b</i>).....	35
2.4.3.1.8.	ALMA DA COLUNA EM TRAÇÃO E EM COMPRESSÃO (<i>Fcw, c</i> e <i>Fcw, t</i>).....	36
2.4.3.1.9.	ALMA DA COLUNA EM CISALHAMENTO (<i>Fcw, s</i>).....	38
2.4.3.1.10.	ANÁLISE DO MOMENTO RESISTENTE DA CONEXÃO.....	39
2.4.3.2.	ANÁLISE DA RIGIDEZ ROTACIONAL DA CONEXÃO.....	40
2.4.3.2.1.	ALMA DO CONECTOR EM TRAÇÃO E EM COMPRESSÃO (<i>kcw, t</i> e <i>kcw, c</i>).....	40
2.4.3.2.2.	CONECTOR EM FLEXÃO E CISALHAMENTO (<i>kbcb</i>).....	41
2.4.3.2.3.	ABAS DO CONECTOR EM FLEXÃO (<i>ktb</i>).....	43
2.4.3.2.4.	RASGAMENTO DA ALMA DA COLUNA (<i>kcw, p</i>).....	44
2.4.3.2.5.	AMASSAMENTO DA ALMA DA COLUNA (<i>kcw, b</i>).....	46
2.4.3.2.6.	ALMA DA COLUNA EM CISALHAMENTO (<i>kcw, s</i>).....	47
2.4.3.2.7.	RIGIDEZ ROTACIONAL DA CONEXÃO.....	49
3.	METODOLOGIA.....	52

3.1.	GEOMETRIAS	53
3.1.1.	COLUNA	53
3.1.2.	CONECTOR.....	54
3.1.3.	LONGARINA	55
3.1.4.	MONTAGEM.....	56
3.2.	MATERIAL	57
3.3.	MODELAGEM NUMÉRICA.....	59
3.3.1.	CONDIÇÕES DE CONTORNO E DETALHES DO MODELO NUMÉRICO.....	61
3.4.	ENSAIO EXPERIMENTAL SIMPLIFICADO	65
3.4.1.	O EXPERIMENTO	66
3.4.2.	TOMADA DE DADOS	69
3.4.3.	PROCESSAMENTO DOS DADOS	70
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	73
4.1.	MÉTODO DAS COMPONENTES	73
4.1.1.	IDENTIFICAÇÃO DAS COMPONENTES.....	73
4.1.1.1.	RIGIDEZ.....	73
4.1.1.1.1.	ALMA DO CONECTOR EM TRAÇÃO E COMPRESSÃO (k_{cow}, t e k_{cow}, c) 73	
4.1.1.1.2.	ABA DO CONECTOR EM FLEXÃO (k_{tb}).....	74
4.1.1.1.3.	ABA ENRIJECEDORA TRASEIRA DO CONECTOR EM FLEXÃO (k_{cotb}) 76	
4.1.1.1.4.	RASGAMENTO E FLEXÃO LATERAL DO FURO DA COLUNA (k_{cwc}, h e k_{cwb}, h).....	77
4.1.1.1.5.	CONECTOR EM FLEXÃO E CISALHAMENTO (k_{bcb})	78
4.1.1.1.6.	FLEXÃO INFERIOR DO FURO DA COLUNA (k_{cwc}, v)	79
4.1.1.1.7.	RASGAMENTO INFERIOR DO FURO DA COLUNA (k_{cwb}, v)....	80
4.1.1.1.8.	ALMA DA COLUNA EM CISALHAMENTO (k_{cws})	81
4.1.1.2.	RESISTÊNCIA	82
4.1.1.2.1.	SOLDA (F_{wel})	82
4.1.1.2.2.	MESA DA LONGARINA EM TRAÇÃO E COMPRESSÃO (F_{bf}, t e F_{bf}, c) 83	
4.1.1.2.3.	ALMA DO CONECTOR EM TRAÇÃO E COMPRESSÃO (F_{cow}, t e F_{cow}, c) 84	
4.1.1.2.4.	CONECTOR EM FLEXÃO (M_{co}, b).....	85
4.1.1.2.5.	ABA DO CONECTOR EM CISALHAMENTO (F_t, s).....	86
4.1.1.2.6.	RASGAMENTO E FLEXÃO INFERIOR NO FURO DA COLUNA (F_{cw}, p e F_{cw}, b)	87
4.1.1.2.7.	ALMA DA COLUNA EM CISALHAMENTO (F_{cw}, s).....	88
4.1.2.	AVALIAÇÃO DAS COMPONENTES.....	89
4.1.2.1.	RIGIDEZ.....	89
4.1.2.2.	RESISTÊNCIA	90
4.1.3.	AVALIAÇÃO GLOBAL DA CONEXÃO.....	91
4.1.3.1.	RIGIDEZ.....	91
4.1.3.1.1.	RIGIDEZ ROTACIONAL RELATIVA AO CISALHAMENTO DA COLUNA ($k_{cws} - \varphi$)	92
4.1.3.1.2.	RIGIDEZ ROTACIONAL RELATIVA À ABA TRASEIRA DO CONECTOR ($k_{cotb} - \varphi$)	93
4.1.3.1.3.	RIGIDEZ ROTACIONAL RELATIVA AOS DENTES DO CONECTOR ($k_{tb} - \varphi$).....	93

4.1.3.1.4.	RIGIDEZ ROTACIONAL RELATIVA À ALMA DO CONECTOR EM TRAÇÃO E COMPRESSÃO ($k_{cow} - \varphi$)	94
4.1.3.1.5.	RIGIDEZ ROTACIONAL INICIAL.....	95
4.1.3.2.	RESISTÊNCIA	96
4.2.	ANÁLISE NUMÉRICA.....	99
4.2.1.	ESTUDO DO MODELO	99
4.2.1.1.	GEOMETRIA	99
4.2.1.2.	MALHA	100
4.2.1.3.	CONTATO.....	101
4.2.2.	RESULTADO DA ANÁLISE NUMÉRICA	103
4.3.	ANÁLISE EXPERIMENTAL SIMPLIFICADA	105
4.3.1.	CORPO DE PROVA 110C-5A-120L-PB 01	106
4.3.2.	CORPO DE PROVA 110C-5A-120L-PB 02	109
4.3.3.	CORPO DE PROVA 110C-5A-120L-PB 03	113
4.3.4.	CORPO DE PROVA 110C-5A-120L-PB 04	117
4.4.	COMPARATIVO	121
4.4.1.	ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL SIMPLIFICADA.....	121
4.4.2.	COMPARATIVO ENTRE ANÁLISE MECÂNICA, NUMÉRICA E EXPERIMENTAL SIMPLIFICADA	127
5.	CONCLUSÕES	129
5.1.	CONCLUSÕES GERAIS	129
5.2.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	130
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	131

1. INTRODUÇÃO

Mundialmente reconhecido, o Brasil está entre os maiores produtores de aço, porém, ainda carece de uma cultura de aplicação do mesmo na construção civil. Isto se dá, talvez, por fatores culturais e econômicos. Dentre eles, pode-se citar o aço laminado a quente ou a frio, perfis formados a frio (PFF) de chapas finas, etc.

Os perfis de chapas finas são amplamente conhecidos por sua versatilidade, leveza e adaptabilidade. Podem ser utilizados em diversos âmbitos da indústria, entre eles: construção civil, automobilística, aeronáutica, etc (GRIGOLETTI; CARVALHO; BARBOSA, 2014).

Na indústria, os PFF têm participação fundamental na composição dos sistemas estruturais de armazenagem, que são demandados quando o espaço horizontal não suporta. Estes sistemas melhoram a logística das empresas já que otimizam espaços, estocando produtos verticalmente e, permitem fácil acesso de consumidores ou funcionários.

Os sistemas de estocagem e armazenamento constituem-se de estruturas de aço formadas por montantes, longarinas, conectores e contraventamentos. Os montantes são formados por duas colunas de perfis do tipo *rack* separados e interligados por perfis U que também possuem a função de contraventamento na direção paralela ao montante. Os perfis *rack* possuem perfurações, igualmente espaçadas, em todo o seu comprimento onde são encaixadas as abas dos conectores, os quais são unidos às longarinas através de soldas. Isto faz com que a ligação entre as longarinas e os montantes seja semirrígida. Esta semirrígidez da ligação tem grande influência na estabilidade global do sistema, assim como no contraventamento na direção perpendicular ao montante.

Devido à complexidade e a falta de normatização específica para essas estruturas, os fabricantes desenvolveram prescrições acerca do tema. Um dos mais conhecidos é o americano *Rack Manufacturers Institute* (RMI, 1997), o qual possui várias recomendações de análise e ensaios experimentais. Na Europa, juntamente com as prescrições do Eurocode 3 segue-se as recomendações da *Federation Européenne de la Manutention* (FEM, 1997) e o EN 15512 (2009). No Brasil, a NBR 15524:2007 baseia-se nas normas estrangeiras anteriormente citadas fornecendo diretrizes aos projetistas de sistemas de armazenagem.

Vários estudos foram realizados a respeito da estabilidade global das estruturas de porta-paletes, e concluiu-se que a conexão entre as longarinas e as colunas, bem como as conexões de base dos montantes, influenciam significativamente essa estabilidade. Um dos grandes desafios do dimensionamento dessas estruturas é a conexão já que não há um passo-a-passo

teórico definido em norma para a quantificação da rigidez rotacional e momento fletor resistente da ligação. As normas recomendam a realização de ensaios experimentais para a obtenção desses valores, porém, esses procedimentos laboratoriais são onerosos e demandam tempo, isto é, os projetistas precisam recorrer a outros recursos quando não tiverem acesso aos dados experimentais de cada tipo de ligação existente (ZHAO et al., 2017).

Alternativamente, a obtenção dos valores da rigidez rotacional e do momento fletor resistente da ligação pode ser realizada através de análise numérica por elementos finitos. Um dos primeiros trabalhos realizados com esse método foi feito por Markazi, Beale E Godley (2001). Neste, os autores fizeram uma análise linear tridimensional de uma conexão típica e compararam os resultados com ensaios experimentais previamente realizados. Outros autores também produziram análises numéricas e constataram grande esforço computacional, além da dificuldade de simular exatamente o comportamento real da ligação.

A norma europeia EN 1993-1-8 (2011) está relacionada ao dimensionamento de ligações em estruturas metálicas; e em seu Capítulo 6 preconiza uma forma de se obter as propriedades estruturais de ligações entre seções I e H por meio do método das componentes. Uma das vantagens deste método é sua versatilidade já que pode ser aplicado em vários tipos de nós, tanto soldados, parafusados ou sem parafusos. As propriedades mecânicas que o método permite obter são: momento resistente, rigidez rotacional e capacidade de rotação.

O Método das Componentes normalmente é composto por três fases. A primeira consiste na identificação das componentes que possuem influência significativa nas propriedades da ligação, por exemplo, a resistência da solda ou a resistência a flexão do conector. Após a identificação das componentes, a segunda fase fundamenta-se na previsão da rigidez inicial e da resistência de cada um deles. O comportamento de cada componente é descrito através de uma relação bi linear entre força e deslocamento e as componentes que não influenciam na rigidez da ligação são consideradas como rígido-plásticas e as que influenciam, como elasto-plásticas. A terceira fase é a avaliação da rigidez inicial e da resistência da ligação global, levando-se em conta todas as componentes anteriormente estudados (ŚLĘCZKA; KOZŁOWSKI, 2008).

Estudos embasados no Método das Componentes para ligações de sistemas estruturais de porta-paletes vem sendo realizados. Alguns autores como Ślęczka e Kozłowski (2008), Zhao et al. (2017) e Gusella (2019) produziram excelentes trabalhos nos quais compararam valores obtidos através do Método das Componentes e ensaios experimentais. A precisão obtida foi bastante favorável em ambos, mostrando que esta análise mecânica é confiável para o uso no dimensionamento de ligações, desde que utilizado corretamente.

1.1.JUSTIFICATIVA

Os sistemas de armazenagem industrial têm grande importância na logística de empresas e necessitam de atenção especial para a estabilidade de suas estruturas que, predominantemente, são metálicas. Qualquer instabilidade que possa causar acidentes, fatais ou não, devem ser previamente estudadas para que sejam evitadas. Assim, o dimensionamento correto dessas estruturas deve ser alcançado. Considerando a dificuldade da utilização de contraventamentos na direção perpendicular aos montantes, as ligações entre longarinas e colunas fazem este papel devido a sua semirrigidez, ou seja, a estabilidade global do sistema é altamente influenciada pelas ligações. Portanto, é importante a inserção de meios que facilitem o dimensionamento das mesmas, ou ao menos uma avaliação preliminar, já que as normas trazem apenas procedimentos laboratoriais ou permite a análise através de modelos numéricos para obtenção dos valores de resistência e rigidez das ligações.

Com este cenário o presente trabalho tem como justificativa o estudo de ligação longarina x coluna de sistemas de armazenagem industrial através de meios alternativos aos preconizados pelas normas. Foram realizadas análises numérica e mecânica e um ensaio laboratorial simplificado.

1.2.OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GERAL

Analisar ligação entre longarina e coluna de sistemas de armazenagem industrial obtendo-se valores relativos à rigidez rotacional inicial e momento fletor resistente.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Validar e comparar os resultados obtidos pelo Método das Componentes e ensaio experimental com uma análise numérica através do *software* comercial Abaqus;
- Analisar a validade do Método das Componentes adaptado para ligações não-parafusadas através da comparação com a análise numérica e experimental simplificada.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho foi organizado em 5 capítulos.

No Capítulo 2 é feita uma revisão da literatura acerca do tema da dissertação. Abordam-se assuntos como perfis formados a frio, estruturas de armazenagem industrial, análises numéricas e mecânica para ligações semirrígidas e ensaio experimental.

No Capítulo 3 apresenta-se a metodologia utilizada no trabalho. Inicia-se com a descrição dos elementos da ligação a ser analisada: longarina, conector e coluna. Logo após, como foi realizada a análise numérica no Abaqus e o ensaio experimental simplificado.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados de rigidez rotacional inicial e momento fletor resistente da conexão, obtidos nas análises numérica, mecânica e experimental simplificada. Além disso, realiza-se a discussão e comparativo entre eles.

No Capítulo 5 são exibidas as discussões e algumas sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO DA LITERATURA

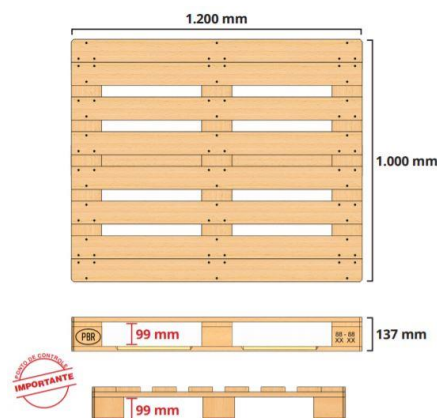
2.1.PERFIS FORMADOS A FRIO

Os perfis formados a frio compõem as estruturas porta-paletes e necessitam de especial atenção em seu dimensionamento devido às instabilidades que podem ocorrer devido a sua esbeltez. Existem três tipos de instabilidades preponderantes e a elas dá-se o nome de: flambagem local, distorcional e global. Podem ocorrer isoladamente ou haver interação entre elas dependendo do comprimento e da seção transversal da barra. A flambagem distorcional ocorre majoritariamente em perfis de seção aberta e com enrijecedores de borda, os quais possuem ampla aplicação em sistemas de armazenagem como seções *rack* em colunas contraventadas que compõem os montantes. Além das instabilidades, devem ser consideradas no dimensionamento de perfis formados a frio a não-linearidade do material, imperfeições e tensões residuais (SCHAFER, 2002).

2.2.SISTEMAS DE ARMAZENAGEM INDUSTRIAL

Os porta-paletes, como o próprio nome já representa, são estruturas destinadas ao armazenamento de produtos ou mercadorias que são estocadas sobre paletes. No Brasil, algumas normas estão voltadas apenas para os paletes de madeira, entre elas: NBR 8252:2011 e NBR 8334:2011. O modelo de paleta padrão mais atual é o PBR-1 versão 2019, este possui área de armazenagem de produtos de 1000 x 1200 milímetros. A partir desta dimensão padronizada os porta-paletes são projetados de forma que armazenem com segurança as mercadorias. O paleta PBR está ilustrado na Figura 2.1.

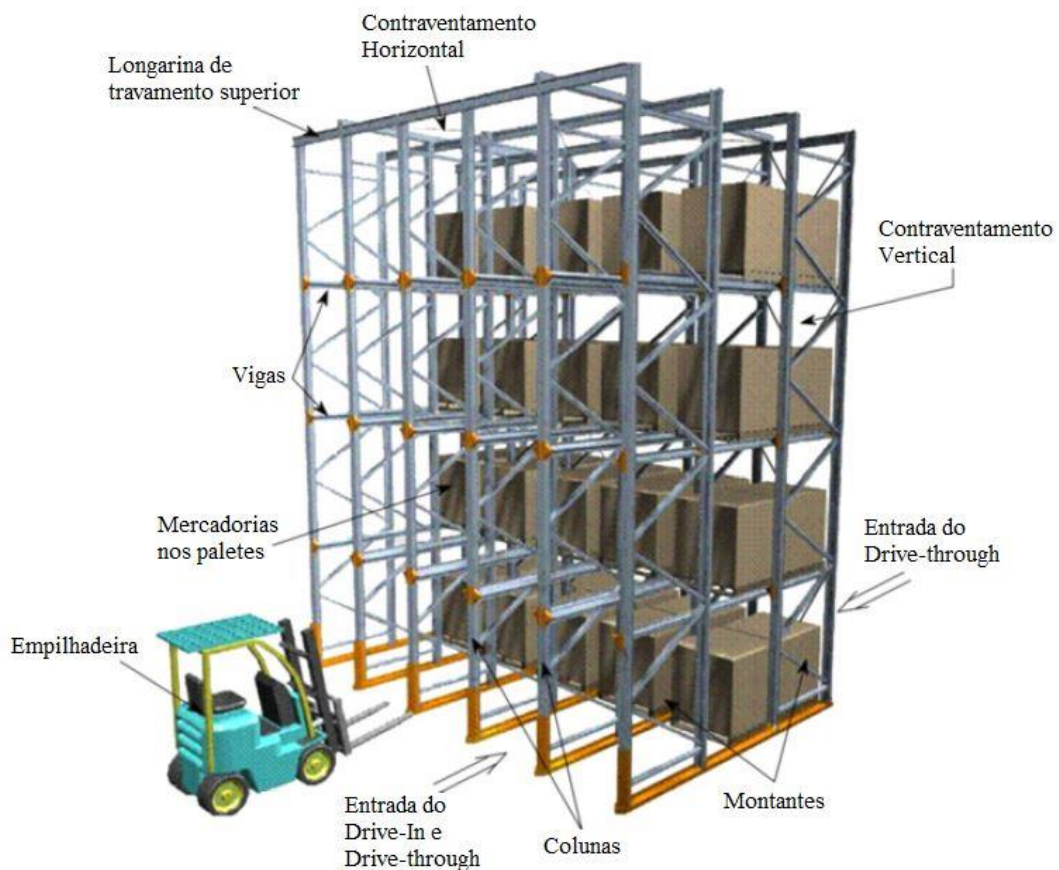
Figura 2.1 - Paleta PBR-1 Versão 2019



Fonte: ABRAS (2019)

Existem porta-paletes dos tipos dinâmico e estático. No primeiro, as cargas se movimentam no interior da estrutura pela força da gravidade ou algum outro mecanismo através de esteiras. Já no sistema estático as cargas são posicionadas e movimentadas através de empilhadeiras (SOUZA, 2005). Dentre os sistemas estáticos, Tilburgs (2013) revela que podem ser do tipo seletivo, *drive-in* e *drive-through*. A diferença entre os dois últimos é o acesso tanto frontal quanto traseiro. Ambos estão ilustrados na Figura 2.2.

Figura 2.2 - Drive-In e Drive-Through

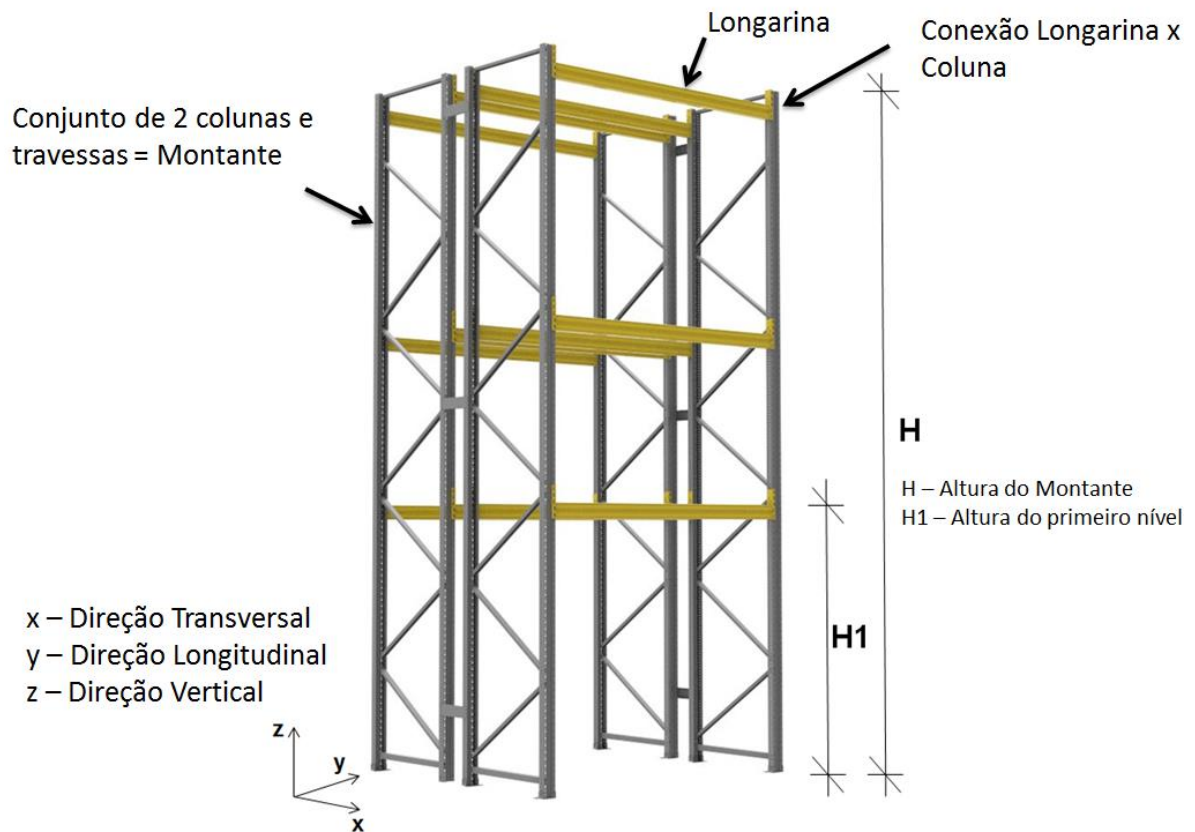


Fonte: Gilbert e Rasmussen (2010), adaptado

Os sistemas do tipo seletivo são mais abrangentes em relação à aplicação já que podem ser encontrados até em lojas de supermercado com acesso ao público, os chamados Atacarejos. Este possui estrutura tridimensional, geralmente composta por perfis de aço formados a frio, o qual pode ou não ser contraventado. A partir de uma vista superior, as direções principais dessa estrutura são: perpendicular ao corredor ou transversal (*cross-aisle direction*) e paralela ao corredor ou longitudinal (*down-aisle direction*). Na primeira, o contraventamento é feito através dos montantes, que são estruturas compostas por duas colunas (geralmente perfis *rack*) conectadas por travessas (geralmente perfis U enrijecidos) que podem estar tanto na posição

horizontal quanto diagonal. As travessas são conectadas aos montantes através de ligações parafusadas ou soldadas. Na Europa e Austrália é comum o uso de parafusos enquanto que nos Estados Unidos, a solda possui alguma aplicação (NG; BEALE; GODLEY, 2009). A Figura 2.3 ilustra o módulo de um porta-palete seletivo.

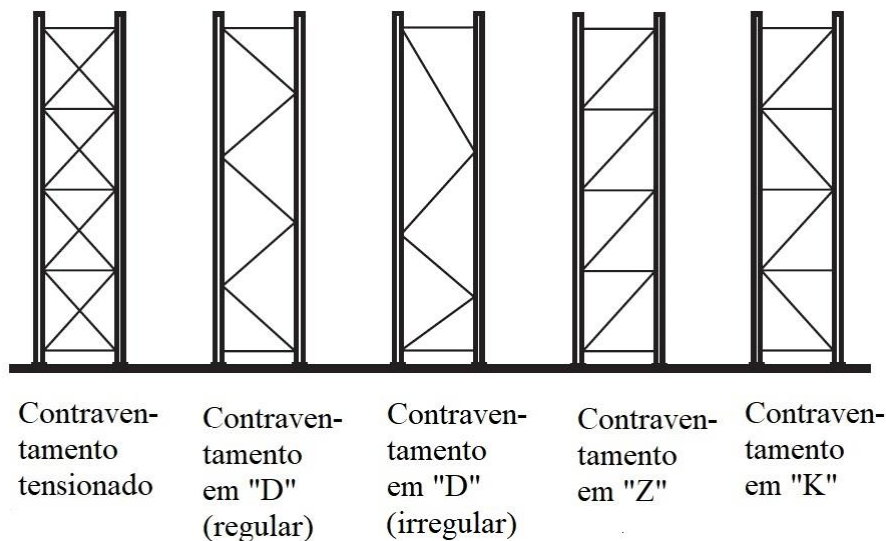
Figura 2.3 - Porta palete seletivo



Fonte: O autor

O posicionamento das travessas entre as duas colunas pode ter variadas aplicações que são empregadas particularmente por cada fabricante. O posicionamento mais comum é o tipo “D” contido na Figura 2.4.

Figura 2.4 - Tipos de contraventamentos dos montantes



Fonte: EN 15512 (2009), adaptado

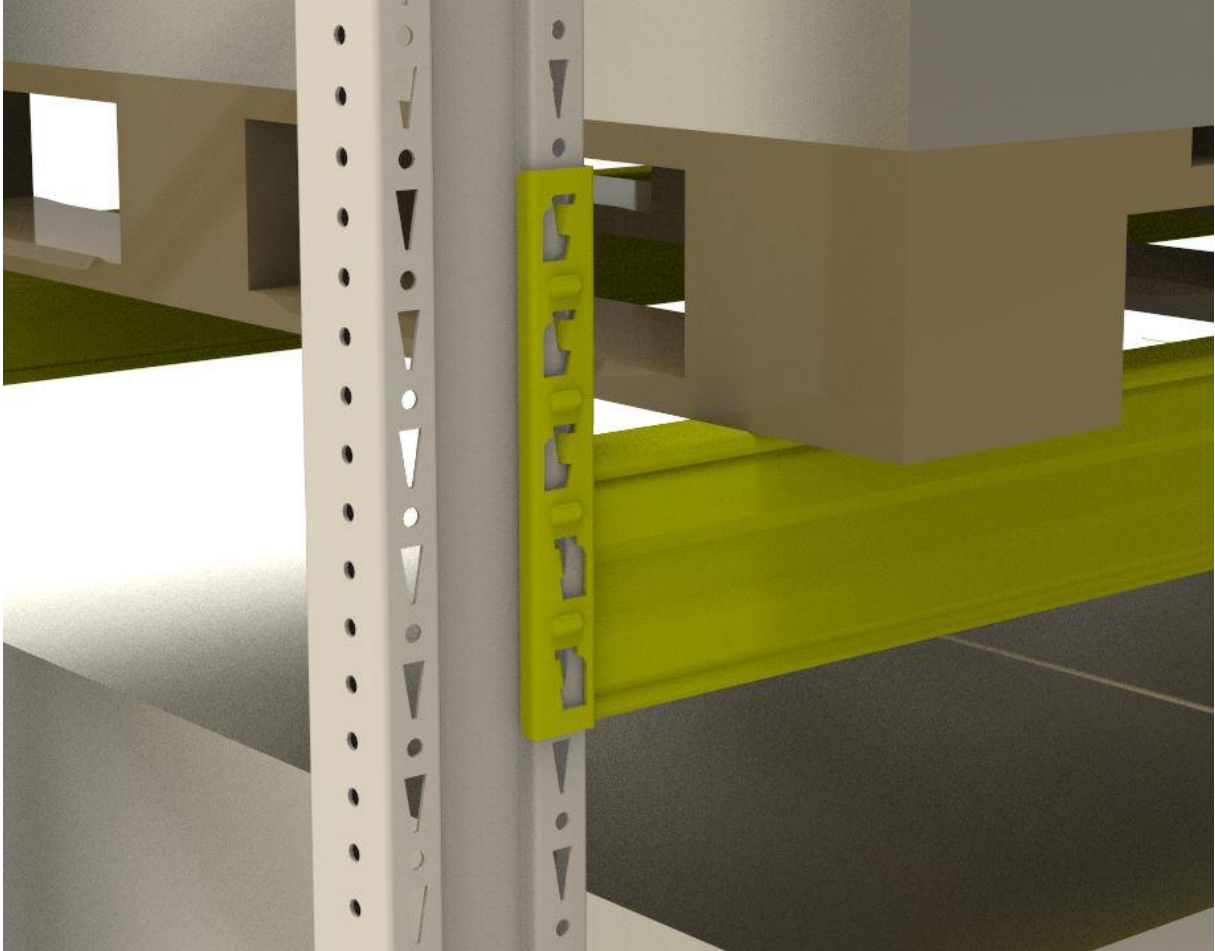
Na direção paralela ao corredor o posicionamento de contraventamentos é dificultado já que isto ocasionaria a obstrução do acesso das empilhadeiras na colocação ou retirada de produtos. Sendo assim, alguns travamentos podem ser colocados entre as longarinas no plano horizontal assim como contraventamentos em "X" verticalmente na porção traseira, oposta ao acesso das empilhadeiras. A rigidez ao deslocamento lateral da estrutura na direção longitudinal é proporcionada pelas conexões entre longarina e coluna bem como entre as chapas de base fixadas pelos chumbadores e as colunas dos montantes (BALDASSINO; BERNUZZI, 2000) e (MARKAZI; BEALE; GODLEY, 1997). Portanto, essas ligações devem ser corretamente dimensionadas e inspecionados para que não ocorram erros que podem comprometer a estabilidade global da estrutura. De acordo com Shah et al. (2016a), os três principais mecanismos que levam à falha estrutural são: carregamento excessivo acima do permitido, dimensionamento incorreto e erros de fabricação ou montagem.

Os montantes são interligados por longarinas, que são vigas de vãos variados e que podem ser compostas por perfis Z ou, mais comumente, dois perfis U enrijecidos acoplados formando-se um perfil de seção retangular. Aos dois extremos destas longarinas são soldados os conectores que são chapas dobradas os quais possuem dentes ou abas com a função de fazer a conexão entre longarina e montantes que possuem perfurações com a função de encaixe do conector em todo seu comprimento. Existem diferentes modelos de conectores que variam de acordo com cada fabricante e o seu estudo é de extrema importância para o sistema estrutural

já que contribuem significativamente na estabilidade da estrutura na direção longitudinal devido à sua semirrigidez (EN 15512, 2009).

Um exemplo de ligação entre longarina e coluna está exposto na Figura 2.5 que segue.

Figura 2.5 - Ligação entre longarina e coluna em sistemas de armazenagem industrial

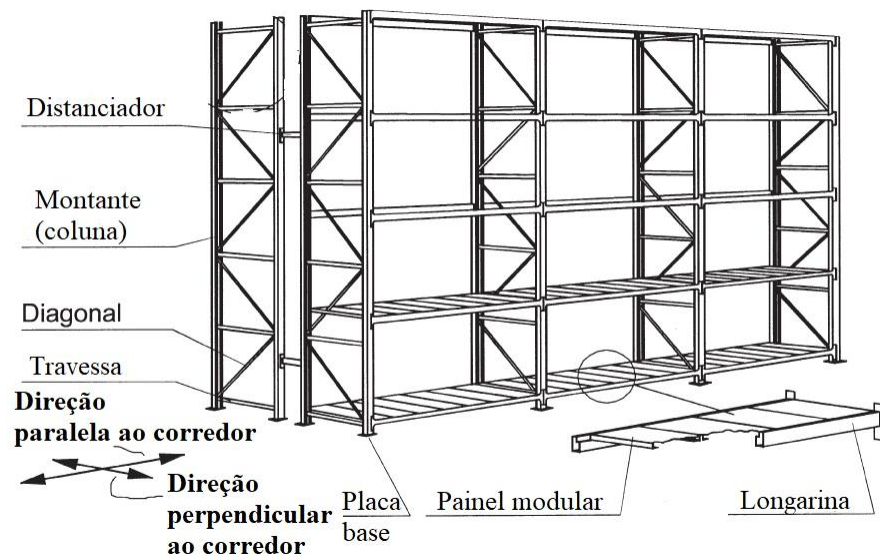


Fonte: O autor

2.2.1. COMPONENTES DOS PORTA-PALETES

O esquema geral de um porta-paletes do tipo seletivo está representado na Figura 2.6. Neste item serão abordados seus componentes: coluna, longarinas e conectores.

Figura 2.6 - Esquema geral de um porta-palete seletivo



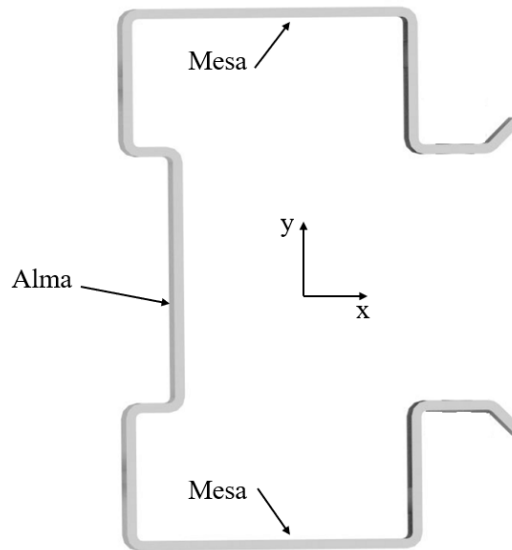
Fonte: (BERNUZZI et al., 2015), adaptado

2.2.1.1.COLUNA

De acordo com Roure et al. (2011) as colunas dos sistemas de armazenagem são constituídas por perfis formados a frio de chapa fina. Os mesmos contêm perfurações ao longo de seu comprimento para possibilitar o encaixe das longarinas em alturas variáveis assim como a fixação dos parafusos na ligação da coluna com as travessas de contraventamento na direção perpendicular ao corredor. Normalmente, são empregados perfis *rack* às colunas dos porta-paletes.

As espessuras mais comuns empregadas nesses perfis variam entre 1,5 a 3,0 milímetros. Desta forma, devido a suas grandes alturas, uma esbelteza elevada faz com que fiquem suscetíveis a instabilidades globais (TILBURGS, 2013). Esses perfis ainda podem estar sujeitos às flambagens local e distorcional assim como pode existir a interação entre elas. Por serem perfis perfurados, sua resistência diminui em relação ao perfil maciço (FREITAS; FREITAS; SOUZA, 2005). A Figura 2.7 a seguir ilustra a seção *rack*.

Figura 2.7 - Seção *rack* típica de colunas em sistemas de armazenagem

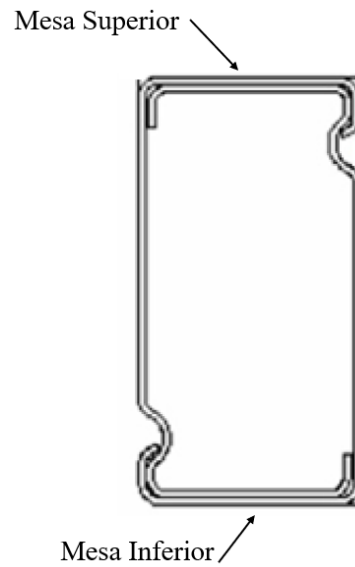


Fonte: O autor

2.2.1.2.LONGARINA

As longarinas desempenham importante papel na estabilidade estrutural dos porta-paletes. Elas fazem a conexão entre os montantes no sentido paralelo ao corredor, suportam as cargas, transmitindo-as para as colunas dos montantes e fornecem rigidez longitudinal ao sistema. É um elemento que deve possuir elevada resistência ao momento fletor. As seções das longarinas podem ser abertas ou fechadas, porém a mais empregada é a seção caixa (Figura 2.8), onde dois perfis de seção U enrijecido são unidos e soldados ao longo do comprimento (GODLEY; BEALE, 2008). Existem dobras nos enrijecedores destes perfis que garantem que eles trabalhem em conjunto quando solicitados aos esforços de flexão e cisalhamento.

Figura 2.8 - Seção típica de longarina

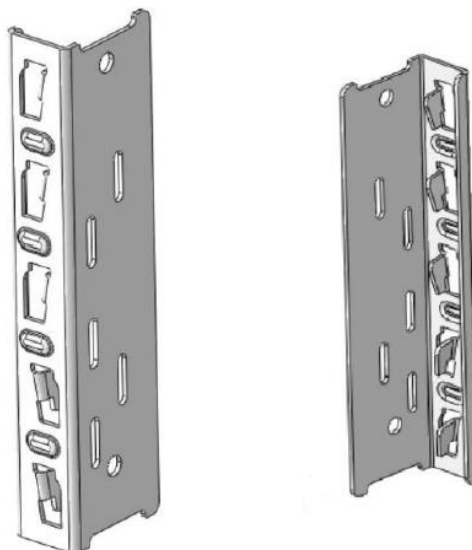


Fonte: Prabha et al. (2010), adaptado

2.2.1.3. CONECTOR

De acordo com Markazi, Beale e Godley (1997), as estruturas dos sistemas de armazenagem possuem conectores soldados nas extremidades das longarinas que funcionam como a ligação não parafusada entre estas e as colunas. São constituídos por chapas metálicas, com espessuras próximas às das colunas. Possuem furos puncionados, os quais formam as abas ou dentes, que servem de conexão com a coluna; ou seja, as abas são encaixadas nas perfurações das colunas na altura desejada. Na Figura 2.9 está o modelo de um conector.

Figura 2.9 - Modelo de conector



Fonte: O autor

A ligação entre conector e coluna pode ser tida como similar às ligações semirrígidas com chapas parafusadas empregadas em estruturas de aço laminado, porém muitos autores ainda não conseguiram realizar uma análise precisa padronizada em conexões não parafusadas. Aos conectores, são adicionadas travas de segurança as quais possuem a função de resistir ao desacoplamento da longarina em uma eventual carga ascendente proveniente dos garfos das empilhadeiras (ŚLĘCZKA; KOZŁOWSKI, 2007).

A resistência dos conectores e a rigidez da ligação entre conector e coluna afetam o desempenho global da estrutura já que o mesmo transfere as cargas resistidas pela longarina às colunas. Devido aos variados tipos de conectores existentes no mercado, há dificuldade em estipular um dimensionamento padrão para essas conexões; sendo assim, as normas preconizam que ensaios experimentais sejam realizados para obtenção de tais propriedades (FILIATRAULT; HIGGINS; WANITKORKUL, 2006).

2.3.NORMATIZAÇÃO

As normas relacionadas ao dimensionamento de sistemas de armazenamento existentes, não fornecem processos analíticos padronizados. Desta forma, elas preconizam muitos ensaios laboratoriais, os quais fornecem resultados referentes à rigidez e resistência dos componentes da estrutura. Assim, os projetistas recorrem a métodos experimentais ou numéricos possibilitando uma conclusão do dimensionamento das estruturas de armazenagem (TILBURGS, 2013). Os ensaios nem sempre são economicamente viáveis devido ao custo dos materiais empregados no ensaio e do laboratório, portanto, a análise numérica através de *softwares* de elementos finitos é vista como boa alternativa.

2.3.1. NORMA AMERICANA - RACK MANUFACTURERS INSTITUTE (RMI)

A norma americana RMI (2008) apresenta um ensaio denominado *cantilever test* através do qual determina-se o momento resistente e a rigidez da ligação longarina x coluna. O procedimento do ensaio consiste de uma viga de 660 milímetros de comprimento a qual é conectada na porção central de uma coluna de, pelo menos, 760 milímetros de altura, sendo suas extremidades engastadas em suportes rígidos o suficiente para que não haja nenhum tipo de deslocamento ou rotação. Um carregamento concentrado e na direção vertical deve ser aplicado a 610 milímetros da face externa da coluna e a deflexão vertical no ponto de aplicação da carga devem ser medidas, para tanto podem ser utilizados transdutores de deslocamento. É

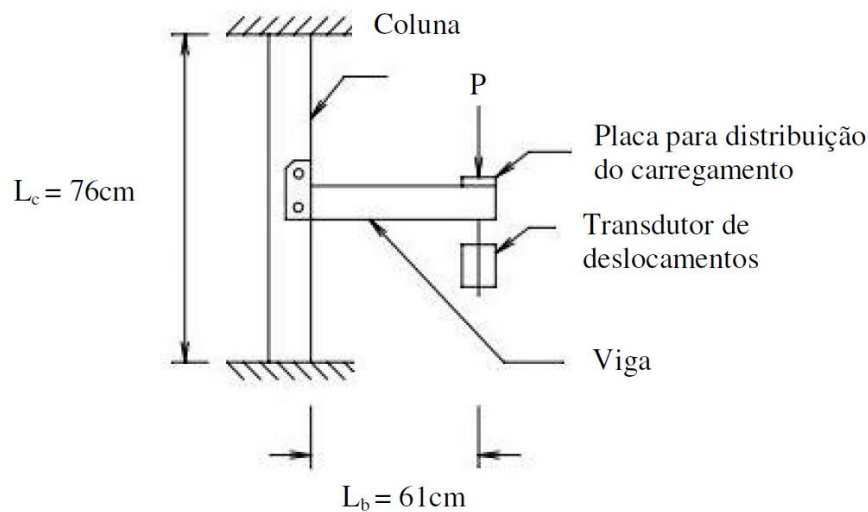
importante salientar que o RMI (2008) recomenda a realização de, ao menos, dois ensaios iguais, dos quais, se os resultados obtidos sobre a rigidez da ligação tiverem desvio padrão maior que 10%, deve-se proceder um terceiro ensaio. Assim, a média dos dois valores mais elevados configurarão o resultado final.

O *cantilever test* permite, através da coleta de dados no laboratório, a construção de um gráfico da carga \times deslocamento. O RMI (2008) prescreve que a rigidez da ligação (S) deve ser:

$$S = \frac{M}{\theta} \quad (2.1)$$

Onde M é o momento fletor gerado na conexão, devido a aplicação da carga na longarina e θ é a rotação linear gerada por este momento fletor, a qual, durante o ensaio é obtida através de transdutores de deslocamento. A conformação do ensaio está representada na Figura 2.10 a seguir.

Figura 2.10 - Conformação do *cantilever test*



Fonte: Miranda (2011), adaptado

Na Figura 2.10, a letra P representa a carga a ser aplicada na longarina; L_b é a distância entre a posição de aplicação da carga e a face externa da coluna e L_c é o comprimento mínimo da coluna a qual tem seus extremos fixados em suportes rígidos.

2.3.2. NORMA EUROPEIA - EN 15512

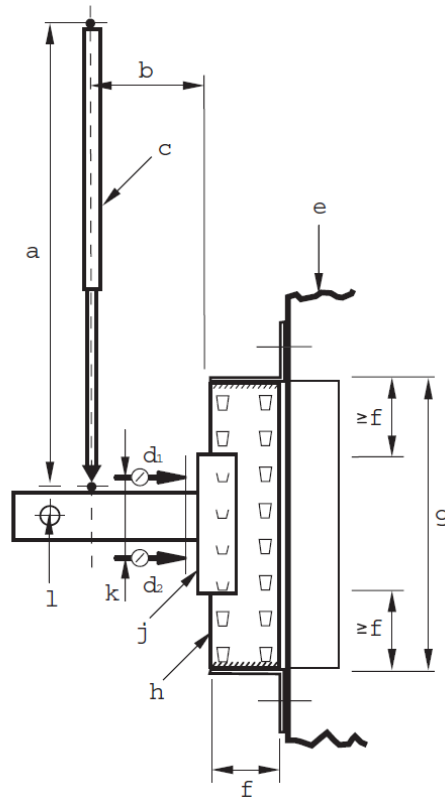
A norma europeia EN 15512 (2009) que trata dos princípios para o dimensionamento de estruturas de armazenagem traz, em seu Anexo A.2, uma série de ensaios laboratoriais que têm por objetivo a obtenção de valores, entre eles a resistência a compressão das colunas perfuradas e as propriedades das ligações semirrígidas entre longarina e colunas os quais são empregados na análise e dimensionamento das estruturas. Este anexo é composto por 11 ensaios, que são: ensaio de coluna curta; ensaio de compressão nos montantes – verificação dos efeitos da flambagem por distorção; ensaio de compressão nos montantes – determinação das curvas de flambagem; ensaio de flexão nos conectores das longarinas; ensaio de folga nos conectores das longarinas; ensaio de cisalhamento nos conectores das longarinas e travas de segurança; ensaio da conexão entre a chapa base do montante e o chão; ensaio da rigidez ao cisalhamento dos montantes; ensaio de flexão nas seções dos montantes; ensaio de flexão nas longarinas e ensaio das emendas dos montantes. Dentre esses, o ensaio de flexão nos conectores das longarinas é o objeto desta dissertação.

2.3.2.1. ENSAIO DE FLEXÃO NOS CONECTORES DAS LONGARINAS

O objetivo principal deste ensaio é a obtenção da rigidez e da resistência à flexão da conexão longarina x coluna. Vários são os aspectos que afetam a conexão, dentre eles: o tipo de coluna assim como sua espessura; o tipo de longarina; a posição da longarina no conector; as propriedades dos materiais utilizados e o método de conexão entre longarina e conector (EN 15512, 2009).

Este ensaio, representado na Figura 2.11, é similar à proposta contida no RMI (2008) e se dá através do engastamento das duas extremidades de uma coluna na qual é conectada uma longarina que fica em balanço. Uma força deve ser aplicada lentamente na longarina a uma distância de 400 mm da coluna. Medidores de deformação devem ser posicionados na longarina próximos a coluna de forma que sejam obtidos os deslocamentos e, posteriormente, calculada a rotação que ocorreu no local.

Figura 2.11 - Ensaio experimental de flexão nos conectores das longarinas



Fonte: EN 15512 (2009)

Onde “a” representa a distância do atuador de carga a qual deve ser maior que 750 mm; “b” é o braço de alavanca entre o ponto de aplicação da carga e a face externa da coluna, a qual recomenda-se 400 mm; “c” representa o atuador de carga; “d₁” e “d₂” são os medidores de deformação; “e” representa a estrutura rígida na qual a coluna deve ser conectada; “f” é a porção da coluna compreendida entre a extremidade de apoio e a extremidade do conector superior ou inferior; “g” é o comprimento total da coluna o qual deve ser, no mínimo, igual a duas vezes o comprimento de sua face somado ao comprimento do conector; “h” representa a coluna; “j” é o conector; “k” é a distância entre os dispositivos de medição de deslocamentos e “l” representa as restrições laterais aplicadas à longarina para que não haja deslocamentos horizontais, permitindo apenas movimentações na direção vertical.

O procedimento do ensaio consiste em aplicar, inicialmente, uma carga (F) equivalente a 10% da carga de falha esperada para que os componentes da ligação possam entrar em contato. Neste ponto, os medidores de deformação devem ser zerados e a seguir a carga deve ser aplicada aumentando-se gradualmente até que ocorra a falha na conexão. Assim, um gráfico do momento (M) \times rotação (θ) deve ser plotado, onde:

$$M = b \cdot F \quad (2.2)$$

e

$$\theta = \frac{\delta_2 - \delta_1}{k} \quad (2.3)$$

onde: “ b ” é o braço de alavanca para a carga F ; “ k ” é a distância entre os dispositivos de medição de deslocamentos e “ δ_1 ” e “ δ_2 ” são os deslocamentos medidos pelos medidores “ d_1 ” e “ d_2 ”, respectivamente.

Na Figura 2.12 está representado o gráfico que pode ser obtido a partir dos resultados extraídos do ensaio, ou seja, é possível obter, através de ensaio, o momento fletor resistente da ligação assim como a rigidez rotacional inicial.

O momento resistente de cálculo (M_{Rd}) da ligação é:

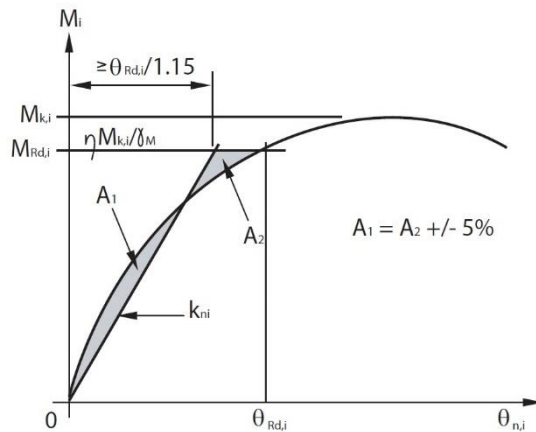
$$M_{Rd} = \eta \frac{M_k}{\gamma_M} \quad (2.4)$$

onde “ γ_M ” é coeficiente de segurança, que de acordo com a norma é equivalente a 1,25 e “ η ” é um fator de redução que, ainda de acordo com a norma europeia, deve ser tomado como menor ou igual a 1,00.

A rigidez rotacional secante da ligação (k_{ni}) deve ser obtida através do cálculo da inclinação de uma reta traçada a partir da origem até o valor do momento resistente de cálculo de modo que se formem áreas equivalentes entre esta reta e a curva obtida no ensaio, ou seja, $A_1 = A_2 \pm 5\%$. Assim, a EN 15512 (2009) indica que a rigidez rotacional é:

$$k_{ni} \leq 1,15 \frac{M_{Rd}}{\theta_{ki}} \quad (2.5)$$

Figura 2.12 - Curva típica do ensaio de flexão nos conectores das longarinas

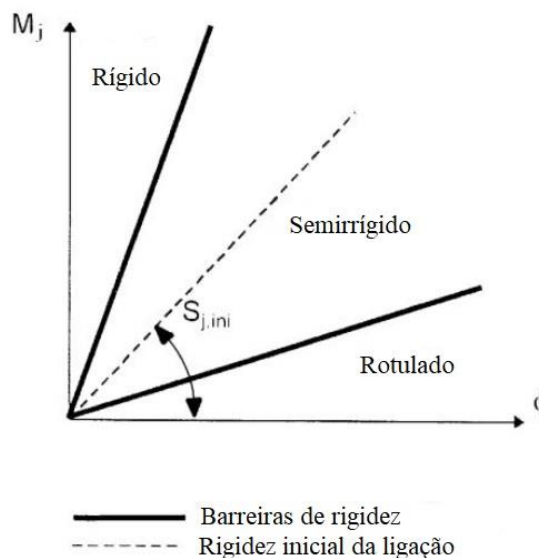


Fonte: EN 15512 (2009)

2.4. CONEXÃO ENTRE LONGARINA E COLUNA

As estruturas metálicas em forma de pórticos, que são similares aos porta paletes seletivos, geralmente têm seu dimensionamento considerando que as junções entre coluna e vigas são rotuladas ou completamente rígidas. Porém, o que ocorre na realidade é um comportamento intermediário já que a rigidez do nó é finita, isto é, as conexões são semirrígidas (DÍAZ et al., 2011). Conforme Jaspert (2000), a classificação da rigidez dos nós pode ser feita comparando-se a curva de rigidez analisada do nó à duas outras as quais representam nós rígidos e rotulados. Estas diferem em função do critério utilizado por cada autor e estão ilustradas na Figura 2.13.

Figura 2.13 - Classificação da rigidez das ligações



Fonte: Jaspert (2000), adaptado

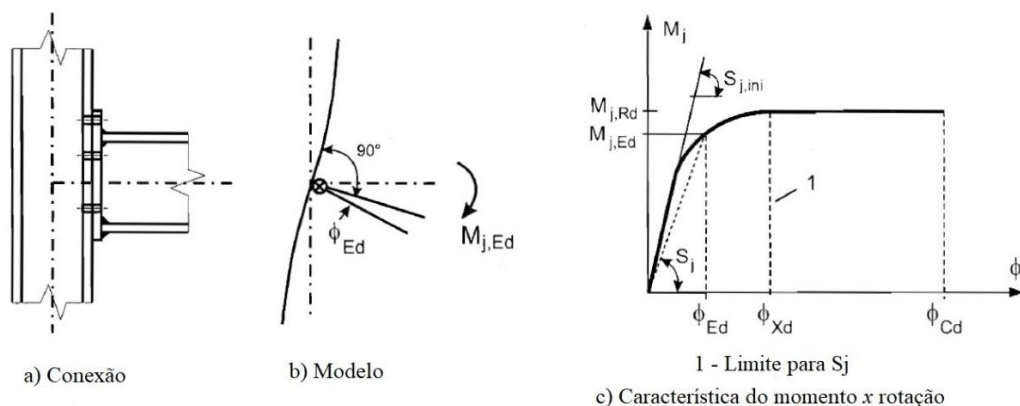
Nota-se pelo gráfico da Figura 2.13 que para relações entre momento fletor e rotação com inclinações abaixo da barreira de rigidez inferior, pode-se considerar que a ligação é rotulada. De maneira similar, para relações momento \times rotação com inclinações acima da barreira de rigidez superior, o nó pode ser considerado rígido, isto é, transfere momento fletor da viga para a coluna e o ângulo formado entre estes dois elementos permanece, praticamente, o mesmo. Por fim, para rigidez inicial $S_{j,ini}$ intermediária entre as duas barreiras inferior e superior, o nó é considerado semirrígido, o qual considera da forma mais aproximada o comportamento real da conexão.

Muitas análises acerca das propriedades mecânicas de ligações entre longarinas e colunas dos sistemas de armazenagem industrial foram realizadas. As primeiras pesquisas foram feitas analisando ligações entre vigas e pilares de aço laminado, entre eles Frye e Morris (1975) que encontraram as características relacionadas ao momento-rotação, em forma adimensional. Demonstraram também a inclusão das deformações das conexões na análise linear das estruturas através da alteração da matriz de rigidez e vetores de força dos membros.

De acordo com Godley (1997), a ductilidade, a resistência e a rigidez são os principais parâmetros que influenciam o desempenho das ligações entre longarinas e colunas de sistemas de armazenagem industrial. Desta forma, para contribuir com a avaliação dessas características, a EN 1993-1-8 (2011) fornece uma orientação de como determinar a eficiência dessas ligações semirrígidas em seções “H” ou “I”, as quais são geralmente utilizadas em aço laminado.

Conforme a EN 1993-1-8 (2011), as características do momento \times rotação de uma conexão definem as seguintes três propriedades estruturais a seguir: momento fletor resistente, rigidez rotacional e capacidade de rotação. Geralmente, essas características apresentam comportamento não-linear, conforme a Figura 2.14.

Figura 2.14 - Característica da relação momento \times rotação de uma conexão

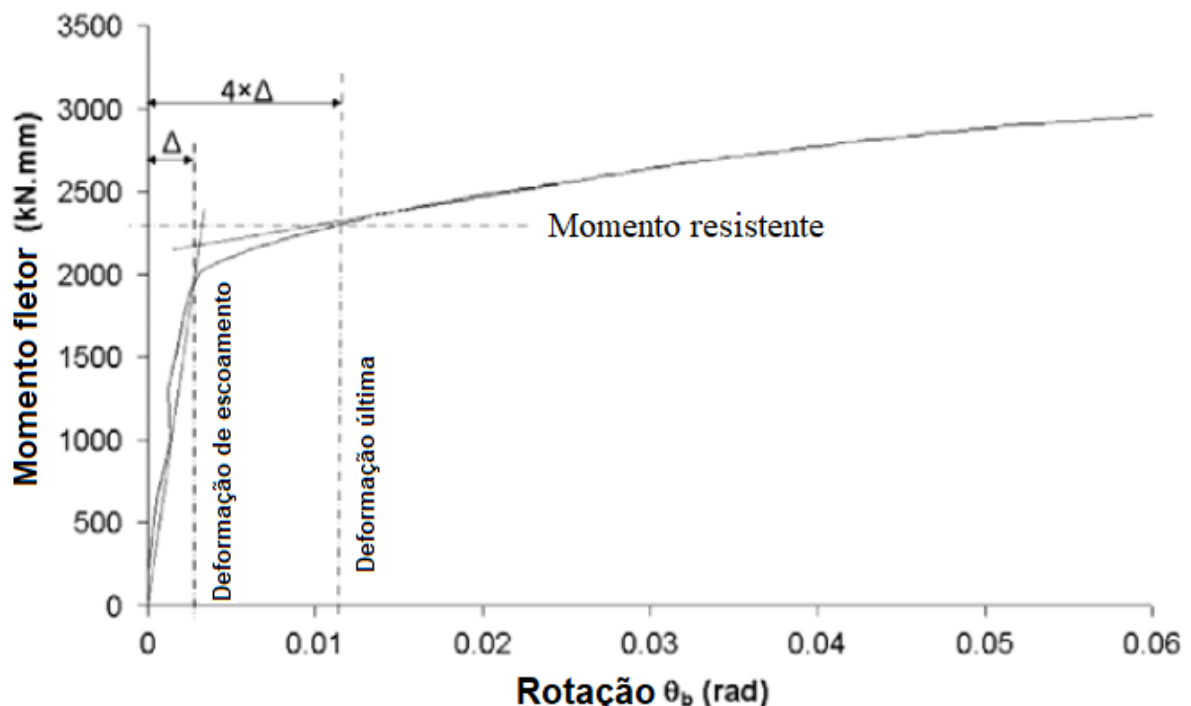


O momento fletor resistente $M_{j,Rd}$ é equivalente ao máximo momento encontrado na curva c) da Figura 2.14; a rigidez rotacional S_j que pode ser definida como a rigidez secante e $S_{j,ini}$ é a rigidez inicial da ligação a qual é representada pela inclinação da porção elástica da curva c) da Figura 2.14, ou seja, a reta tangente a porção inicial da curva e a capacidade de rotação ϕ_{Cd} é equivalente à máxima rotação a que a ligação pode ser submetida.

Quando o momento fletor resistente não pode ser atingido através da curva momento \times rotação, como o que pode acontecer na análise numérica, um valor alternativo deste valor pode ser encontrado, de acordo com Gilbert e Rasmussen (2011), onde impõe-se um estado de deformação de, aproximadamente, três vezes a deformação que ocorre logo após o escoamento do material. Yura et al. (1980) apud Gilbert e Rasmussen (2011) propuseram que a deformação última seria de três a quatro vezes a deformação de escoamento.

A Figura 2.15 ilustra um exemplo de obtenção do momento fletor resistente em uma curva momento \times rotação de uma ligação.

Figura 2.15 - Exemplo de obtenção do momento fletor resistente de uma ligação



Fonte: Gilbert e Rasmussen (2011), adaptado

A norma australiana de porta-paletes AS 4084 (2012) também aborda, similarmente, este procedimento para quando a curva não atinge um momento fletor máximo.

Conforme Díaz et al. (2011), os modelos de obtenção da curva momento x rotação para ligações semirrígidas são: analítico, empírico, experimental, informacional, mecânico e numérico. O mecânico é melhor representado pelo método das componentes. Na Tabela 2.1 e Tabela 2.2 estão a relação dos tipos de análises, as vantagens e desvantagens de cada modelo, assim como a avaliação de suas principais características.

Tabela 2.1 - Vantagens e desvantagens dos modelos de caracterização das ligações

Modelo	Vantagens	Desvantagens
Analítico	Fácil aplicação e baixo custo computacional	Usa modelos simplificados e requer verificação com resultados experimentais para validação
Empírico	Fácil aplicação e baixo custo computacional	Requer calibração com outros modelos, sua aplicabilidade é limitada às tipologias de conexões utilizadas para calibrá-lo e não pode ser usado para determinar a contribuição de cada componente de uma ligação no seu comportamento global
Experimental	Melhor método para obter o comportamento rotacional das ligações	Realização dos ensaios com alto custo
Informacional	Pode-se obter informações dos dados experimentais	Grande número de dados são necessários para se obter bons resultados
Mecânico	Aplicável em qualquer tipo de ligação e baixo custo computacional	A precisão dos resultados dependem do número de componentes usados e de suas características mecânicas
Numérico	Pode-se introduzir efeitos locais os quais são difíceis de mensurar (por exemplo: contato) e pode ser usado para realização de estudos paramétricos	Alto custo computacional

Fonte: Díaz et al. (2011), adaptado

Os modelos destacados em amarelo na Tabela 2.1 serão os utilizados para análise nesta pesquisa. Nota-se que o modelo experimental é oneroso em relação a tempo e investimento monetário. O modelo numérico permite a parametrização das ligações, fornecendo assim uma vasta gama de resultados permitindo até a otimização das conexões. O modelo mecânico tem sua vantagem na possibilidade de aplicação em qualquer tipo de ligação, porém não é simples a obtenção das características mecânicas detalhadas de cada elemento.

Tabela 2.2 - Características dos modelos de caracterização das ligações

Características	Modelo					
	Análítico	Empírico	Experimental	Informacional	Mecânico	Numérico
Análise avançada disponível (contato, protensão, etc.)	Baixo	Baixo	Médio	Baixo	Médio	Alto
Nível de complexidade	Baixo	Baixo	Médio	Médio	Médio	Alto
Necessidade de dados	Alto	Alto	Baixo	Alto	Baixo	Médio
Custo	Baixo	Baixo	Alto	Médio	Baixo	Médio
Reutilizável para outras tipologias de conexões	Não	Não	Não	Não	Sim	Sim
Parametrização	Baixo	Baixo	Baixo	Alto	Médio	Alto
Tempo de solução	Baixo	Baixo	Alto	Baixo	Baixo	Médio
Habilidade do usuário	Baixo	Baixo	Médio	Médio	Médio	Alto
Capacidade de otimização	Baixo	Baixo	N/A	Alto	Alto	Alto
Simula o comportamento real	Baixo	Baixo	Alto	Médio	Médio	Médio
Fornecer informação extra	Não	Não	Sim	Não	Sim	Sim

Fonte: Díaz et al. (2011), adaptado

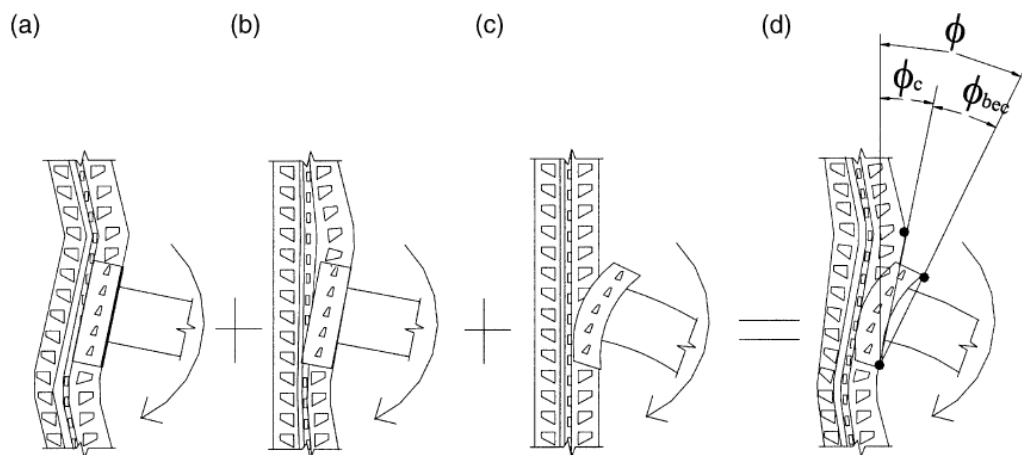
2.4.1. ANÁLISES EXPERIMENTAIS

Os primeiros trabalhos relacionados a sistemas de armazenagem tiveram cunho experimental. Krawinkler (1978) ensaiou vinte conexões utilizando o *cantilever test* para obter informações sobre o comportamento dos porta paletes submetidos às cargas sísmicas. Algumas de suas conclusões foram que: 1) a resposta da estrutura às perturbações sísmicas é, majoritariamente, controlada pelas conexões entre as colunas e longarinas, pelos contraventamentos e pela conexão da coluna com o piso; 2) o comportamento dessas conexões são representadas por molas rotacionais cujas características podem ser investigadas através de ensaios experimentais, como o *cantilever test* e 3) a capacidade de dissipação de energia e ductilidade dos porta paletes é maior na direção paralela ao corredor do que na direção perpendicular, o que explica a importância do conhecimento da rigidez das conexões.

Markazi, Beale e Godley (1997) realizaram ensaios experimentais e uma investigação teórica para estimar a rigidez das ligações ensaiadas em laboratório. No trabalho, algumas das conclusões obtidas foram: 1) aumentando-se o número de abas ou dentes nos conectores a rigidez e a resistência dos mesmos aumentam; 2) a geometria do conector influencia na rigidez e 3) aumentando-se a rigidez do perfil da coluna, aumenta-se a rigidez do conector.

No estudo realizado por Bernuzzi e Castiglioni (2001), onze ensaios foram realizados em dois tipos de elementos diferentes. Ensaios monotônicos, onde a carga é aplicada apenas em um sentido, mostraram que zonas nodais tiveram um comportamento dúctil satisfatório e deformações nas abas dos conectores, sendo que o colapso não foi atingido e grandes rotações foram observadas. A Figura 2.16 ilustra as deformações sofridas pela conexão durante o ensaio, as quais são compostas pela soma das seguintes deformações: a) cisalhamento na coluna, b) deformação da coluna devido ao momento fletor e c) a deformação da chapa do conector.

Figura 2.16 - Zonas nodais sujeitas ao momento fletor no ensaio monotônico



Fonte: Bernuzzi e Castiglioni (2001)

Com a evolução das análises, o ensaio experimental do *cantilever test* foi realizado, para determinar a flexibilidade de conexões entre coluna e longarina, e comparado com modelos de elementos finitos. Também se descobriu que as imperfeições aumentam a não-linearidade do comportamento da conexão (BAJORIA; TALIKOTI, 2006).

Prabha et al. (2010) concluiu através dos ensaios laboratoriais que os modos de falha das conexões são governados pela deformação das colunas e das abas dos conectores. Notou também que aumentando o número de abas, aumenta-se a rigidez e a resistência da conexão. Seus resultados experimentais apresentaram comportamento similar aos modelos numéricos, que foram processados no *software* ABAQUS.

2.4.2. ANÁLISES NUMÉRICAS

Os modelos das conexões entre longarinas e colunas de sistemas de armazenagem industrial podem variar drasticamente entre os fabricantes além de possuírem geometrias variadas e, por vezes, complexas (SHAH et al., 2016b). Desta forma, a simulação

computacional é dificultada tornando-se necessário fazer adaptações nas condições de contorno, vinculações, contato e graus de liberdade.

O comportamento não-linear de diferentes tipos de conectores e as chances de erros de obtenção de dados nos ensaios experimentais levou os pesquisadores a optarem, alternativamente, aos modelos numéricos. O método dos elementos finitos, que pode ser encontrado em uma infinidade de programas computacionais, apresenta-se como uma opção de alta confiabilidade para prever o comportamento das conexões, assim como os efeitos de vários outros parâmetros associados às estruturas de armazenagem (SHAH et al., 2016a).

Markazi, Beale e Godley (2001) fizeram análises numéricas elásticas das conexões e utilizaram os resultados dos ensaios experimentais para validação do modelo numérico. Os modelos numéricos eram tridimensionais, isoparamétricos e o elemento finito utilizado foi o sólido com malha hexaédrica. As simulações se deram com conexões rígidas e semirrígidas e observaram que os resultados com relação a rigidez momento-curvatura possuíam boa correlação com os experimentos e que a posição em que são colocados os medidores das deformações, influenciam diretamente na curva do momento \times rotação.

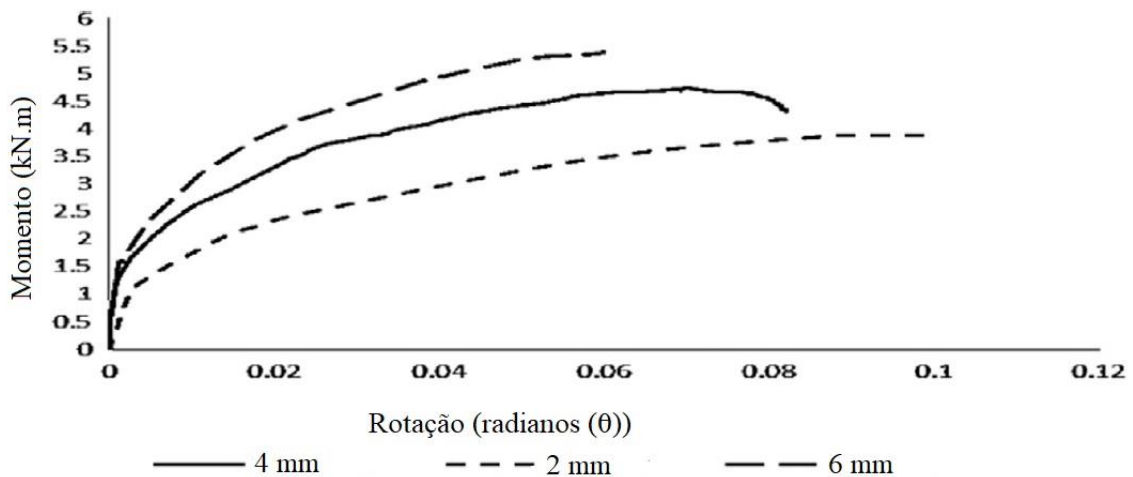
Na parte relativa às análises numéricas do estudo de Prabha et al. (2010), o modelo foi desenvolvido para que pudesse simular da melhor forma os ensaios experimentais. Foram utilizados elementos de casca (S4R no ABAQUS) com integração reduzida. Para simular a solda da conexão entre a longarina e o conector foi utilizado um elemento que restringe os nós dos dois elementos de forma que os seis graus de liberdade sejam os mesmos. Já a conexão entre a coluna e o conector foi simulada utilizando-se o algoritmo de contato *surface-to-surface*, sem fricção e devido a sua complexidade, as abas do conector não foram modeladas, porém algumas condições de contorno embasadas no arranjo experimental foram aplicadas ao modelo. Para a representação da folga inicial da conexão, uma mola de comportamento não-linear foi modelada e a falha começou a ser observada a partir do aparecimento de cisalhamento das abas atuando na alma da coluna.

Shah et al. (2016a) desenvolveram modelos numéricos das conexões entre longarina e coluna, utilizando o método dos elementos finitos. Estes foram validados por ensaios experimentais que apresentaram bons resultados comparativos. Assim, com o modelo numérico foi possível realizar a parametrização para analisar quais variáveis afetam o comportamento das ligações. Concluiu-se que o parâmetro de falha preponderante nas análises experimentais foram as abas dos conectores já que a falha da conexão ocorreu quando as abas se desencaixaram dos furos da coluna, o que causou cisalhamento na parede da coluna e, conseqüentemente, a diminuição da carga devido à falha. O segundo parâmetro mais corrente foi a falha da coluna a

qual pode ser diminuída aumentando-se o número de abas no conector ou aumentando-se a seção transversal da longarina. Logo, concluiu-se que a eficácia da conexão pode ser melhorada aumentando-se a espessura da coluna, a seção transversal da longarina e o número de abas do conector.

O estudo paramétrico mostrou também que, elevando-se a espessura da chapa do conector, a conexão torna-se mais rígida, o que pode ser observado na Figura 2.17, onde três espessuras diferentes foram analisadas. A primeira, de 6 milímetros, mostrou um comportamento mais rígido já que sua curva apresenta a maior inclinação inicial. A segunda espessura utilizada para análise foi de 4 milímetros e apresentou um comportamento mediano em relação a rigidez e, por fim, uma espessura de 2 milímetros foi empregada, o que resultou na curva menos inclinada, caracterizando a menor rigidez e comprovando a relação entre aumento de espessura e rigidez na conexão (SHAH et al., 2016a).

Figura 2.17 - Gráfico do momento \times rotação variando-se a espessura do conector



Fonte: Shah et al. (2016a), adaptado

Outra observação que vale ser ressaltada, foi em relação a posição da solda entre a longarina e o conector. A solda na mesa superior da longarina causa uma distribuição não-uniforme das tensões geradas pelo momento fletor nas abas do conector, levando a conexão para uma falha antecipada. Já, quanto a solda na mesa inferior da longarina, constatou-se que o desempenho da conexão melhora em relação a resistência e rigidez. A conclusão geral deste trabalho foi que a rigidez da conexão é mais sensível aos aumentos dos parâmetros do que a resistência, ou seja, as características elásticas da conexão semirrígida entre longarina e coluna dependem das geometrias dos elementos envolvidos.

2.4.3. ANÁLISE MECÂNICA (MÉTODO DAS COMPONENTES)

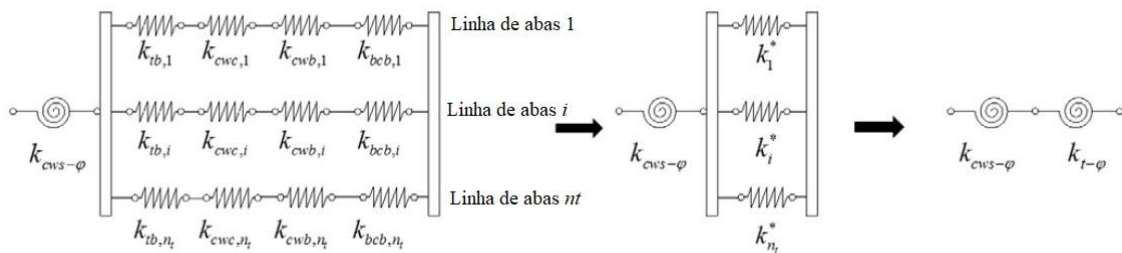
O método das componentes prevê com precisão o comportamento de vários tipos de ligações semirrígidas em aço laminado. Através dele é possível analisar a influência de cada componente constituinte da ligação; como parafusos, chapas e soldas (EN 1993-1-8, 2011). Como já foi visto, a norma europeia expõe o método das componentes como uma maneira mecânica de se calcular e analisar as ligações, porém, a ser aplicado em perfis de aço laminados.

Os perfis formados a frio, principalmente os aplicados em estruturas de porta paletes, necessitam de adaptação no método já que as conexões entre coluna e longarina possuem conectores de geometrias complexas e divergentes em função do projeto de cada fabricante. Aplicando-se uma análise mecânica, torna-se possível prever e analisar as ligações fornecendo uma alternativa à onerosidade de ensaios laboratoriais para obtenção do mesmo resultado e, ainda, pode-se realizar a otimização dos seus elementos já que, através do método é possível analisar o desempenho de cada componente da ligação e assim modifica-lo se necessário. Os resultados que podem ser extraídos desse método são os mesmos obtidos por ensaios laboratoriais e análises numéricas, ou seja, momento fletor resistente e rigidez rotacional inicial (SHAH et al., 2016a).

O método das componentes para análise de ligações sem parafusos entre longarinas e colunas empregados em sistemas de armazenagem industrial se fragmenta, usualmente, em três fases: a primeira consiste na identificação dos componentes que têm influência sobre a conexão, ou seja, a complexa geometria é subdividida em partes. A segunda fase consiste na análise da rigidez, resistência e capacidade de deformação de cada um dos componentes que foram separados na primeira fase. Cabe ressaltar que cada elemento é analisado com um comportamento bi linear na relação entre força e deslocamento e com propriedade constitutiva elasto-plástica. Os componentes que não afetam significativamente as propriedades da conexão, são referenciados como rígido-plástico. Na última etapa, é feita a combinação dos resultados da segunda etapa representados por molas com rigidez axial as quais são posicionadas em série ou em paralelo, de acordo com a posição de cada componente em relação a geometria geral do conector. O procedimento para obtenção da rigidez rotacional está melhor ilustrado na Figura 2.18 onde nota-se a presença de várias molas que relacionam a rigidez axial e rotacional dos componentes da ligação e que estão associadas em linha ou em paralelo. Ao final, esta associação resultará na rigidez rotacional inicial da ligação. De maneira similar, é feito o estudo da resistência à flexão (ŚLĘCZKA; KOZŁOWSKI, 2008). Estes autores ainda compararam as análises mecânicas com ensaios experimentais realizados previamente. Os componentes da

ligação identificados neste estudo foram: alma da coluna sofrendo cisalhamento, esmagamento, compressão e tração; as abas do conector sofrendo cisalhamento; o conector em cisalhamento, flexão, tração e compressão e as mesas da longarina solicitadas à compressão e tração. De acordo com Gusella (2019), o elemento de solda, que é empregado entre a longarina e o conector, geralmente é associado a um comportamento rígido-plástico no qual a falha deste componente acontece quando a tensão de escoamento é alcançada na fibra mais extrema solicitada.

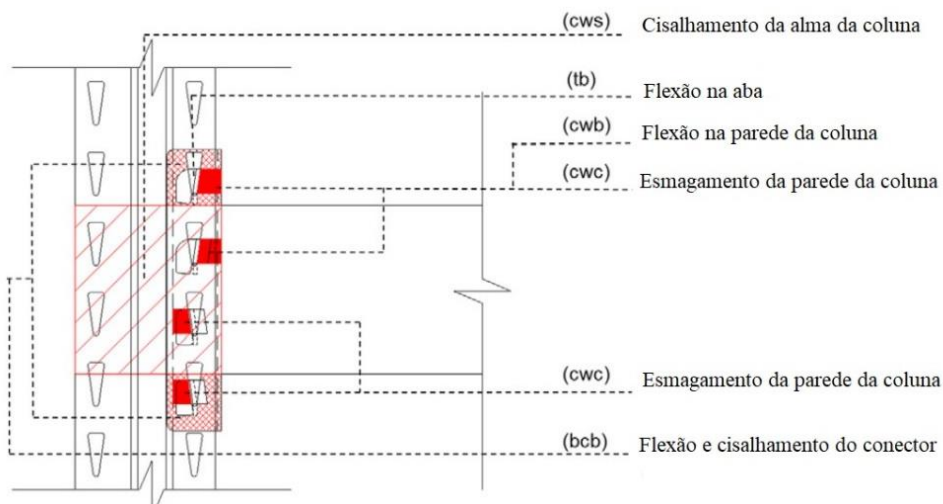
Figura 2.18 - Análise da rigidez rotacional inicial da ligação



Fonte: (ZHAO et al., 2017), adaptado

No estudo de Zhao et al. (2017) realizou-se uma investigação teórica da rigidez rotacional inicial de dezessete tipos de ligações longarina-coluna. Variou-se a seção transversal da coluna, da longarina e o número de abas do conector. Os componentes básicos deformáveis considerados para essas conexões, os quais estão ilustrados na Figura 2.19 foram: flexão na aba (tb), cisalhamento da alma da coluna (cws), flexão da parede da coluna (cwb), esmagamento da parede da coluna (cwc), flexão e cisalhamento do conector (bcb).

Figura 2.19 - Componentes deformáveis básicos da ligação



Fonte: Zhao et al. (2017), adaptado

O autor ainda analisou o valor da influência de cada componente na rigidez rotacional inicial da conexão e fazendo a separação destes valores, concluiu que a flexão na aba do conector possui a maior influência para este tipo de ligação. Ressalta também que este tipo de separação dos componentes assim como sua influência global não é possível avaliar nos ensaios experimentais. Fez a comparação dos resultados obtidos pelo método das componentes com ensaios realizados previamente e obteve uma média de variação entre eles com valores bem próximos concluindo que o modelo mecânico proposto avalia devidamente a rigidez rotacional inicial de ligações não parafusadas (ZHAO et al., 2017).

Em Gusella et al. (2018) avaliou-se, pelo Método das Componentes, o momento fletor resistente da conexão proposta, assim como o mecanismo de falha de cada componente. Os resultados foram validados com ensaios laboratoriais executados precedentemente, o que destacou a precisão do modelo mecânico desenvolvido. Concluiu-se que este modelo se apresenta como boa alternativa aos custosos ensaios preconizados pelas normas regulamentadoras e fornece a possibilidade de economia na otimização dos elementos estruturais que compõem a conexão já que permite detectar os componentes com menor resistência. Em outro estudo, Gusella, Orlando e Thiele (2018) avaliaram a rigidez rotacional do mesmo tipo de conexão do artigo anteriormente citado. Pelo método das componentes, fez-se a validação dos resultados com ensaios laboratoriais e as conclusões apresentaram-se similares.

No trabalho realizado por Dai, Zhao e Rasmussen (2018), apresentou-se resultados de vinte e um ensaios experimentais com cargas monotônicas, isto é, carregamento em apenas uma direção e sentido. Discutiu-se os modos de falha, as deformações e os parâmetros críticos para a resistência da conexão. Comparou-se também o comportamento de ligações parafusadas e não parafusadas e por fim, constatou-se que estudos preliminares via método das componentes para prever a rigidez rotacional inicial e a resistência das ligações é favorável para auxiliar no dimensionamento de estruturas de porta paletes em geral.

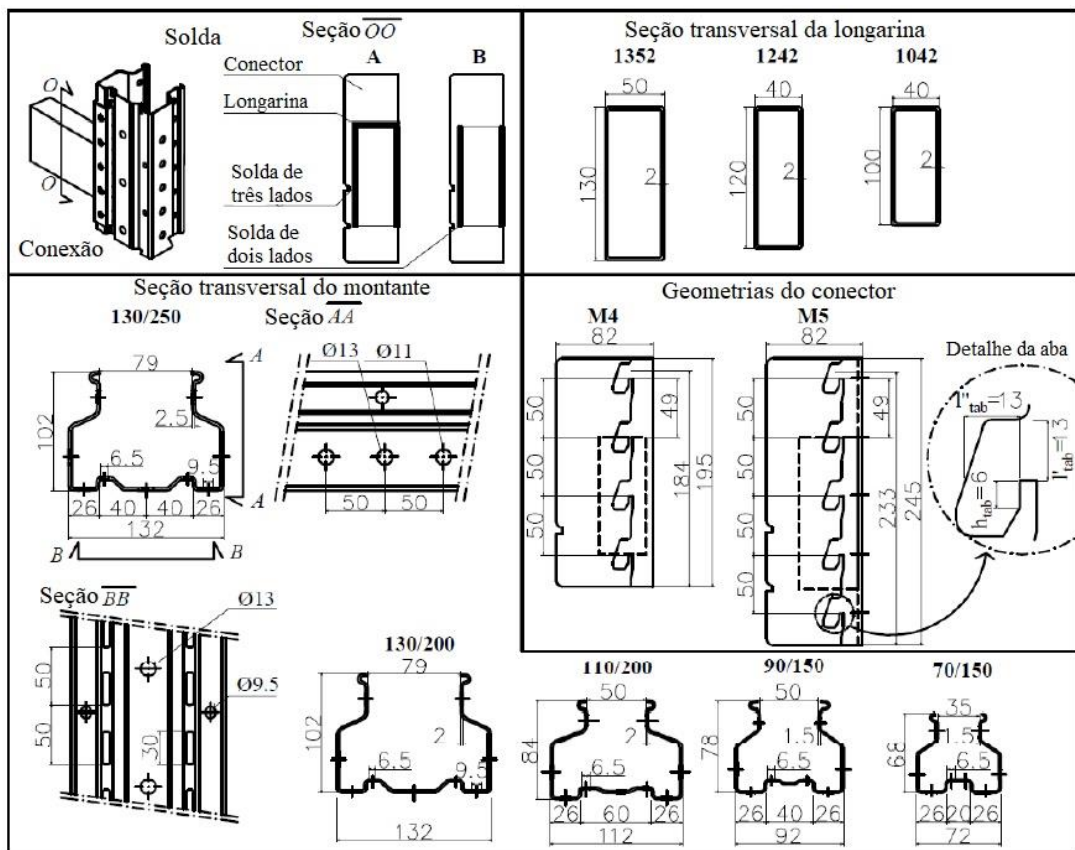
Gusella (2019) em sua tese de doutorado analisou o comportamento mecânico das conexões e sua influência no comportamento das estruturas submetidas a solicitações sísmicas. Neste trabalho empregou-se o método das componentes para análise das propriedades das conexões. A seguir, será descrito o método para obtenção da rigidez rotacional inicial e momento fletor resistente para conexões entre longarina e coluna, utilizado por Gusella (2019) e Zhao et al. (2017).

2.4.3.1.MOMENTO FLETOR RESISTENTE DA CONEXÃO

O momento fletor resistente da conexão pelo método das componentes é obtido da seguinte forma: primeiro a determinação dos componentes resistentes do conjunto, depois da força resistente relativa a cada um desses componentes e, por último, a avaliação da resistência ao momento fletor do conjunto através da contribuição de cada força resistente e o braço de alavanca relativo ao centro de rotação da ligação.

Primeiramente será descrito o método utilizado para obtenção do momento fletor resistente da conexão que tem suas geometrias ilustradas na Figura 2.20.

Figura 2.20 - Geometrias dos membros da conexão



Fonte: Gusella (2019), adaptado

2.4.3.1.1. SOLDA (F_{wel})

O primeiro componente considerado foi a solda, a qual conecta a longarina e o conector. A solda normalmente é empregada nas laterais da alma da longarina. A resistência última relativa a solda é dada pela seguinte fórmula.

$$F_{wel} = \frac{M_{max,b}}{h_b} = \frac{J_w f_{y,w}}{h_b y_w} \quad (2.6)$$

Onde:

$M_{max,b}$ (N.mm): máximo momento fletor transferido pela longarina;

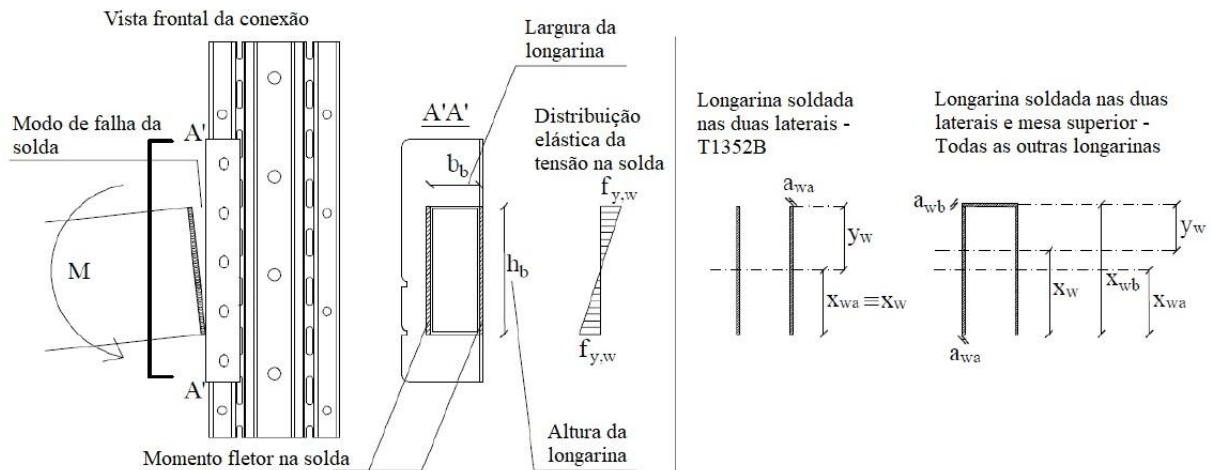
y_w (mm): distância entre o centro da área do filete de solda e a extremidade deste;

$f_{y,w}$ (MPa): tensão de escoamento da solda;

J_w (mm⁴): momento de inércia dos filetes de solda.

A Figura 2.21 a seguir ilustra a solda na conexão entre a longarina e o conector utilizados por Gusella (2019) e alguns parâmetros necessários para o cálculo da força última resistente.

Figura 2.21 - Modelo de falha da solda em tensão



Fonte: Gusella (2019), adaptado

2.4.3.1.2. MESA DA LONGARINA EM TRAÇÃO E EM COMPRESSÃO ($F_{bf,t}$ e $F_{bf,c}$)

O segundo componente a ser considerado é a mesa da longarina em tração e compressão no contato com o conector durante a flexão. Para avaliar sua resistência a esses esforços foi assumida a seguinte relação:

$$F_{bf,t} = F_{bf,c} = b_{eff,b} t_b f_{y,b} \quad (2.7)$$

Onde:

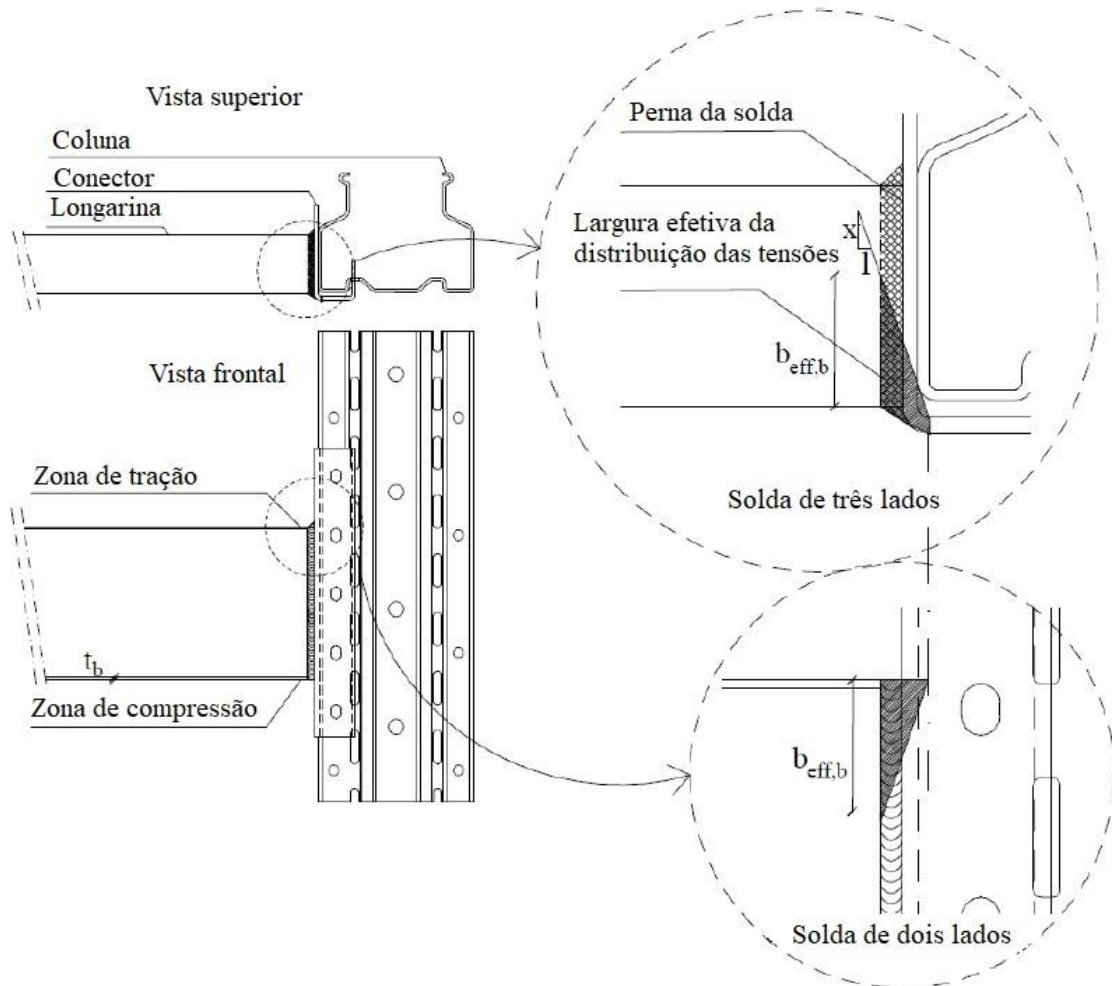
$b_{eff,b}$: largura da longarina considerando um ângulo de propagação 1:x, o qual tem como valor proposto pelos autores 1:2,5. Por simplicidade, este valor pode ser considerado como a largura da longarina;

$f_{y,b}$: resistência ao escoamento do aço da longarina;

t_b : espessura da longarina.

Esses parâmetros estão ilustrados na Figura 2.22:

Figura 2.22 - Distribuição de tensão na mesa da longarina



Fonte: Gusella (2019), adaptado

2.4.3.1.3. ALMA DO CONECTOR EM TRAÇÃO E EM COMPRESSÃO ($F_{cow,t}$ e $F_{cow,c}$)

A conexão entre a longarina e o conector, submetida ao esforço do momento fletor provoca tração e compressão na alma do conector. A resistência nas regiões de tração e compressão pode ser considerada como:

$$F_{cow,t} = F_{cow,c} = \omega_{co} b_{eff,co} t_{co} f_{y,co} \quad (2.8)$$

Onde:

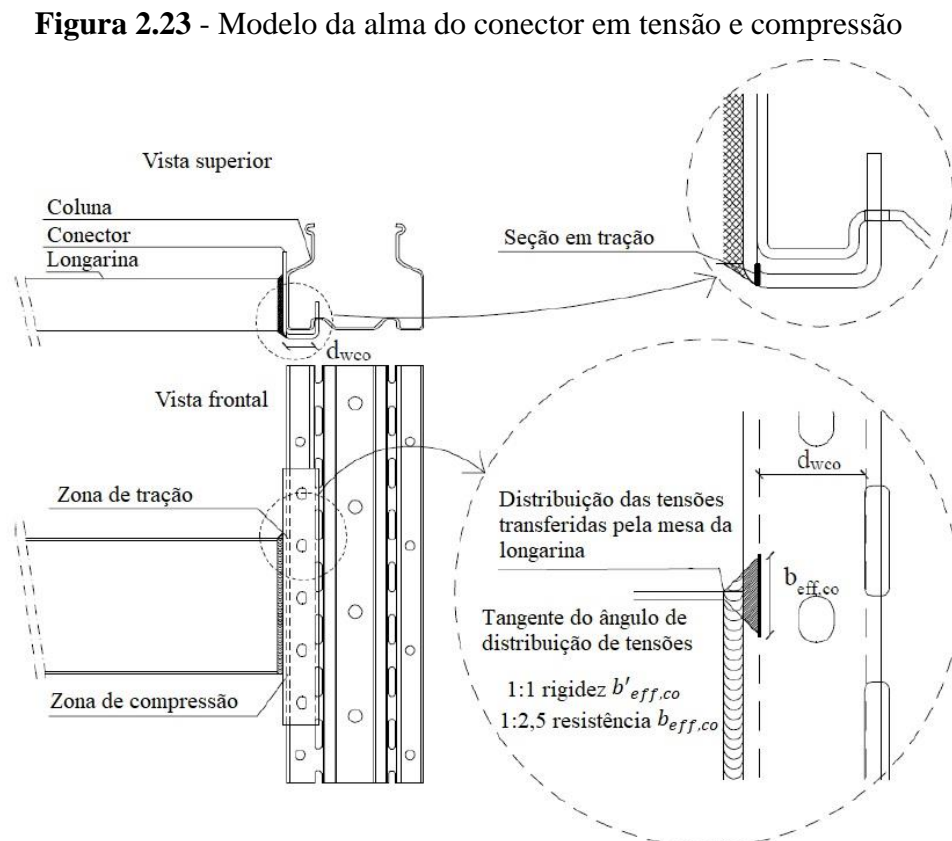
ω_{co} : fator de redução da alma do conector levando-se em consideração a interação com o cisalhamento (EN 1993-1-8, 2011);

$b_{eff,co}$: largura da longarina considerando um ângulo de propagação 1:2,5;

t_{co} : Espessura do conector;

$f_{y,co}$: resistência ao escoamento do aço do conector.

Esses parâmetros estão ilustrados na Figura 2.23:



Fonte: Gusella (2019), adaptado

2.4.3.1.4. CONECTOR EM FLEXÃO ($M_{co,b}$)

A resistência do conector ao momento fletor pode ser considerada como a resistência plástica de uma viga em balanço para a porção que fica externa à superfície da mesa da longarina, como ilustrado na Figura 2.24. Este momento resistente é:

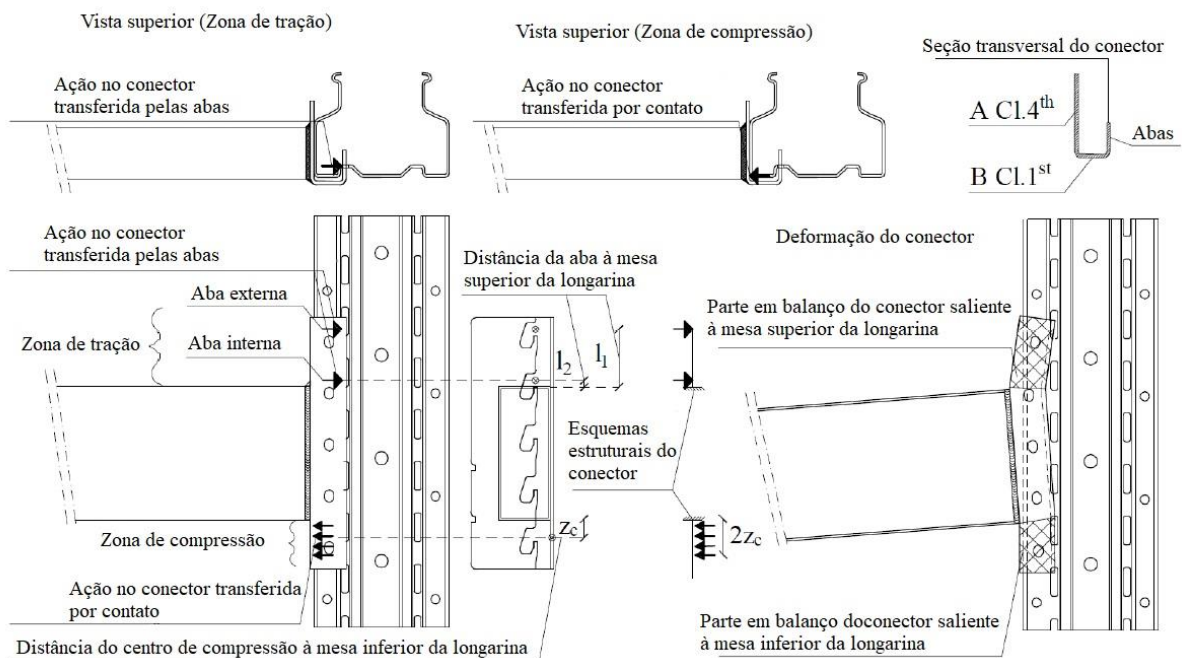
$$M_{co,b} = W_{pl,co} f_{y,co} \quad (2.9)$$

Onde:

$W_{pl,co}$: módulo de resistência plástica da seção do conector;

$f_{y,co}$: resistência ao escoamento do aço do conector.

Figura 2.24 - Modelo para o conector em flexão



Fonte: Gusella (2019), adaptado

2.4.3.1.5. ABAS DO CONECTOR EM FLEXÃO E CISALHAMENTO ($F_{t,s}$)

As abas do conector estão sujeitas a tensões devido a flexão e cisalhamento devido ao contato com os furos da coluna. Esta condição influencia a resistência ao momento fletor do conector em relação a sua resistência última ao cisalhamento e flexão de cada dente, que pode ser dada como:

$$F_{t,s} = \frac{f_{u,co} A_{v,tab}}{\sqrt{3}} \quad (2.10)$$

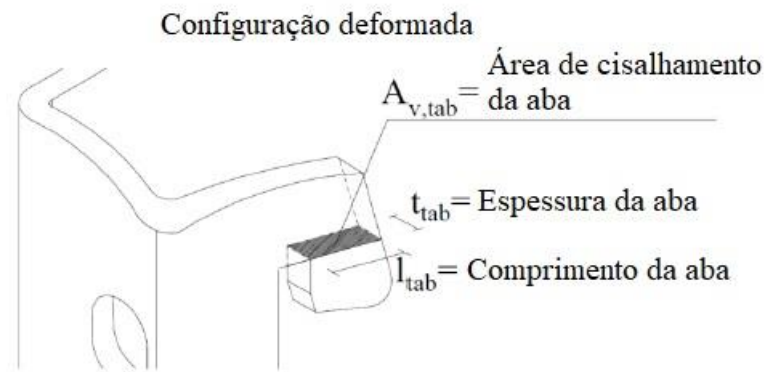
Onde:

$A_{v,tab}$: área de cisalhamento efetiva da aba = $t_{tab} l_{tab}$;

$f_{u,co}$: resistência à ruptura do aço do conector na tração.

Esses parâmetros estão ilustrados na Figura 2.25:

Figura 2.25 - Modelo utilizado para obtenção do componente das abas



Fonte: Gusella et al. (2018), adaptado

2.4.3.1.6. RASGAMENTO DA ALMA DA COLUNA ($F_{cw,p}$)

O contato dos dentes do conector com os furos da coluna pode provocar o puncionamento ou rasgamento destes furos situados na alma da coluna. As componentes resistentes a este fenômeno podem ser dadas como:

$$F_{cw,p} = 0,6 d_m t_{cw} f_{u,cw} \quad (2.11)$$

Onde:

t_{cw} : espessura da coluna;

$f_{u,cw}$: resistência à ruptura do aço da coluna na tração;

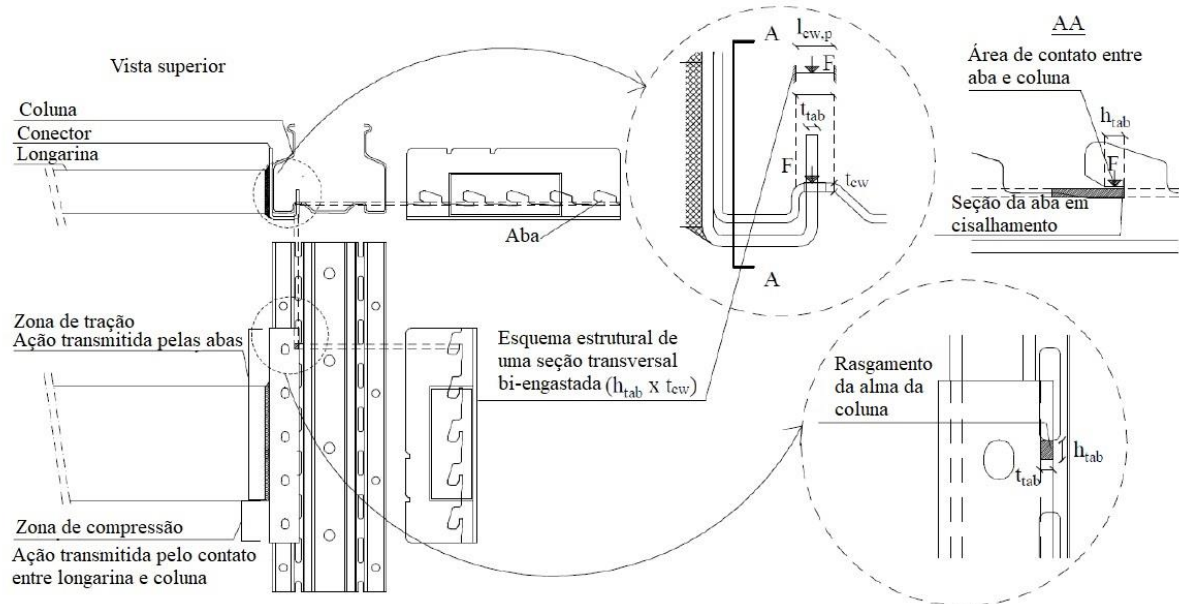
d_m : perímetro da aba do conector que está em contato com a coluna: $d_m = t_{tab} + 2h_{tab}$;

t_{tab} : espessura da aba do conector;

h_{tab} : altura da aba.

Esses parâmetros estão ilustrados na Figura 2.26:

Figura 2.26 - Modelo de rasgamento de coluna



Fonte: Gusella (2019), adaptado

2.4.3.1.7. AMASSAMENTO DA ALMA DA COLUNA ($F_{cw,b}$)

A ação do contato entre as abas e a alma da coluna pode causar o amassamento da mesma. A resistência deste componente, que ocorre na zona de tração da ligação, é avaliada de acordo com EN 1993-1-8 (2011), fazendo-se uma correlação com conexões parafusadas.

$$F_{cw,b} = 2,5\alpha f_{u,cw} h_{tab} t_{cw} \quad (2.12)$$

Onde:

$\alpha = \frac{f_{u,co}}{f_{u,cw}}$: fator de redução

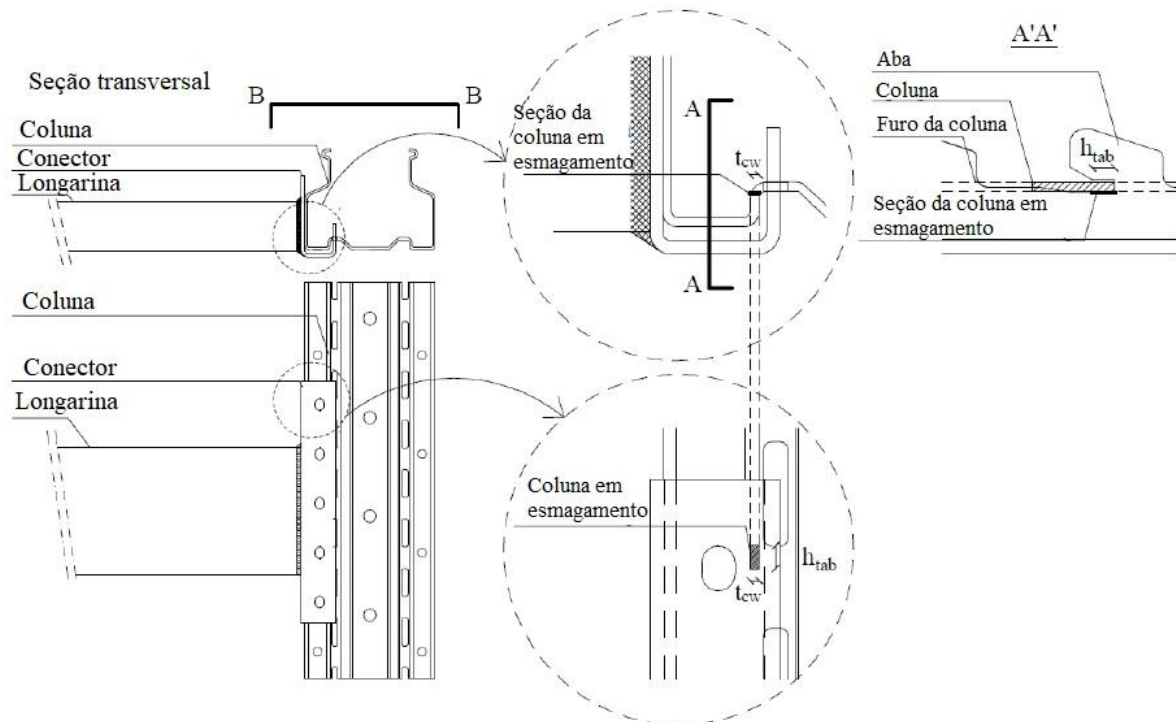
$f_{u,cw}$: resistência à ruptura do aço da coluna na tração;

t_{cw} : espessura da coluna;

h_{tab} : altura da aba.

Esses parâmetros estão ilustrados na Figura 2.27:

Figura 2.27 - Modelo para determinar a resistência ao amassamento



Fonte: Gusella (2019)

2.4.3.1.8. ALMA DA COLUNA EM TRAÇÃO E EM COMPRESSÃO ($F_{cw,c}$ e $F_{cw,t}$)

O conector submetido ao esforço de flexão provoca tração e compressão na alma da coluna. A resistência da porção comprimida pode ser obtida através do EN 1993-1-8 (2011), no qual:

$$F_{cw,c} = \min (F_{cw,cb}; F_{cw,cr}) \quad (2.13)$$

Onde:

$$F_{cw,t} = F_{cw,cr} = \omega b_{eff,c} t_{cw} f_y \quad (2.14)$$

$$F_{cw,cb} = F_{cw,cr} \left[\frac{1}{\lambda} \left(1 - \frac{0,22}{\lambda} \right) \right] \quad (2.15)$$

Onde:

$$\lambda = \left(\frac{b_{eff,c} t_{cw} f_{y,cw}}{F_{cr}} \right)^{0,5} \quad (2.16)$$

$$F_{cr} = \frac{\pi E t_{cw}^3}{3(1 - \nu^2) d_{wc,cb}} \quad (2.17)$$

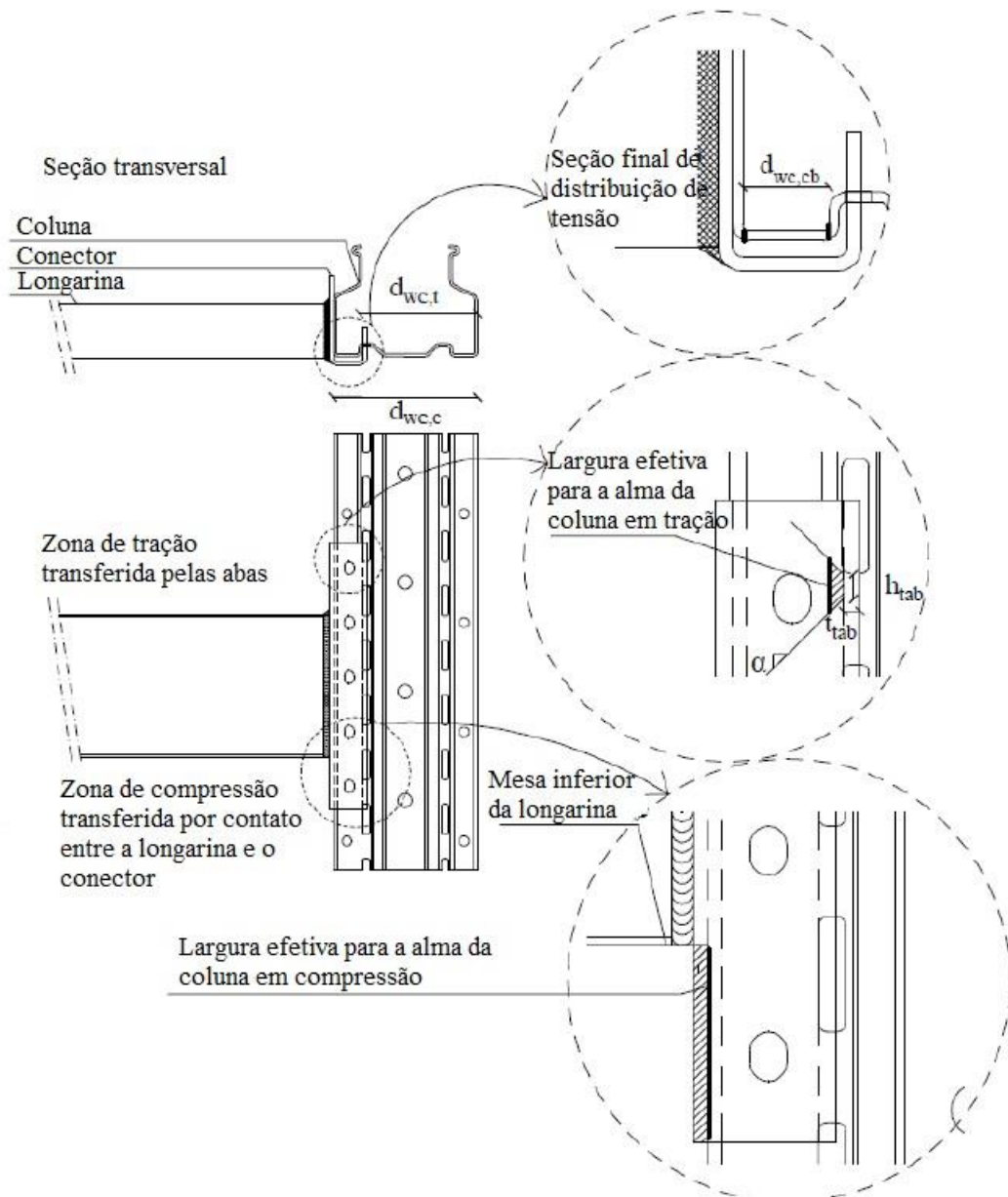
Onde:

$d_{wc,cb}$: é a profundidade livre da alma da coluna em flambagem;

$b_{eff,c}$: assumido com igual à largura do conector.

Esses parâmetros estão ilustrados na Figura 2.28:

Figura 2.28 - Modelo para determinar a resistência da alma da coluna a tração e compressão



Fonte: Gusella (2019), adaptado

A resistência da parte tracionada pode ser obtida através da equação 2.14

2.4.3.1.9. ALMA DA COLUNA EM CISALHAMENTO ($F_{cw,s}$)

Para conexões entre longarinas e colunas em apenas um lado, a contribuição da resistência da coluna ao cisalhamento deve ser considerada, sendo ela:

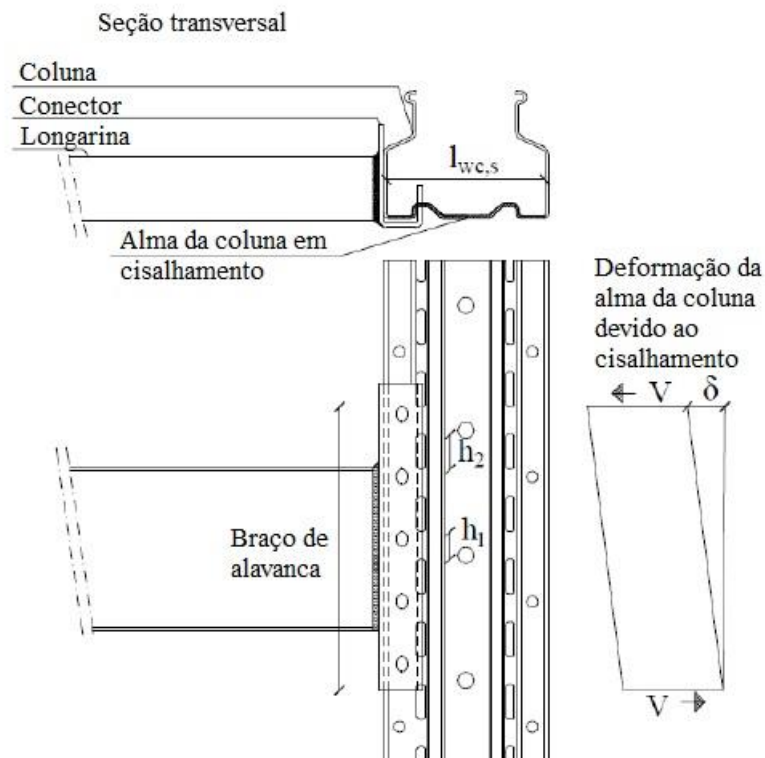
$$F_{cw,s} = \frac{f_{y,cw} A_{vc,net}}{\sqrt{3}} \quad (2.18)$$

Onde:

$A_{vc,net}$: área líquida da coluna é equivalente a área bruta subtraindo-se a largura das estampas.

Este parâmetro está ilustrado na Figura 2.29:

Figura 2.29 - Modelo da coluna em cisalhamento



Fonte: Gusella (2019), adaptado

2.4.3.1.10. ANÁLISE DO MOMENTO RESISTENTE DA CONEXÃO

O modelo mecânico que representa a conexão (Figura 2.30) apresenta todos os valores acima calculados. Os componentes mais fracos representam a resistência de cada linha (Figura 2.30a). Desta forma, o modelo pode ser resumido a seguir (Figura 2.30b).

$$F_{weakest} = \min (F_{cw,p}; F_{cw,b}; F_{cw,t}; F_{t,s}) \quad (2.19)$$

$$F_{weakest,beam} = \min (F_{cow,i}; F_{bf,i}) \quad (2.20)$$

No trabalho de Gusella (2019), o centro de rotação foi assumido como sendo na mesa inferior da longarina e o braço de alavanca da mola que representa o cisalhamento da alma da coluna é a distância do centro de compressão e o ponto de aplicação da força de reação na zona de tração.

Por condição de equilíbrio a reação na zona de compressão ($Z \leq F_{cw,c}$) é igual as forças $F_{weakest}$ agindo em cada linha de tração. O momento fletor da porção do conector que ultrapassa a altura da longarina ($M_{co,b}$) não pode ser excedido e a distância do centro de compressão até o centro de rotação é:

$$z_c = \frac{M_{co,b}}{Z} \quad (2.21)$$

Onde:

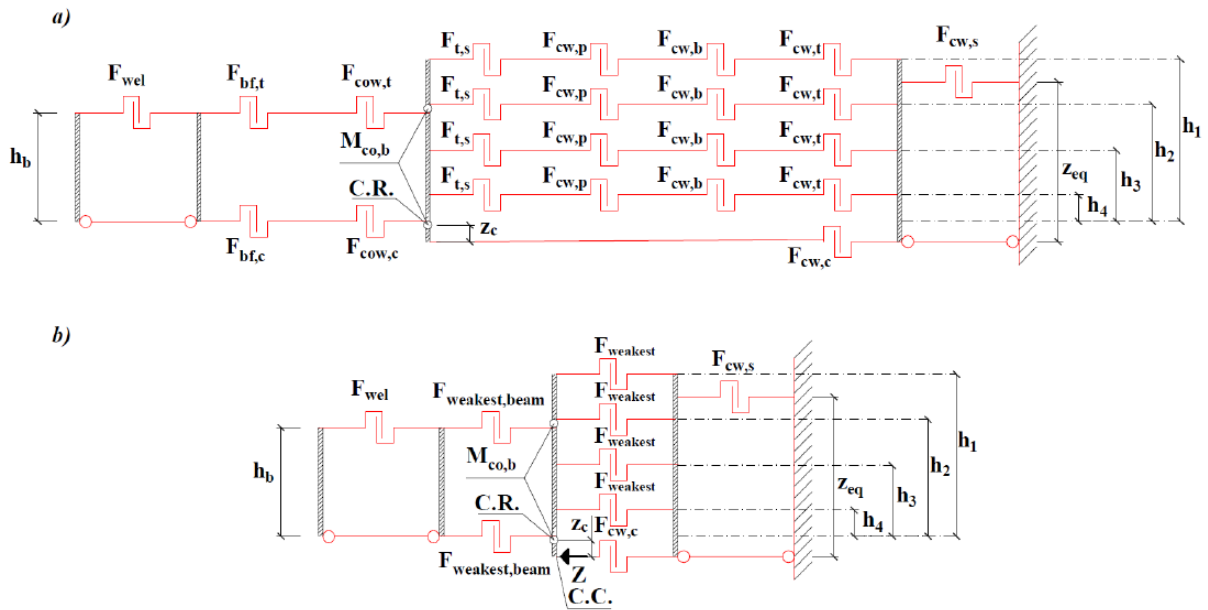
Z: força de reação na zona de compressão;

$M_{co,b}$: resistência a flexão do conector.

A resistência plástica a flexão da conexão fica então:

$$\begin{aligned}
M_{u,num} &= \min (F_{wel}h_b = M_{u,weld}; F_{weaset,beam}h_b \\
&= M_{u,bea}; F_{weakest} \sum_i^r h_i + M_{co,b} \\
&= M_{u,connector}; F_{cw,s}z_{eq} = M_{u,panel})
\end{aligned} \tag{2.22}$$

Figura 2.30 - Modelo mecânico da conexão



Fonte: Gusella (2019), adaptado

2.4.3.2. ANÁLISE DA RIGIDEZ ROTACIONAL DA CONEXÃO

A seguir será descrito a obtenção da rigidez rotacional da conexão através do método das componentes, utilizado por Gusella (2019) e Zhao et al. (2017).

2.4.3.2.1. ALMA DO CONECTOR EM TRAÇÃO E EM COMPRESSÃO ($k_{cow,t}$ e $k_{cow,c}$)

A rigidez axial que descreve a componente da alma do conector em tração ($k_{cow,t}$) e compressão ($k_{cow,c}$) é obtida pela expressão a seguir e assumindo-se um ângulo de propagação de 1:1 ou 45 graus.

$$k_{cow,t} = k_{cow,c} = \frac{Eb'_{eff,co}t_{co}}{d_{wco}} \tag{2.23}$$

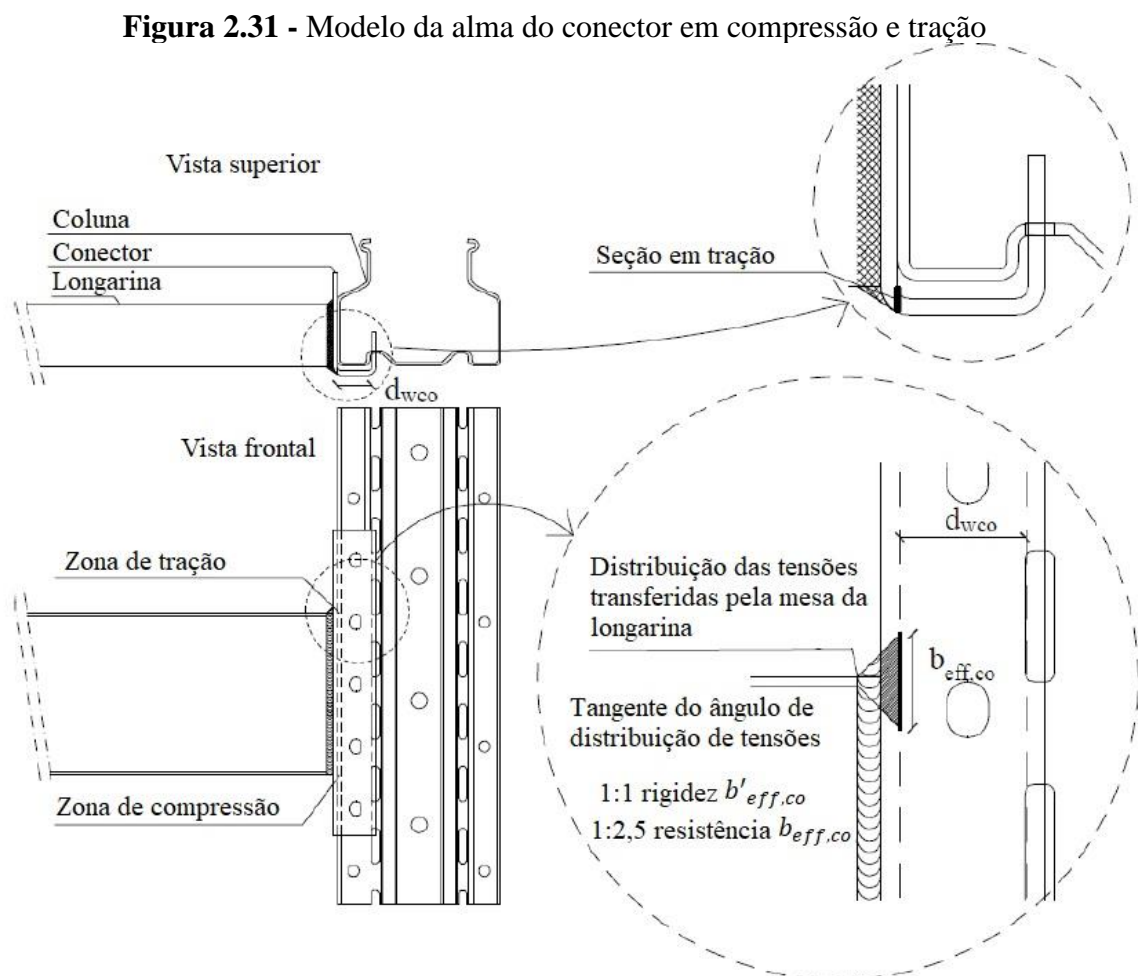
Onde:

d_{wco} : profundidade livre da alma do conector;

t_{co} : espessura do conector;

$b'_{eff,co}$: comprimento efetivo da alma do conector para cálculo da rigidez (assumindo um ângulo de propagação de 1:1).

Esses parâmetros estão ilustrados na Figura 2.31:

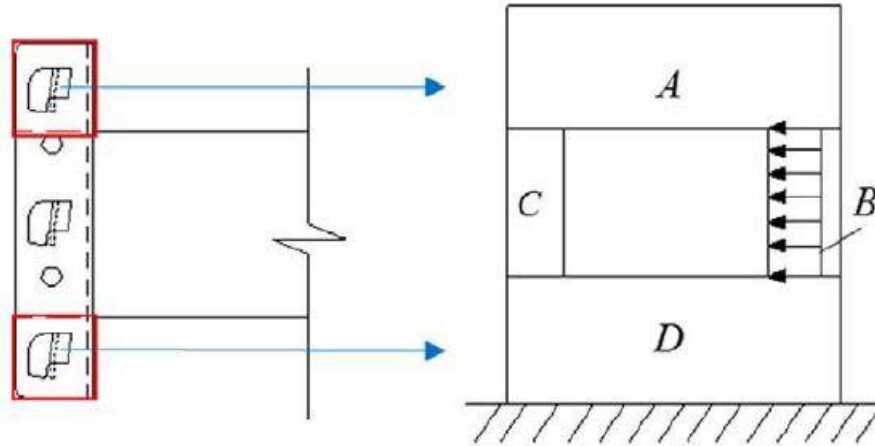


Fonte: Gusella (2019), adaptado

2.4.3.2.2. CONECTOR EM FLEXÃO E CISALHAMENTO (k_{bcb})

Para Zhao et al. (2017), a porção do conector que fica além da mesa superior ou inferior da longarina pode ser simulada através de uma parede de cisalhamento (*shear-wall*) com furo em balanço. Estes furos existem devido a confecção das abas do conector. A Figura 2.32 ilustra o que foi dito.

Figura 2.32 - Modelo para o conector em flexão e cisalhamento



Fonte: Dai; Zhao; Rasmussen (2018)

Nota-se que a parede de cisalhamento em balanço é subdividida em quatro partes em torno do furo e nomeadas A, B, C e D.

A rigidez axial para o conector em flexão e cisalhamento (k_{bcb}) pode ser obtida através da seguinte expressão.

$$k_{bcb} = \frac{1}{\left\{ \frac{h_B^3}{384EI_B} + \frac{k}{2(k+1)} \left[\frac{h_B^2}{24EI_B} \left(\frac{3h_A}{2} + \frac{5h_B}{2} \right) + \frac{1,3h_B}{EA_B} \right] + \left[\frac{h_D^2}{12EI_d} \left(\frac{3h_A}{2} + 3h_b + 2h_D \right) + \frac{1,3h_D}{EA_D} \right] + \frac{h_B h_D}{8EI_D} (h_A + 2h_B + h_D) \right\}} \quad (2.24)$$

Onde:

E : módulo de elasticidade;

$$k = \left(\frac{w_B}{w_C} \right)^3 \frac{h_C^2 + 2,6w_C^2}{h_B^2 + 2,6w_B^2} \quad (2.25)$$

$$I_j = \frac{w_j^3 t_{bec}}{12} \text{ e } A_j = w_j t_{bec} \quad (2.26)$$

j : refere-se às chapas A, B, C e D;

w_j : largura referente às chapas A, B, C e D;

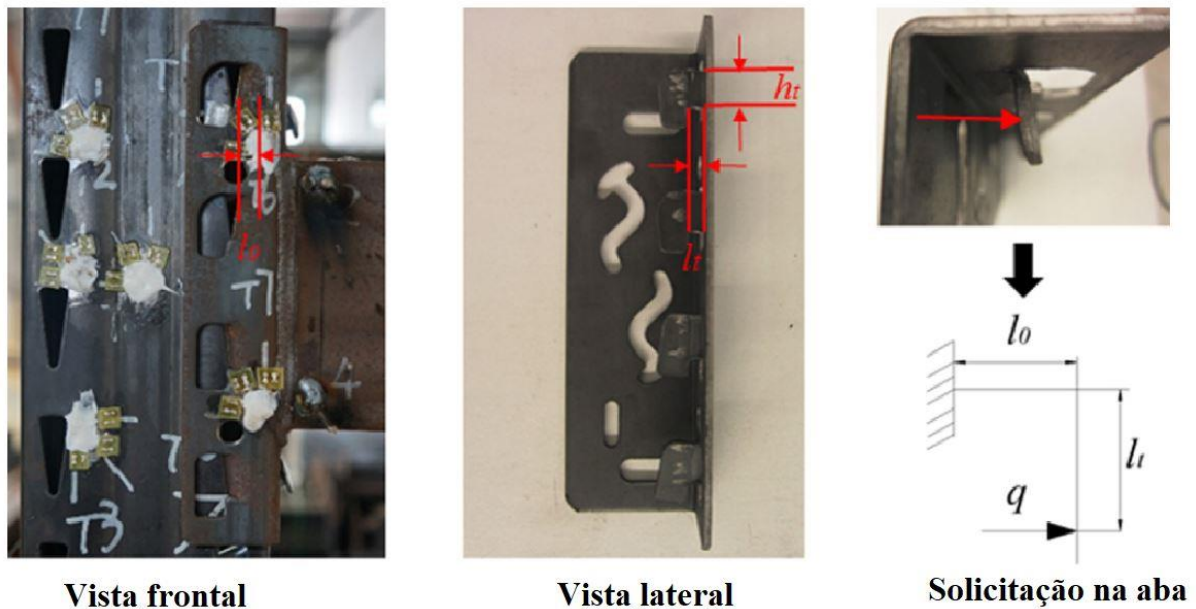
h_j : altura referente às chapas A, B, C e D;

t_{bec} : espessura da chapa.

2.4.3.2.3. ABAS DO CONECTOR EM FLEXÃO (k_{tb})

As abas do conector são conformadas através da própria chapa do conector e elas são responsáveis pela transferência das cargas aplicadas na longarina para a coluna. No início do carregamento, quando as cargas ainda não são altas, as abas transferem as cargas através do contato de sua espessura com a espessura do furo da coluna. Para um carregamento maior, as abas encostam na parede do furo da coluna sofrendo assim, esforços de flexão (ZHAO et al., 2017). O esquema utilizado para obter a rigidez inicial referente às abas do conector em flexão está ilustrado na Figura 2.33.

Figura 2.33 – Esquema para obtenção da rigidez das abas do conector



Fonte: Dai, Zhao e Rasmussen (2018), adaptado

A rigidez rotacional inicial é representada por:

$$k_{tb} = \frac{F}{\delta_{tb}} \quad (2.27)$$

Onde:

$$\delta_{tb} = \frac{qh_t}{EI} \left(\frac{l_t^3}{3} + l_t^2 l_0 \right) \quad (2.28)$$

$$I = \frac{t_t^3 h_t}{12} \quad (2.29)$$

Assim:

$$k_{tb} = \frac{q h_t}{\delta_{tb}} \quad (2.30)$$

$$k_{tb} = \frac{3EI}{l_t^2 (l_t + 3l_0)} \quad (2.31)$$

Onde:

l_0 : é o comprimento da aba na vista frontal do conector ou direção paralela ao comprimento da longarina;

l_t : é o comprimento da aba na vista lateral do conector ou direção perpendicular ao comprimento da longarina o qual é composto por: metade da espessura do conector, espessura da coluna e a folga entre o conector e a coluna;

E : é o módulo de elasticidade;

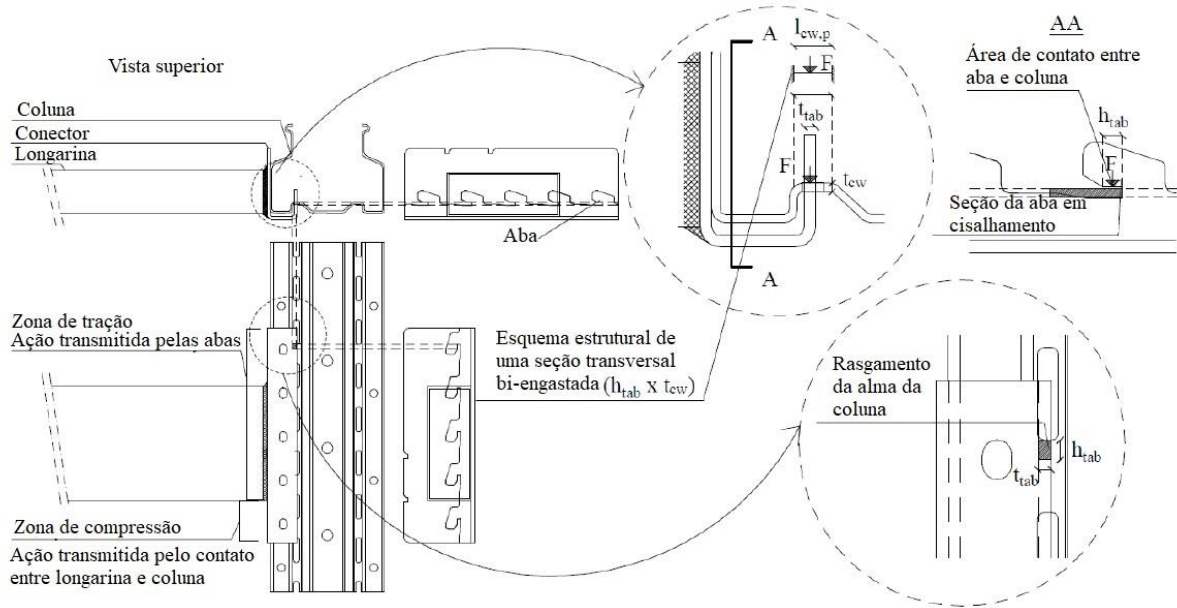
t_t : é a espessura do conector;

h_t : é a altura da aba ou dente.

2.4.3.2.4. RASGAMENTO DA ALMA DA COLUNA ($k_{cw,p}$)

O contato da aba do conector com a parede da coluna pode provocar o rasgamento. Para modelar a rigidez inicial com relação a este fenômeno pode-se considerar uma viga bi engastada onde é aplicada uma força F pela aba do conector. Este modelo está ilustrado na Figura 2.34:

Figura 2.34 - Modelo da rigidez inicial para o rasgamento da alma da coluna



Fonte: Gusella (2019), adaptado

Para encontrar o valor da rigidez inicial deste modelo pode-se aplicar a seguinte condição:

$$k_{cw,p} = \frac{F}{\delta} \quad (2.32)$$

Onde:

$$\delta = \left(\frac{\chi l_{cw,p}}{4GA_{cw,p}} + \frac{l_{cw,p}^3}{192EJ_{cw,p}} \right) F \quad (2.33)$$

χ : fator de correção do cisalhamento;

$l_{cw,p}$: comprimento do extremo fixo da viga que representa o comprimento inferior do furo da coluna onde é encaixado o dente do conector;

E : módulo de elasticidade do material;

G : módulo de elasticidade transversal do material.

$$A_{cw,p} = t_{cw} h_{tab} \quad (2.34)$$

$$J_{cw,p} = \frac{1}{12} h_{tab} t_{cw}^3 \quad (2.35)$$

Onde:

t_{cw} : é a espessura da coluna;

h_{tab} : é a altura do dente do conector que entra em contato com a parede da coluna;

Assim:

$$k_{cw,p} = \frac{1}{\frac{\chi l_{cw,p}}{4GA_{cw,p}} + \frac{l_{cw,p}^3}{192EJ_{cw,p}}} \quad (2.36)$$

2.4.3.2.5. AMASSAMENTO DA ALMA DA COLUNA ($k_{cw,b}$)

A ação do contato das abas do conector na porção inferior do furo, pode causar o amassamento na alma da coluna. O EN 1993-1-8 (2011) sugere que a rigidez da componente relativa a este fenômeno seja:

$$k_{cw,b} = 12k_b k_t h_{tab} f_{u,cw} \quad (2.37)$$

Onde:

$f_{u,cw}$: resistência à ruptura do aço da coluna;

$k_b = 1,25$ (EN 1993-1-8, 2011);

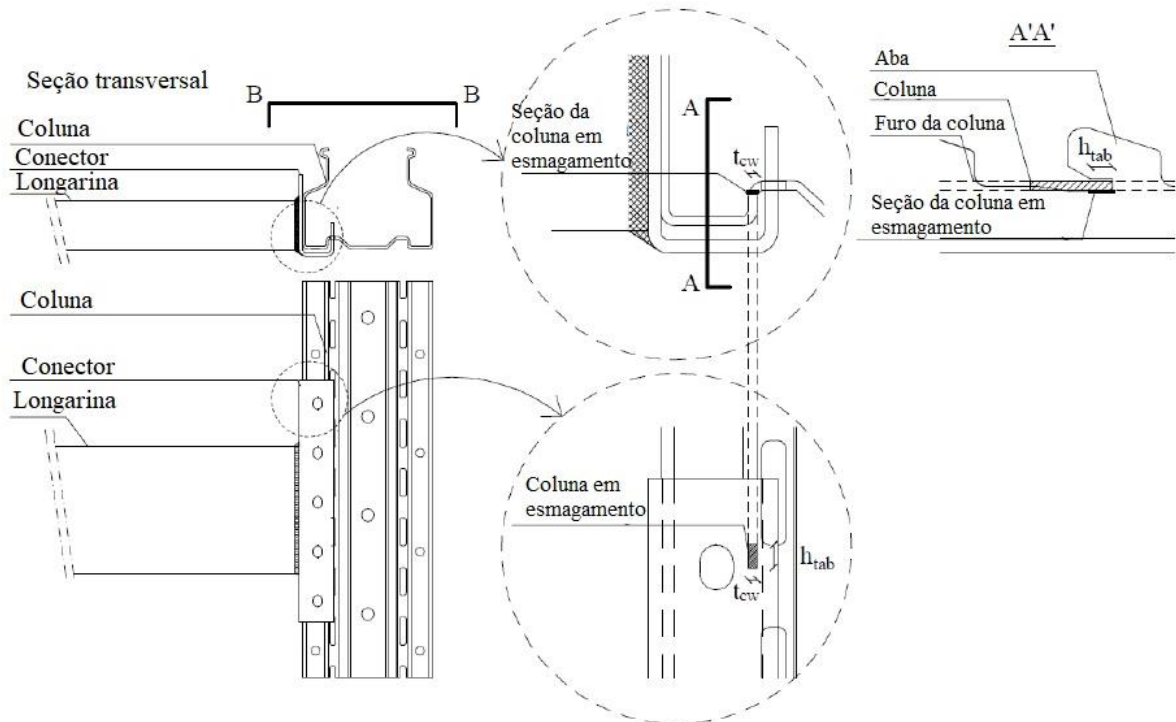
h_{tab} : altura da aba do conector;

$k_t = \frac{1,5t_{cw}}{d_{M16}}$ (EN 1993-1-8, 2011);

d_{M16} : igual a 2,5 de acordo com (EN 1993-1-8, 2011).

O esquema utilizado para obter a rigidez inicial referente ao amassamento da alma da coluna está ilustrado na Figura 2.35.

Figura 2.35 - Modelo para rigidez inicial relativo ao amassamento da alma da coluna

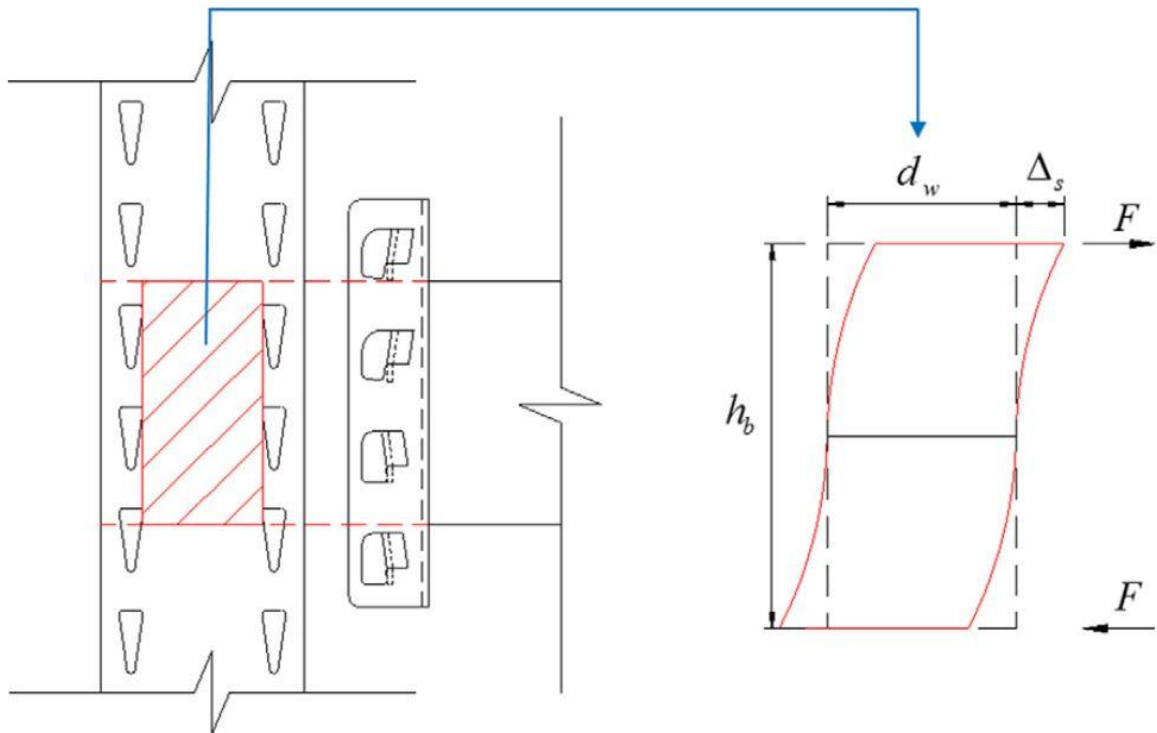


Fonte: Gusella (2019), adaptado

2.4.3.2.6. ALMA DA COLUNA EM CISALHAMENTO ($k_{cw,s}$)

Para casos onde a conexão gera momento fletor em apenas um lado da coluna, a deformação gerada pelo cisalhamento na alma coluna deve ser levada em consideração. A força axial na coluna pode ser desprezada (ZHAO et al., 2017). A deformação gerada pelo cisalhamento da alma da coluna pode ser representada pelo modelo na Figura 2.36.

Figura 2.36 - Modelo para alma da coluna em cisalhamento



Fonte: Zhao et al. (2017)

De acordo com Zhao et al. (2017), a rigidez axial da alma da coluna em cisalhamento pode ser obtida a partir da seguinte expressão.

$$k_{cw,s} = \frac{2Gt_{up}d_w}{h_b} \quad (2.38)$$

Onde:

d_w : é a largura da alma da coluna que está em cisalhamento;

h_b : é a altura da longarina;

t_{up} : é a espessura da coluna;

G : é o módulo de elasticidade transversal.

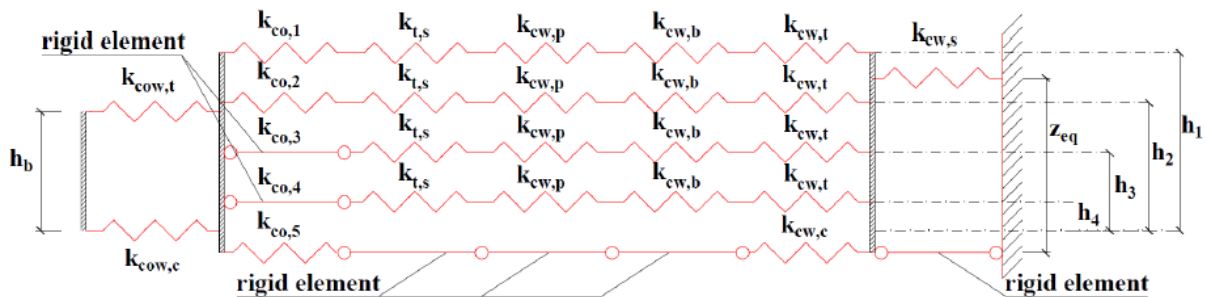
A rigidez rotacional inicial da alma da coluna em cisalhamento pode ser obtida a partir da seguinte expressão.

$$k_{cws-\varphi} = Gt_{up}d_w h_b \quad (2.39)$$

2.4.3.2.7. RIGIDEZ ROTACIONAL DA CONEXÃO

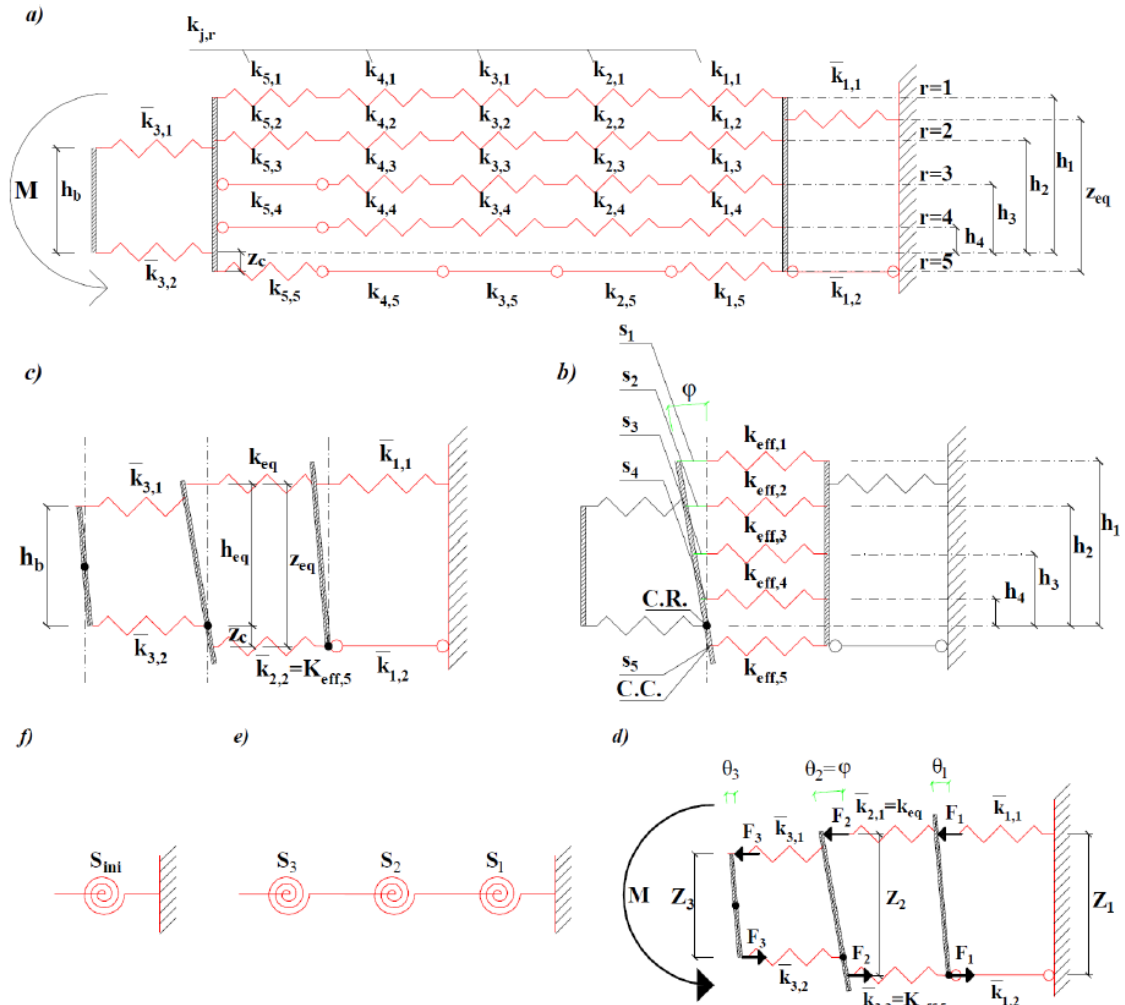
Para a determinação da rigidez rotacional inicial da conexão longarina x coluna, a rigidez axial de cada componente identificado da ligação deve ser levada em consideração em um modelo mecânico, ou seja, cada componente contribui com sua rigidez axial, a qual deve ser transformada em rigidez rotacional. Para esta transformação deve ser levado em conta o braço de alavanca de cada mola equivalente (ZHAO et al., 2017). O modelo mecânico e o procedimento utilizados para a avaliação da rigidez rotacional inicial da conexão estão expostos na Figura 2.37 e Figura 2.38.

Figura 2.37 - Modelo mecânico para rigidez rotacional inicial da conexão



Fonte: Gusella (2019), adaptado

Figura 2.38 - Procedimento para rigidez rotacional inicial da conexão



Fonte: Gusella (2019), adaptado

No trabalho de Gusella (2019) foi assumido que o centro de rotação (C.R.) do modelo coincide com o centro de compressão (C.C.). O primeiro passo para a obtenção da rigidez rotacional inicial da conexão é o cálculo da rigidez efetiva de cada linha relativa a cada componente (Figura 2.38b).

$$k_{eff,r} = \frac{1}{\sum_{j=1}^{n_r} \frac{1}{k_{j,r}}} \quad (2.40)$$

O próximo passo é a obtenção da rigidez equivalente geral a tração (Figura 2.38c):

$$k_{eq} = \frac{\sum_{r=1}^n k_{eff,r} h_r}{h_{eq}} \quad (2.41)$$

Onde:

$k_{eff,r}$: coeficiente de rigidez efetiva para a linha r levando em consideração os coeficientes de rigidez $k_{j,r}$ para os componentes básicos;

h_{eq} : distância equivalente do centro de rotação: $h_{eq} = z_{eq} - z_c$; onde z_c foi obtido no item 2.4.3.1.10 e z_{eq} é o braço de alavanca equivalente, que pode ser obtido a seguir:

$$z_{eq} = \frac{\sum_{r=1}^4 k_{eff,r} h_r z_r}{\sum_{r=1}^4 k_{eff,r} h_r} \quad (2.42)$$

Onde:

z_r : braço de alavanca do componente na sua linha r: $z_r = h_r + z_c$.

O último passo é a transformação das molas com rigidez axial em molas com rigidez rotacional (Figura 2.38d e Figura 2.38e) através da equação abaixo:

$$S_n = \left(\frac{z_n^2}{\sum_{n=1}^2 \frac{1}{k_{n,i}}} \right) \quad (2.43)$$

A obtenção da rigidez rotacional inicial do modelo inteiro pode ser obtida com a relação a seguir:

$$S_{ini,num} = \frac{1}{\sum_{n=1}^3 \frac{1}{S_n}} \quad (2.44)$$

3. METODOLOGIA

Neste capítulo os procedimentos metodológicos para a realização das análises propostas são apresentados. Na primeira parte são expostos os materiais empregados em cada elemento da ligação. Posteriormente as geometrias e a descrição das análises realizadas. Utiliza-se três tipos de análises, sendo elas: mecânica pelo método das componentes, numérica com base no Método dos Elementos Finitos (MEF) através do *software* comercial Abaqus e ensaio experimental.

Como cada fabricante possui um tipo de geometria próprio para longarinas, conectores e colunas, não é possível fazer a validação exata dos modelos utilizados por Gusella (2019) e Zhao et al. (2017), porém será criado um modelo adaptado para a análise da conexão referente a esta dissertação utilizando-se as ferramentas fornecidas por esses dois autores. A nomenclatura utilizada para coluna, conector, longarina e posição da longarina no conector estão organizadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Nomenclatura dos elementos utilizados para análise da conexão

Coluna	Conector	Longarina	Posição da Longarina
110C	5A	120L	PB

Fonte: O autor

A nomenclatura escolhida para as peças está em função de suas características, ou seja, a coluna possui largura da alma de 110 milímetros, portanto é denominada como 110C. O conector que possui 5 dentes é denominado como 5A. A longarina que possui uma seção de 50 milímetros de largura por e 120 milímetros de altura é denominada como 120L e sua posição em relação ao conector dá-se na sua parte inferior ou parte de baixo, portanto, denomina-se como PB.

Na análise pelo método das componentes, cada componente da ligação tem suas características e contribuições mecânicas avaliadas, assim como sua rigidez axial e resistência que são representadas por molas que são dispostas em série ou em paralelo. O resultado final é a combinação da contribuição de cada mola para a conexão como um todo.

A análise numérica da ligação é feita utilizando-se o Método dos Elementos Finitos através do *software* Abaqus versão 6.14, o qual possui a capacidade de realizar análises complexas com não-linearidade geométrica, material e de contato, assim como a simulação de modelos estáticos e dinâmicos. O programa permite a análise em duas dimensões ou em três

com elementos do tipo chapa (*shell*), sólido (*solid*), entre outros. O tipo de elemento finito escolhido para esta dissertação é o *solid* 3D já que as complexas geometrias a serem analisadas são modeladas através de *software* CAD tridimensional e importadas ao Abaqus e por conta de o contato entre as partes serem, majoritariamente, realizado através de suas espessuras, a utilização do elemento de chapa torna-se inviável. A modelagem é feita de modo similar ao ensaio experimental preconizado pelo EN 15512 (2009) de modo que uma força é aplicada a uma distância de 400 milímetros da parede da coluna e as deformações são medidas nas posições extremas das mesas superior e inferior da longarina e, ao final da análise, com os dados gerados, obtém-se a curva da relação momento fletor \times rotação e, através dela, os valores da rigidez rotacional inicial e momento fletor resistente da ligação são avaliados.

3.1.GEOMETRIAS

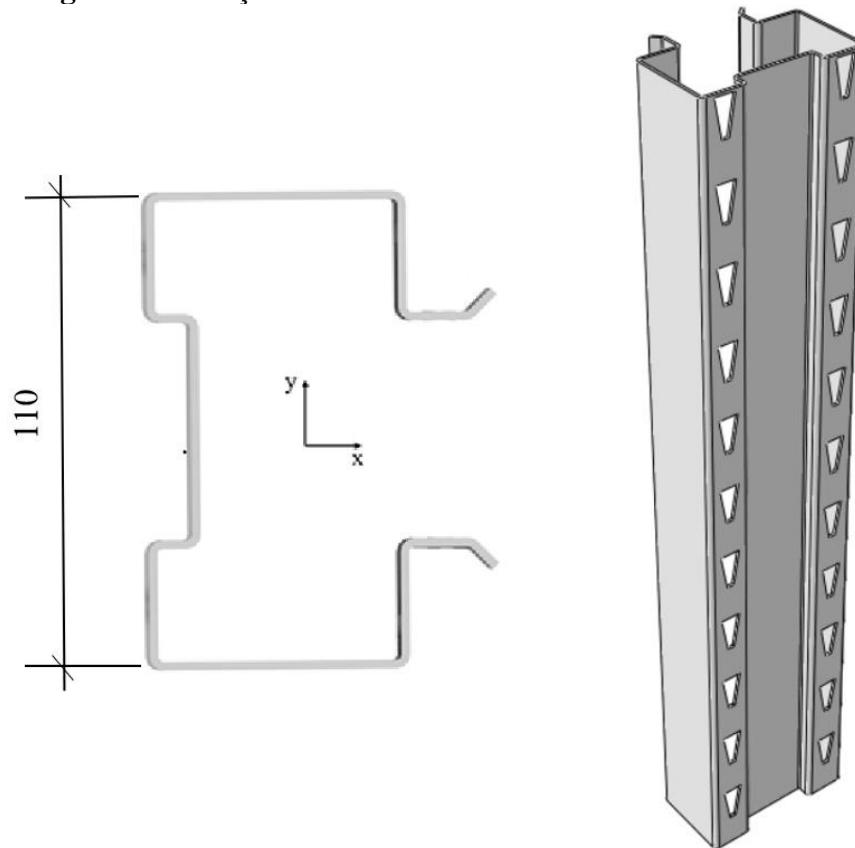
As geometrias comerciais a serem analisadas nesta dissertação são compostas por: 1 coluna de 110 mm de largura, 1 conector de 5 abas e 1 longarina de 120 mm de altura. Os modelos tridimensionais foram criados em um programa de desenhos de sólidos CAD. As geometrias foram simplificadas de modo que detalhes, como furos para pintura e outros elementos que não influenciam diretamente na rigidez e resistência da peça, foram retirados através do editor de geometria do *software* Abaqus.

Apenas as dimensões gerais dos elementos são fornecidas por questões confidenciais da empresa fabricante.

3.1.1. COLUNA

A coluna utilizada na análise desta dissertação é composta por um perfil do tipo *rack* perfurado em todo seu comprimento de 550 milímetros. Seus furos possuem espaçamento uniforme dedicados ao encaixe das abas do conector. A Figura 3.1 contém a seção transversal da coluna e o modelo tridimensional.

Figura 3.1 – Seção transversal e modelo tridimensional da coluna



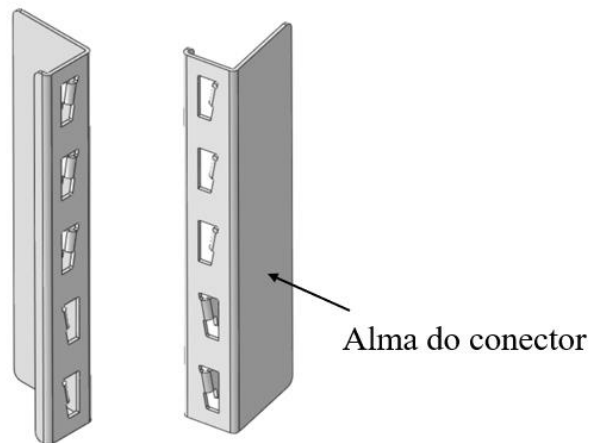
Fonte: O autor

3.1.2. CONECTOR

O conector é composto por um perfil formado a frio dobrado em forma de “J” que contém 5 dentes que são geradas a partir do puncionamento e dobra da chapa. As abas são dispostas de forma a encaixar nos furos tanto na direção vertical quanto na horizontal, ou seja, ela transmite esforços de cisalhamento nas duas direções para conter o momento fletor gerado na conexão, o que caracteriza sua semirrigidez. A chapa do conector ainda contém uma dobra adicional na porção oposta ao local destinado ao posicionamento da longarina. Esta dobra tem a finalidade de auxiliar na resistência ao momento fletor através do contato lateral com a alma da coluna assim como de aumentar a rigidez rotacional da ligação.

O modelo tridimensional do conector está exposto na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Modelo tridimensional do conector



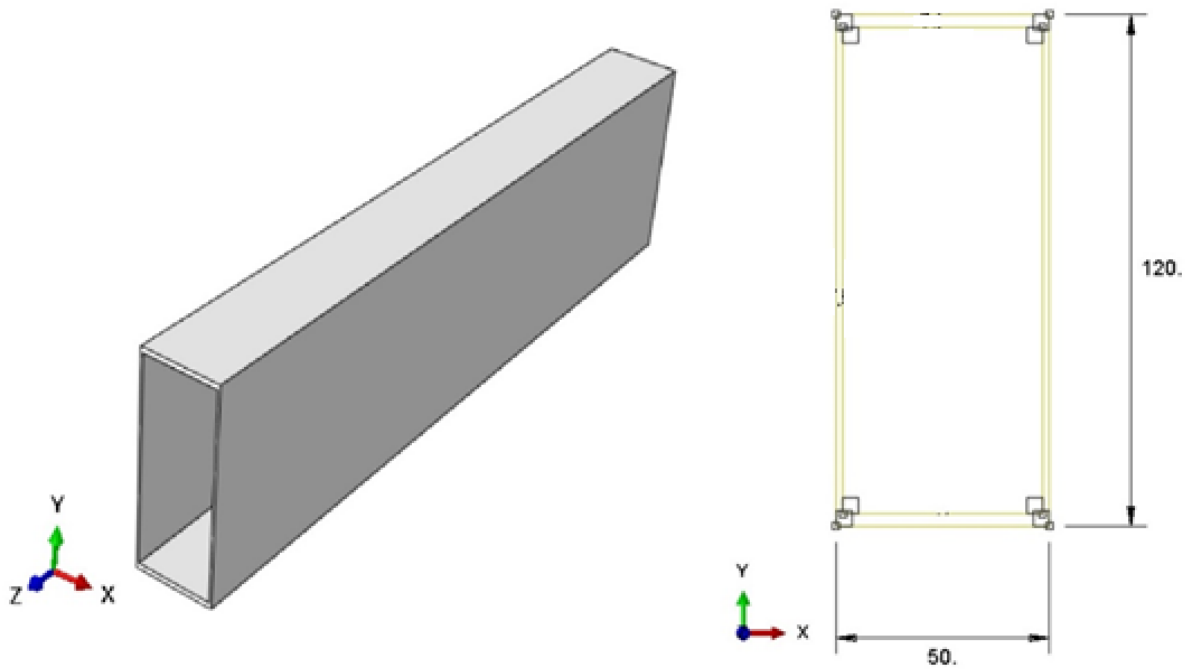
Fonte: O autor

3.1.3. LONGARINA

A longarina é composta por dois perfis formados a frio do tipo U enrijecido os quais são acoplados um ao outro formando uma seção tubular de 50x120 mm com 500 milímetros de comprimento. A união entre os dois é feita através de solda intermitente, o que garante um comportamento uniforme entre os dois perfis e possibilita a consideração de um tubo durante a análise e dimensionamento.

O modelo tridimensional exato dos perfis utilizados para longarina possui dobras, raios e enrijecimentos na alma que aumentam a complexidade na análise numérica e, consequentemente, aumentam o custo computacional devido ao contato entre os dois. Como este contato não é de extrema importância nesta análise visto que os dois perfis se comportam de maneira uniforme, a seção transversal é simplificada para um tubo retangular com espessura nas mesas inferior e superior duas vezes maior que a espessura na alma. O modelo tridimensional, assim como as dimensões gerais da seção transversal utilizada para o perfil da longarina estão contidos na Figura 3.3.

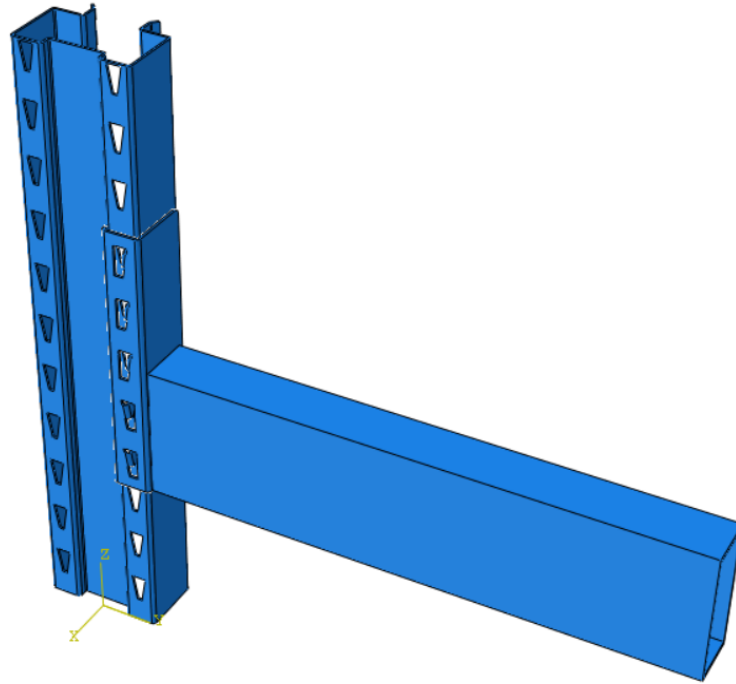
Figura 3.3 - Modelo tridimensional da longarina e dimensões gerais



Fonte: O autor

3.1.4. MONTAGEM

A montagem da conexão para a simulação numérica é feita de forma a seguir as diretrizes da EN 15512 (2009) para o ensaio laboratorial *cantilever test*. A Figura 3.4 mostra a montagem do modelo de elementos finitos a ser simulado.

Figura 3.4 - Montagem da conexão

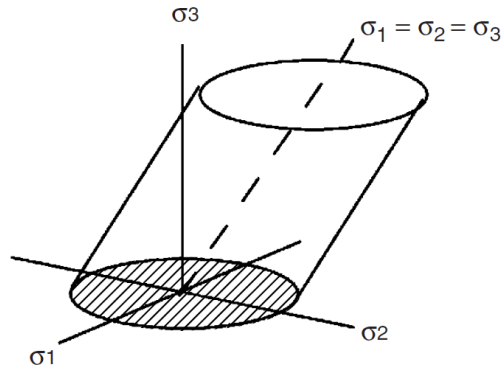
Fonte: O autor

3.2.MATERIAL

Quando materiais dúcteis são submetidos à uma solicitação mecânica, ocorre uma sucessão de acontecimentos com o material. Primeiramente, há uma deformação elástica, seguida de uma deformação plástica antes da fratura (HOSFORD, 2005). Para as deformações elásticas, ainda é válida a lei de Hooke, porém, após atingido seu limite de escoamento, o comportamento passa a ser plástico, cujo processo é irreversível e a elasticidade então, deixa de ser válida.

Ainda segundo Hosford (2005), para saber qual a tensão que provoca o escoamento plástico no material, existe uma representação gráfica de tensões principais, chamada de superfície de escoamento. Para cada material, esta representação se comporta de uma forma; no caso do aço, forma-se um cilindro, que adquire essa forma devido às suas propriedades isotrópicas. Esse cilindro separa a região plástica da elástica, ou seja, para tensões fora ou sobre a superfície do cilindro, ocorrerá o escoamento do aço; para tensões dentro, o escoamento não ocorre. A Figura 3.5 mostra superfície de escoamento de acordo com o critério de von Mises.

Figura 3.5 - Superfície de escoamento do aço

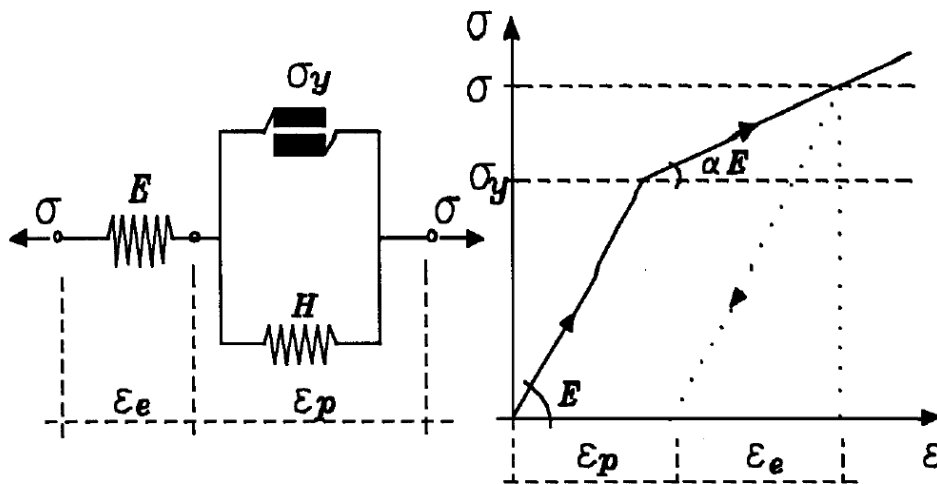


Fonte: Hosford (2005)

Através de um ensaio de tração em uma peça de aço, obtém-se uma curva tensão-deformação, a qual fornece várias informações sobre seu estado elástico e plástico; essa curva também pode ser denominada como curva de escoamento, pois contém a tensão que faz com que o aço passe do comportamento elástico para o escoamento plástico (DAGNESE, 2012).

O modelo constitutivo utilizado para o aço na análise numérica apresenta comportamento elasto-plástico bilinear e está representado na Figura 3.6.

Figura 3.6 - Modelo elasto-plástico bilinear



Fonte: Neto (1994)

Este modelo é caracterizado como associação mista e nele, combina-se o modelo elástico perfeitamente plástico (em série) com o modelo rígido com encruamento (em paralelo) e é caracterizado pela soma das deformações de um e outro (NETO, 1994).

O tipo de aço utilizado nos elementos da conexão é o ASTM A572 – Grau 50. A seguir, a Tabela 3.2 resume as características deste material.

Tabela 3.2 - Propriedades do aço utilizado

Elemento	Tipo de aço	f_y (MPa)	f_u (MPa)	Módulo de Young (MPa)	Coef. De Poisson (ν)
Coluna	ASTM A572 - GR50	345	450	210.000	0,30
Conector	ASTM A572 - GR50	345	450	210.000	0,30
Longarina	ASTM A572 - GR50	345	450	210.000	0,30

Fonte: O autor

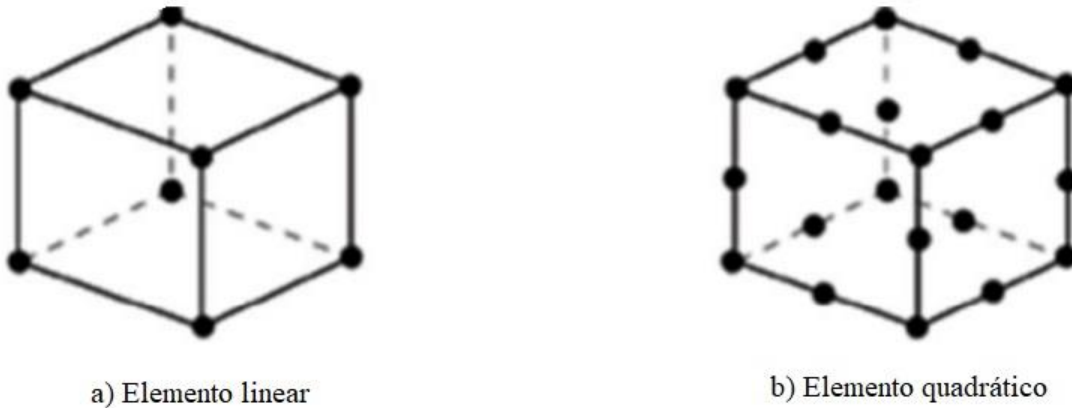
3.3.MODELAGEM NUMÉRICA

O Método dos Elementos Finitos (MEF) torna o domínio de integração contínuo em finitas subdivisões, chamadas de elementos finitos. Surgiu como alternativa para os métodos numéricos de Rayleigh-Ritz, Galerkin, diferenças finitas, resíduos ponderados, entre outros (ASSAN, 2003)

O *software* de elementos finitos Abaqus possui um poderoso *solver* capaz de convergir complexas análises. Para isso, o programa faz a separação dos elementos em famílias que podem ser: sólidos, casca, viga, membrana, rígido, treliça, chapas, entre outros. Os domínios dos elementos são interpolados pelo número de nós que possuem e o programa dispõe de elementos com interpolação de primeira e segunda ordem. A estes nós são fornecidos os graus de liberdade que são variáveis importantes no MEF, como por exemplo, rotações e deslocamentos. Os elementos detêm rigidez e massa que são previstas através de pontos de integração em seu interior utilizando-se da quadratura de Gauss. O *software* apresenta elementos com integração total e reduzida. Na integração reduzida, o tempo de processamento é menor em relação a total.

Ainda o *software* Abaqus, há outra separação dos elementos que são os elementos estruturais e contínuos. Os modelos contínuos, representados pelos sólidos, apresentam volume e são geralmente empregados em análises complexas não lineares e que incluam plasticidade e deformações finitas. Há a possibilidade de constituir um ou vários materiais de diferentes propriedades. De acordo com o grau de interpolação (quadráticos ou lineares), esses elementos são categorizados em: tetraedros, prismas triangulares e hexaedros. Como já foi dito no início do Capítulo 3, para a análise numérica desta dissertação é utilizado o elemento finito hexaédrico linear com oito nós representado pela Figura 3.7a.

Figura 3.7 - Elementos: a) linear e b) quadrático



Fonte: Manual ABAQUS (2014), adaptado

Considerando-se que nesta dissertação geometrias complexas são analisadas, problemas relacionados a precisão em regiões de alta concentração de tensões e contato entre os elementos podem surgir. Para contornar essas adversidades, a utilização de malhas discretizadas em quadriláteros regulares de segunda ordem e integração reduzida, juntamente com o hexaedro, podem aproximar os resultados dos experimentais. Nos pontos de concentração de tensões e contato, a malha é refinada.

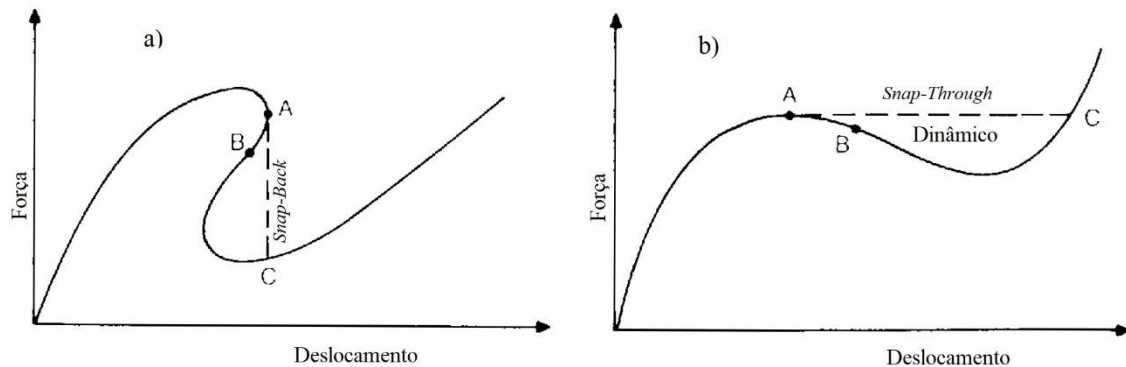
O Abaqus separa as superfícies de contato em: mestre (*master*) e escrava (*slave*). A definição dessas superfícies é de extrema importância para que o algoritmo do *software* possa identificar o comportamento e interação dos componentes do modelo. Os nós da superfície escrava não podem penetrar a superfície mestre, por isso é conveniente utilizar uma malha menor para a superfície escrava. A interação entre as superfícies, como o deslocamento entre elas são tratadas através do deslizamento pequeno (*small sliding*) ou deslizamento finito (*finite sliding*). Para as superfícies soldadas, o elemento de contato *tie* é usado.

As condições de contorno utilizadas restringem deslocamentos e rotações dos extremos da coluna e o deslocamento lateral juntamente ao ponto de aplicação do carregamento. A carga aplicada é monotônica e estática. Portanto, o pré-processamento do *software* se resume em definir as propriedades geométricas e físicas dos elementos que constituem o modelo; as condições de contorno e o carregamento; as interações entre os elementos estruturais e a definição da malha.

O Abaqus faz uso do método iterativo de Newton-Raphson para solucionar problemas não lineares, que podem conter pontos limites na trajetória de equilíbrio da estrutura. Esses limites são chamados de pontos críticos e a partir deles também podem ocorrer comportamentos

chamados de *snap-through*, que é um salto dinâmico sob controle de carga e *snap-back* que é um salto sob controle de deslocamento e pontos de bifurcação (CRISFIELD, 1991). Para contornar esta situação, métodos de continuação podem ser utilizados, dentre eles o método de Riks. A Figura 3.8 ilustra a trajetória de equilíbrio que representa esses comportamentos.

Figura 3.8 - Trajetórias de equilíbrio: a) *Snap-Through* e b) *Snap-Back*



Fonte: Crisfield (1991), adaptado

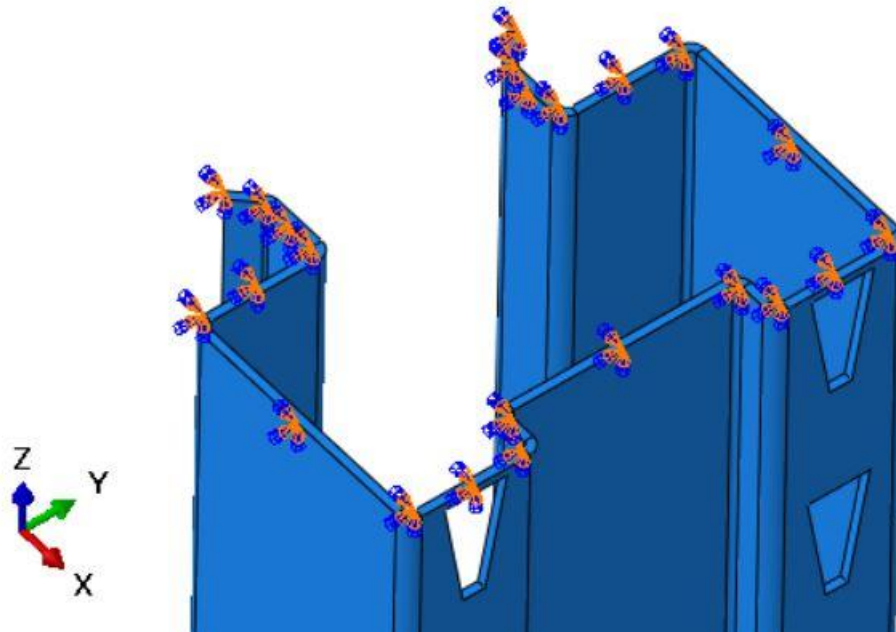
Para obtenção dessa trajetória de equilíbrio, a qual descreve a relação entre a força aplicada e o deslocamento gerado na estrutura para além de sua carga máxima, o *software* utiliza-se da técnica de continuação chamada comprimento de arco (*arc-length*) desenvolvida por Riks (1979).

O pós-processamento consiste na avaliação dos resultados após os deslocamentos, tensões e outros parâmetros foram calculados. O programa permite visualização gráfica do produto do processamento, assim como a extração dos dados numéricos para manipulação de valores e geração de gráficos.

3.3.1. CONDIÇÕES DE CONTORNO E DETALHES DO MODELO NUMÉRICO

A simulação numérica do *cantilever test* no *software* Abaqus, detalhada no item anterior, é realizada com elementos sólidos para que o contato entre os componentes seja simulado. A coluna é restringida em suas duas extremidades tanto a rotação quanto a translação em todos os eixos (Figura 3.9).

Figura 3.9 - Restrição dos seis graus de liberdade na extremidade da coluna

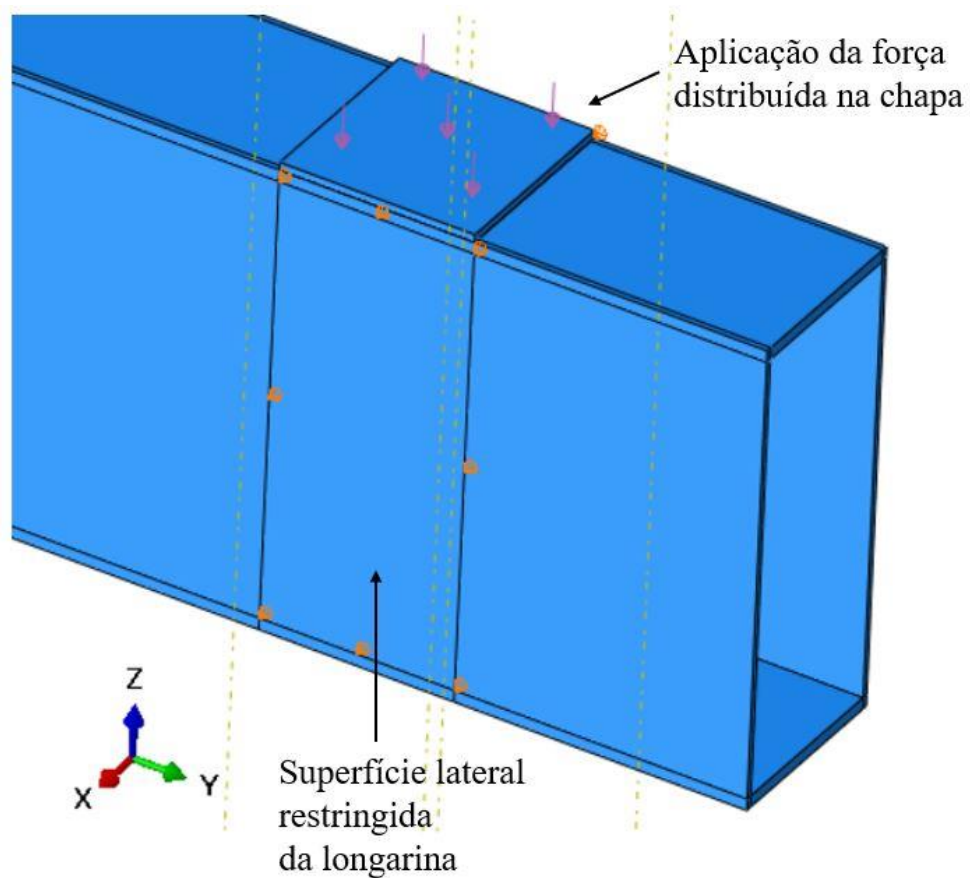


Fonte: O autor

A longarina é restringida ao deslocamento lateral (eixo x) na região da aplicação da força em ambos os lados da alma de sua seção transversal. O comprimento da restrição ao longo da longarina é de 50 milímetros. Esta restrição é recomendada pela EN 15512 (2009) para que o deslocamento devido a aplicação da força ocorra apenas na direção vertical (eixo z).

Uma chapa de 50x50 milímetros de seção e 2 milímetros de espessura é criada, cujo centroide é posicionado a 400 milímetros da face da coluna. A força então é aplicada sobre a superfície desta chapa. A Figura 3.10 ilustra a força aplicada sobre a superfície da chapa e a restrição lateral da longarina.

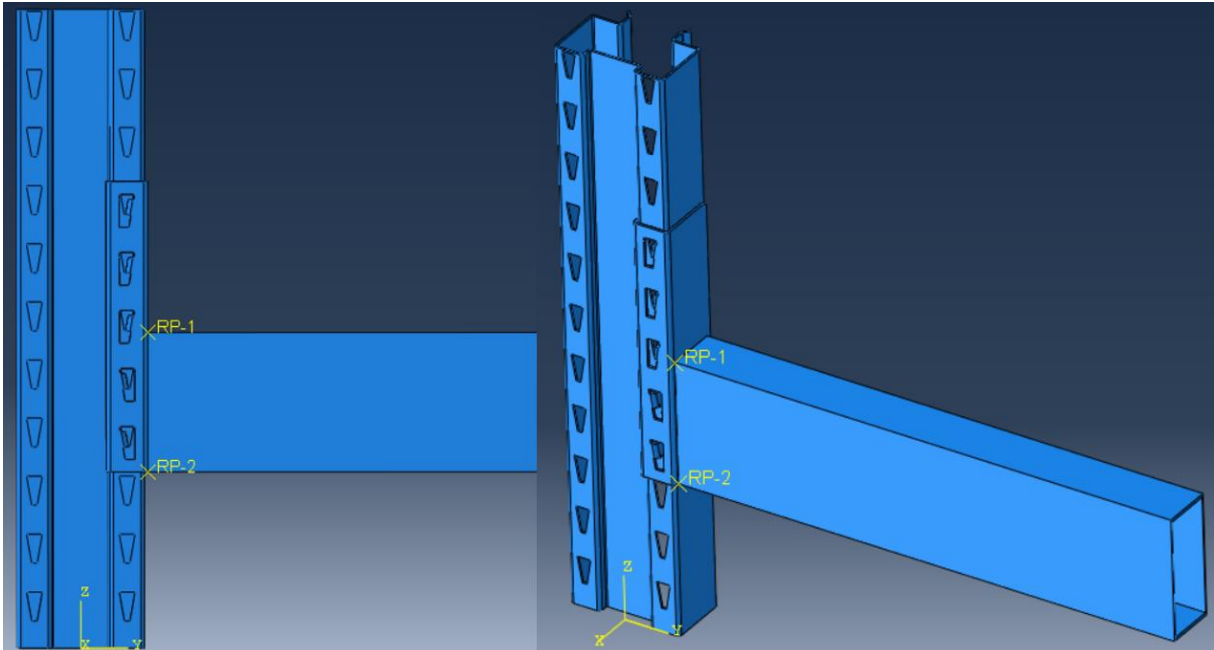
Figura 3.10 - Aplicação da força e restrição lateral da longarina



Fonte: O autor

No pós processamento, os dados a serem extraídos são: a força aplicada na chapa e o deslocamento na direção y na em duas posições da seção da longarina. Como é usado o método de continuação do comprimento de arco (Riks), a força, aplicada sobre a superfície da chapa fixada na mesa superior longarina a 400 milímetros da coluna, é multiplicada pelo fator de proporcionalidade de carga (ou LPF – *Load Proportionality Factor*) do Abaqus. Os pontos onde são extraídos os valores de deslocamento no eixo y , estão localizados nas extremidades da mesa superior e inferior da longarina. Na Figura 3.11 pode-se visualizar estas posições que são representadas por RP-1 e RP-2.

Figura 3.11 - Pontos para extração de dados do deslocamento na direção y



Fonte: O autor

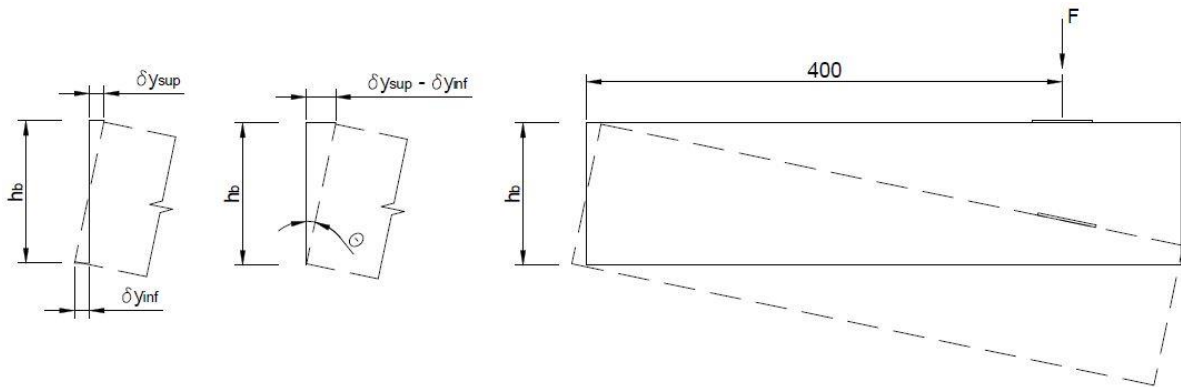
A partir dos dados extraídos faz-se a conversão dos valores para gerar a curva momento fletor \times rotação. O momento fletor (M) pode ser obtido através da multiplicação da força aplicada na longarina pelo braço de alavanca compreendido entre o centroide da superfície chapa onde a força é aplicada uniformemente distribuída e a superfície lateral vertical da coluna. O valor desta distância é de 400 milímetros, como representado na Equação 3.1. Para encontrar a rotação (θ) que acontece na longarina, subtrai-se o deslocamento no eixo y da mesa superior pelo deslocamento na mesma direção da mesa inferior. O resultado desta subtração é dividido pela altura da longarina ou a distância entre os dois pontos de medição de deslocamento e então, encontra-se o arco tangente desta divisão, como representado na Equação 3.2. Por fim, transforma-se o ângulo resultante de graus para radianos.

$$M = F \times 400 \quad (3.1)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{\delta y_{sup} - \delta y_{inf}}{h_b}\right) \quad (3.2)$$

A Figura 3.12 ilustra os parâmetros citados acima.

Figura 3.12 - Momento e Rotação da longarina (dimensões em mm)



Fonte: O autor

3.4. ENSAIO EXPERIMENTAL SIMPLIFICADO

A metodologia ideal para o ensaio experimental seria utilizar todas as condições prescritas pelas normas técnicas, com a utilização de equipamentos de medição de alta precisão em laboratórios dedicados a este fim. Porém, no caso dessa dissertação serão realizados ensaios sem as condições ideais que se encontraria em um laboratório com as medições sendo feitas por meios menos precisos que transdutores de deslocamento, por exemplo, e a aplicação da força realizada por massas com peso conhecido, colocadas gradualmente em aparato fixado à longarina. Com este ensaio simplificado se espera obter valores próximos aos obtidos em condições ideais de ensaio, porém com validade de verificação das outras análises (numérica e mecânica) devido à imprecisão. Serão realizados ensaios em quatro corpos de prova. É importante salientar também que, devido ao alto grau de imprecisão de um ensaio com medições feitas através de trena métrica, força aplicada através de massas conhecidas aplicadas manualmente e por conta da atual pandemia mundial que dificultou fazer os ensaios em laboratório, os resultados do ensaio experimental simplificado terá validade apenas de estimativa ou verificação a ser comparado com os resultados da análise numérica e mecânica.

A conexão ensaiada é composta por longarina de 50x120 mm de seção transversal retangular e 2300 mm de comprimento, coluna de seção *rack* 110x60 mm, conector em forma de “J” com 5 abas e com a longarina soldada na sua parte de baixo. O nome dado a este conjunto, que está na Figura 3.13, é: 110C-5A-120L-PB.

Figura 3.13 - Conexão 110C-5A-120L-PB

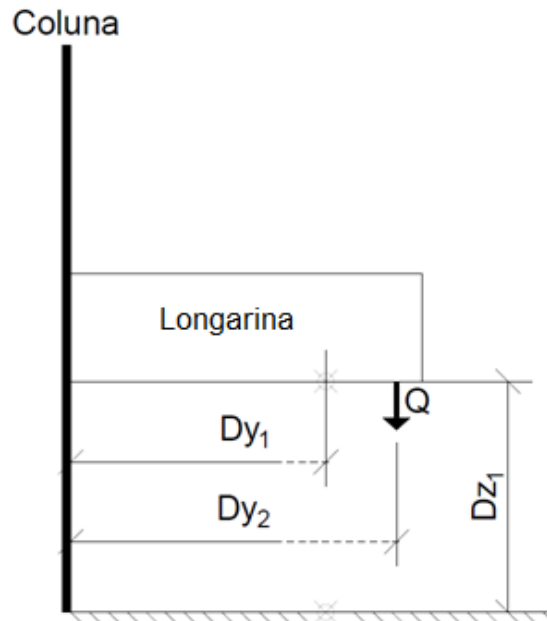


Fonte: O autor

3.4.1. O EXPERIMENTO

Para que o ensaio prescrito pela norma técnica seja feito sem os transdutores de deslocamento, sem o atuador mecânico ou hidráulico de força e sem as condições laboratoriais específicas, um ensaio experimental simplificado será elaborado. O seguinte esquema da Figura 3.14 ilustra o ensaio a ser realizado.

Figura 3.14 - Esquema do ensaio experimental simplificado



Fonte: O autor

A distância D_{y1} é tomada entre a coluna e o ponto, ao longo da longarina, onde o deslocamento vertical D_{z1} da longarina é medido em relação ao solo. A distância D_{y2} está compreendida entre a coluna e o ponto de aplicação da carga Q . As distâncias D_{y1} e D_{y2} são fixas enquanto que a D_{z1} varia conforme o carregamento é aplicado.

A aplicação do carregamento é feita utilizando-se caixas metálicas com retalhos de aço em seu interior as quais possuem uma massa controlada de 10 kg cada. Essas caixas estão ilustradas na Figura 3.15.

Figura 3.15 - Caixas metálicas utilizadas no ensaio



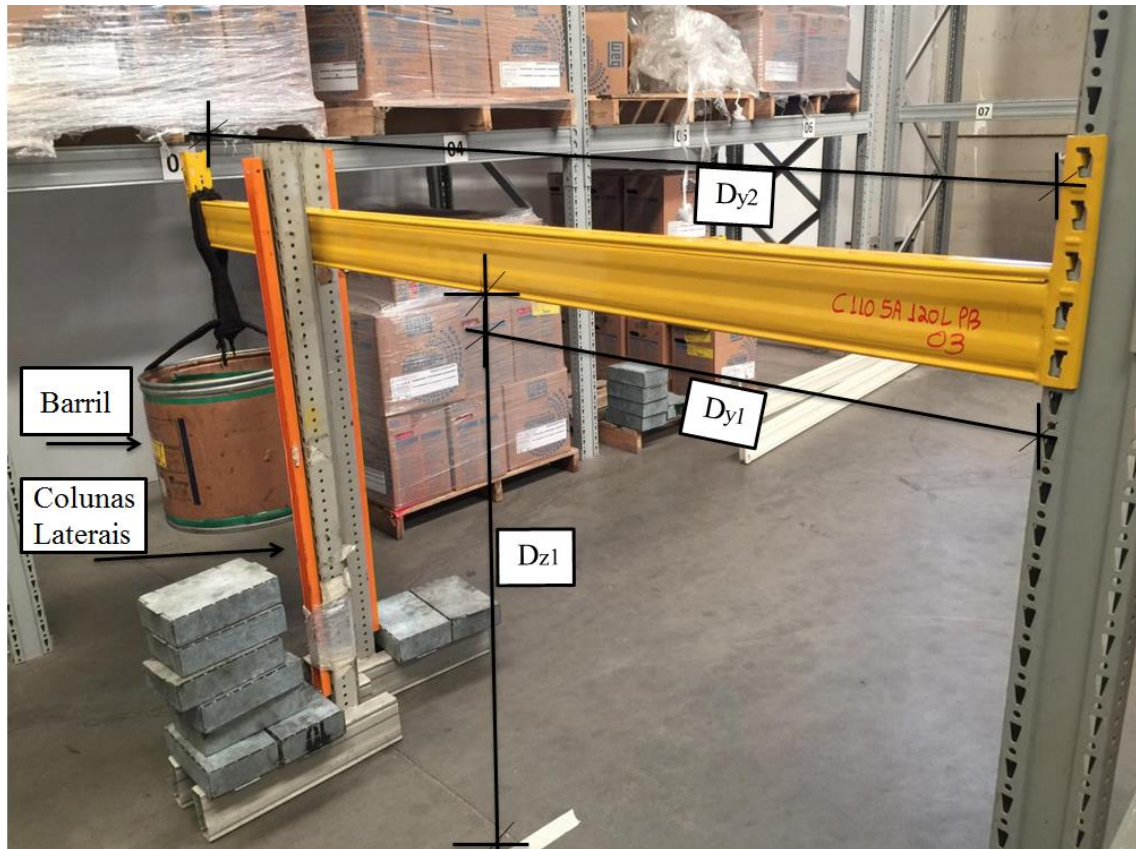
Fonte: O autor

As caixas metálicas serão inseridas em um barril que é acoplado na extremidade da longarina através de uma cinta. Para cada caixa metálica inserida, o valor do deslocamento na distância D_{y1} é medida.

Para evitar que a longarina movimente lateralmente, duas colunas são posicionadas em contato com a alma da seção transversal da longarina e pesos são posicionados aos pés dessas colunas para que as mesmas não se movimentem.

A Figura 3.16 ilustra o esquema montado com aparato para inserção das massas e as colunas posicionadas em contato com a alma da seção transversal da longarina, para evitar movimentação lateral.

Figura 3.16 - Ensaio experimental simplificado montado



Fonte: O autor

3.4.2. TOMADA DE DADOS

Os dados do ensaio são obtidos através do preenchimento do modelo da seguinte Tabela

3.3.

Tabela 3.3 – Modelo de tabela a ser preenchida durante o ensaio

Ensaio: Rigidez Rotacional - Longarina x Conector	
Data: --/-----	
Dy ₁ (mm) =	
Dy ₂ (mm) =	
Carga	Distância Vertical
Q	Dz ₁
kg	mm

Fonte: O autor

3.4.3. PROCESSAMENTO DOS DADOS

Para que a curva momento \times rotação seja elaborada a partir do ensaio experimental simplificado, é preciso processar os dados tomados. O momento fletor que o carregamento provocou na conexão é obtido através da seguinte expressão.

$$M = Q \times D_{y2} \quad (3.3)$$

Ou seja, multiplica-se a carga pela distância da aplicação da mesma até a coluna (D_{y2}).

A rotação foi obtida através da seguinte expressão.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{d_{zi}}{D_{y1}} \right) \quad (3.4)$$

Onde:

d_{zi} : deslocamento vertical

devido ao carregamento Q_i ;

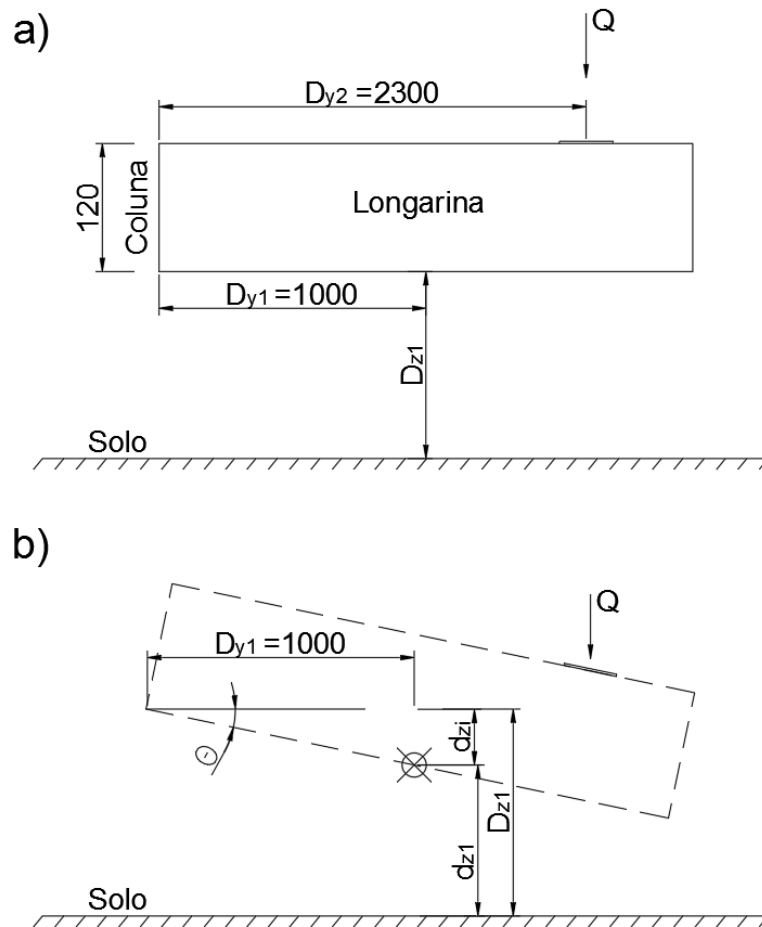
$$d_{zi} = D_{z1} - d_{z1}$$

d_{z1} : distância vertical medida após a aplicação da carga;

D_{z1} : distância vertical medida na condição inicial, sem carregamento.

Esses parâmetros estão ilustrados na Figura 3.17.

Figura 3.17 - Parâmetros de medição



Fonte: O autor

Na Figura 3.17a tem-se a configuração inicial, sem carregamento e na Figura 3.17b tem-se a situação após o carregamento. Utilizou-se D_{y2} como 2300 milímetros para que o mesmo momento fletor na conexão fosse gerado com uma parcela menor de carga, se comparado à situação de 400 milímetros da análise numérica.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados e discussões relativos às análises realizadas. O comportamento da ligação é avaliado através da curva momento fletor x rotação gerada pela análise numérica e experimental, e a influência de cada componente na resistência e rigidez da conexão é aferida através da análise mecânica feita pelo Método das Componentes.

4.1.MÉTODO DAS COMPONENTES

A análise da conexão entre longarina e conector através do Método das Componentes se deu com a adequação das rotinas utilizadas por Gusella (2019) e Zhao et al. (2017). Por conta de as ligações estudadas por esses autores não serem idênticas a ligação analisada nesta dissertação, algumas adaptações e adequações tiveram que ser realizadas.

4.1.1. IDENTIFICAÇÃO DAS COMPONENTES

Como já discutido anteriormente, o primeiro passo do Método das Componentes é a identificação, nos elementos da ligação, de cada componente local que contribui para a rigidez e resistência global da conexão.

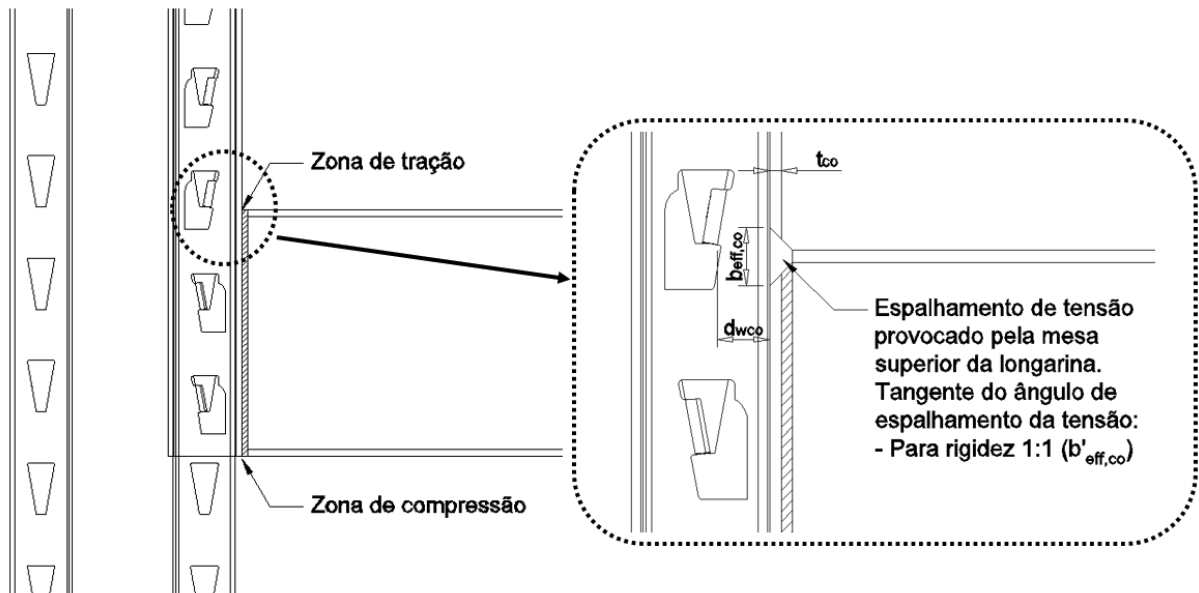
4.1.1.1.RIGIDEZ

A seguir, são apresentadas as componentes locais identificadas que contribuem para a rigidez rotacional inicial da conexão.

4.1.1.1.1. ALMA DO CONECTOR EM TRAÇÃO E COMPRESSÃO ($k_{cow,t}$ e $k_{cow,c}$)

Um dos elementos que contribuem para a rigidez da conexão está localizado na alma do conector, ou seja, a porção do conector onde está localizada a longarina. Na junção entre longarina e conector, quando aplicado o momento fletor, ocorre concentração de tensão nas extremidades da longarina, a qual é transferida para o conector na forma de tração na mesa superior e compressão na mesa inferior da seção transversal da longarina. A Figura 4.1 mostra o espalhamento desta tensão provocada pela mesa superior da longarina.

Figura 4.1 - Alma do conector em tração e compressão



Fonte: O autor

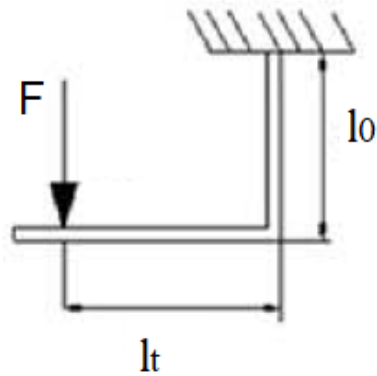
A expressão utilizada para a avaliação desta componente foi a equação 2.23 novamente apresentada a seguir:

$$k_{cow,t} = k_{cow,c} = \frac{Eb'_{eff,co}t_{co}}{d_{wco}}$$

4.1.1.1.2. ABA DO CONECTOR EM FLEXÃO (k_{tb})

Após certo valor de momento fletor aplicado à conexão, as abas superiores do conector (zona de tração) tendem a entrar em contato com a parede lateral dos furos da coluna. Para avaliar a rigidez relativa a esta componente, foi utilizado o modelo de viga engastada ilustrado na Figura 4.2.

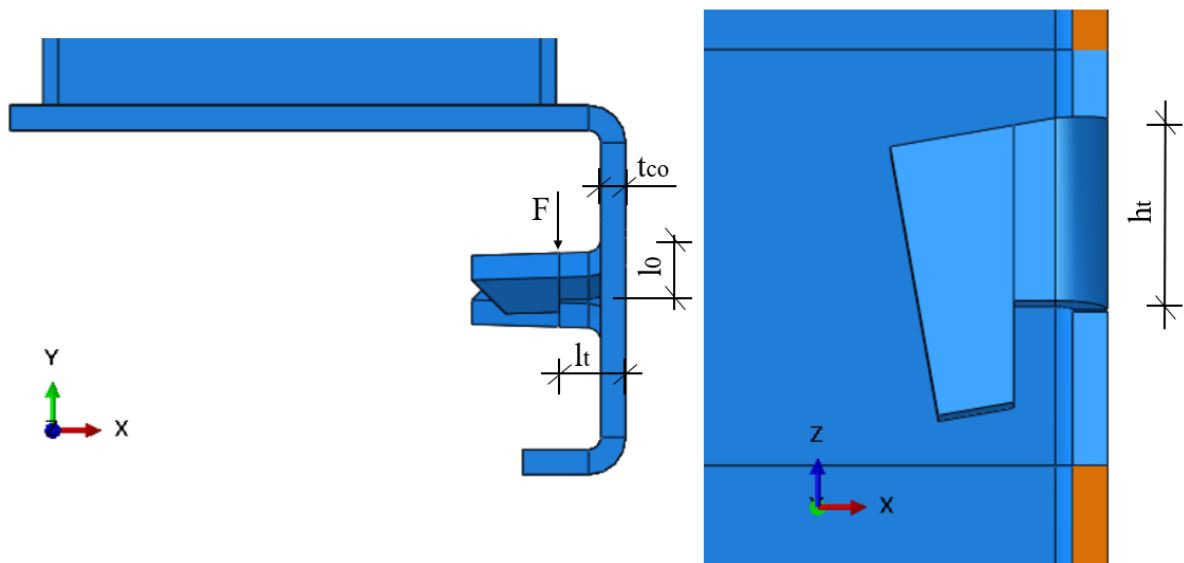
Figura 4.2 - Modelo para aba do conector em flexão



Fonte: O autor

Aplicando-se o modelo acima nas abas do conector, as dimensões estão ilustradas na Figura 4.3.

Figura 4.3 - Aba do conector em flexão



Fonte: O autor

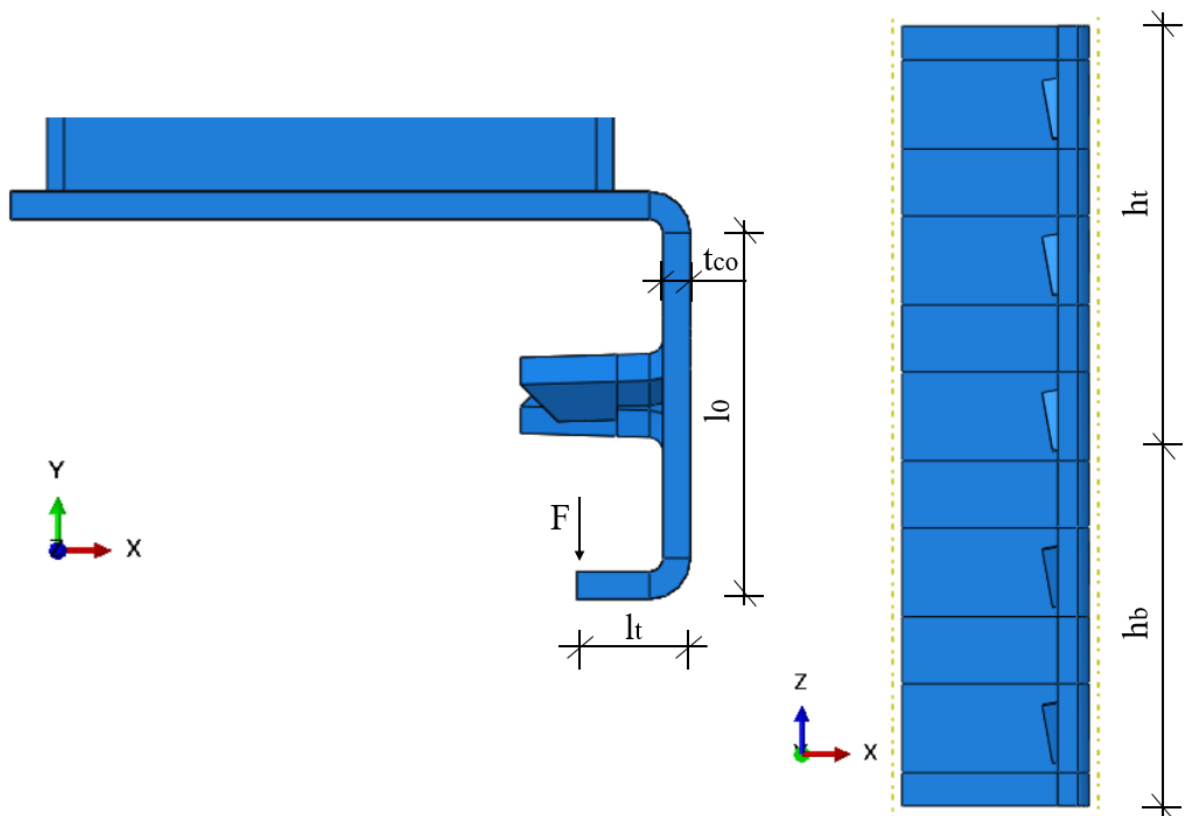
A expressão utilizada para a avaliação desta componente foi a equação 2.31, novamente apresentada a seguir:

$$k_{tb} = \frac{3EI}{l_t^2(l_t + 3l_0)}$$

4.1.1.1.3. ABA ENRIJECEDORA TRASEIRA DO CONECTOR EM FLEXÃO (k_{cotb})

Devido a geometria em formato de “J” do conector, a aba traseira de sua seção transversal localizada no lado oposto a alma do conector entra em contato com a coluna após a aplicação do momento fletor à conexão. Foi considerado que a porção do conector que fica acima da altura da longarina (h_b) entra em contato com a coluna (zona de tração). Este contato contribui com a rigidez rotacional do sistema. Para avaliar esta componente foi utilizado o mesmo modelo de viga engastada utilizado no item anterior. A Figura 4.4 ilustra a componente da aba enrijecedora traseira do conector em flexão.

Figura 4.4 - Aba enrijecedora traseira do conector em flexão



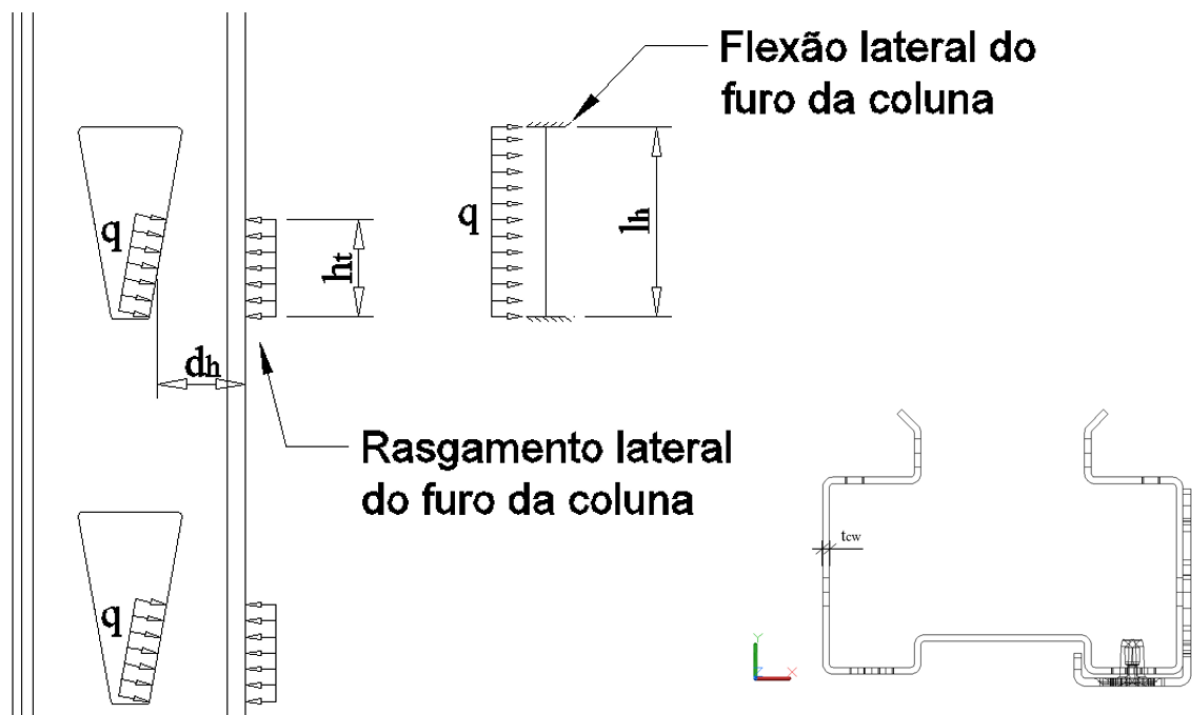
Fonte: O autor

A expressão utilizada para a avaliação desta componente também foi a expressão 2.31 utilizada no item anterior foi:

4.1.1.1.4. RASGAMENTO E FLEXÃO LATERAL DO FURO DA COLUNA ($k_{cwc,h}$ e $k_{cwb,h}$)

As abas da coluna, ao entrarem em contato com a parede lateral do furo da coluna pode gerar o rasgamento e flexão das mesmas. O rasgamento pode ocorrer até a altura da aba (h_t) e a flexão ocorre na parede lateral do furo da coluna com altura l_h . Estas duas são componentes que contribuem com a rigidez rotacional da conexão. A Figura 4.5 representa o modelo utilizado para a obtenção da contribuição desta componente com a rigidez rotacional global da ligação.

Figura 4.5 - Rasgamento e flexão lateral do furo da coluna



Fonte: O autor

A expressão utilizada para a avaliação do rasgamento lateral do furo da coluna foi a equação 4.1:

$$k_{cwc,h} = \frac{E h_t t_{cw}}{d_h} \quad (4.1)$$

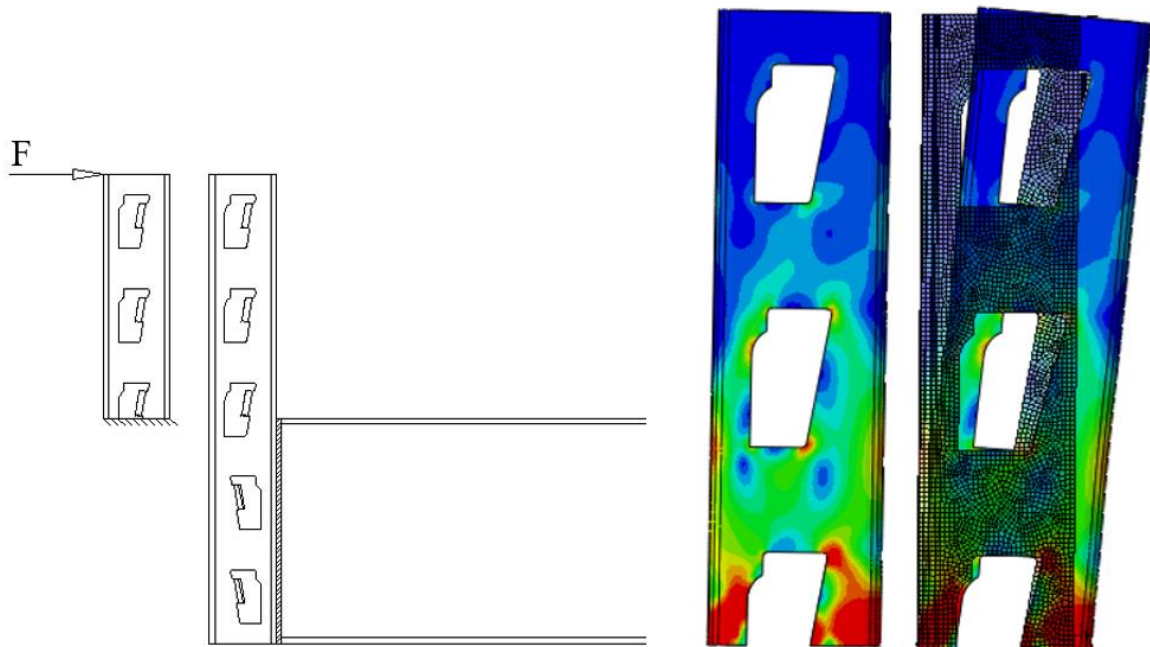
A expressão 4.2 foi utilizada para a avaliação da flexão lateral do furo da coluna:

$$k_{cwb,h} = \frac{32Et_{cw}d_h^3}{l_h^3} \quad (4.2)$$

4.1.1.1.5. CONECTOR EM FLEXÃO E CISALHAMENTO (k_{bcb})

Devido à grande dificuldade de adaptar a expressão do modelo utilizado por Zhao et al. (2017) para a obtenção da rigidez local relativa ao conector em flexão e cisalhamento, foi utilizado o método dos elementos finitos para contornar esta situação. Como o autor utiliza um modelo onde a porção do conector acima da altura da longarina comporta-se como uma viga em balanço, foi extraído um modelo 3D desta porção do conector e engastado na sua parte inferior e aplicada uma força lateral no topo. Foi gerado o gráfico força x deslocamento e, a partir deste, calculada a rigidez através da tangente do ângulo formado pela curva na parte inicial ou linear do gráfico. A Figura 4.6 ilustra o modelo de elementos finitos utilizado para obtenção da rigidez relativa ao conector em flexão e cisalhamento.

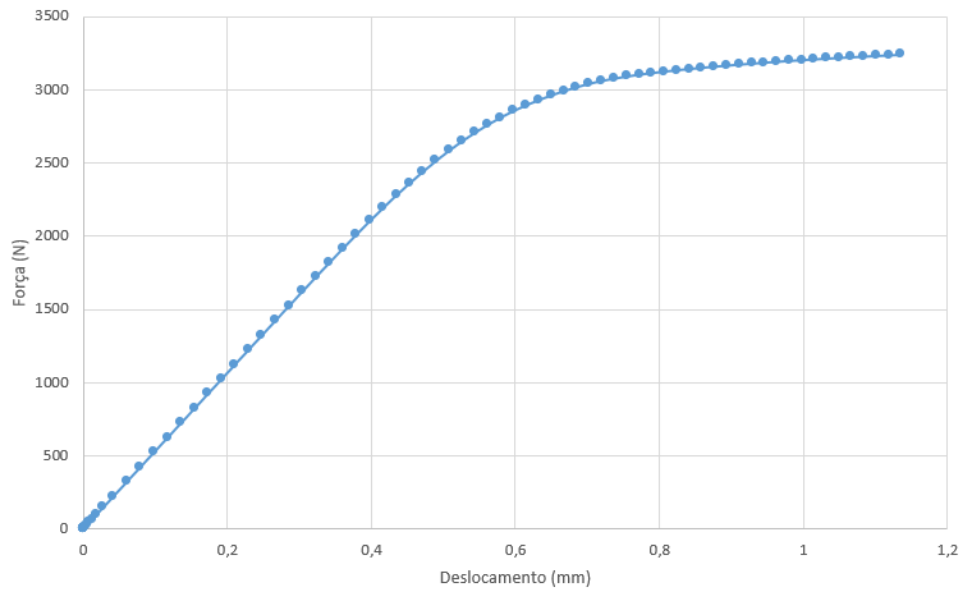
Figura 4.6 - Conector em flexão e cisalhamento



Fonte: O autor

A curva força x deslocamento gerada a partir da análise acima está na Figura 4.7.

Figura 4.7 - Curva força x deslocamento para o conector

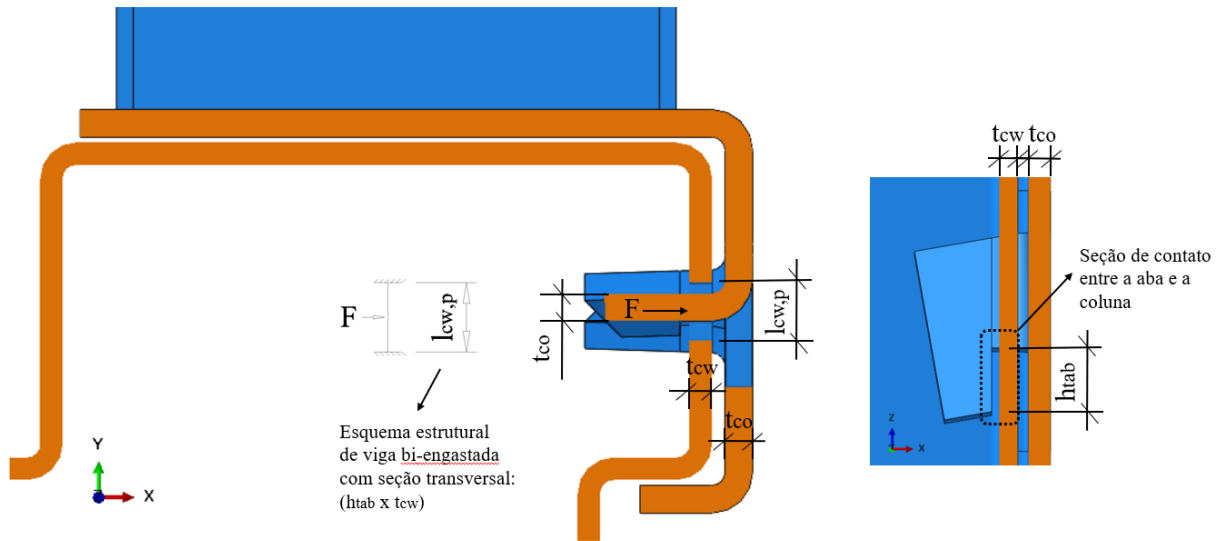


Fonte: O autor

4.1.1.1.6. FLEXÃO INFERIOR DO FURO DA COLUNA ($k_{cwc,v}$)

As abas do conector estão em contato com a espessura inferior dos furos da coluna no estado inicial. Após certo valor de momento fletor aplicado à conexão, as abas superiores do conector entram em contato com a parede lateral do furo causando a flexão e rasgamento da parede lateral do furo da coluna e as abas inferiores permanecem com o contato com a parede inferior do furo na qual gera flexão e rasgamento. A flexão da parede inferior do furo também contribui para a rigidez rotacional da ligação. A Figura 4.8 ilustra esta componente.

Figura 4.8 - Flexão inferior do furo da coluna



Fonte: O autor

A equação 2.36 foi utilizada para a avaliação desta componente e está representada novamente a seguir:

$$k_{cwc,v} = \frac{1}{\frac{\chi l_{cw,p}}{4GA_{cw,p}} + \frac{l_{cw,p}^3}{192EJ_{cw,p}}}$$

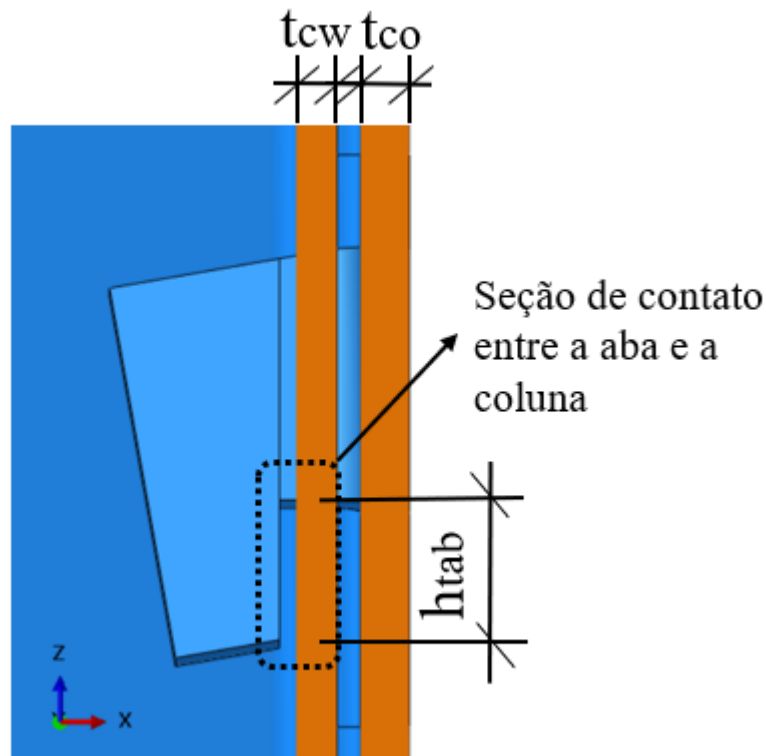
$$\text{onde: } J_{cw,p} = \frac{h_{tab} t_{cw}^3}{12}$$

$$A_{cw,p} = t_{cw} h_{tab}$$

4.1.1.1.7. RASGAMENTO INFERIOR DO FURO DA COLUNA ($k_{cwb,v}$)

Assim como a flexão da parede inferior do furo da coluna, o contato das abas inferiores do conector pode causar o rasgamento inferior do furo da coluna a qual contribui com a rigidez rotacional inicial da ligação. Esta componente está ilustrada na Figura 4.9.

Figura 4.9 - Rasgamento inferior do furo da coluna



Fonte: O autor

A equação 2.37 foi utilizada para a avaliação desta componente e a seguir, ela está novamente representada:

$$k_{cwb,v} = 12k_b k_t h_{tab} f_{u,cw}$$

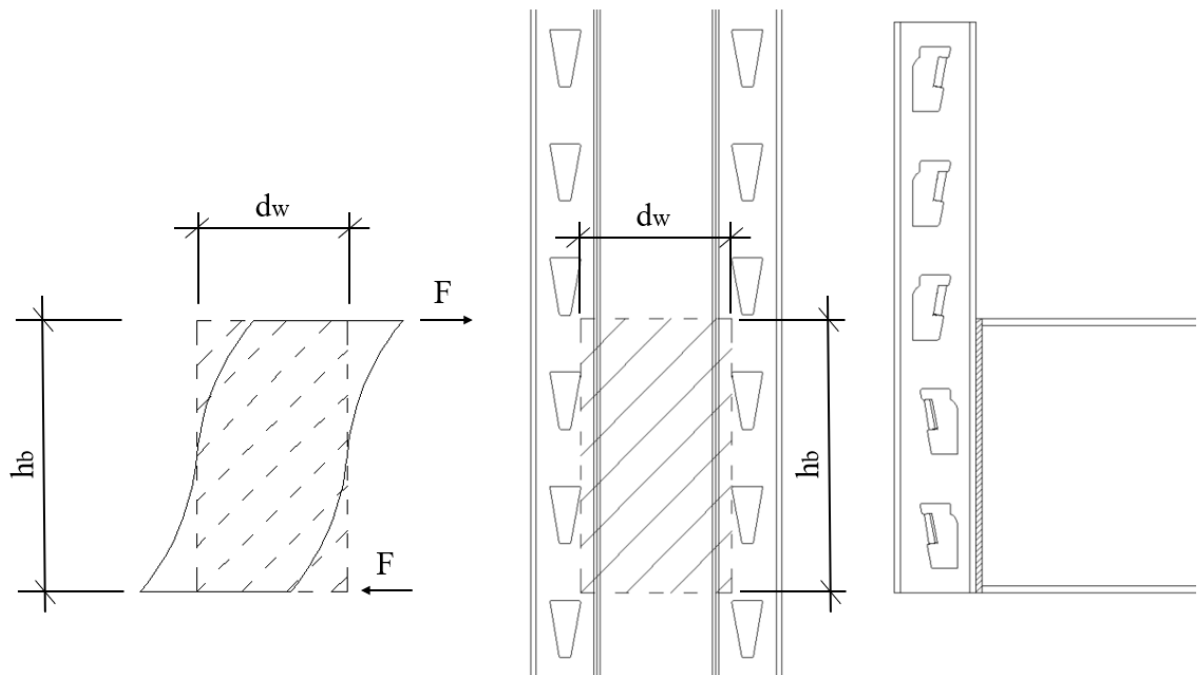
$$\text{onde: } k_b = 1,25$$

$$k_t = \frac{1,5t_{cw}}{16}$$

4.1.1.1.8. ALMA DA COLUNA EM CISALHAMENTO (k_{cws})

Principalmente em conexões onde a longarina está apenas em um dos lados da coluna, como é o caso do ensaio contido nesta dissertação, a contribuição da alma da coluna em cisalhamento deve ser levada em consideração. A deflexão da alma da coluna devido ao momento fletor é pequena, então pode-se considerar uma tensão de cisalhamento puro. A Figura 4.10 ilustra a componente da alma da coluna em cisalhamento.

Figura 4.10 - Alma da coluna em cisalhamento



Fonte: O autor

A equação 2.38 foi utilizada para a avaliação desta componente a qual está representada novamente a seguir:

$$k_{cws} = \frac{2Gt_{cw}d_w}{h_b}$$

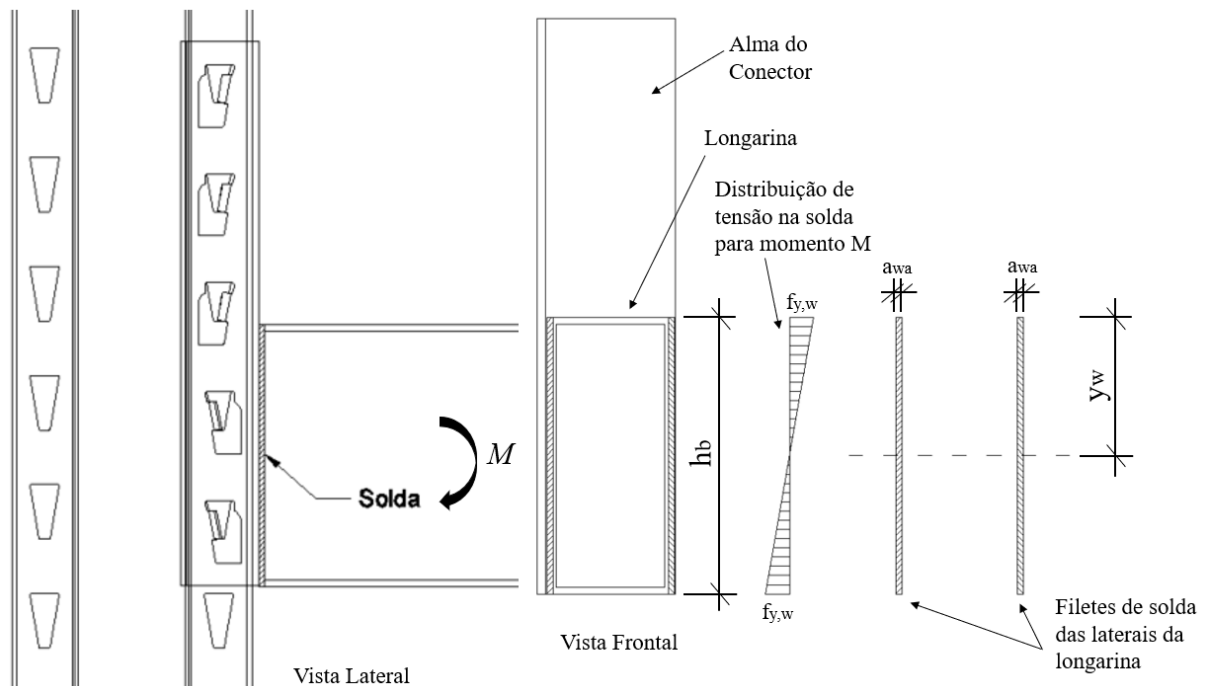
4.1.1.2.RESISTÊNCIA

A seguir, são apresentadas as componentes locais identificadas que contribuem para o momento fletor resistente da conexão.

4.1.1.2.1. SOLDA (F_{wel})

A solda no conjunto faz a função de conectar a longarina à alma do conector. No caso da conexão em estudo desta dissertação, a solda está localizada na altura da longarina nos dois lados. A componente solda é considerada apenas no cálculo da resistência da conexão assumindo-se uma distribuição elástica da tensão e a tensão de escoamento sendo atingida nas fibras mais externas. A Figura 4.11 ilustra a componente solda.

Figura 4.11 - Solda



Fonte: O autor

A expressão 2.6 foi utilizada para a avaliação desta componente e está representada novamente a seguir:

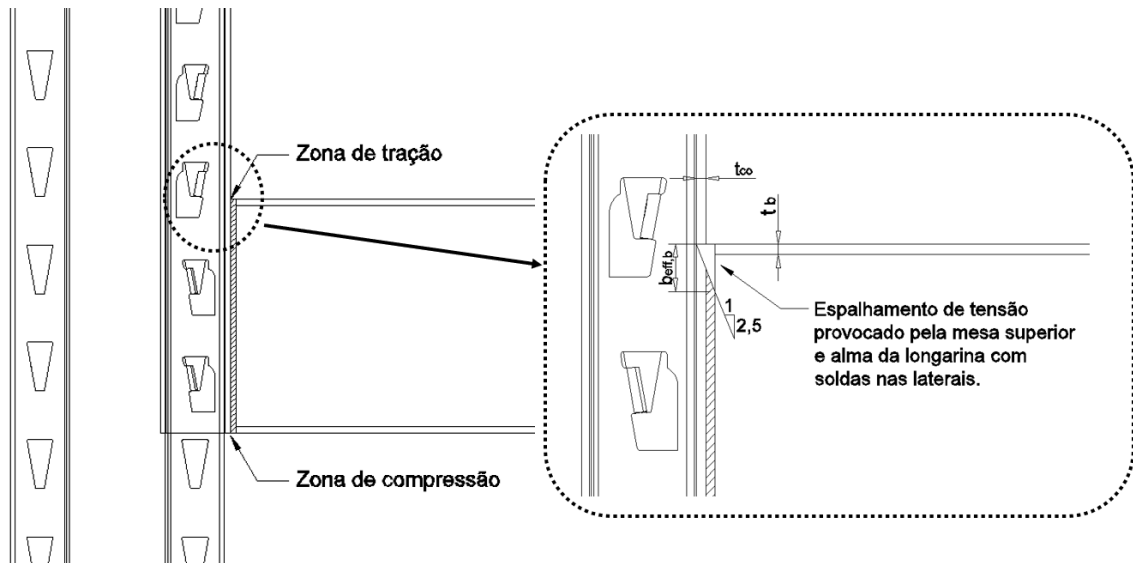
$$F_{wel} = \frac{M_{max,b}}{h_b} = \frac{J_w f_{y,w}}{h_b y_w}$$

onde: $J_w = \frac{a_{wa}(2y_w)^3}{12}$

4.1.1.2.2. MESA DA LONGARINA EM TRAÇÃO E COMPRESSÃO ($F_{bf,t}$ e $F_{bf,c}$)

A mesa superior da longarina em tração e a mesa inferior em compressão contribuem com a resistência da conexão. Para a avaliação desta componente foi utilizada a consideração contida em Ślęczka e Kozłowski (2008) e EN 15512 (2009) onde foi proposta uma inclinação de espalhamento de tensão de 1:2,5 na zona de tração, quando se trata da avaliação da resistência. A Figura 4.12 ilustra esta componente.

Figura 4.12 - Mesa da longarina em tração e compressão



Fonte: O autor

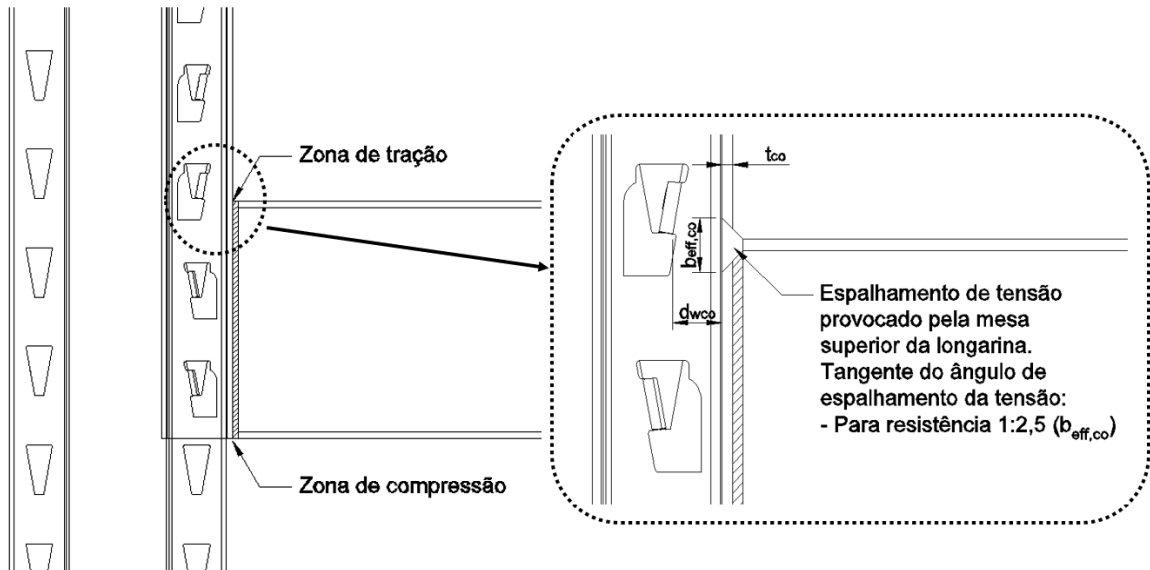
A expressão 2.7 foi utilizada para a avaliação desta componente e está representada novamente a seguir:

$$F_{bf,t} = F_{bf,c} = b_{eff,b} t_b f_{y,b}$$

4.1.1.2.3. ALMA DO CONECTOR EM TRAÇÃO E COMPRESSÃO ($F_{cow,t}$ e $F_{cow,c}$)

A alma do conector sofre esforços de compressão na parte inferior e tração na parte superior devido a ação da longarina que está conectada a ele através da solda. A inclinação de espalhamento de tensão é de 1:2,5 na zona de tração, quando se trata da avaliação da resistência. Esta é outra componente que influencia na resistência da conexão e que está ilustrada na Figura 4.13.

Figura 4.13 - Alma do conector em tração e compressão



Fonte: O autor

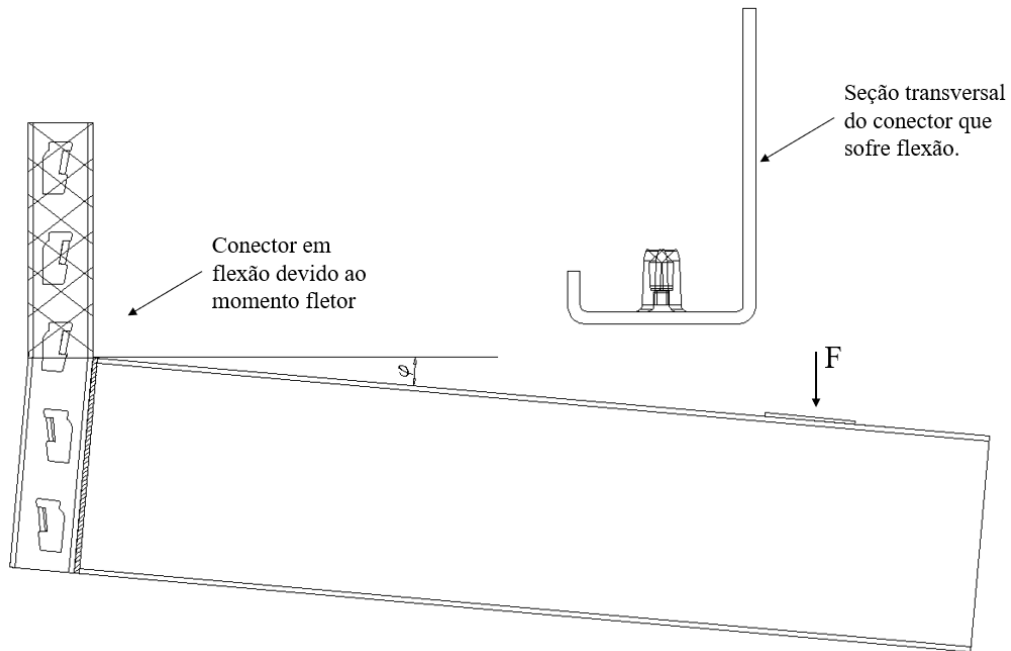
A equação 2.8 foi utilizada para a avaliação desta componente e está representada novamente a seguir:

$$F_{cow,t} = F_{cow,c} = \omega_{co} b_{eff,co} t_{co} f_{y,co}$$

4.1.1.2.4. CONECTOR EM FLEXÃO ($M_{co,b}$)

A ação da longarina no conector faz com que este sofra flexão. Sua resistência a flexão ($M_{co,b}$) pode ser assumida como a resistência plástica de uma viga em balanço sendo esta a parte do conector que está acima da longarina e a qual sofre a flexão. A Figura 4.14 ilustra a seção transversal do conector que sofre flexão.

Figura 4.14 - Conector em flexão



Fonte: O autor

A expressão 2.9 foi utilizada para a avaliação desta componente e está representada novamente a seguir:

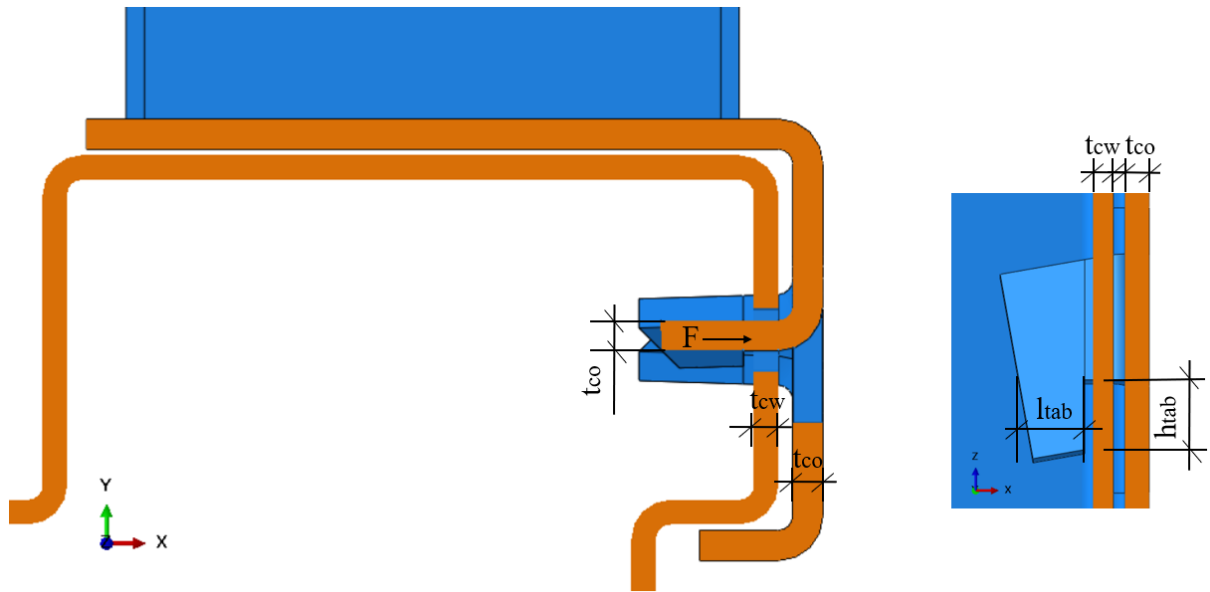
$$M_{co,b} = W_{pl,co} f_{y,co}$$

onde: $W_{pl,co}$ é o módulo plástico da seção transversal do conector

4.1.1.2.5. ABA DO CONECTOR EM CISALHAMENTO ($F_{t,s}$)

A aba do conector, ao ser solicitada, sofre deformações que ocasionam sua flexão. Esta tem influência na rigidez da conexão. Após a flexão, as abas começam a ser solicitadas por cisalhamento. Este também ocasiona o rasgamento do furo da coluna ao qual está em contato. A componente da aba do conector em cisalhamento influencia na resistência ao momento fletor da conexão com relação a resistência última da aba ao cisalhamento. A porção da aba que está em cisalhamento é denominada l_{tab} e a parte que entra em contato com o furo da coluna é denominada h_{tab} . A Figura 4.15 ilustra esta componente.

Figura 4.15 - Aba do conector em cisalhamento



Fonte: O autor

A equação 2.10 foi utilizada para a avaliação desta componente e está novamente representada a seguir:

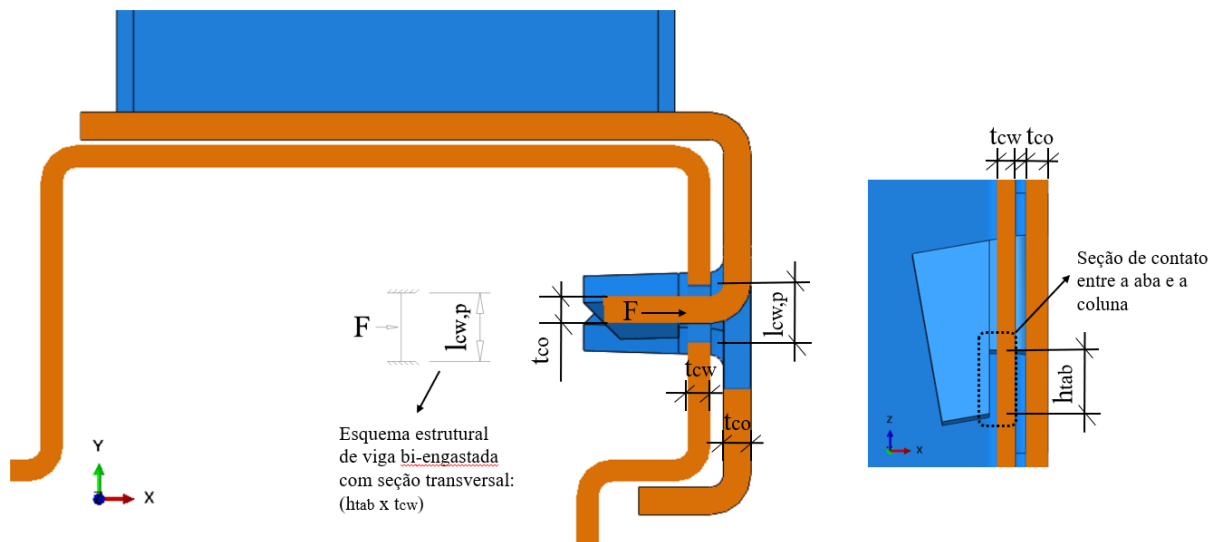
$$F_{t,s} = \frac{f_{u,co} A_{v,tab}}{\sqrt{3}}$$

$$\text{onde: } A_{v,tab} = l_{tab} t_{co}$$

4.1.1.2.6. RASGAMENTO E FLEXÃO INFERIOR NO FURO DA COLUNA ($F_{cw,p}$ e $F_{cw,b}$)

As abas do conector, ao serem submetidas aos esforços de momento fletor na conexão, agem sobre os furos da coluna onde estão encaixadas. A parte inferior das abas entram em contato com a parede do furo da coluna podendo causar o rasgamento e a flexão do mesmo. Para o rasgamento, pode-se fazer a mesma consideração feita para a rigidez onde a parede inferior do furo da coluna pode ser tomada como uma viga bi engastada que sofre o esforço de uma força pontual da aba do conector no meio do vão. Estas componentes dependem da resistência última da coluna e contribuem para a o momento resistente da conexão e estão ilustradas na Figura 4.16.

Figura 4.16 - Rasgamento e flexão inferior no furo da coluna



Fonte: O autor

A equação 2.11 foi utilizada para a avaliação do rasgamento inferior no furo da coluna e está representada novamente a seguir:

$$F_{cw,p} = 0,6d_m t_{cw} f_{u,cw}$$

$$\text{onde: } d_m = t_{tab} + 2h_{tab}$$

A equação 2.12 foi utilizada para a avaliação da flexão inferior no furo da coluna ou amassamento da mesma:

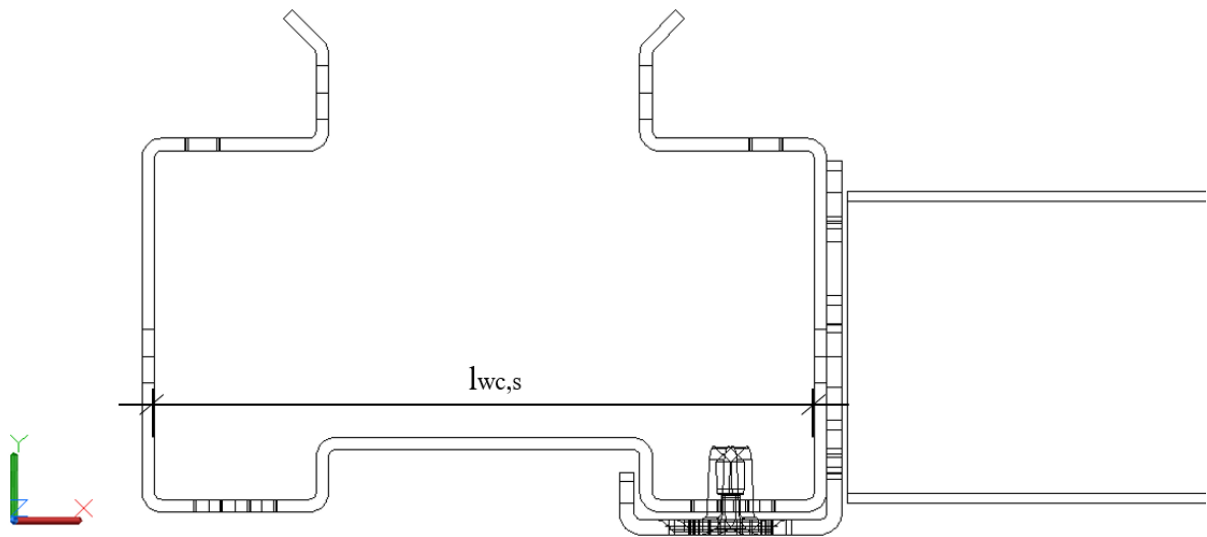
$$F_{cw,b} = 2,5\alpha f_{u,cw} h_{tab} t_{cw}$$

$$\text{onde: } \alpha = \frac{f_{u,co}}{f_{u,cw}}$$

4.1.1.2.7. ALMA DA COLUNA EM CISALHAMENTO ($F_{cw,s}$)

Assim como para a rigidez rotacional inicial da conexão, a componente da alma da coluna em cisalhamento também contribui com a resistência ao momento fletor. Para as ligações em que a longarina se encontra em um dos lados da coluna, ocorre o efeito de cisalhamento na alma da coluna que se deve à aplicação do momento fletor na ligação. O comprimento da alma da coluna está ilustrado na Figura 4.17.

Figura 4.17 - Comprimento da alma da coluna



Fonte: O autor

A expressão 2.18 foi utilizada para a avaliação desta componente:

$$F_{t,s} = \frac{f_{y,cw} A_{vc,net}}{\sqrt{3}}$$

onde: $A_{vc,net} = l_{cw,s} t_{cw} - (\text{largura dos furos})$

4.1.2. AVALIAÇÃO DAS COMPONENTES

A avaliação de cada componente identificada no item anterior será exposta neste item. Os valores obtidos para rigidez e resistência estão em função da geometria, material dos elementos da conexão e a interação entre eles. Dentre estes elementos estão: coluna, conector, longarina e solda. Para manter o sigilo do fabricante com relação aos detalhes de geometrias e espessuras utilizadas, o detalhamento dos cálculos não será exposto, apenas os valores finais obtidos através das fórmulas contidas no item anterior.

4.1.2.1. RIGIDEZ

A rigidez rotacional inicial global da conexão depende da contribuição à rigidez local de cada componente identificada. Desta forma, cada componente contribui com certa rigidez linear, que pode ser representada por uma mola. Para a obtenção da rigidez rotacional é preciso elaborar um modelo mecânico onde todas as molas e os respectivos braços de alavanca em relação ao centro de rotação estão posicionados e, posteriormente, fazer a transformação destas

molares lineares em molares rotacionais. Na Tabela 4.1 estão os valores de rigidez linear das componentes da conexão identificadas no item anterior.

Tabela 4.1 - Rigidez linear das componentes mecânicas

Elemento	Componente	Valor	Unidade
Longarina	$k_{cow,t}$	458.568	N/mm
	$k_{cow,c}$	458.568	N/mm
Conector	k_{cotb}	8.851	N/mm
	k_{tb}	9.277	N/mm
	$k_{cwc,h}$	506.994	N/mm
	$k_{cwb,h}$	953.956	N/mm
	k_{bcb}	5.331	N/mm
	$k_{cwc,v}$	10.042	N/mm
	$k_{cwb,v}$	56.457	N/mm
Coluna	k_{cws}	178.554	N/mm

Fonte: O autor

Nota-se a partir da Tabela 4.1 que a componente que tem o maior valor de rigidez linear é a flexão lateral do furo da coluna, portanto pode-se inferir que o contato lateral da aba do conector com a parede do furo da coluna tem grande influência na rigidez rotacional global da conexão.

4.1.2.2.RESISTÊNCIA

O momento fletor resistente da conexão depende da contribuição das componentes resistentes do conjunto identificadas. A avaliação da força resistente de cada componente está exposta na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Força resistente das componentes mecânicas

Elemento	Componente	Valor	Unidade
Solda	F_{wel}	33.600	N
Longarina	$F_{bf,t}$	19.148	N
	$F_{bf,c}$	19.148	N
	$F_{cow,t}$	22.356	N
	$F_{cow,c}$	22.356	N
Conector	$M_{co,b}$	880.095	N.mm
	$F_{t,s}$	4.346	N
	$F_{cw,p}$	8.824	N
	$F_{cw,b}$	15.683	N
Coluna	$F_{cw,s}$	31.503	N

Fonte: O autor

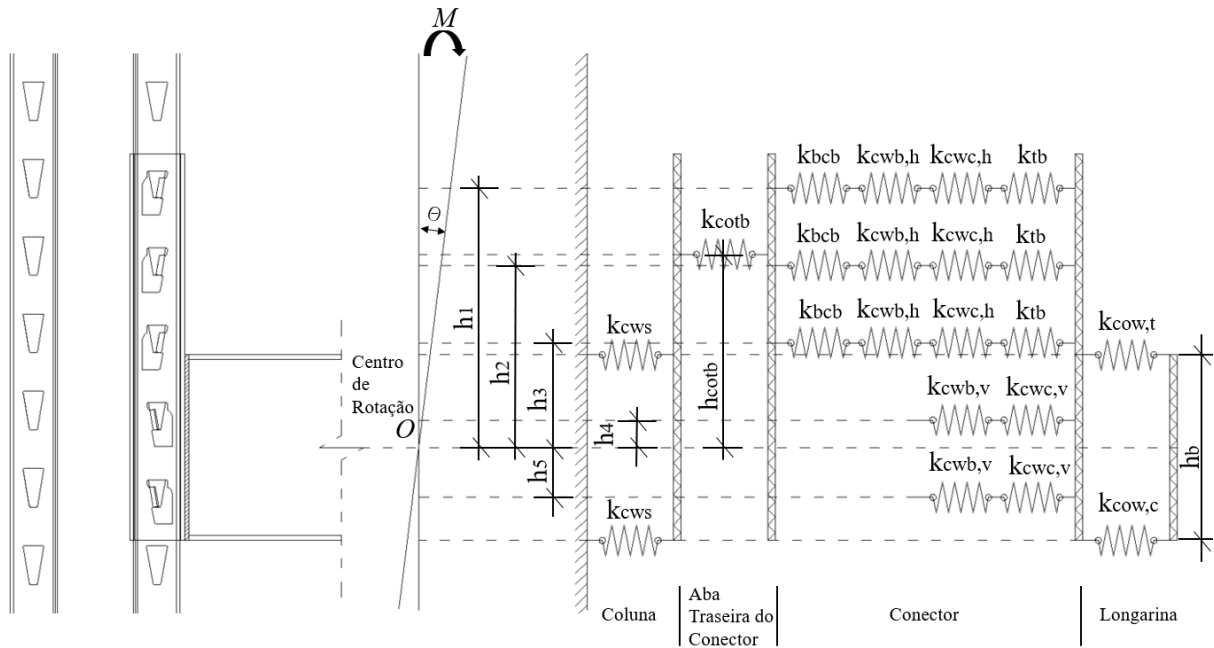
4.1.3. AVALIAÇÃO GLOBAL DA CONEXÃO

O terceiro passo do método das componentes consiste em avaliar o comportamento conjunto das componentes individuais, que foram identificadas e avaliadas nos passos anteriores. Para avaliar a rigidez rotacional inicial e o momento fletor resistente da conexão, é desenvolvido um modelo mecânico de molas em paralelo e em série. Nos itens a seguir, a rigidez e a resistência serão avaliadas.

4.1.3.1. RIGIDEZ

As componentes que contribuem com a rigidez rotacional inicial da ligação foram identificadas e avaliadas nos itens anteriores e, neste item, um modelo mecânico é esquematizado para que seja possível a obtenção da rigidez global da ligação. Na Figura 4.18 está representado o modelo mecânico para a rigidez da ligação, onde cada componente é representada por uma mola. As posições das componentes em relação ao centro de rotação também estão representadas.

Figura 4.18 - Modelo mecânico para rigidez da ligação



Fonte: O autor

No modelo mecânico foram separadas as componentes contribuintes relacionadas à coluna, aba traseira do conector, conector e longarina. Considerou-se que o centro de rotação da ligação está na metade da altura da longarina (h_b). As distâncias dos dentes do conector ao centro de rotação estão representadas pela letra h_i .

4.1.3.1.1. RIGIDEZ ROTACIONAL RELATIVA AO CISALHAMENTO DA COLUNA ($k_{cws-\varphi}$)

Para avaliar a rigidez rotacional relativa ao cisalhamento da coluna, foi utilizada a equação 4.3 que está contida em Zhao et al. (2017).

$$k_{cws-\varphi} = Gt_{cw}d_w h_b \tag{4.3}$$

O valor encontrado para a rigidez rotacional desta componente foi de:

$$k_{cws-\varphi} = 1.285.587.692 \text{ N.mm/rad}$$

$$k_{cws-\varphi} = 1.286 \text{ kN.m/rad}$$

4.1.3.1.2. RIGIDEZ ROTACIONAL RELATIVA À ABA TRASEIRA DO CONECTOR ($k_{cotb-\varphi}$)

Para a rigidez rotacional relativa à aba traseira do conector foi considerado que o ponto de ação da componente está localizado no centro da porção do conector que está acima da longarina. Esta distância, como já foi exposta anteriormente foi denominada como h_t .

De acordo com Zhao et al. (2017), para calcular a rigidez rotacional equivalente de uma componente, a seguinte equação 4.4 pode ser aplicada.

$$k_{cotb-\varphi} = \sum_{i=1}^n k_i^* h_{cotb}^2 \quad (4.4)$$

Onde k_i^* é a rigidez linear equivalente relativa à componente da aba traseira do conector e h_{cotb} é a distância do ponto de aplicação da componente até o centro de rotação do modelo mecânico, que está representado na Figura 4.18.

Desta forma, pode-se inferir que a rigidez rotacional desta componente é de:

$$k_{cotb-\varphi} = 8.850,7(h_{cotb})^2 = 138.292.683 \text{ N.mm/rad}$$

$$k_{cotb-\varphi} = 138 \text{ kN.m/rad}$$

4.1.3.1.3. RIGIDEZ ROTACIONAL RELATIVA AOS DENTES DO CONECTOR ($k_{tb-\varphi}$)

Para a rigidez rotacional relativa aos dentes do conector foi feito o mesmo processo do item anterior onde calculou-se a rigidez linear equivalente (k_i^*) relativa às componentes encontradas para os dentes do conector e, posteriormente, calculada a rigidez rotacional ($k_{tb-\varphi}$).

A rigidez linear equivalente para os dentes do conector contou com a contribuição das componentes que estão expostas na Figura 4.18, para cada dente. As distâncias de cada dente ao centro de rotação do modelo mecânico também estão representadas na figura. Portanto, a rigidez linear equivalente de cada dente foi calculada de acordo com as seguintes relações.

$$\text{Dente 1: } k_1^* = \frac{1}{\frac{1}{k_{tb}} + \frac{1}{k_{cwc,h}} + \frac{1}{k_{cwb,h}} + \frac{1}{k_{bcb}}}$$

$$\text{Dente 2: } k_2^* = \frac{1}{\frac{1}{k_{tb}} + \frac{1}{k_{cwc,h}} + \frac{1}{k_{cwb,h}} + \frac{1}{k_{bcb}}}$$

$$\text{Dente 3: } k_3^* = \frac{1}{\frac{1}{k_{tb}} + \frac{1}{k_{cwc,h}} + \frac{1}{k_{cwb,h}} + \frac{1}{k_{bcb}}}$$

$$\text{Dente 4: } k_4^* = \frac{1}{\frac{1}{k_{cwc,v}} + \frac{1}{k_{cwb,v}}}$$

$$\text{Dente 5: } k_5^* = \frac{1}{\frac{1}{k_{cwc,v}} + \frac{1}{k_{cwb,v}}}$$

Para o cálculo da rigidez rotacional relativa aos dentes do conector, a seguinte equação 4.4 foi utilizada.

$$k_{tb-\varphi} = \sum_{i=1}^n k_i^* h_i^2 \quad (4.4)$$

Onde i representa a cada um dos cinco dentes do conector.

Desta forma, pode-se inferir que a rigidez rotacional desta componente é de:

$$k_{tb-\varphi} = k_1^* h_1^2 + k_2^* h_2^2 + k_3^* h_3^2 + k_4^* h_4^2 + k_5^* h_5^2$$

$$k_{tb-\varphi} = 167.851.293 \text{ N.mm/rad}$$

$$k_{tb-\varphi} = 168 \text{ kN.m/rad}$$

4.1.3.1.4. RIGIDEZ ROTACIONAL RELATIVA À ALMA DO CONECTOR EM TRAÇÃO E COMPRESSÃO ($k_{cow-\varphi}$)

Para a rigidez rotacional relativa à alma do conector em tração e compressão foi utilizado o mesmo processo feito anteriormente onde calculou-se a rigidez linear equivalente (k_i^*) relativa às componentes de tração e compressão que agem na alma do conector e, posteriormente, calculada sua rigidez rotacional ($k_{cow-\varphi}$).

Os valores da rigidez linear tanto da tração como da compressão na alma do conector estão contidos na Tabela 4.1. Para o cálculo da rigidez rotacional relativa à alma do conector em tração e compressão, a equação 4.5 foi utilizada.

$$k_{cow-\varphi} = \sum_{i=1}^n k_i^* h_i^2 \quad (4.5)$$

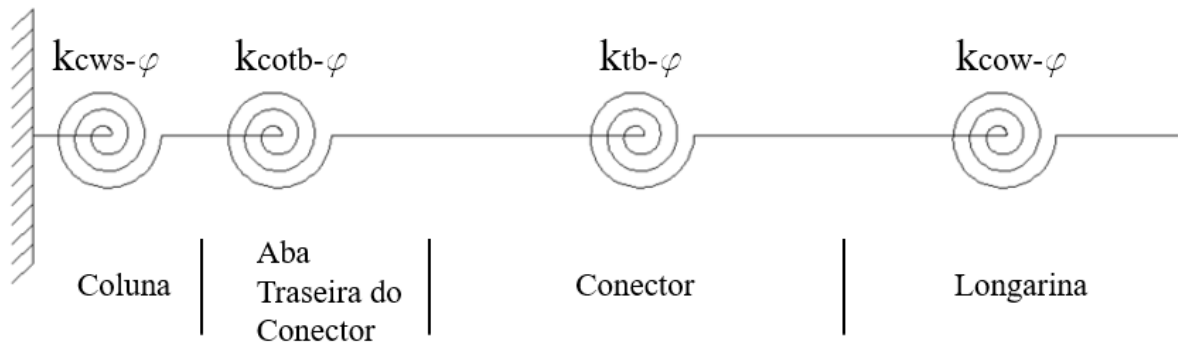
Desta forma, pode-se inferir que a rigidez rotacional desta componente é de:

$$k_{cow-\varphi} = k_{cow,t} \left(\frac{h_b}{2}\right)^2 + k_{cow,c} \left(\frac{h_b}{2}\right)^2$$

4.1.3.1.5. RIGIDEZ ROTACIONAL INICIAL

Ajustando-se o modelo mecânico com a rigidez rotacional de cada elemento da ligação, tem-se molas rotacionais em séries, que estão representadas na Figura 4.19.

Figura 4.19 - Molas rotacionais em série



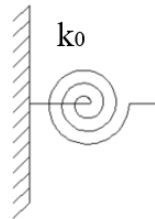
Fonte: O autor

A partir deste modelo mecânico, a equação 4.6 foi formada.

$$k_0 = \frac{1}{\frac{1}{k_{cws-\varphi}} + \frac{1}{k_{cotb-\varphi}} + \frac{1}{k_{tb-\varphi}} + \frac{1}{k_{cow-\varphi}}} \quad (4.6)$$

Transformando-se as molas rotacionais que estão em série em uma mola rotacional equivalente, representada pela Figura 4.20, obtém-se o valor da rigidez rotacional inicial da ligação.

Figura 4.20 - Rigidez rotacional inicial da ligação



Fonte: O autor

Desta forma, pode-se inferir que o valor da rigidez rotacional inicial da ligação é:

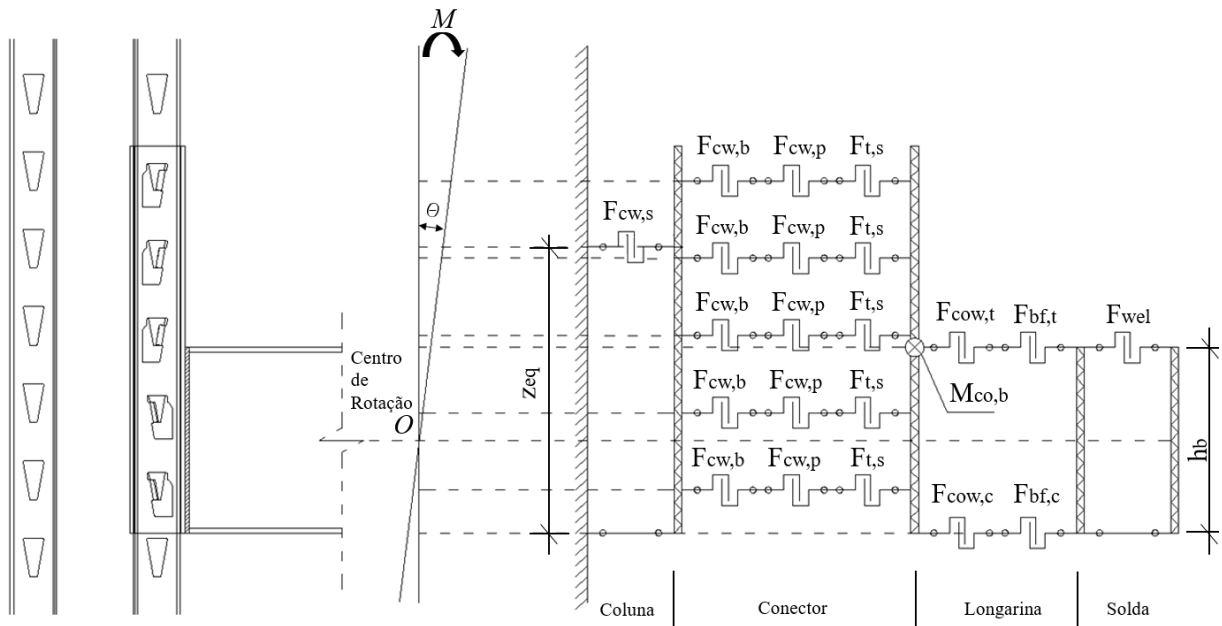
$$k_0 = 70.079.910 \text{ N.mm/rad}$$

$$k_0 = 70 \text{ kN.m/rad}$$

4.1.3.2.RESISTÊNCIA

As componentes que contribuem com a resistência da ligação foram identificadas e avaliadas nos itens anteriores e, neste item, um modelo mecânico é esquematizado para a obtenção da resistência ao momento fletor. Na Figura 4.21 está representado o modelo mecânico para a resistência da ligação, onde cada componente é representada por molas. As posições das componentes em relação ao centro de rotação também estão representadas.

Figura 4.21 - Modelo mecânico para a resistência ao momento fletor da ligação



Fonte: O autor

O modelo mecânico representado na Figura 4.21 prevê a resistência ao momento fletor da conexão em estudo. Nele estão representados: a mola referente à solda entre a longarina e a alma do conector no nível da mesa superior da longarina já que ali ocorre a maior tensão de tração quando aplicado o momento fletor; as molas referentes à longarina que estão no nível das mesas superior e inferior da seção transversal da mesma; as molas referentes ao conector que estão no nível de cada dente e a mola referente à coluna em cisalhamento que está no nível de z_{eq} . Está também representado a resistência ao momento fletor da porção do conector que está acima da longarina ($M_{co,b}$).

O próximo passo é avaliar os menores valores de cada nível ou linha de molas de cada elemento, ou seja, tomar o menor valor das linhas de mola referentes à solda, à longarina, ao conector e à coluna. Assim, as forças resistentes a serem utilizadas são as seguintes.

$$\text{Solda: } F_{menor,wel} = menor(F_{wel})$$

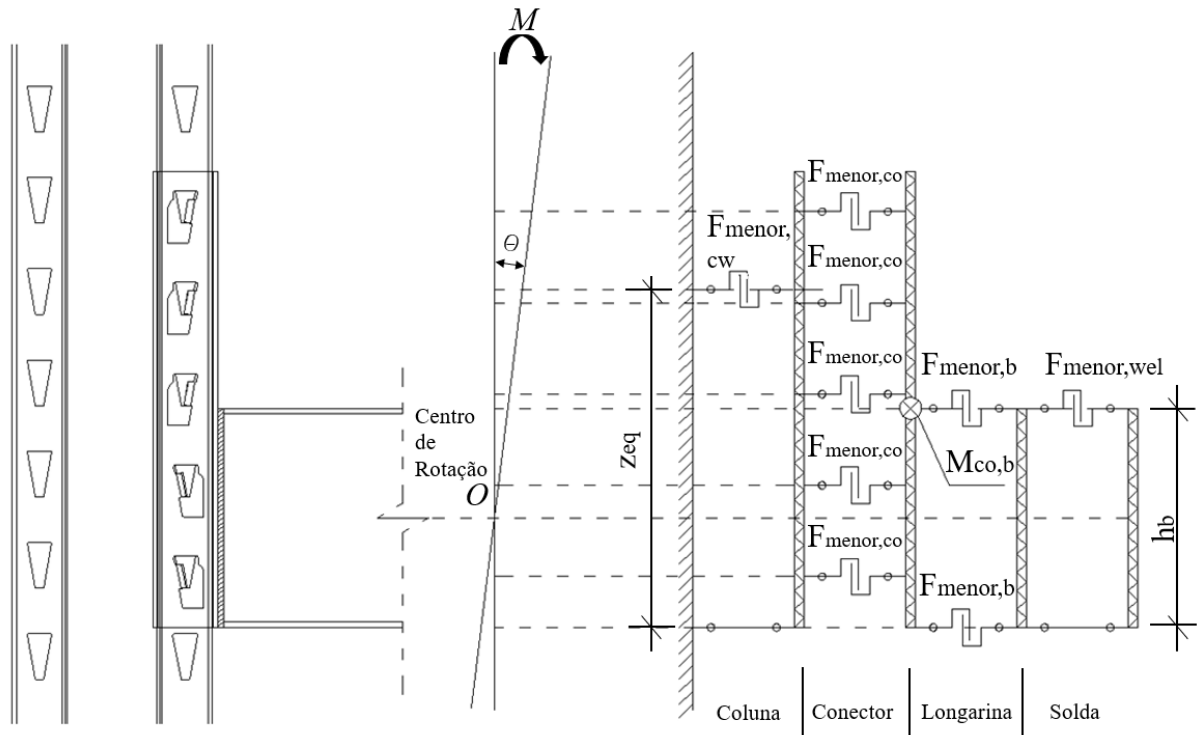
$$\text{Longarina: } F_{menor,b} = menor(F_{cow,i}; F_{bf,i})$$

$$\text{Conector: } F_{menor,co} = menor(F_{cw,b}; F_{cw,p}; F_{t,s})$$

$$\text{Coluna: } F_{menor,cw} = menor(F_{cw,s})$$

O modelo mecânico pode então ser modificado para o modelo contido na seguinte Figura 4.22 onde estão representados os menores valores das linhas componentes de cada elemento da ligação.

Figura 4.22 - Modelo mecânico para momento fletor resistente modificado



Fonte: O autor

O momento fletor resistente da conexão é encontrado fazendo-se a multiplicação das forças por seus respectivos braços de alavanca. A seguir, os valores finais de momento fletor resistente, encontrados para cada elemento da ligação

$$\text{Solda: } M_{u,wel} = F_{menor,wel} h_b = 4.032.000 \text{ N. mm}$$

$$\text{Longarina: } M_{u,b} = F_{menor,b} h_b = 4.595.400 \text{ N. mm}$$

$$\text{Conector: } M_{u,co} = M_{co,b} + F_{menor,co} (h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5) = 2.633.557 \text{ N. mm}$$

$$\text{Coluna: } M_{u,cw} = F_{menor,cw} Z_{eq} = 6.008.927 \text{ N. mm}$$

A partir destes valores encontrados, nota-se que o conector apresenta o menor valor, portanto pode-se inferir que o valor do momento fletor resistente da ligação é:

$$M_{u,num} = 2.633.557 \text{ N. mm}$$

$$M_{u,num} = 2,63 \text{ kN. m}$$

4.2. ANÁLISE NUMÉRICA

A análise numérica para obtenção da rigidez rotacional inicial e do momento fletor resistente da ligação entre longarina e coluna, performada através do *software* Abaqus foi realizada seguindo os procedimentos, para ensaio laboratorial, preconizados pela norma europeia EN 15512 (2009). Devido à elevada não linearidade característica do modelo da conexão, foram utilizados elementos sólidos e, para os cálculos realizados pelo programa, foi utilizada a técnica de continuação do comprimento de arco. A não linearidade do material também foi pré-estabelecida no programa.

4.2.1. ESTUDO DO MODELO

Devido à complexidade envolvida no modelo de elementos finitos da conexão objeto de estudo desta dissertação, um estudo preliminar foi feito. Esse estudo abordou parâmetros relativos à geometria, tamanho de malha e contato entre as partes.

4.2.1.1. GEOMETRIA

Como a geometria inicial, fornecida pelo fabricante, foi desenvolvida através de *software* CAD, vários detalhes de fabricação e montagem, os quais não influenciam no comportamento estrutural da conexão, foram removidos do modelo. Destes detalhes não estruturais pode-se citar:

- No conector:
 - Repuxos próximos aos furos;
 - Furos destinados a inserção de arames para pendurar a peça durante pintura;
 - Chanfros para evitar pontas vivas nas peças de aço;

- Na coluna:
 - Furos destinados ao encaixe outros elementos que não se relacionam com a conexão objeto de estudo desta dissertação;
 - Furos destinados a inserção de arames para pendurar a peça durante pintura;
 - Chanfros;

- Na longarina:
 - A longarina do fabricante, apesar de ser composta por dois perfis U enrijecidos acoplados e soldados que trabalham de forma conjunta, possui muitos detalhes de dobras e contato que tornariam a sua análise em elementos finitos complexa. Portanto, sua geometria foi simplificada de modo que sua espessura e seção transversal fossem mantidas e apenas uma peça, ao invés de duas, fosse analisada.

4.2.1.2.MALHA

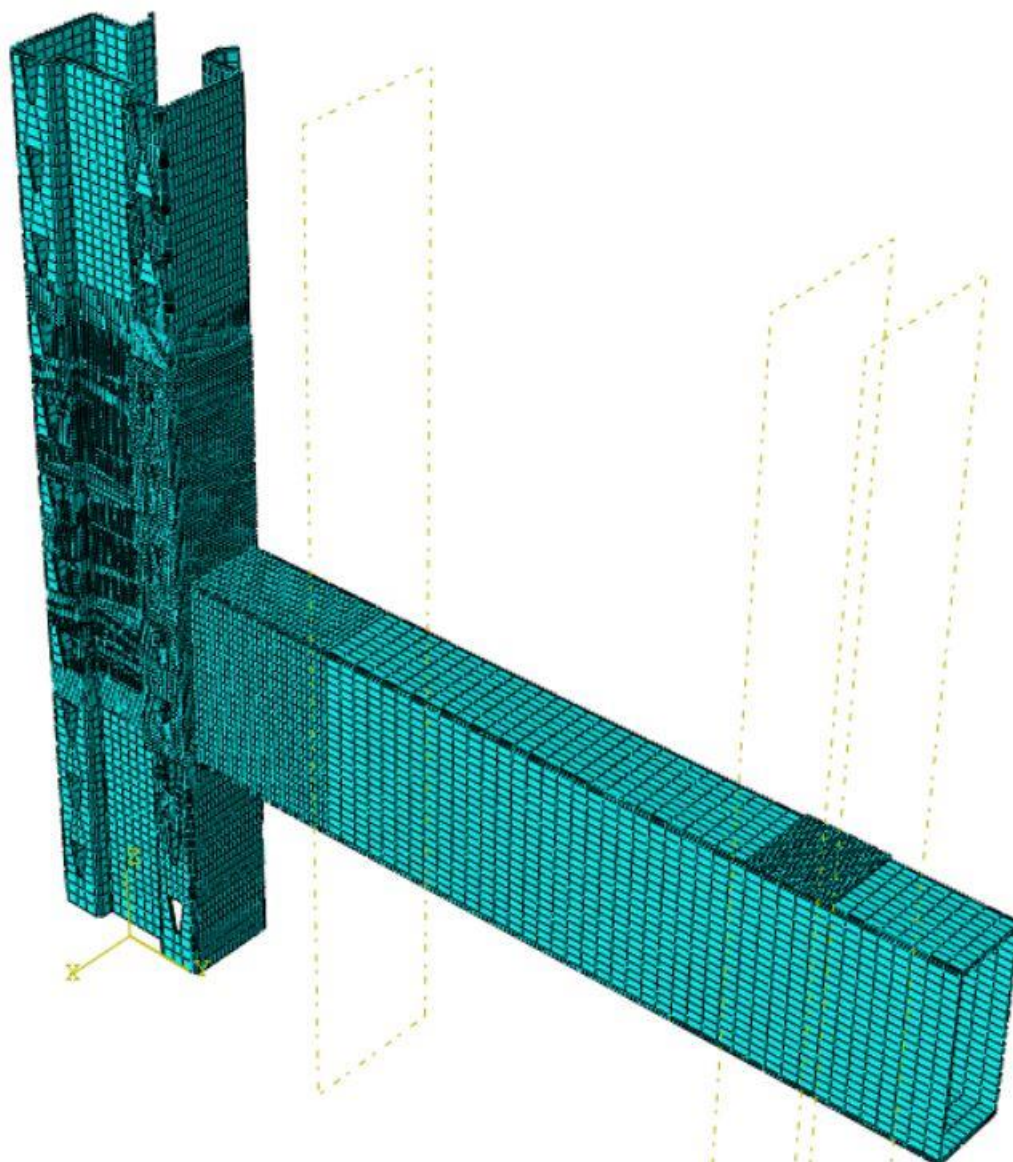
O tamanho da malha de elementos finitos influencia os dados obtidos no pós-processamento, portanto é importante realizar o estudo de convergência relativo ao tamanho da malha, ou seja, se o seu refinamento foi expressivo, ou não, no resultado, comparado ao aumento do tempo e custo computacional. O tipo de malha utilizado para os sólidos desta simulação foi a hexaédrica estruturada linear pois verificou-se durante as tentativas de simulação que esta tinha a melhor performance para convergência em relação a outros tipos de malhas.

Outro ponto importante a se considerar foi relativo às superfícies mestre (*master*) e escrava (*slave*) já que, para evitar a penetração de uma superfície na outra e conseqüentemente erros de convergência, foram adotadas malhas mais finas para superfícies escravas.

Após várias tentativas de convergência o tamanho global da malha nos elementos foi o seguinte:

- Coluna: 7 mm;
- Conector: 4 mm;
- Longarina: 15 mm.

Cabe ressaltar também que as regiões onde há maior concentração de tensões foram subdivididas, através de pontos (*seed edges*), em malhas ainda menores. Por exemplo, no local de contato entre o dente do conector e o furo da coluna, há um aumento significativo da tensão já que o contato ocorre através da espessura do conector com a espessura da coluna. Como as espessuras são finas, houve a necessidade de subdivisão das mesmas. A malha da longarina também teve um refinamento na região de contato com o conector já que há um grande fluxo de tensões que se encaminham nestes pontos. A malha final para o modelo numérico ensaiado ficou como na Figura 4.23.

Figura 4.23 - Malha do modelo numérico

Fonte: O autor

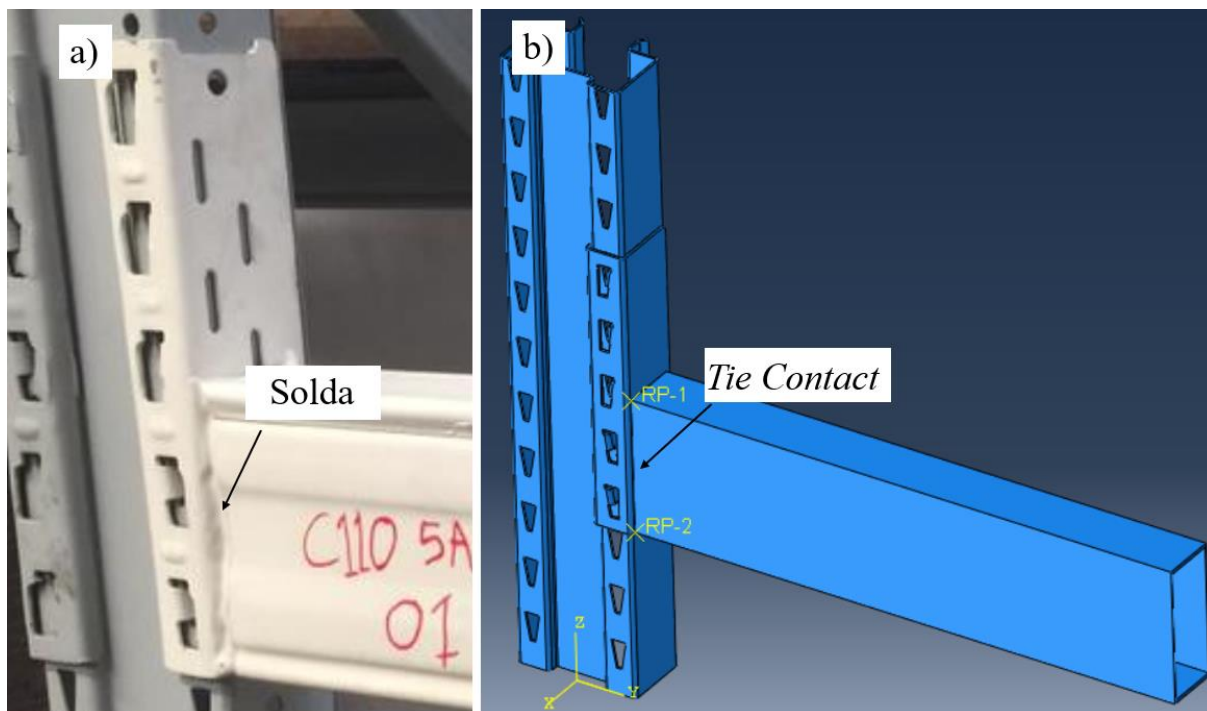
4.2.1.3.CONTATO

O contato entre as partes do modelo tem influência sobre o resultado final e o alto grau de não linearidade somado a complexidade das geometrias e os contatos entre elas, torna a análise complexa.

Para simular o contato entre a chapa de aplicação de força e a mesa superior da longarina foi usado o *tie contact*. Esta chapa tem a função de distribuir melhor a força aplicada e evitar a ocorrência de deformações localizadas na mesa superior da longarina. O mesmo foi feito na região de contato entre a longarina e o conector onde, na prática, as laterais da seção transversal da longarina são soldadas ao conector. Utilizando-se o *tie contact*, pode-se inferir que os nós

da superfície mestre (*master*) estão conectados e trabalham juntos com os nós da superfície escrava (*slave*). A solda entre a longarina e o conector e o local onde foi utilizado o tie contact no Abaqus estão representados na Figura 4.24a e Figura 4.24b.

Figura 4.24 – Ligação entre longarina e conector



Fonte: O autor

Na região de contato entre os dentes do conector e os furos da coluna foi utilizado o contato superfície-superfície (*surface-to-surface-contact*) onde os dentes do conector assim como sua região interna foram caracterizados como superfície mestre e os furos da coluna e sua superfície externa, que entra em contato com o conector foram caracterizadas como superfície escrava.

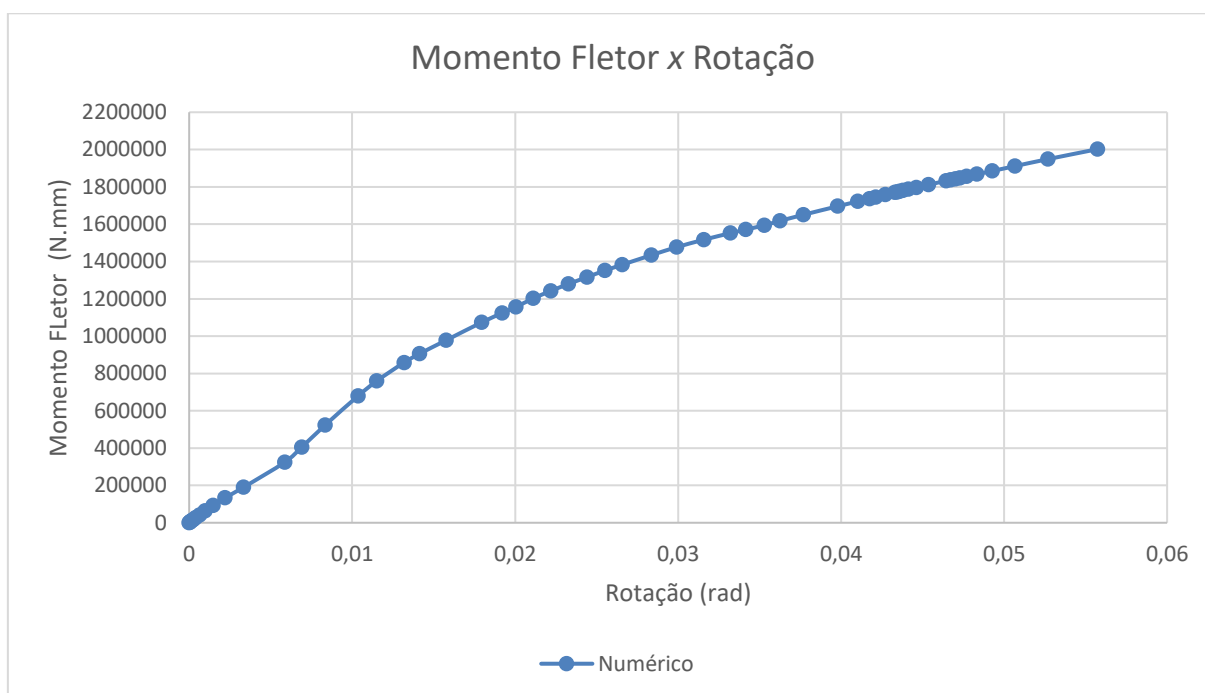
As propriedades mecânicas deste contato foram relativas ao comportamento tangente e normal. Para o comportamento tangente foi inserido um coeficiente de atrito referente ao contato entre elementos de aço. E para o comportamento normal, foi utilizado o “*hard*” *contact*. Para que essas superfícies entrassem em contato, foi aplicado um deslocamento vertical inicial simulando o carregamento inicial para que os elementos se acoplem, ou seja, para que o *software* detecte que existe contato entre os elementos já que inicialmente podem existir folgas no modelo gerado no desenho CAD que façam com que a análise não convirja. Após este procedimento, começou a ser aplicado o carregamento na chapa sobre a longarina.

4.2.2. RESULTADO DA ANÁLISE NUMÉRICA

Os resultados da análise numérica foram satisfatórios já que a simulação convergiu considerando-se a não linearidade material e geométrica da conexão, o que fez com que se aproximasse do comportamento real da ligação. Como a geometria dos elementos simulados possui alta complexidade, as simplificações feitas no modelo de elementos finitos podem ter causado algum desvio com relação aos resultados finais das outras análises realizadas neste trabalho.

A partir do procedimento já descrito anteriormente no capítulo 3, os dados de deslocamento e força foram extraídos e posteriormente gerado o gráfico momento fletor x rotação que está representado na Figura 4.25.

Figura 4.25 - Gráfico momento fletor x rotação



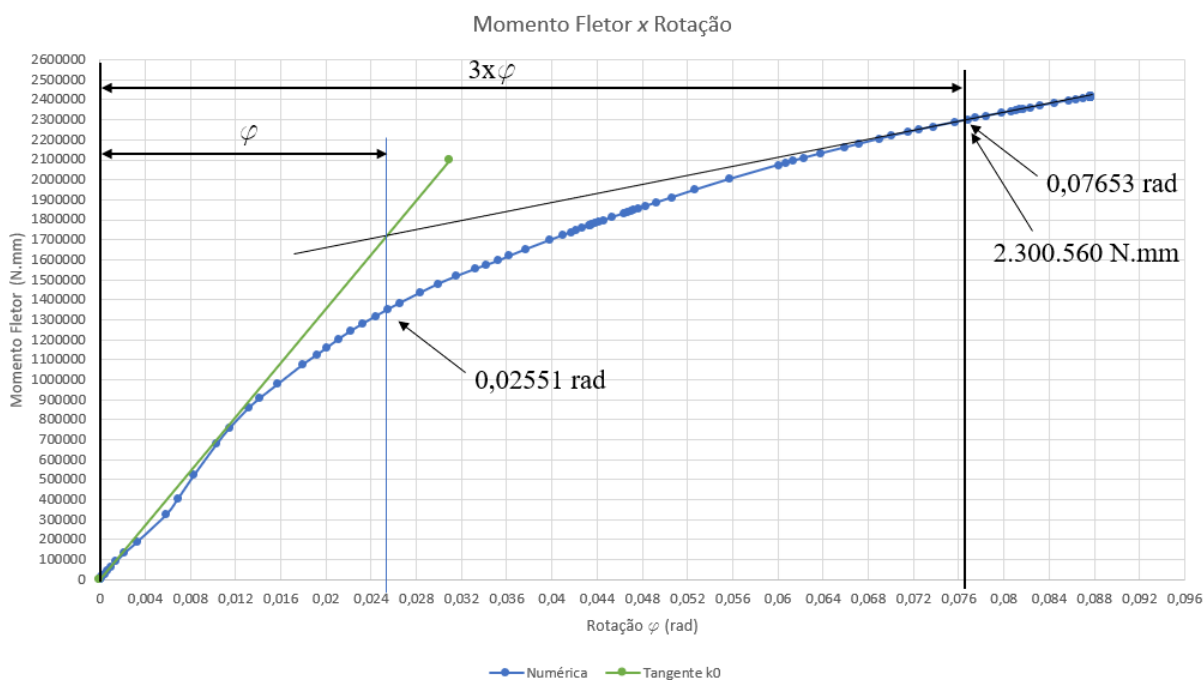
Fonte: O autor

Nota-se a partir do gráfico que a curva possui um comportamento não linear e que no início, até a rotação de, aproximadamente 0,006 rad, existe uma leve mudança da tangente. Isto se deve à folga inicial que existe no modelo desenvolvido pelo fabricante. À medida que os elementos entram em contato, a força aplicada aumenta e as folgas iniciais diminuem, a curva passa a aumentar a sua tangente e, conseqüentemente, aumenta a rigidez; o que pode ser observado a partir da rotação de, aproximadamente 0,006 rad.

Conforme a força aplicada aumenta, a curva tende a suavizar esta tangente e diminuir a rigidez, o que indica que os elementos estão começando a plastificar e a conexão se aproxima da falha.

A partir do gráfico anterior, para a obtenção do momento fletor resistente, como não ocorreu uma inversão da curva indicando um ponto de pico, foi utilizado o procedimento descrito no capítulo 3 no qual Gilbert e Rasmussen (2011) descrevem que a deformação última do modelo ensaiado pode ser tomado como três a quatro vezes a sua deformação de escoamento. Assim, foi traçada uma reta tangente (k_0) à porção elástica ou inicial do gráfico e uma tangente à porção plástica. No encontro destas duas retas foi anotado o valor da rotação equivalente a este ponto e tomada como a deformação de escoamento. Posteriormente, o valor da deformação última foi tomado como três vezes o valor da deformação de escoamento e assim foi encontrado o valor do momento fletor resistente de 2,30 kN.m. Este procedimento está representado no gráfico da Figura 4.26.

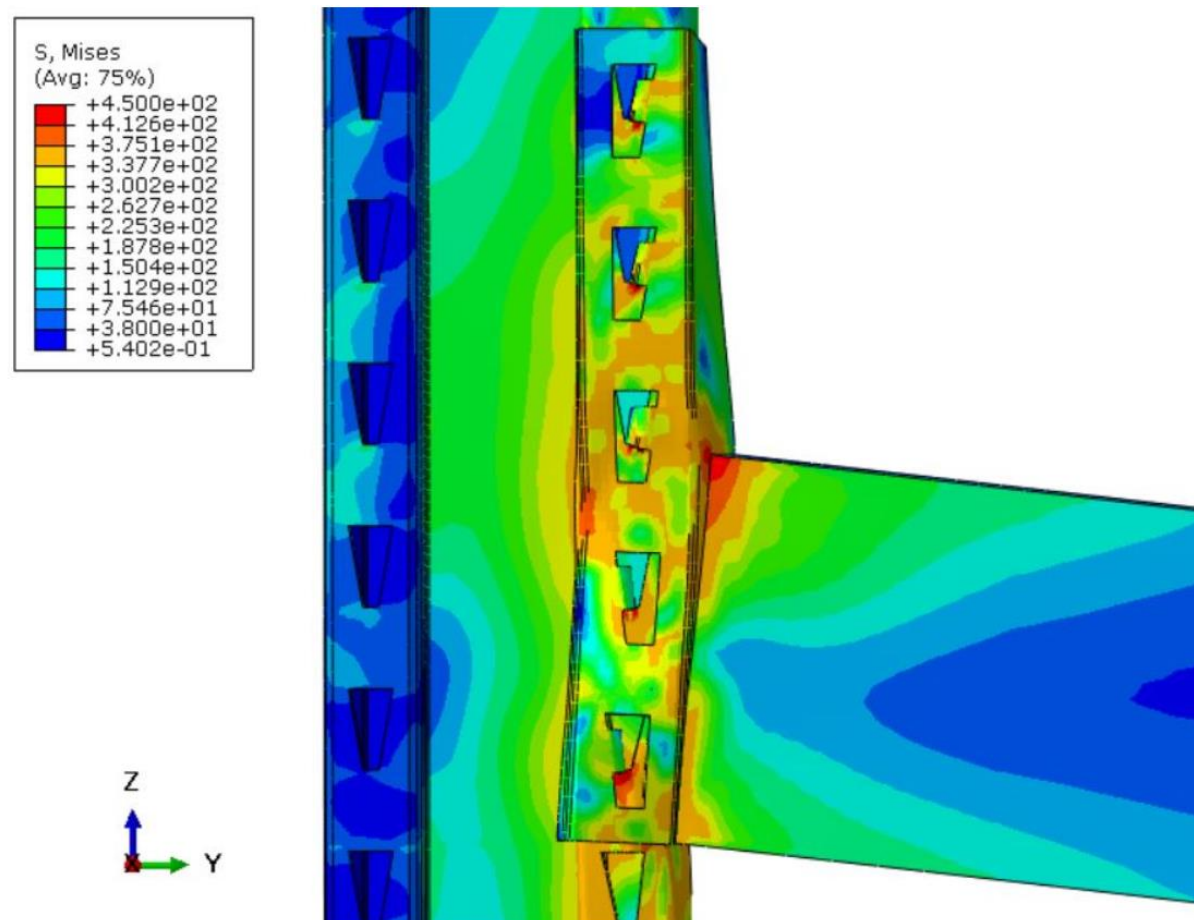
Figura 4.26 - Obtenção do momento fletor resistente da ligação



Fonte: O autor

O estado final análise numérica simulada através do *software* Abaqus, está exposto na Figura 4.27.

Figura 4.27 - Resultado da análise numérica



Fonte: O autor

Observa-se através da Figura 4.27 que o fluxo de tensões se encaminha para um ponto específico localizado na mesa superior esquerda da longarina (ponto em vermelho na Figura 4.27). Neste ponto, no qual a longarina é ligada ao conector através da solda, existe um alto valor de tensão de tração onde, na prática, pode ser uma região de falha caso a solda da ligação não esteja devidamente aplicada.

4.3. ANÁLISE EXPERIMENTAL SIMPLIFICADA

Como já foi abordado nesta dissertação, a análise experimental foi realizada de forma simplificada, ou seja, sem as condições ideais encontradas em um laboratório e de forma improvisada.

Foram ensaiados quatro corpos de prova que foram denominados como: 110C-5A-120L-PB 01, 110C-5A-120L-PB 02, 110C-5A-120L-PB 03 e 110C-5A-120L-PB 04.

4.3.1. CORPO DE PROVA 110C-5A-120L-PB 01

O corpo de prova 110C-5A-120L-PB 01 contou com um estado inicial em condições normais, ou seja, após inspeção visual não foi detectado nenhum tipo de defeito ou anomalia. A Figura 4.28 mostra seu estado inicial e o esquema do ensaio antes do carregamento.

Figura 4.28 - Corpo de prova 110C-5A-120L-PB 01

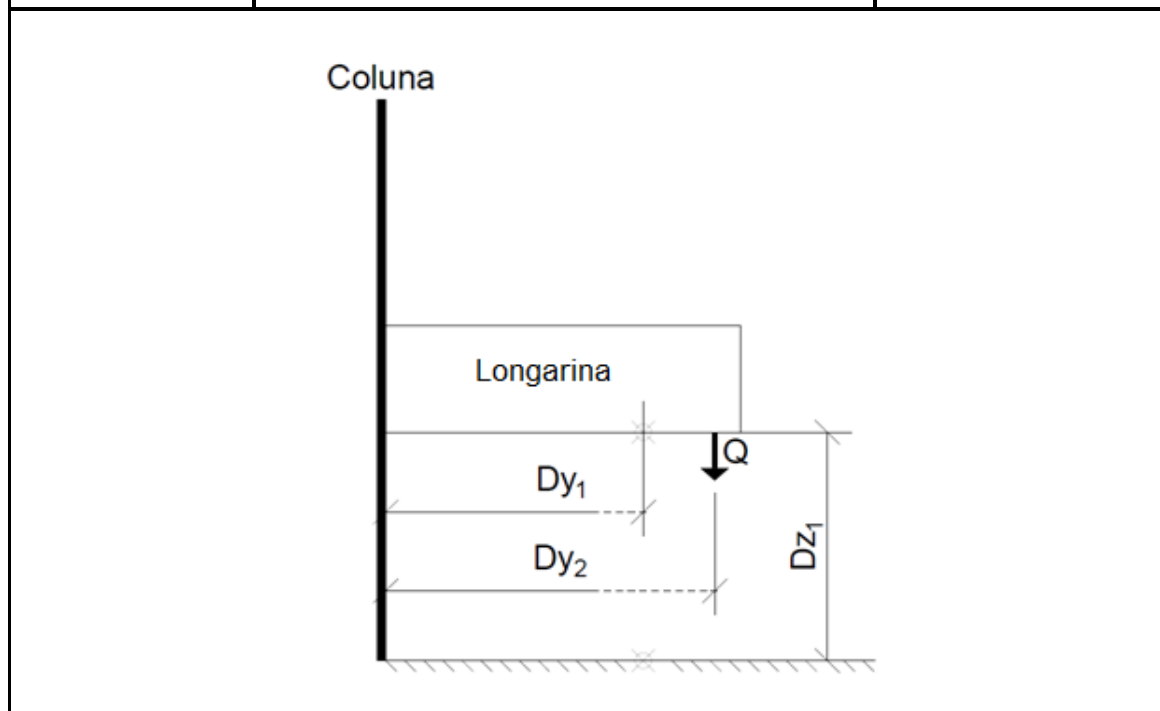


Fonte: O autor

A cada caixa metálica de 10 kg inserida no aparato fixado na extremidade da longarina, foi medida a distância vertical da mesa inferior da seção transversal da longarina até o solo a uma distância horizontal de 1000 mm da face externa da coluna. O aparato tinha uma massa de 6 kg. Os dados foram anotados e estão expostos na Tabela 4.3.

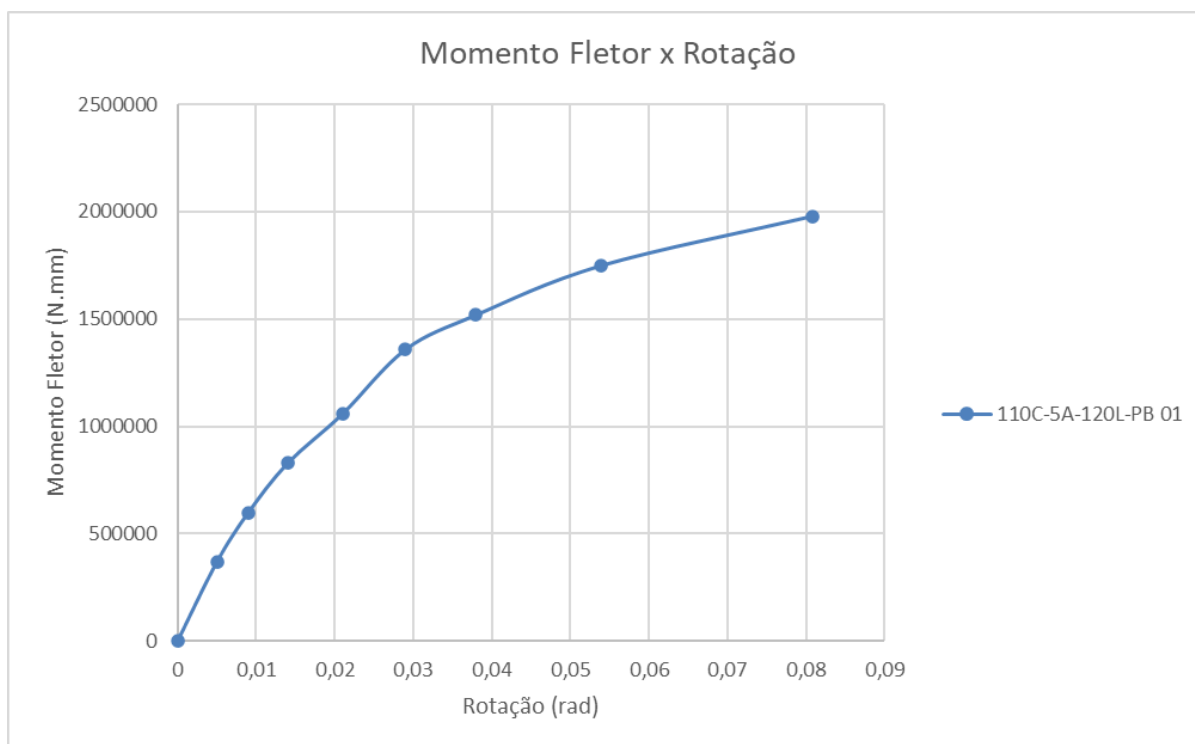
Tabela 4.3 - Deformações verticais do corpo de prova 110C-5A-120L-PB 01

Ensaio: Rigidez Rotacional - Longarina x Conector		
Data: 02/06/2021		
Dy ₁ (mm) = 1000		
Dy ₂ (mm) = 2300		
Carga	Distância Vertical	Deslocamento
Q	Dz ₁	dz
kg	mm	mm
6	1249	0
16	1244	5
26	1240	9
36	1235	14
46	1228	21
59	1220	29
66	1211	38
76	1195	54
86	1168	81



Fonte: O autor

Os dados obtidos no ensaio foram processados como descrito no capítulo 3 e assim se pode traçar a curva momento \times rotação do corpo de prova 01 que está na Figura 4.29.

Figura 4.29 - Curva momento x rotação do corpo de prova 110C-5A-120L-PB 01

Fonte: O autor

A conexão falhou quando foi colocado um total 80 kg no aparato, com um braço de alavanca de 2300 mm. Através do gráfico acima nota-se o comportamento não linear da ligação onde, à medida que a carga foi aumentando, os deslocamentos e, conseqüentemente, as rotações, passaram a ser maiores.

Pode-se inferir que a falha ocorreu no conector ao se observar o estado final do corpo de prova 01 após a falha, que está na Figura 4.30.

Figura 4.30 - Estado final do corpo de prova 110C-5A-120L-PB 01



Fonte: O autor

4.3.2. CORPO DE PROVA 110C-5A-120L-PB 02

O corpo de prova 110C-5A-120L-PB 02 contou com um estado inicial em condições adversas, ou seja, pode-se verificar que havia certa porosidade na região da solda entre a longarina e o conector. Talvez este tenha sido o motivo da carga última ser inferior à do corpo de prova 110C-5A-120L-PB 01. A Figura 4.31 a seguir mostra seu estado inicial antes do carregamento.

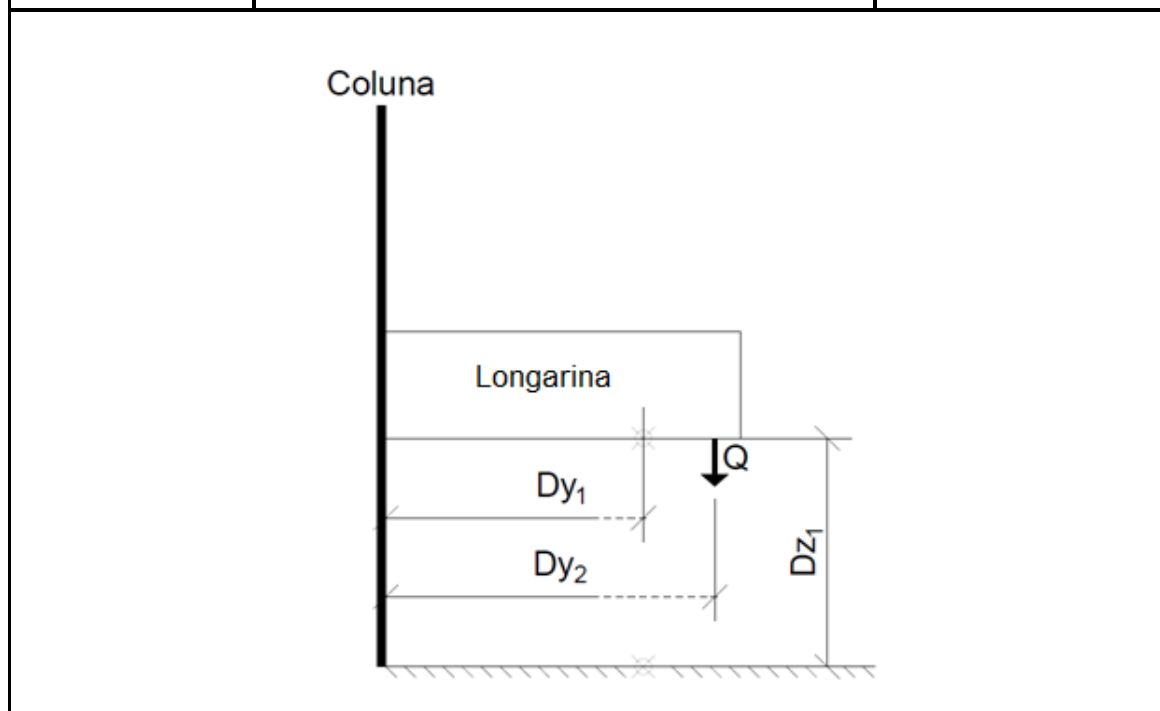
Figura 4.31 - Corpo de prova 110C-5A-120L-PB 02

Fonte: O autor

A cada caixa metálica de 10 kg inserida no aparato fixado na extremidade da longarina, foi medida a distância vertical da mesa inferior da seção transversal da longarina até o solo a uma distância horizontal de 1000 mm da face externa da coluna. O aparato tinha uma massa de 6 kg. Os dados foram anotados e estão expostos na Tabela 4.4.

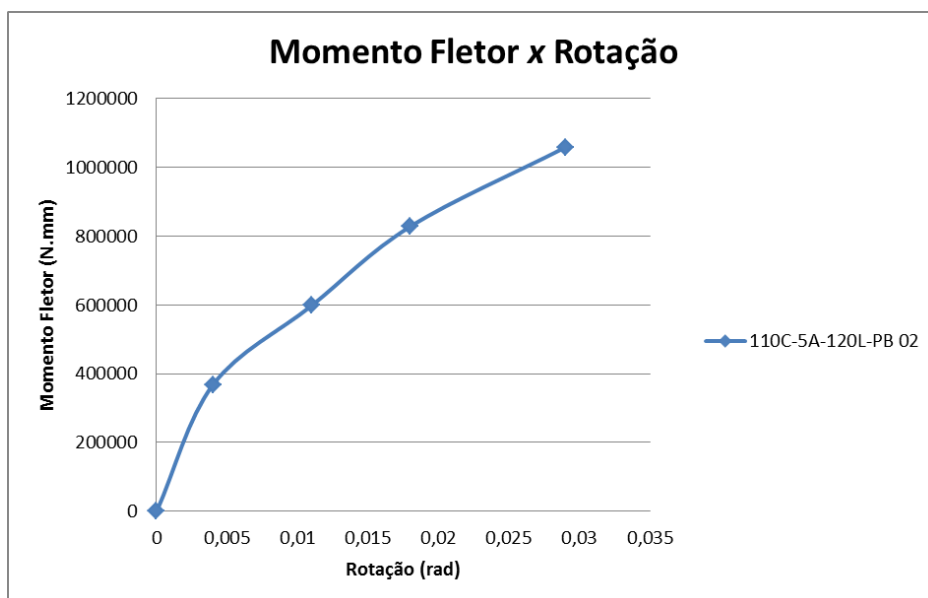
Tabela 4.4 - Deformações verticais do corpo de prova 110C-5A-120L-PB 02

Ensaio: Rigidez Rotacional - Longarina x Conector		
Data: 02/06/2021		
Dy_1 (mm) =	1000	
Dy_2 (mm) =	2300	
Carga	Distância Vertical	Deslocamento
Q	Dz_1	dz
kg	mm	mm
6	1298	0
16	1294	4
26	1287	11
36	1280	18
46	1269	29



Fonte: O autor

Os dados obtidos no ensaio foram processados como descrito no capítulo 3 e assim se pode traçar a curva momento \times rotação do corpo de prova 02 que está na Figura 4.32.

Figura 4.32 - Curva momento x rotação do corpo de prova 110C-5A-120L-PB 02

Fonte: O autor

A conexão falhou quando foi colocado um total 40 kg no aparato, com um braço de alavanca de 2300 mm. Através do gráfico acima nota-se o comportamento não linear da ligação onde, à medida que a carga foi aumentando, os deslocamentos e, conseqüentemente, as rotações, passaram a ser maiores.

Pode-se inferir que a falha ocorreu na solda ao se observar o estado final do corpo de prova 02 após a falha, que está na Figura 4.33.

Figura 4.33 - Estado final do corpo de prova 110C-5A-120L-PB 02



Fonte: O autor

4.3.3. CORPO DE PROVA 110C-5A-120L-PB 03

O corpo de prova 110C-5A-120L-PB 03 contou com um estado inicial em condições adversas, ou seja, assim como no corpo de prova 02 pode-se verificar que havia certa porosidade na região da solda entre a longarina e o conector. Talvez este tenha sido o motivo da carga última também ser inferior à do corpo de prova 110C-5A-120L-PB 01. A Figura 4.34 a seguir mostra seu estado inicial antes do carregamento.

Figura 4.34 - Corpo de prova 110C-5A-120L-PB 03

Fonte: O autor

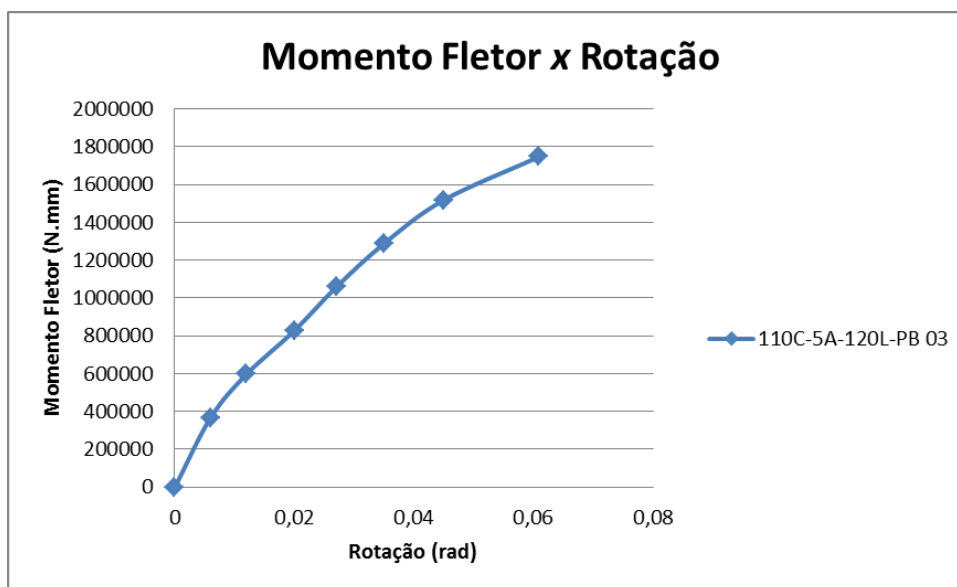
A cada caixa metálica de 10 kg inserida no aparato fixado na extremidade da longarina, foi medida a distância vertical da mesa inferior da seção transversal da longarina até o solo a uma distância horizontal de 1000 mm da face externa da coluna. O aparato tinha uma massa de 6 kg. Os dados foram anotados e estão expostos na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Deformações verticais do corpo de prova 110C-5A-120L-PB 03

Ensaio: Rigidez Rotacional - Longarina x Conector		
Data: 02/06/2021		
Dy ₁ (mm) =	1000	
Dy ₂ (mm) =	2300	
Carga	Distância Vertical	Deslocamento
Q	Dz ₁	dz
kg	mm	mm
6	1245	0
16	1239	6
26	1233	12
36	1225	20
46	1218	27
56	1210	35
66	1200	45
76	1184	61

Fonte: O autor

Os dados obtidos no ensaio foram processados como descrito no capítulo 3 e assim se pode traçar a curva momento \times rotação do corpo de prova 03 que está na Figura 4.35.

Figura 4.35 - Curva momento x rotação do corpo de prova 110C-5A-120L-PB 03

Fonte: O autor

A conexão falhou quando foi colocado um total 70 kg no aparato, com um braço de alavanca de 2300 mm. Através do gráfico acima nota-se o comportamento não linear da ligação onde, à medida que a carga foi aumentando, os deslocamentos e, conseqüentemente, as rotações, passaram a ser maiores.

Pode-se inferir neste corpo de prova a falha ocorreu no conector, ao se observar o estado final do corpo de prova 03 após a falha, que está na Figura 4.36.

Figura 4.36 - Estado final do corpo de prova 110C-5A-120L-PB 03



Fonte: O autor

4.3.4. CORPO DE PROVA 110C-5A-120L-PB 04

O corpo de prova 110C-5A-120L-PB 04 contou com um estado inicial em condições adversas, ou seja, assim como no corpo de prova 02 e 03 pode-se verificar que havia certa porosidade na região da solda entre a longarina e o conector. Talvez este tenha sido o motivo da carga última também ser inferior à do corpo de prova 110C-5A-120L-PB 01. A Figura 4.37 mostra seu estado inicial antes do carregamento.

Figura 4.37 - Corpo de prova 110C-5A-120L-PB 04

Fonte: O autor

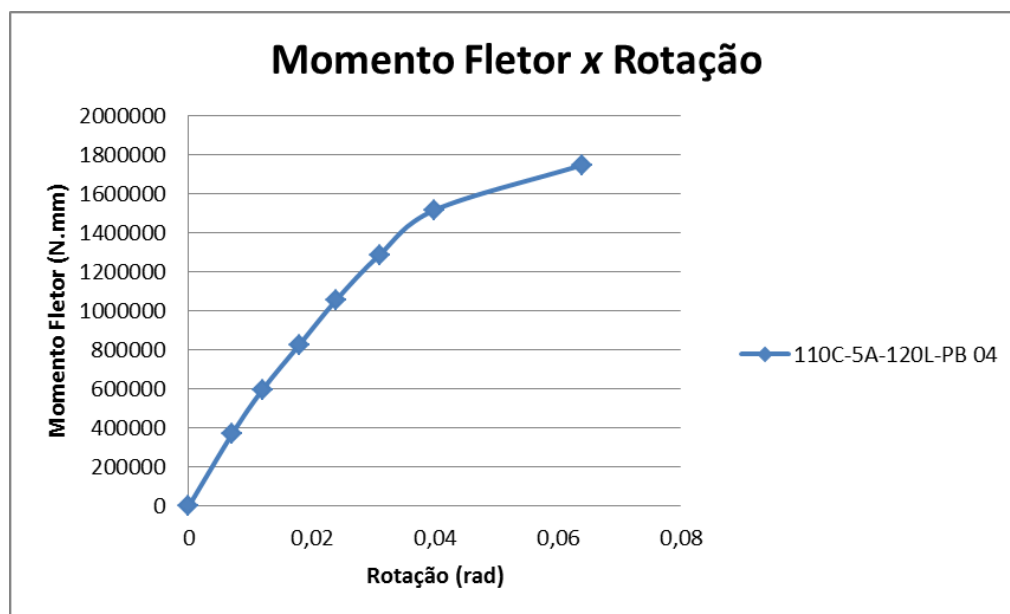
A cada caixa metálica de 10 kg inserida no aparato fixado na extremidade da longarina, foi medida a distância vertical da mesa inferior da seção transversal da longarina até o solo a uma distância horizontal de 1000 mm da face externa da coluna. O aparato tinha uma massa de 6 kg. Os dados foram anotados e estão expostos na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Deformações verticais do corpo de prova 110C-5A-120L-PB 04

Ensaio: Rigidez Rotacional - Longarina x Conector		
Data: 02/06/2021		
Dy ₁ (mm) = 1000		
Dy ₂ (mm) = 2300		
Carga	Distância Vertical	Deslocamento
Q	Dz ₁	dz
kg	mm	mm
6	1316	0
16	1309	7
26	1304	12
36	1298	18
46	1292	24
56	1285	31
66	1276	40
76	1252	64

Fonte: O autor

Os dados obtidos no ensaio foram processados como descrito no capítulo 3 e assim se pode traçar a curva momento \times rotação do corpo de prova 04 que está na Figura 4.38.

Figura 4.38 - Curva momento x rotação do corpo de prova 110C-5A-120L-PB 04

Fonte: O autor

A conexão falhou quando foi colocado um total 70 kg no aparato, com um braço de alavanca de 2300 mm. Através do gráfico acima nota-se o comportamento não linear da ligação onde, à medida que a carga foi aumentando, os deslocamentos e, conseqüentemente, as rotações, passaram a ser maiores.

Pode-se inferir neste corpo de prova a falha ocorreu no conector, ao se observar o estado final do corpo de prova 04 após a falha, que está na Figura 4.39.

Figura 4.39 - Estado final do corpo de prova 110C-5A-120L-PB 04



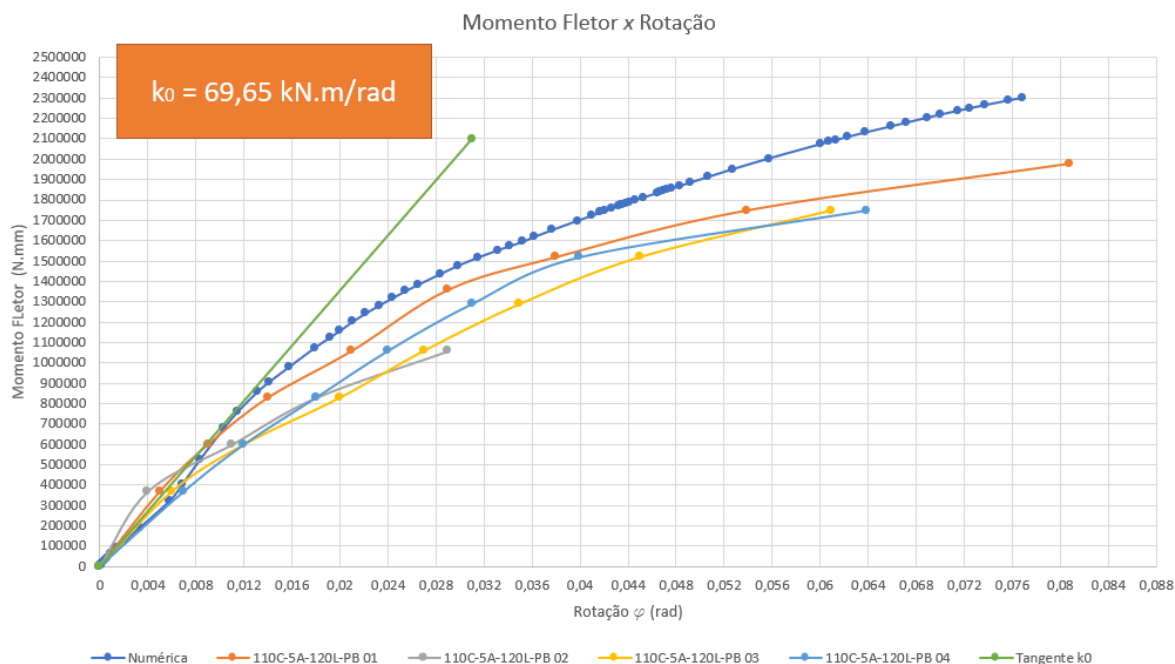
Fonte: O autor

4.4.COMPARATIVO

Após realizadas as análises mecânica, numérica e experimental simplificada, um comparativo entre elas é feito. Neste item serão comparados os valores obtidos para rigidez rotacional inicial e o momento fletor resistente da ligação obtidos pelas três análises. Serão comparados também os resultados da simulação numérica e do ensaio experimental simplificado.

4.4.1. ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL SIMPLIFICADA

A partir das análises numérica e experimental traçou-se a curva momento fletor x rotação. A Figura 4.40 contém todas as curvas geradas através das análises realizadas assim como a tangente média da parte inicial da curva, ou seja, a reta que representa a rigidez rotacional inicial da ligação (k_0).

Figura 4.40 - Curvas momento \times rotação

Constata-se no gráfico uma boa concordância entre as curvas momento fletor \times rotação das análises, porém, é no início que as curvas possuem maior similaridade, ou seja, a rigidez rotacional inicial das curvas do ensaio experimental simplificado e da análise numérica estão próximas. O valor médio da rigidez rotacional inicial (k_0) entre as curvas foi inserido no gráfico e este foi obtido fazendo-se a média entre os valores resultantes das análises numérica e experimental. A Tabela 4.7 a seguir mostra a comparação dos valores da rigidez rotacional inicial e do momento fletor resistente obtidos através de cada uma das curvas assim como a média do ensaio experimental simplificado e a média total entre a análise numérica e experimental.

Tabela 4.7 – Valores de rigidez e momento fletor resistente

Análise	Rigidez Rotacional Inicial (kN.m/rad)	Momento Fletor Resistente (kN.m)
Numérica	67,74	2,30
Experimental Simplificado	CP 01	1,98
	CP 02	1,06
	CP 03	1,75
	CP 04	1,75
Média - Experimental Simpl.	70,13	1,63
Média Total	69,65	1,77

Fonte: O autor

O valor do momento resistente relativo à análise numérica foi obtido através do procedimento contido no item 4.2.2 desta dissertação e os outros valores da Tabela 4.7 foram obtidos traçando-se a tangente da parte inicial de cada curva e observando-se o valor máximo de momento fletor para o qual a ligação falhou.

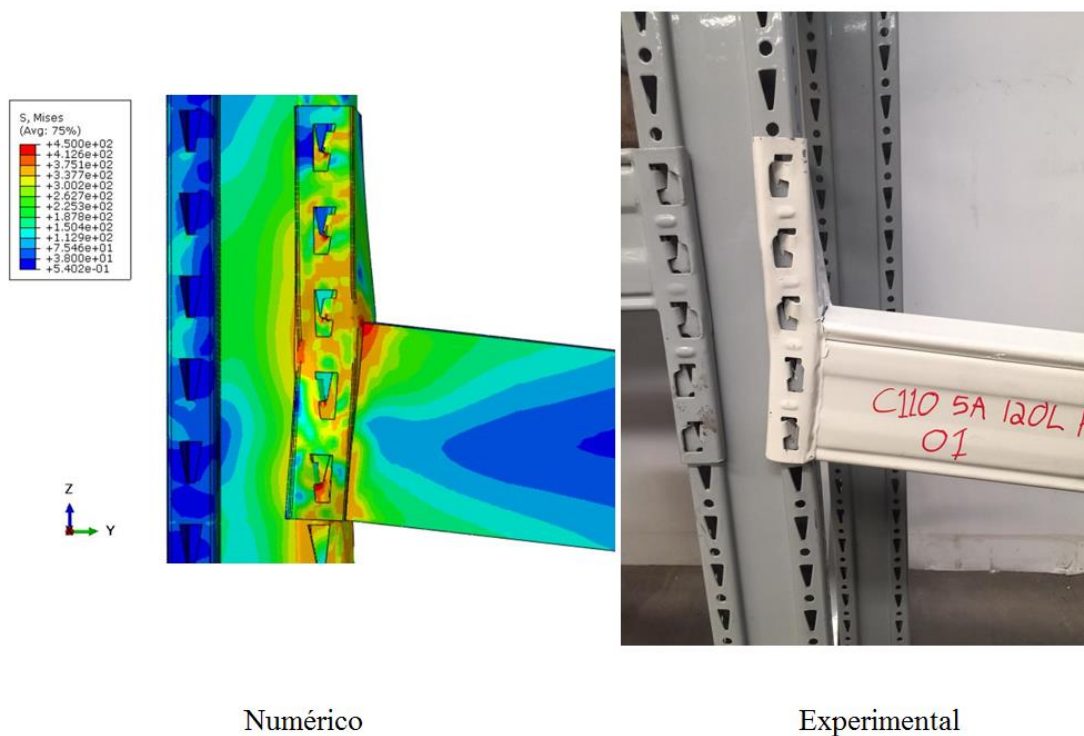
Uma tangente média entre as curvas da análise numérica e do ensaio experimental simplificado foi traçada e através dela obtém-se o valor da rigidez rotacional inicial que é de $k_0 = 69,65 \text{ kN.m/rad}$.

Percebe-se também que a curva da análise numérica é um pouco superior às curvas do ensaio experimental simplificado e que o corpo de prova 01 teve a maior rotação dentre todas as análises. A diferença entre as curvas referentes ao ensaio experimental simplificado deve-se aos defeitos observados através de análise visual dos corpos de prova 02, 03 e 04. Já a diferença entre a análise numérica e experimental sugere que a simplificação da geometria no modelo numérico pode ter causado este desvio assim como a imprecisão da aferição do valor dos deslocamentos no ensaio experimental simplificado.

Uma outra constatação pode ser feita no início da curva da análise numérica onde até a rotação de, aproximadamente, 0,005 rad a curva segue com certa tangente e logo após ganha um pouco mais de rigidez, já que a tangente aumenta ligeiramente. Isto pode ser explicado devido a folga inicial existente no encaixe entre o conector e a coluna. A influência desta folga na curva dos ensaios experimentais seria possível obter somente em condições ideais de laboratório e com aferição precisa dos deslocamentos.

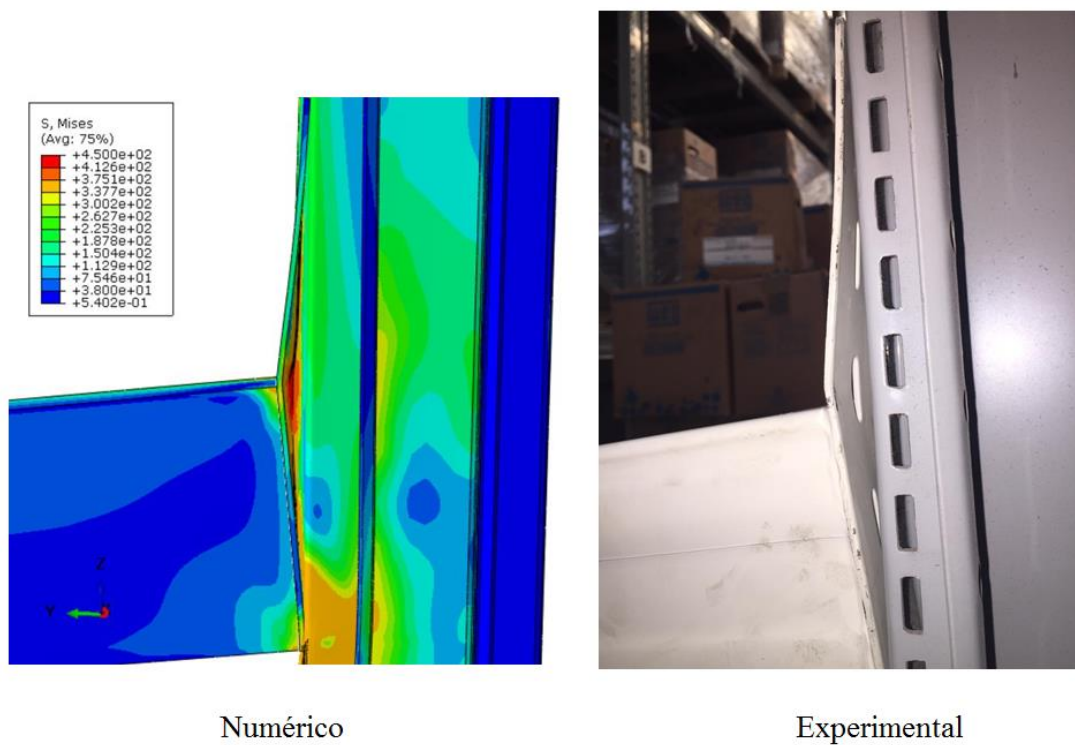
Da Figura 4.41 à Figura 4.47 mostra-se a comparação entre o estado final da análise numérica e do ensaio experimental simplificado.

Figura 4.41- Vista lateral frontal



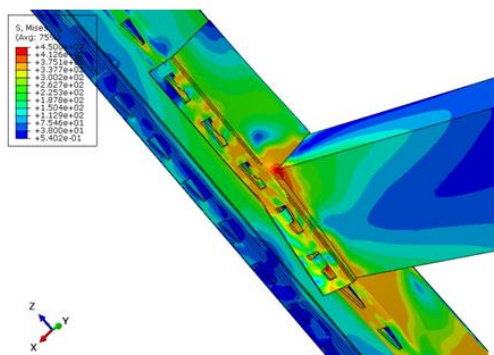
Fonte: O autor

Figura 4.42 - Vista lateral traseira



Fonte: O autor

Figura 4.43 - Vista isométrica frontal



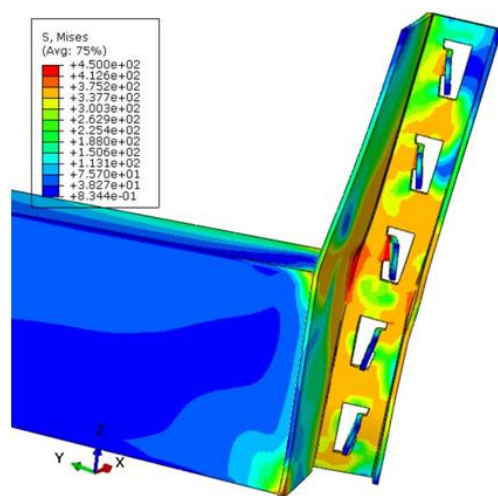
Numérico



Experimental

Fonte: O autor

Figura 4.44 - Vista isométrica traseira



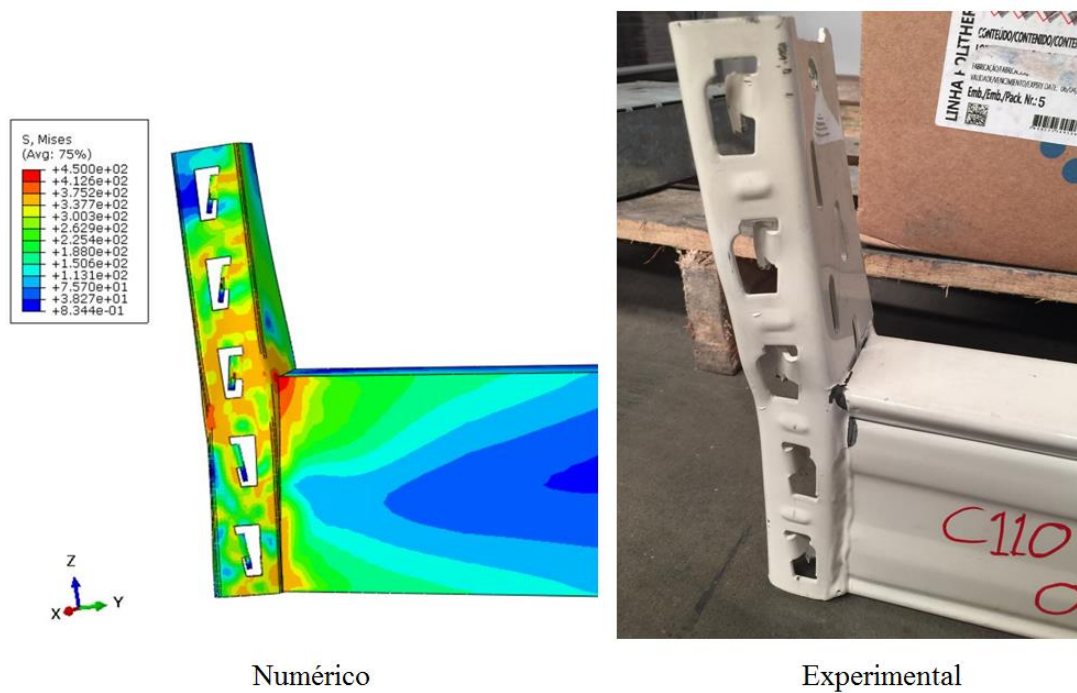
Numérico



Experimental

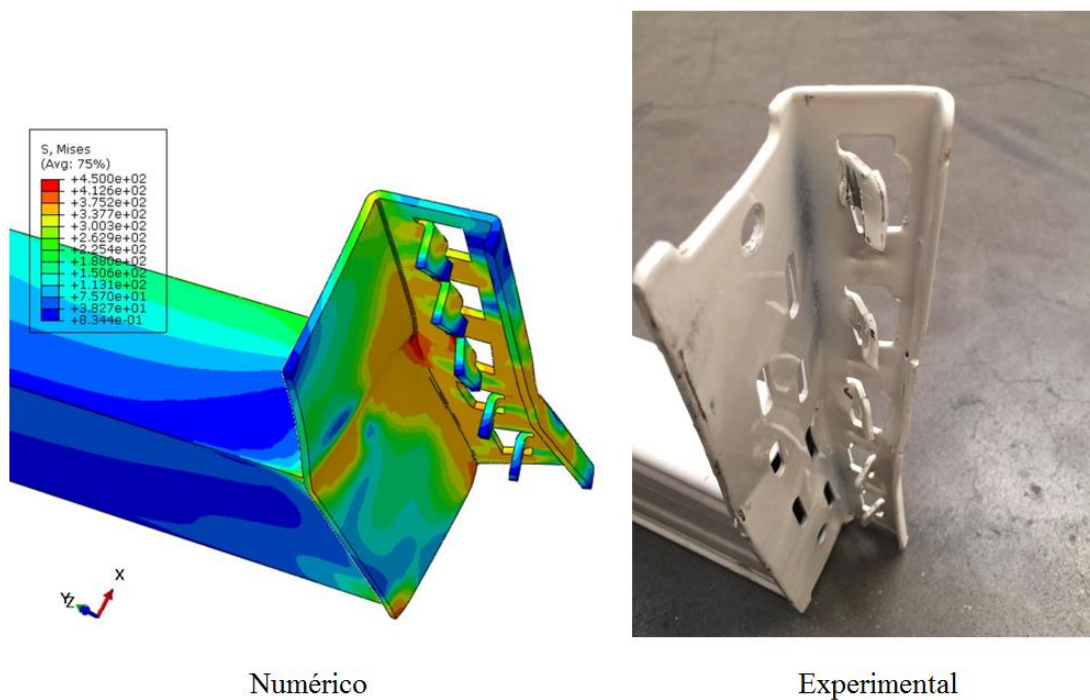
Fonte: O autor

Figura 4.45 - Vista lateral frontal - longarina e conector

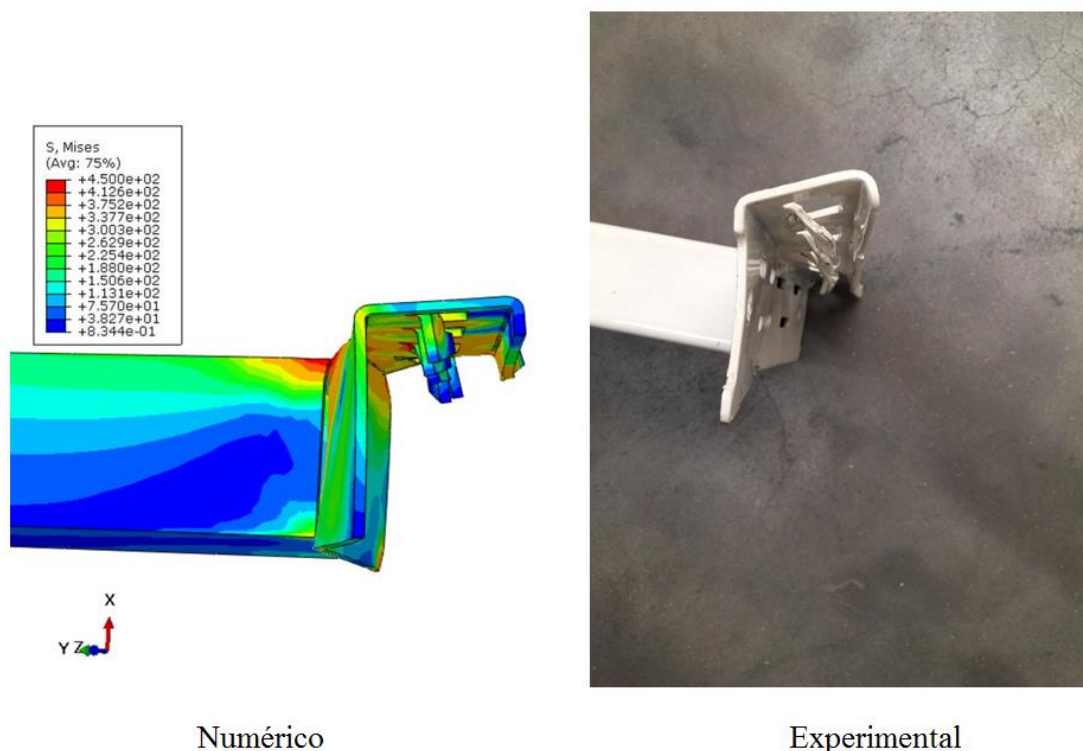


Fonte: O autor

Figura 4.46 - Vista isométrica traseira - longarina e conector



Fonte: O autor

Figura 4.47 - Vista superior - longarina e conector

Numérico

Experimental

Fonte: O autor

4.4.2. COMPARATIVO ENTRE ANÁLISE MECÂNICA, NUMÉRICA E EXPERIMENTAL SIMPLIFICADA

A partir das análises é desenvolvido um comparativo, que está na Tabela 4.8, entre os resultados de rigidez rotacional inicial e momento fletor resistente obtidos através da análise mecânica com o Método das Componentes, da análise numérica com o *software* Abaqus e da análise experimental simplificada que tem valor de estimativa.

Tabela 4.8 - Resultados finais

Análise	Rigidez Rotacional Inicial	Momento Fletor Resistente
	k_0 (kN.m/rad)	M_{Rd} (kN.m)
Mecânica	70,00	2,63
Numérica	67,74	2,30
Experimental Simplificada	70,13	1,98

Fonte: O autor

Nota-se boa concordância entre os resultados finais das análises. O valor da rigidez rotacional inicial e momento fletor resistente da análise experimental simplificada foi obtido no

item anterior e é relativo à média entre os quatro corpos de prova ensaiados. A rigidez obtida pela análise mecânica resultou em valor ligeiramente maior que da análise numérica e isto pode ter ocorrido devido às considerações feitas no modelo mecânico proposto. Como a ligação possui alto grau de não linearidade, a previsão exata do comportamento de cada componente identificada torna-se complexa.

O valor do momento fletor resistente também ficou próximo nas análises numérica e experimental simplificada, mas na análise mecânica ficou ligeiramente acima também. A análise mecânica pelo Método das Componentes é bastante sensível em relação às considerações que são feitas no modelo mecânico, ou seja, qualquer variação nos valores assim como nas componentes consideradas, o valor final pode mudar consideravelmente.

5. CONCLUSÕES

Neste capítulo são abordadas as conclusões obtidas nesta dissertação assim como algumas sugestões para trabalhos futuros.

5.1. CONCLUSÕES GERAIS

O objetivo principal desta dissertação foi o estudo de uma ligação semirrígida longarina x coluna de sistemas de armazenagem industrial, a qual desempenha importante função na estabilidade global das estruturas porta-paletes, principalmente na direção paralela ao corredor ou longitudinal.

Sua característica não linear e semirrígida torna o cálculo de suas propriedades complexo e inviabiliza métodos analíticos para obtenção dos valores de rigidez rotacional e momento fletor resistente. Desta forma, as normas técnicas preconizam que ensaios laboratoriais sejam realizados para que curvas momento fletor x rotação sejam extraídas e, a partir delas, logradas as propriedades mecânicas da ligação. Alternativamente, outras análises podem ser performadas como a numérica e a mecânica.

Nesta dissertação foram realizadas análises mecânica, numérica e experimental simplificada para obtenção dos valores da rigidez inicial e momento fletor resistente de uma conexão típica.

O Método das Componentes para ligações parafusadas e soldadas, presente na norma técnica europeia EN 1993-1-8 (2005), teve de ser adaptado para uma ligação sem parafusos através de procedimentos já realizados por outros autores. Apesar de aproximadas e com algumas simplificações as análises tiveram boa concordância entre si, gerando resultados satisfatórios.

Com os resultados obtidos pela análise numérica e pelos valores estimados através do ensaio experimental simplificado, conclui-se que o Método das Componentes adaptado às ligações não parafusadas pode ser uma alternativa para prever o comportamento das ligações semirrígidas já que através dele pode-se verificar quais componentes e o quanto elas contribuem para a rigidez rotacional e resistência da conexão.

A contribuição deste trabalho ressalta a importância do estudo de componentes específicas e pontuais, como é o caso da ligação semirrígida longarina x coluna, para posterior refinamento da análise global em estruturas. Existem variados tipos de análise que podem ser

empregadas, porém as mais comuns são: numérica e experimental. A análise mecânica é tida como uma alternativa e comprovou-se, nesta dissertação, ser um meio confiável para estimativa de rigidez e resistência da ligação, assim como permitir a avaliação de cada componente e possível modificação da geometria para aumentar sua eficiência.

5.2.SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com a conclusão desta dissertação, algumas sugestões para trabalhos futuros são mencionadas a seguir:

- Analisar uma gama maior de conexões variando-se número de dentes no conector, seção transversal da coluna e longarina e espessuras;
- Realizar ensaio laboratorial de acordo com a norma para maior precisão dos resultados.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15524-2**: Sistemas de armazenagem Parte 2: Diretrizes para o uso de estruturas tipo porta-paletes seletivos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

ASSAN, A. E. **Método dos Elementos Finitos - Primeiros Passos**. 2ª Edição ed. [s.l.: s.n.].

BAJORIA, K. M.; TALIKOTI, R. S. Determination of flexibility of beam-to-column connectors used in thin walled cold-formed steel pallet racking systems. **Thin-Walled Structures**, v. 44, n. 3, p. 372–380, 2006.

BALDASSINO, N.; BERNUZZI, C. Analysis and behaviour of steel storage pallet racks. **Thin-Walled Structures**, v. 37, n. 4, p. 277–304, 2000.

BALDASSINO, N.; ZANDONINI, R. Design by testing of industrial racks. **Advanced Steel Construction**, v. 7, n. 1 SPEC. ISSUE, p. 27–47, 2011.

BERNUZZI, C. et al. Unbraced pallet rack design in accordance with European practice-Part 1: Selection of the method of analysis. **Thin-Walled Structures**, v. 86, p. 185–207, 2015.

BERNUZZI, C.; CASTIGLIONI, C. A. Experimental analysis on the cyclic behaviour of beam-to-column joints in steel storage pallet racks. **Thin-Walled Structures**, v. 39, n. 10, p. 841–859, 2001.

CRISFIELD, M. A. **Non-Linear Finite Element Analysis of Solids and Structures**. Volume 1: ed. [s.l.] John Wiley & Sons Ltd., 1991.

DAGNESE, J. **Análise do comportamento elasto-plástico de um aço AISI 1045 em baixas deformações**. 2012. 70f. Dissertação (Mestrado Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

DAI, L.; ZHAO, X.; RASMUSSEN, K. J. R. Flexural behaviour of steel storage rack beam-to-upright bolted connections. **Thin-Walled Structures**, v. 124, n. November 2017, p. 202–217, 2018.

DÍAZ, C. et al. Review on the modelling of joint behaviour in steel frames. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 67, n. 5, p. 741–758, 2011.

EN 15512. Steel static storage systems- Adjustable pallet racking systems - Principles for structural design. 2009.

EN 1993-1-8. Design of joints. v. 1, n. 2005, 2011.

FILIATRAULT, A.; HIGGINS, P. S.; WANITKORKUL, A. Experimental stiffness and seismic response of pallet-type steel storage rack connectors. **Practice Periodical on Structural Design and Construction**, v. 11, n. 3, p. 161–170, 2006.

FREITAS, A. M. S.; FREITAS, M. S. R.; SOUZA, F. T. Analysis of steel storage rack columns. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 61, n. 8, p. 1135–1146, 2005.
FRYE, M. J.; MORRIS, A. Frye1975.Pdf. n. 1 969, 1975.

GILBERT, B. P.; RASMUSSEN, K. J. R. Bolted moment connections in drive-in and drive-through steel storage racks. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 66, n. 6, p. 755–766, 2010.

GILBERT, B. P.; RASMUSSEN, K. J. R. Determination of the base plate stiffness and strength of steel storage racks Determination of the base plate stiffness and strength of steel storage racks. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 67, n. 6, p. 1031–1041, 2011.
GODLEY, M. H. R. Plastic design of pallet rack beams. **Thin-Walled Structures**, v. 29, n. 1–4, p. 175–188, 1997.

GODLEY, M. H. R.; BEALE, R. G. Investigation of the effects of looseness of bracing components in the cross-aisle direction on the ultimate load-carrying capacity of pallet rack frames. **Thin-Walled Structures**, v. 46, n. 7–9, p. 848–854, 2008.

GUSELLA, F. et al. Flexural Capacity of Steel Rack Connections Via The Component Method. **The Open Construction and Building Technology Journal**, v. 12, n. 1, p. 90–100, 2018.

GUSELLA, F. **on the Mechanical Behavior of Steel Rack Connections and Its Influence on the Seismic Response**. [s.l.] University of Florence and University of Braunschweig – Institute of Technology, 2019.

GUSELLA, F.; ORLANDO, M.; THIELE, K. Evaluation of rack connection mechanical properties by means of the Component Method. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 149, p. 207–224, 2018.

HOSFORD, W. F. **Mechanical behavior of materials**. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2005.

JASPART, J. P. General report: Session on connections. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 55, n. 1–3, p. 69–89, 2000.

KRAWINKLER, H. Experimental Study on Seismic Behavior of Industrial Storage Racks. **Proceedings - Annual Public Water Supply Engineers' Conference**, v. 2, p. 749–781, 1978.

MARKAZI, F. D.; BEALE, R. G.; GODLEY, M. H. R. Experimental analysis of semi-rigid boltless connectors. **Thin-Walled Structures**, v. 28, n. 1, p. 57–87, 1997.

MARKAZI, F. D.; BEALE, R. G.; GODLEY, M. H. R. Numerical modelling of semi-rigid boltless connectors. **Computers and Structures**, v. 79, n. 26–28, p. 2391–2402, 2001.

MIRANDA, S. A. DE. Análise de ligações de sistemas de armazenagem industrial tipo porta-pallets. 2011.

MUNAIAR NETO, J. **Modelos de comportamentos viscoelástico e viscoplástico na análise de estruturas planas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1994.

NG, A. L. Y.; BEALE, R. G.; GODLEY, M. H. R. Methods of restraining progressive collapse in rack structures. **Engineering Structures**, v. 31, n. 7, p. 1460–1468, 2009.

PRABHA, P. et al. Evaluation of connection flexibility in cold formed steel racks. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 66, n. 7, p. 863–872, 2010.

RIKS, E. An incremental approach to the solution of snapping and buckling problems. **International Journal of Solids and Structures**, v. 15, p. 529-551, 1979.

ROURE, F. et al. Stub column tests for racking design: Experimental testing, FE analysis and EC3. **Thin-Walled Structures**, v. 49, n. 1, p. 167–184, 2011.

SCHAFER, B. W. Local, distortional, and Euler buckling of thin-walled columns. **Journal of Structural Engineering**, v. 128, n. 3, p. 289–299, 2002.

SHAH, S. N. R. et al. State-of-the-art review on the design and performance of steel pallet rack connections. **Engineering Failure Analysis**, v. 66, p. 240–258, 2016a.

SHAH, S. N. R. et al. Behavior of Industrial Steel Rack Connections. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 70–71, p. 725–740, 2016b.

ŚLĘCZKA, L.; KOZŁOWSKI, A. Experimental and theoretical investigations of pallet racks connections. **Advanced Steel Construction**, v. 3, n. 2, p. 607–627, 2007.

ŚLĘCZKA, L.; KOZŁOWSKI, A. Design of beam-to-column joints in steel storage pallet racks by testing and by component method. **Archives of Civil Engineering**, v. 54, n. 1, p. 263–291, 2008.

SOUZA, F. T. DE. **Análise Teórico-Experimental de Sistemas Apertados com Elementos Perfurados em Perfis Formados a Frio - Racks**. [s.l.] Universidade Federal de Ouro Preto, 2005.

STANDARDS AUSTRALIA. **AS 4084: Steel Storage Racking**. Sydney, p. 118. 2012.

TILBURGS, K. Those peculiar structures in cold-formed steel: “racking & shelving”. **Steel Construction**, v. 6, n. 2, p. 95–106, 2013.

YURA, J.A.; ZETTLEMOYER, N.; EDWARDS I.F. Ultimate capacity equations for tubular joints. In: 12th annual offshore technology conference. 1980. p. 113–25. Paper 3690.

ZHAO, X. et al. A theoretical model for the rotational stiffness of storage rack beam-to-upright connections. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 133, p. 269–281, 2017.