



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



ADRIANO TOLEDO DA SILVA

LIGAÇÕES SEMIRRÍGIDAS EM PERFIS FORMADOS A FRIO DE AÇO

**Ouro Preto
Julho de 2017**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



LIGAÇÕES SEMIRRÍGIDAS EM PERFIS FORMADOS A FRIO DE AÇO

AUTOR:ADRIANO TOLEDO DA SILVA

ORIENTADOR:Profa. Dra. Arlene Maria Cunha Sarmanho

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências da Engenharia Civil, área de concentração: Construção Metálica.

Ouro Preto, Julho de 2017

S586l

Silva, Adriano Toledo.

Ligações semirrígidas em perfis formados a frio [manuscrito] / Adriano Toledo Silva. - 2017.

123f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Profa. Dra. Arlene Maria Cunha Sarmanho.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção Metálica.

1. Ligações metálicas. 2. Construção metálica. 3. Projeto estrutural - Modelos matemáticos. I. Sarmanho, Arlene Maria Cunha . II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.


CDU: 624.014

LIGAÇÕES SEMIRRIGIDAS EM PERFIS FORMADOS A FRIO

AUTOR: ADRIANO TOLEDO DA SILVA

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 27 de julho de 2017, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:


Prof. Arlene Maria Cunha Sarmanho, D. Sc. – UFOP (Presidente)


Prof. Flávio Teixeira de Souza, D. Sc. – IFMG


Prof. Ana Amélia Oliveira Mazon, D. Sc. – UFSJ

Tente uma, duas, três vezes e se possível tente a quarta, a quinta e quantas vezes for necessário. Só não desista nas primeiras tentativas, a persistência é amiga da conquista.

Se você quer chegar aonde a maioria não chega, faça o que a maioria não faz.

(Bill Gates)

A minha família e amigos.

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente a Deus, por dar força e paciência para mais essa conquista.

Aos meus pais, Hermes e Rosana, pelo bom exemplo, por serem meu alicerce, apoio e força nos momentos difíceis. Aos meus irmãos, Anderson, Ariane e Eduardo, pelo incentivo e amizade.

A minha avó, Dona Maria, pelas orações e carinho.

À Lívia por todo apoio e ajuda nas correções.

À professora Arlene, pelos ensinamentos, tempo dedicado e por acreditar na minha capacidade.

A todos os amigos que passaram e de alguma forma contribuíram com este trabalho.

À Capes pelo apoio e financiamento deste trabalho.

Resumo

As ligações viga-coluna utilizadas em projetos de estruturas metálicas são consideradas rígidas ou flexíveis. As ligações flexíveis possuem liberdade de rotação entre os elementos ligados e não há transmissão de momentos fletores, por outro lado, as ligações rígidas transmitem momento e não há rotação relativa. No entanto, sabe-se que grande parte das ligações não possuem este comportamento idealizado e dispõem de capacidade de transmissão parcial de momento fletor e de rotação. Estas ligações são chamadas de semirrígidas.

Estas simplificações são utilizadas em projetos devido à dificuldade de análise e dimensionamento do real comportamento das ligações. No entanto sabe-se que o uso das ligações semirrígidas pode auxiliar na economia final dos projetos estruturais.

O Eurocode 3 apresenta um método analítico de avaliação da semirridez de alguns tipos de ligações pré-definidas que possibilitam apresentar o comportamento momento x rotação. Neste trabalho foi utilizado as equações propostas pelo método citado e foram incorporados coeficientes de ajuste devido à diferença nas características geométricas da ligação em estudo. Os resultados desta nova formulação foram comparados com modelos numéricos, realizados no programa Ansys versão 12.0. Os resultados foram considerados satisfatórios, dentro da geometria e modelos verificados.

Abstract

Beam-column connections used in steel frame designs are considered rigid or pinned. The pinned connections have free rotation between the connected elements and there is no transmission of bending moments, on the other hand, the rigid connections transmit the moment and there is no relative rotation between the elements. However, it is known that a great part of the connections do not have this idealized behavior and they have capacity of transmission of bending moment and rotation. These connections are called semi-rigid.

These simplifications are used in projects due the difficulty of analyzing and scaling the real behavior of the connections. However, it is known that the use of semi-rigid connections can yield the final savings of structural projects.

Eurocode 3 presents an analytical method of evaluating the semirigid of some types of predefined connections that allow to present the moment-by-rotation behavior. In this work the equations proposed by the cited method were used and adjustment coefficients were incorporated due to the difference in the geometric characteristics of the connection under study. The results of this new formulation were compared with numerical models, performed in the software Ansys, version 12.0. The results were considered satisfactory, within the geometry and verified models.

Índice

1.	Introdução	1
1.1.	Considerações Gerais	4
1.2.	Ligações viga coluna com chapa de topo.....	6
1.3.	Classificação das ligações	7
1.4.	Classificação segundo Eurocode 3 (2010)	9
1.5.	Utilização de análise não linear e as ligações semirrígidas.....	11
1.6.	Perfis de aço formados a frio	13
2.	Estudo teórico.....	18
2.1.	Considerações sobre o modelo.....	18
2.1.1.	Coluna	20
2.1.2.	Viga.....	20
2.1.3.	Chapa de topo.....	21
2.1.4.	Barras redondas e porcas.....	22
2.2.	Ligações “t-stub” e efeito alavanca em perfis “T”	23
2.2.1.	Flange da coluna à flexão.....	28
2.2.2.	Chapa de topo sob flexão.	31
2.3.	Método das componentes – Eurocode 3 (2010).....	32
3.	Análise numérica.....	43
3.1.	Propriedades dos materiais.....	44
3.2.	Elementos finitos utilizados	45
3.2.1.	Elemento plano “SHELL181”	46
3.2.2.	Elemento sólido “SOLID95”	46
3.2.3.	Elementos de contato “TARGE170”, “CONTA175” e “CONTA174”	47
3.3.	Definição das malhas e elementos finitos	50

3.3.1.	Viga e chapa de topo	52
3.3.2.	Coluna	53
3.3.3.	Parafusos e porcas	53
3.3.4.	Soldas entre perfis da coluna e das vigas	54
3.4.	Carregamentos.....	55
3.5.	Condições de contorno	56
3.6.	Outras informações importantes	57
4.	Resultado da Análise Numérica	58
4.1.	Vigas e aplicação das cargas nos extremos.....	59
4.2.	Chapa de topo.....	64
4.3.	Parafusos	66
4.4.	Pilares	68
4.5.	Deslocamentos	70
4.6.	Estudo Paramétrico	72
4.6.1.	Chapa de topo.....	72
4.6.2.	Espessura da viga e coluna.....	73
4.6.3.	Diâmetro dos parafusos.....	74
4.6.4.	Altura da seção do pilar.....	75
5.	Análise e Comparação dos Resultados	77
5.1.	Adaptação dos coeficientes do Método das Componentes para o modelo analisado	77
5.2.	Geometria do modelo LVC05.....	78
5.3.	Coefficiente K_2 – Alma da coluna comprimida.....	79
5.4.	Coefficiente K_5 – Chapa de topo a flexão.....	82
5.5.	Coefficiente K_{10} – Parafuso tracionado	84
5.6.	Valores dos coeficientes de rigidez para o modelo LVC05	85

5.7.	Associação dos coeficientes de rigidez da ligação do modelo LVC05.....	86
5.8.	Adaptações nas equações propostas pelo Eurocode 3 (2010).....	88
5.9.	Avaliação da semirrigidez da ligação	91
6.	Conclusões e Recomendações.....	92
	Referências Bibliográficas	96
	Anexos	101

Lista de Figuras

Capítulo 1 - Introdução

Figura 1. 1 – Ligação viga pilar com chapa de topo entre perfis I.	6
Figura 1. 2 – Binário de tração e compressão - ligação chapa de topo.....	7
Figura 1. 3 – Parâmetros para dimensionamento da semirrigidez da ligação.....	8
Figura 1. 4 – Classificação das ligações segundo a rigidez.	9
Figura 1. 5 – Fluxograma de análise e dimensionamento.....	12
Figura 1. 6 – Processo de conformação a frio – dobragem ou prensagem.	13
Figura 1. 7 – Processo de conformação a frio – calandragem.	13
Figura 1. 8 – Processo de conformação a frio – perfilagem.	14
Figura 1. 9 – Seções transversais em perfis formados a frio.	14
Figura 1. 10 – Seções transversais mais utilizadas.	15
Figura 1. 11 – Exemplo de uso dos perfis formados a frio em galpões.....	15
Figura 1. 12 – Edificações residências com utilização de perfis formados a frio.....	16
Figura 1. 13 – Obras residências com utilização de perfis formados a frio.....	16
Figura 1. 14 – Racks ou porta-paletes em perfis formados a frio.....	17

Capítulo 2 – Estudo Teórico

Figura 2. 1 – Ligação em estudo.....	18
Figura 2. 2 – Seção do pilar e parâmetros geométricos	20
Figura 2. 3 - Seção do viga e parâmetros geométricos.	21
Figura 2. 4 – Chapa de topo e parâmetros geométricos.....	21
Figura 2. 5 – Barras passantes.	22
Figura 2. 6 – Parâmetros geométricos das porcas de mercado.	22
Figura 2. 7 – Tipos de ligações com chapa de topo.....	23
Figura 2. 8 – Ligação “t-stub”.	23
Figura 2. 9 – Distribuição das forças devido ao efeito alavanca.	24
Figura 2. 10 – Modos de falha do “t-stub”.	25
Figura 2. 11 – Somatório do comprimento efetivo L_{eff}	27

Figura 2. 12 – Definições de e , e_{min} , r_c e m .	28
Figura 2. 13 – Modos de ruptura das linhas de parafusos.	28
Figura 2. 14 – Modelo chapa de topo como “t-stubs” separados.	30
Figura 2. 15 – Valores de α para ligações com enrijecedores.	30
Figura 2. 16 – Parâmetros geométricos para cálculo da chapa de topo a flexão.	31
Figura 2. 17 – Distribuição triangular e plástica das forças.	33
Figura 2. 18 - Zonas de recebimento de esforços.	33
Figura 2. 19 – Ilustração das componentes verificadas pelo método.	34
Figura 2. 20 – Esquema para análise da rigidez rotacional da ligação.	35
Figura 2. 21 – Procedimento de cálculo da semirrigidez rotacional.	35
Figura 2. 22 – Centro de compressão e braço de alavanca “z”.	37

Capítulo 3 - Análise Numérica

Figura 3. 1 – Representação do diagrama bilinear.	44
Figura 3. 2 – Geometria do elemento “SHELL181” (Ansys, 2012).	46
Figura 3. 3 – Elemento volumétrico “SOLID95” (Ansys, 2012).	47
Figura 3. 4 – Elemento de contato “TARGE170” (Ansys, 2012).	49
Figura 3. 5 - Elemento de contato CONTA174 (Ansys, 2012).	49
Figura 3. 6 – Elemento de contato CONTA175 (Ansys, 2012).	50
Figura 3. 7 – Localização dos elementos de contato.	50
Figura 3. 8 - Representação da malha para o modelo total.	51
Figura 3. 9 – Representação da malha para viga.	52
Figura 3. 10 – Representação da malha e detalhe do furo.	52
Figura 3. 11 – Representação da malha da coluna, detalhe do furo e vista superior.	53
Figura 3. 12 – Representação da malha dos parafusos e porcas e detalhe da região de acoplamento dos elementos.	54
Figura 3. 13 – Representação da malha das soldas das vigas.	54
Figura 3. 14 – Representação da malha das soldas da coluna.	55
Figura 3. 15 – Posicionamento do carregamento na viga.	56
Figura 3. 16 – Condições de contorno extremidade inferior.	56
Figura 3. 17 – Condições de contorno extremidade superior.	57

Capítulo 4 - Resultado da Análise Numérica

Figura 4. 1 – Desenvolvimento das tensões nas vigas, (a) início, (b) meio e (c) fim do carregamento (MPa).	59
Figura 4. 2 – Diagrama de tensões na alma das vigas na direção “z”.	60
Figura 4. 3 – Tração e compressão devido ao momento na ligação.	64
Figura 4. 4 Vista da Ligação (mm)	65
Figura 4. 5 – Deslocamento transversal chapa de topo modelo LVC11 (mm).....	65
Figura 4. 6 – Deslocamento transversal chapa de topo modelo LVC13 (mm).....	65
Figura 4. 7 – Tensão de Von Mises na chapa de topo (MPa)	66
Figura 4. 8 – Diagrama de tensões eixo longitudinal aos parafusos de 12,5 mm (MPa) 67	
Figura 4. 9 – Flexão dos parafusos devido a chapa (mm).	68
Figura 4. 10 - Diagrama de tensões de Von Mises devido a compressão do flange inferior da viga (MPa).....	69
Figura 4. 11 – Deslocamentos das paredes dos perfis (mm).	69
Figura 4. 12 - Tensões de Von Mises (MPa).	70

Capítulo 5 – Análise e Comparação do Resultados

Figura 5. 1 – Deformação da alma do pilar em perfil I devido a compressão da viga. ..	79
Figura 5. 3 – Ponto de formação da rotula plástica do perfil “T”	83

Lista de Tabelas

Capítulo 2 – Estudo Teórico

Tabela 2. 1 – Modelos e características geométricas.	19
Tabela 2. 2 – Resistência $F_{T,Rd}$ do “t-stub”.	26
Tabela 2. 3 – Comprimento efetivo para flanges não enrijecidos.	29
Tabela 2. 4– Comprimento efetivo para flanges enrijecidos.	29
Tabela 2. 5 – Comprimento efetivo para chapa de topo	32
Tabela 2. 6 – Componentes utilizadas nas ligações viga-coluna.	34
Tabela 2. 7 – Coeficientes indicados em ligações com chapa de topo segundo Eurocode 3 (2010).	38
Tabela 2. 8 – Valores para o parâmetro de comparação β	39

Capítulo 3 - Análise Numérica

Tabela 3. 1 - Tensão de Escoamento dos Componentes da ligação	45
Tabela 3. 2 – Quantidade de elementos utilizados.	57

Capítulo 4 - Resultado da Análise Numérica

Tabela 4. 1 Cálculo do par ordenado ângulo e semirrigidez para o modelo LVC01.	63
Tabela 4. 3 – Defomação dos componentes da ligação.	71

Capítulo 5 – Análise e Comparação dos Resultados

Tabela 5. 1– Tabela de características geométricas do modelo LVC05.	78
Tabela 5. 2 – Relação semirrigidez modelo numérico e analítico para primeira variação de K_2	81
Tabela 5. 3 – Coeficientes de rigidez utilizados.	85
Tabela 5. 4 – Coeficiente de rigidez efetivo para as três linhas de parafuso.	86
Tabela 5. 5 – Braço de alavanca equivalente da ligação em estudo.	87

Tabela 5. 6 – Coeficiente de Rigidez equivalente da região tracionada da ligação e coeficiente K_2	87
Tabela 5. 7 – Coeficiente de rigidez do modelo LVC05 (N/rad).	88
Tabela 5. 8 – Relação entre resultados teóricos e resultados numéricos (Ansys 12.0). .	90

Lista de Gráficos

Capítulo 4 - Resultado da Análise Numérica

Gráfico 4. 1 - Momento na viga x tensão na intersecção da chapa com a viga	60
Gráfico 4. 2 - Momento x Rotação para ligação LVC01	63
Gráfico 4. 3 - Curvas Momento x Rotação para variação da chapa de topo.	72
Gráfico 4. 4 - Curvas Momento x Rotação para variação das chapas das vigas e coluna da ligação.	73
Gráfico 4. 5 - Curvas Momento x Rotação para variação diâmetro dos parafusos.	74
Gráfico 4. 6 – Curvas Momento x Rotação para variação altura do pilar.	75

Capítulo 5 – Análise e Comparação dos Resultados

Gráfico 5. 1 – Curva comparativa de semirrigidez entre modelo teórico e numérico. ...	90
---	----

1. Introdução

Os modelos utilizados na análise estrutural de edifícios, sejam eles de qualquer material – aço, concreto ou madeira – são baseados em barras unidimensionais interligadas entre si por nós. As barras representam as vigas, colunas e qualquer elemento linear e os nós as ligações entre eles.

Para facilitar os procedimentos de cálculo, embora haja uma infinidade de maneiras de representar esses nós, é uma prática comum idealizá-los como ligações rígidas ou flexíveis.

Estas simplificações omitem o real funcionamento das estruturas, pois há uma série de dispositivos mecânicos, inerentes à ligação, que são negligenciados por não representar suas imperfeições, descontinuidades geométricas e mecânicas, além de efeitos locais que devem ser levados em consideração.

Com isso, para que uma análise seja representativa do modelo real das estruturas, vem sendo introduzido um novo tipo de abordagem, levando em conta ligações com nível intermediário de rigidez e suas consequências no comportamento estrutural.

Além de saber o real comportamento estrutural, outro benefício do uso da semirrigidez da ligação é a diminuição do peso/custo dos materiais utilizados nas estruturas. O uso da curva momento x rotação e a introdução de uma rigidez rotacional as ligações, reduz o momento solicitante nas vigas e conseqüentemente os perfis utilizados diminuem de seção reduzindo o peso/custo da estrutura.

Vale ressaltar que, embora representem uma parcela pouco significativa do peso total da estrutura, quando se analisa economia proporcionada pelo uso das ligações semirrígidas no custo total das estruturas metálicas, elas acabam por merecer uma análise mais refinada do seu comportamento.

Nos muitos trabalhos desenvolvidos com o tema, a necessidade de incluir a semirrigidez da ligação aos modelos numéricos, a procura por classificações mais consistentes e adequadas ao comportamento estrutural das ligações, a busca por uma

análise teórica representativa destas, através de métodos matemáticos e físicos, são um dos principais estímulos. O caráter científico das pesquisas, a busca por estruturas mais leves e econômicas em seus processos de fabricação e a facilidade na montagem através de ligações aparafusadas dos elementos metálicos também são incentivadores das pesquisas.

O conhecimento do comportamento da ligação em estudo, embora seja uma muito específica, os materiais e elementos utilizados no modelo numérico, as considerações feitas na análise numérica e teórica, poderão trazer grande contribuição aos trabalhos futuros.

Com isso, objetiva-se apresentar, além do modelo numérico, uma formulação de dimensionamento da semirrigidez teórica da ligação em estudo, com base no proposto pelo Eurocode 3: Projeto de Estruturas de Aço, Parte 1-8: Projeto de Ligações 2010, com o uso também da NBR 14762:2010 - Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio e também a NBR 8800 – Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios, para avaliação de ligações equivalentes a apresentada neste trabalho.

A ligação em estudo é composta basicamente por duas vigas, que possuem uma chapa soldada em uma das extremidades. Essas chapas são ligadas a um pilar central, através de seis parafusos que atravessam o mesmo e recebem as porcas para fixação. Os perfis são fabricados em chapas finas dobradas, soldados, formando um perfil tubular no o pilar, e dois perfis “I”, com flanges enrijecidos nas vigas.

Uma outra forma de análise de ligações, além do método numérico e teórico, é através de ensaios laboratoriais. Estes métodos se tornaram onerosos pois dependendo dos resultados demandados a instrumentação necessária para a obtenção dos resultados possuem alto valor, além também do gasto de materiais.

Dado isso, neste trabalho realiza-se a análise numérica da ligação em estudo para posterior variação de sua geometria e, com o uso das normas em vigor, objetiva-se a sistematização do cálculo dos coeficientes de rigidez e em seguida calcular a semirrigidez da ligação, através de formulações que incluem suas características geométricas.

Iniciando o desenvolvimento deste trabalho, ainda neste capítulo de **Introdução**, apresentam-se as considerações gerais pertinentes aos assuntos abordados e a ligação viga coluna com placa de topo. Será exposta a classificação das ligações segundo o Eurocode 3 (2010), além dos conceitos associados ao uso das ligações semirrígidas na análise estrutural. Por fim, expõem-se as definições, métodos de fabricação, histórico e principais empregos dos perfis formados a frio.

Em seguida, o capítulo 2 é dedicado ao **Estudo Teórico**. Descreve-se a geometria de cada um dos componentes da ligação com objetivo de apresentar todo o embasamento e conceitos necessários para a compreensão deste trabalho, como o efeito alavanca e a teoria e ligações “t-stub”, base para o dimensionamento da resistência e semirrigidez da região tracionada da ligação, além do método de avaliação proposto pelo Eurocode 3 (2010).

Apresenta-se ainda os conceitos utilizados pelo método das componentes, também proposto pelo Eurocode 3 (2010), para a avaliação da semirrigidez da ligação, o dimensionamento dos coeficientes de rigidez, dados por molas, utilizados em ligações com chapa de topo, além das combinações necessárias para obtenção da semirrigidez da ligação.

O capítulo 3, intitulado **Análise Numérica**, apresenta as configurações utilizadas no modelo computacional em elementos finitos, realizado no programa Ansys, version 12.0. Neste capítulo expõem-se o algoritmo numérico, os elementos utilizados em cada uma das componentes da ligação, estratégias para análise não linear, modelos de material, por fim, todas as considerações e critérios utilizados pelo programa para a análise numérica da ligação em estudo.

São indicadas as condições de contorno utilizadas, as discontinuidades geométricas representadas por elemento de contatos, os carregamentos aplicados, as malhas utilizadas no pilar, nas vigas, chapas e parafusos do modelo.

No capítulo 4, **Resultado da Análise Numérica**, apresenta-se os resultados relativos a análise numérica dos 18 modelos rodados no programa. Através da análise de tensões de Von Mises são expostos a trajetória da distribuição de tensões das vigas,

passando pelas chapas e chegando ao pilar, assim como, os efeitos destas em cada um dos elementos da ligação.

Complementando a análise de tensão e caminho das cargas, são esboçados gráficos comparativos de semirrigidez com a variação da geometria de cada um dos componentes, espessura da chapa de topo, espessura das vigas e pilares, diâmetro dos parafusos e altura dos pilares.

O capítulo 5, **Análise e Comparação dos Resultados**, apresenta a avaliação teórica da ligação, a proposição das componentes que interferem na ligação e o cálculo do coeficiente de rigidez de cada uma delas, explicitados através de tabelas para, por fim, se chegar a semirrigidez da ligação relativa ao modelo LVC05.

Realiza-se a comparação dos resultados entre a análise numérica, dada pelo programa Ansys, version 12.0 e a análise teórica, contemplando as configurações utilizadas para aproximação dos resultados entre as análises.

Esboça-se também o posicionamento da semirrigidez dos 19 modelos estudados neste trabalho entre os limites abordados pelo Eurocode 3 (2010) das ligações rotuladas e engastadas.

Finalizando, o capítulo 6 apresenta as **Conclusões e Recomendações** para trabalhos futuros, e por fim, apresentam-se as **Referências Bibliográficas** e os **Anexos** com a APDL utilizada no programa de cálculo Ansys, version 12.0.

1.1. Considerações Gerais

O comportamento global de uma estrutura metálica está diretamente ligado à rigidez de seus elementos e suas ligações. O desempenho de ligações entre vigas e colunas metálica, como lembrou PRELORENTZOU (1991), citado por RIBEIRO (1998), não tem o mesmo comportamento monolítico característico das estruturas de concreto convencionais.

As ligações são descontinuidades geométricas e mecânicas. Essas características demandam uma abordagem cuidadosa e devem ser tratadas com muito rigor, analisando o seu comportamento da forma mais precisa possível.

Para facilitar e viabilizar a análise estrutural são adotadas simplificações, e as ligações são classificadas como rígidas e flexíveis, mas sabe-se que o comportamento real da maioria delas se encontra entre estas duas situações.

Neste intervalo, se encontram as ligações semirrígidas, que segundo RIBEIRO (1998), a quantificação dos valores de semirrígidez é de difícil avaliação e dependente de análises experimentais, e um fator importante para o avanço das pesquisas foi o extraordinário desenvolvimento verificado na área da computação, o que possibilitou o uso de equipamentos e técnicas sofisticadas para a análise e tratamento dos modelos experimentais e para o refinamento dos modelos matemáticos desenvolvidos.

O método dos elementos finitos é uma destas técnicas, e vem sendo utilizado com grande frequência em pesquisas, permitindo que as especificações de projetos passem a incorporar recomendações relativas ao comportamento estrutural das ligações, introduzindo novos modos de classificação.

A norma europeia, denominada Eurocode 3 (2010), estabelece algumas diretrizes para a aplicação do comportamento das ligações no projeto e dimensionamento de estruturas metálicas, incluindo alguns critérios básicos para a classificação e modelagem do comportamento momento-rotação das ligações viga-coluna.

O ANSI/AISC (2010) apresenta orientação específica para o uso da análise elástica de primeira ordem com o uso dos fatores B1 e B2 de amplificação, que incorporam os efeitos de segunda ordem no projeto de estruturas apertadas com ligações rígidas.

Por fim, serão apresentados alguns conceitos e métodos para análise de ligações, assim como uma contextualização histórica para um melhor entendimento sobre o comportamento da ligação em estudo assim como os métodos de classificação.

1.2. Ligações viga coluna com chapa de topo

Este tipo de ligação é constituída de perfis metálicos, ligados através de uma chapa soldada à extremidade da viga horizontal, e parafusada a mesa do pilar. A ligação a momento transfere os esforços da viga ao pilar através dos parafusos na região tracionada e do contato viga-chapa-pilar na região comprimida. A ligação é apresentada na figura 1.1.

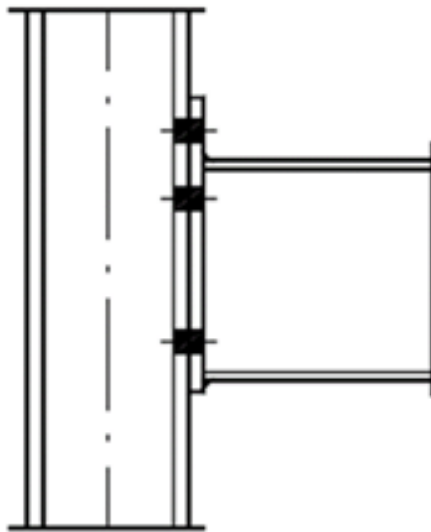


Figura 1. 1 – Ligação viga pilar com chapa de topo entre perfis I.

Como mostrado na figura 1.2, o momento fletor é transmitido da viga para o pilar através de um binário de tração dos parafusos superiores e a compressão do flange inferior da viga, originando o braço de alavanca “z”. Este tipo de ligação tem, na maioria das vezes, comportamento semirrígido quanto à rigidez, rotação e resistência ao momento fletor.

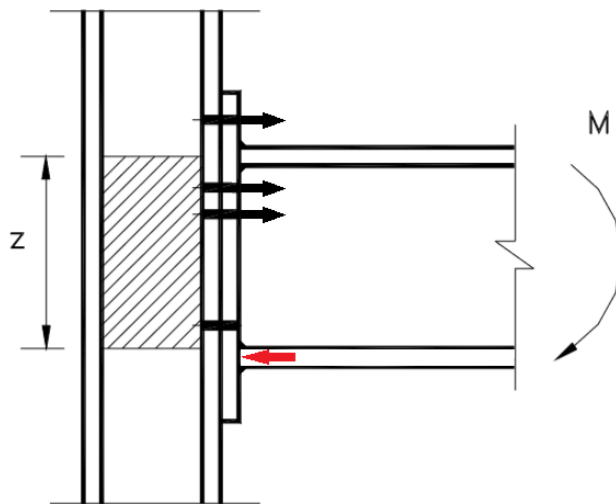


Figura 1. 2 – Binário de tração e compressão - ligação chapa de topo.

1.3. Classificação das ligações

As ligações estruturais são usualmente conduzidas em projetos como rígidas ou simplesmente flexíveis. O primeiro modo implica que não ocorra nenhuma rotação relativa entre os membros conectados, ou seja, em qualquer ligação viga-coluna, a distribuição de momentos fletores ocorre de acordo com a rigidez à flexão destes membros.

De forma oposta, é considerado nas ligações flexíveis que a rotação relativa na extremidade da viga seja livre, isto é, o momento fletor na extremidade da viga é zero. Contudo, sabe-se que todas as ligações, apesar de serem classificadas como rígidas, permitem certa deformação por flexão. Já as ligações consideradas flexíveis, possuem certo grau de restrição desta rotação. Estas são chamadas ligações semirrígidas.

A semirrigidez é associada a curva momento versus rotação. A ligação é representada por uma mola rotacional que faz a ligação entre as linhas médias dos membros ligados, como mostrado na Figura 1.3.

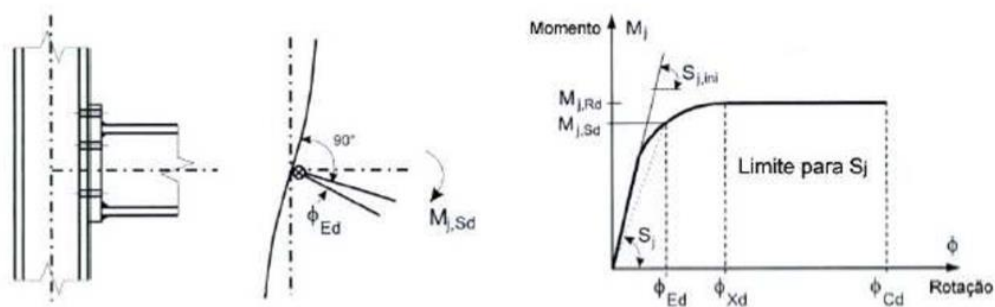


Figura 1. 3 – Parâmetros para dimensionamento da semirrigidez da ligação.

Onde:

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

Devido à utilização dos métodos simplificadores adotados até os dias de hoje, os elementos de ligação não têm seus reais comportamentos levados em consideração na análise global da estrutura, são dimensionados separadamente, a partir dos esforços de extremidade dos demais elementos estruturais (vigas e colunas).

Segundo RIBEIRO (1998), posteriormente a 1978, em situações de projeto, era usual estimar qual a influência da ligação no comportamento da estrutura, sem a utilização de uma análise não-linear.

Com a evolução das pesquisas e os estudos realizados atualmente, os principais códigos internacionais, como o Eurocode 3 (2010), o ANSI/AISC (2010), assim como a NBR8800 (2008), trazem limites na rigidez da ligação em função das características geométricas dos perfis ligados e consideram em separado os critérios de rigidez e resistência, possibilitando que uma mesma ligação pode ser classificada em categorias diferentes.

A classificação proposta pelo Eurocode 3 (2010) é baseada na capacidade resistente dos elementos estruturais e a rigidez da ligação está diretamente ligada à rigidez dos elementos conectados e ao comportamento global da estrutura. Neste modelo, as ligações não são tratadas isoladamente e com isso apresentam uma

complexidade maior na análise global da estrutura. Na seção seguinte é apresentada as classificações segundo o EUROCODE 3.

1.4. Classificação segundo Eurocode 3 (2010)

A classificação proposta pelo Eurocode 3 (2010) é baseada na capacidade de carga dos elementos estruturais, que é afetado pelo comportamento global da estrutura. A rigidez das ligações está diretamente ligada à rigidez dos elementos conectados. Esta norma propõe parâmetros relativos à rigidez e à resistência, analisados separadamente.

O primeiro critério está diretamente ligado à rigidez global da estrutura. A utilização de contraventamentos afeta diretamente os limites de classificação, mostrados na figura 1.4.

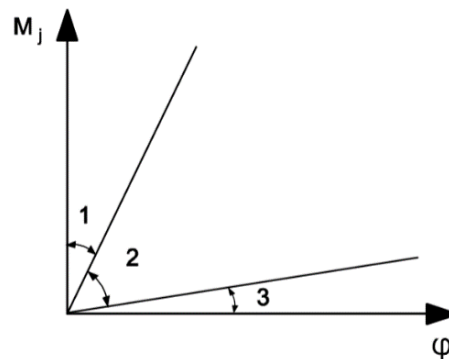


Figura 1. 4 – Classificação das ligações segundo a rigidez.

Os limites são dados por:

- Zona 1 – Rígida: $S_{j,ini} \geq k_b EI_b / L_b$;
- Zona 2 – Semirrígidas: todas ligações entre os dois limites;
- Zona 3 – Flexíveis: $S_{j,ini} \leq 0,5 EI_b / L_b$;

Sendo que:

- φ = Rotação relativa entre os membros da ligação;

- k_b = Parâmetro adimensional dado em função do valor médio de I_b/L_b , obtido por:
 - $k_b = 8$ para estrutura cujo os contraventamentos reduzem em pelo menos 80% os deslocamentos horizontais (estrutura contraventada);
 - $k_b = 25$ para demais estruturas (não contraventada), assegurando-se que, para cada pavimento, $k_b/k_c \geq 0,1$;
- k_c = Parâmetro adimensional dado em função do valor médio de I_c/L_c , fornecido para todos pilares do pavimento;
- I_b = Momento de inércia da viga;
- I_c = Momento de inercia da coluna;
- L_b = Comprimento da viga;
- L_c = Comprimento da coluna;
- E = Modulo de elasticidade do aço;

O segundo critério é relativo à resistência. As ligações são classificadas de acordo com sua capacidade de receber e transferir os momentos fletores, sendo divididas em:

- Ligações rotuladas: ligações projetadas para transferir apenas esforços normais e cortantes, não absorvendo valores consideráveis de momento fletor. A capacidade de rotação das ligações deve ser capaz de permitir a formação de rótulas plástica sem que o momento seja transferido entre os elementos. São consideradas rotuladas ligações cujo momento $M_{j,Rd}$ não exceda 0,25 do momento da ligação totalmente resistente, com isso a capacidade de rotação seja “totalmente” garantida.
- Ligações completamente resistentes: ligações projetadas para que o valor de cálculo da resistência da ligação seja pelo menos igual à resistência dos elementos ligados. A rotação entre os membros deve ser praticamente desprezível. A formação da rotula plástica não acontece na ligação, mas sim, nos elementos ligados.
- Ligações parcialmente resistentes: ligações que não satisfazem as condições para serem rotuladas e completamente resistentes.

Por fim, salienta-se a dificuldade em classificar uma ligação, seja pelos critérios da rigidez ou resistência, ou pela complexidade dos métodos e ligações. Com isso, a necessidade de introduzir a semirrigidez de maneira racional às estruturas para refletir a rigidez de suas ligações, é de difícil quantificação, mas necessário para proporcionar aos projetos maior economia e desempenho estrutural.

1.5. Utilização de análise não linear e as ligações semirrígidas

Um sistema de classificação unificado é necessário e útil para que possa ser utilizado de forma segura e coerente no projeto e dimensionamento das estruturas. É de fundamental importância se conhecer a que categoria, dentro do sistema de classificação, está a ligação em estudo.

Já bem conhecidos e utilizados dois tipos de ligações, flexíveis e rígidas, torna-se necessário considerar o terceiro tipo, as ligações semirrígidas, que possuem flexibilidade (ou rigidez) intermediária como já explicado anteriormente.

Na análise estrutural de ligações semirrígidas, a resposta da ligação deve ser apurada para que a análise conduza a uma representação real da estrutura. Deve-se também levar em conta os efeitos de segunda ordem produzidos, com significativo crescimento nos deslocamentos à medida que cresce a flexibilidade das ligações.

É extremamente importante salientar que, com a utilização das ligações semirrígidas, análises que representam as características de não linearidade geométrica da estrutura oriundas do comportamento estrutural das ligações devem ser feitas de acordo com o comportamento real das ligações.

Romano (2001) apresenta um fluxograma com uma metodologia de dimensionamento, onde é levado em conta a semirrigidez da ligação e é esboçado na figura 1.5.

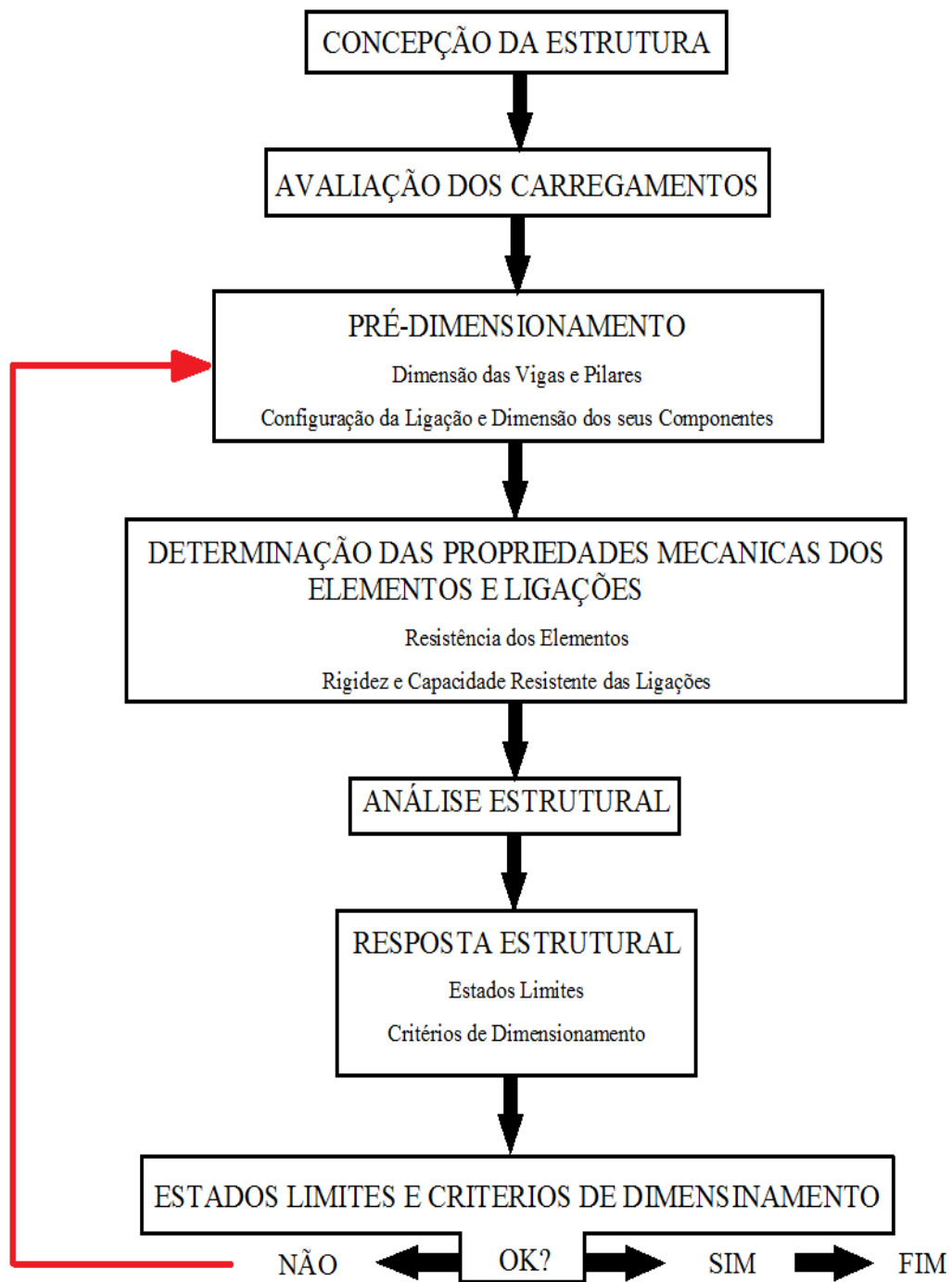


Figura 1. 5 – Fluxograma de análise e dimensionamento.

1.6. Perfis de aço formados a frio

Os perfis de aço formados a frio ou perfis leves foram inicialmente utilizados nos Estados Unidos e Grã-Bretanha em 1950. São assim chamados devido ao seu processo de fabricação, onde a conformação é realizada por três processos distintos denominados: dobramento ou prensagem, calandragem e perfilagem mostradas na figura 1.6, 1.7 e 1.8 respectivamente. Estes perfis são formados, geralmente por chapas finas com até 6,3mm de espessura, o que lhes proporciona leveza, facilidade de manuseio e transporte e conseqüentemente menor custo.

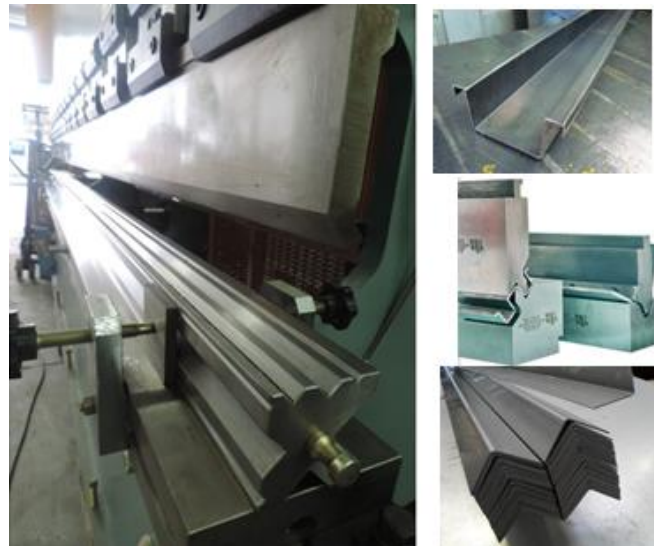


Figura 1. 6 – Processo de conformação a frio – dobragem ou prensagem.

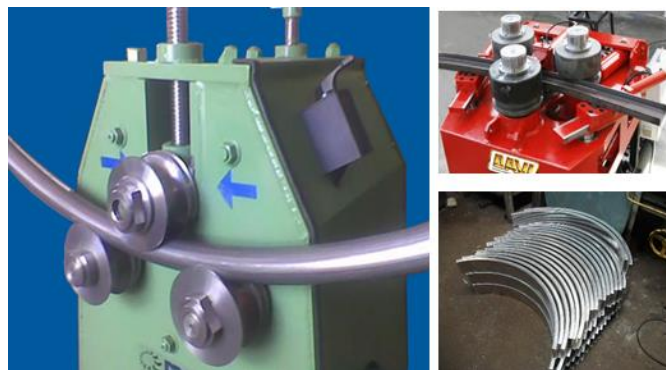


Figura 1. 7 – Processo de conformação a frio – calandragem.



Figura 1. 8 – Processo de conformação a frio – perfilagem.

Devido a sua simplicidade de fabricação, basicamente corte e dobra de chapas de aço, permite uma grande variedade de perfis, possibilitando a fabricação de geometrias com dimensões que atendam a situações particulares de um projeto, sem grandes elevações no preço final. Alguns tipos de perfis são mostrados na figura 1.9.

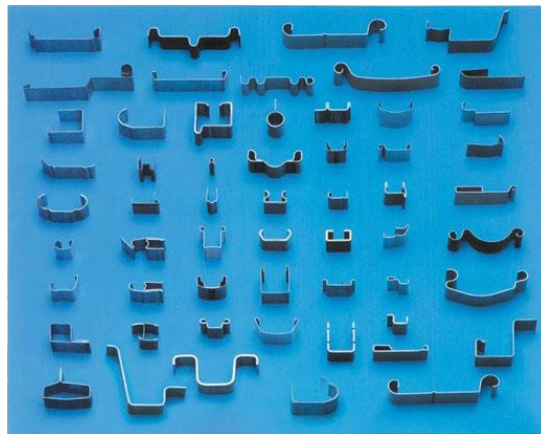


Figura 1. 9 – Seções transversais em perfis formados a frio.

Embora haja uma grande gama de perfis que podem ser utilizados, no Brasil os perfis “U”, “U” enrijecido, “I” – formado pela união de dos perfis “U”, “Z”, cartola e

seções fechadas – quadradas e retangulares são as mais utilizadas e são mostradas na figura 1.10.

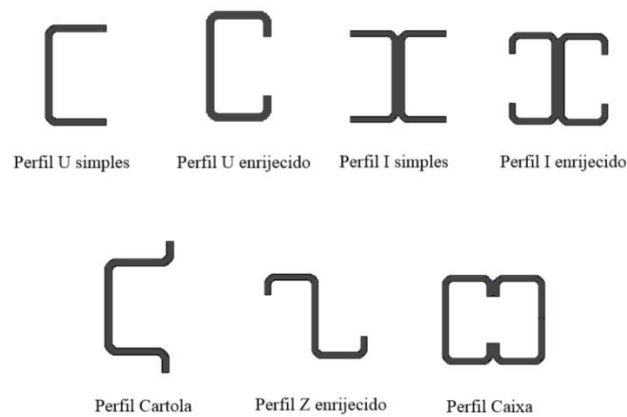


Figura 1. 10 – Seções transversais mais utilizadas.

Embora seja abrangente, seu emprego é voltado principalmente para coberturas de galpões e edifícios industriais, seja em estruturas principais em treliças de cobertura e também na estrutura secundária para suporte de telhas de fechamento e cobertura, como mostrado na figura 1.11.



Figura 1. 11 – Exemplo de uso dos perfis formados a frio em galpões.

Outra utilização crescente dos perfis leves é em edificações populares de até quatro pavimentos, onde as vigas são formadas por perfis “I”, compostos pela utilização de perfis “U” (enrijecidos ou não) e os pilares por seções caixas, que podem ser

preenchidos com concreto, também compostos pelo perfil “U”, mostrados na figura 1.12.



Figura 1. 12 – Edificações residências com utilização de perfis formados a frio.

Não muito utilizado no Brasil, mas visto em larga escala nos Estados Unidos e Europa, obras residenciais pré-fabricadas utilizam os perfis formados a frio em todo o projeto, colunas, vigas e estruturas secundárias de fechamento e esquadrias, como visto na figura 1.13.



Figura 1. 13 – Obras residências com utilização de perfis formados a frio.

Estruturas de armazenagem industrial também fazem utilização dos perfis formados a frio, proporcionando aos chamados racks, leveza e esbeltez necessários para este tipo de estrutura. A figura 1.14 mostra alguns exemplos.



Figura 1. 14 – Racks ou porta-paletes em perfis formados a frio.

Muitas são as aplicações dos perfis formados a frio em estruturas leves como as apresentadas anteriormente, devido a possibilidade de estruturas com menor custo em projetos.

2. Estudo teórico

Neste capítulo apresenta-se o modelo da ligação em estudo, seus elementos constituintes e parâmetros geométricos atribuídos a ela. São apontados os conceitos teóricos fundamentais para o entendimento da ligação viga coluna com chapa de topo, sendo eles o efeito alavanca, também chamando de “t-Stub” e o método das componentes, prescrito pelo Eurocode 3 (2010).

2.1. Considerações sobre o modelo

O modelo em estudo é composto por duas vigas, que possuem uma chapa soldada em uma das extremidades. Essas chapas são ligadas a um pilar central, através de seis barras roscadas passantes que recebem as porcas para fixação, como mostrado na figura 2.1.

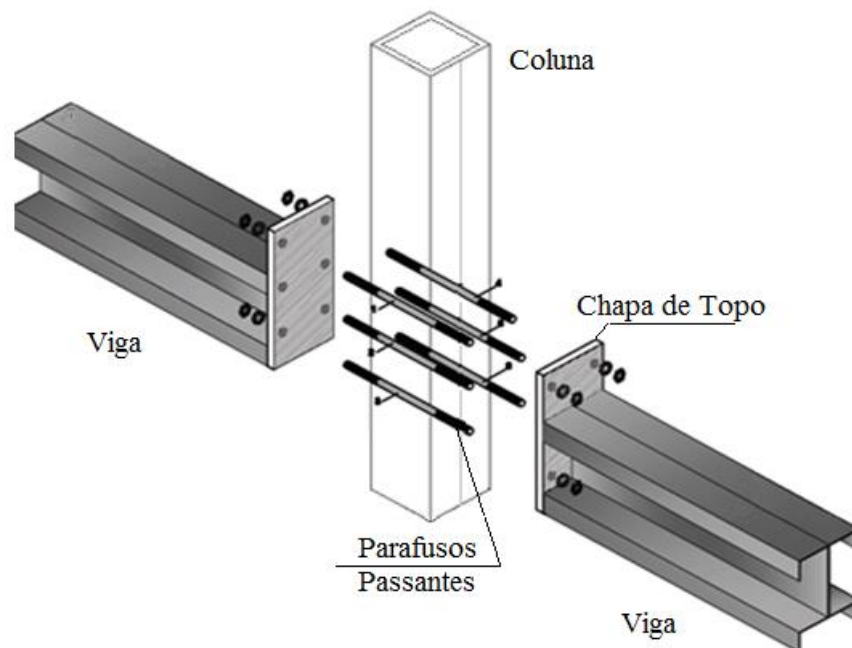


Figura 2. 1 – Ligação em estudo.

O estudo do comportamento da ligação foi realizado através da variação da geometria dos seus componentes. Os modelos considerados neste trabalho são apresentados na tabela 2.1.

Tabela 2. 1 – Modelos e características geométricas.

Model	D (mm)	t _p (mm)	h _b (mm)	b _{fb} (mm)	t _{fb} =0,5t _{wb} (mm)	h _c (mm)	b _{fc} (mm)	t _{fc} =t _{wc} (mm)
LVC01	12.50	6.0	250	170	4.75	250	170	4.75
LVC02		8.0						
LVC03		9.5						
LVC04		12.5						
LVC05	12.50	8.0	250	170	3.50	250	170	3.50
LVC06					4.00			4.00
LVC07					4.50			4.50
LVC08					5.00			5.00
LVC09					5.50			5.50
LVC10					6.00			6.00
LVC11					6.30			6.30
LVC12	12.50	9.5	250	170	6.30	250	170	6.30
LVC13	15.90							
LVC14	19.05							
LVC15	22.22							
LVC16	12.5	9.5	250	170	6.30	200	170	6.3
LVC17						250		
LVC18						300		
LVC19						350		

D – diâmetro dos parafusos; t_p – espessura da chapa; h_b – altura da viga; b_{fb} – largura da viga; t_{wb} – espessura da alma da viga; t_{fb} – espessura do flange da viga; h_c – altura da alma da coluna; b_{fc} – largura da coluna; t_{wc} – espessura da alma da coluna; t_{fc} – espessura do flange da coluna

Segue nos próximos subitens, a definição da geometria de cada componente mostrada na tabela 2.1, assim como, parâmetros em estudo nesse trabalho.

2.1.1. Coluna

A figura 2.2 mostra a coluna composta de dois perfis “U enrijecidos”, soldados, que formam um único perfil “caixa”. As dimensões variam de acordo com a tabela 2.1, com exceção do comprimento do enrijecedor.

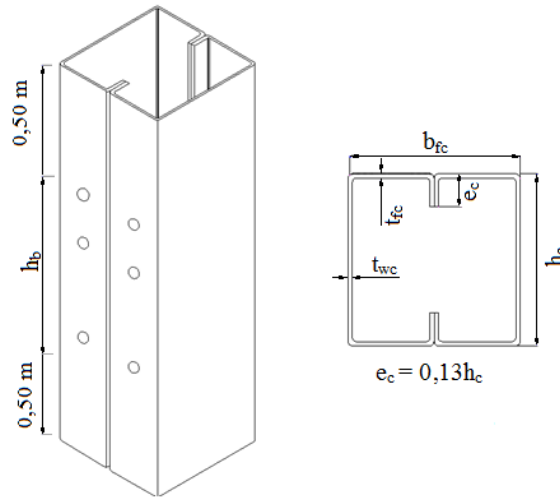


Figura 2. 2 – Seção do pilar e parâmetros geométricos

2.1.2. Viga

A viga também é composta de dois perfis “U enrijecidos” soldados. Os enrijecedores do flange superior e inferior são dobrados no mesmo sentido, formando um único perfil I. As dimensões variam de acordo com a tabela 2.1, com exceção do comprimento do enrijecedor, apresentado na figura 2.3.

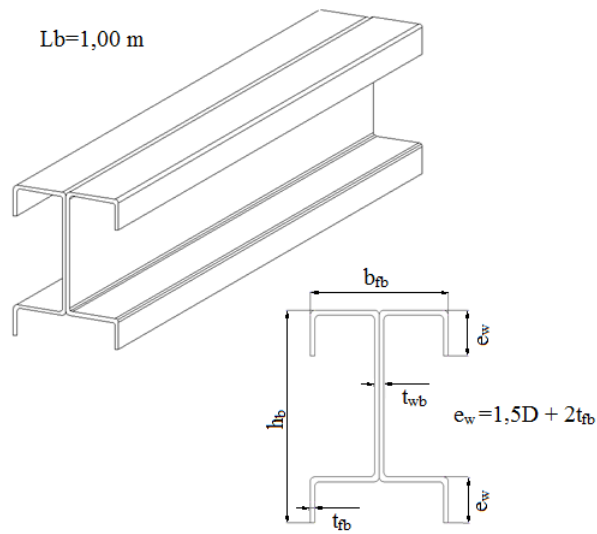


Figura 2. 3 - Seção do viga e parâmetros geométricos.

A relação $e_w = 1,5D + 2t_{fb}$ foi utilizada como simplificação na determinação dos enrijecedores das colunas.

2.1.3. Chapa de topo

A chapa possui 6 furos, mostrados na figura 2.4, sendo 2 deles acima do flange superior da viga e os outros quatro abaixo dos flanges superior e inferior. As dimensões variam de acordo com a tabela 2.1.

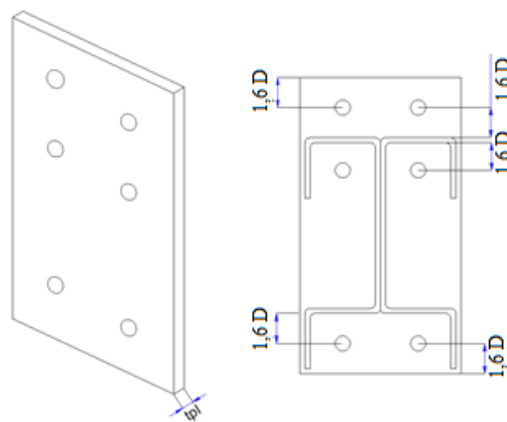


Figura 2. 4 – Chapa de topo e parâmetros geométricos.

2.1.4. Barras redondas e porcas

A ligação é realizada por 6 barras redondas roscadas, mostrados na figura 2.5, todas com diâmetro “D”, que atravessam o perfil e são fixadas através de porcas. Para a simulação, considerou-se o conjunto atuando como um único elemento, sendo o comprimento do parafuso igual a soma das espessuras das chapas de topo com a altura do pilar e das porcas.

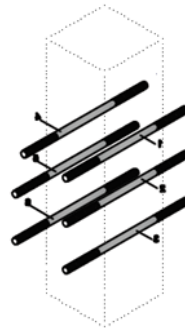


Figura 2. 5 – Barras passantes.

A padronização da geometria das porcas, seguindo alguns catálogos de mercado, foi realizada da seguinte forma:

$$C1 = 1.66D/2$$

$$C2 = \sqrt{3} C1/2$$

Os parâmetros C1 e C2 são mostrados na figura 2.6 abaixo.

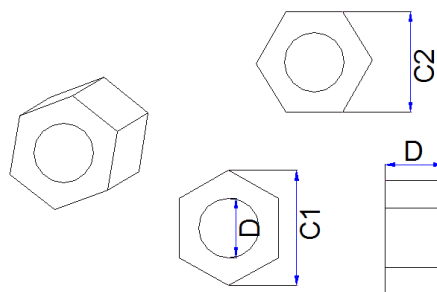


Figura 2. 6 – Parâmetros geométricos das porcas de mercado.

2.2. Ligações “t-stub” e efeito alavanca em perfis “T”

O modelo de ligação “t-stub” é utilizado nas ligações realizadas através de chapas. O esforço de tração causa a flexão da chapa ou perfil conforme será mostrado. O mecanismo pode ser visto em chapas que ligam viga-viga, viga-coluna, coluna-base, além de emendas de vigas e colunas, mostradas na figura 2.7.



Figura 2. 7 – Tipos de ligações com chapa de topo

O método simplificado para o dimensionamento destas ligações é representado na figura 2.8, onde a princípio tem-se que a força F_t é dividida igualmente entre os parafusos.

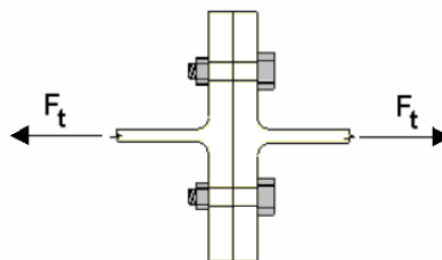


Figura 2. 8 – Ligação “t-stub”.

Dependendo da geometria do perfil e dos materiais dos elementos conectados podem aparecer forças devido ao efeito alavanca mostradas na figura 2.9.

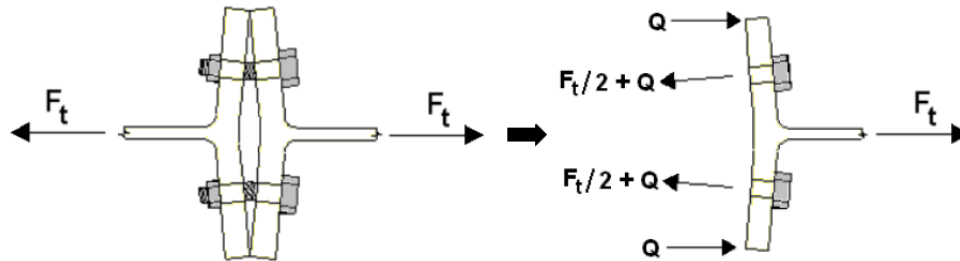


Figura 2. 9 – Distribuição das forças devido ao efeito alavanca.

Zoetemeijer e deBack (1972) apresentaram uma formulação para dimensionamento considerando a formação de rótulas plásticas na união do flange com a alma do perfil "T" e observaram 3 modos de colapso mostrados na figura 2.10.

Modo 1: Formação da rótula plástica na linha de parafusos com máximo valor da força "Q" devido ao "efeito alavanca".

Modo 2: Formação da rótula plástica na interseção entre o flange e a alma e ruptura simultânea do parafuso.

Modo 3: Colapso dos parafusos e menor valor da força "Q".

A força "Q" é resultado do efeito alavanca produzido pela seção.

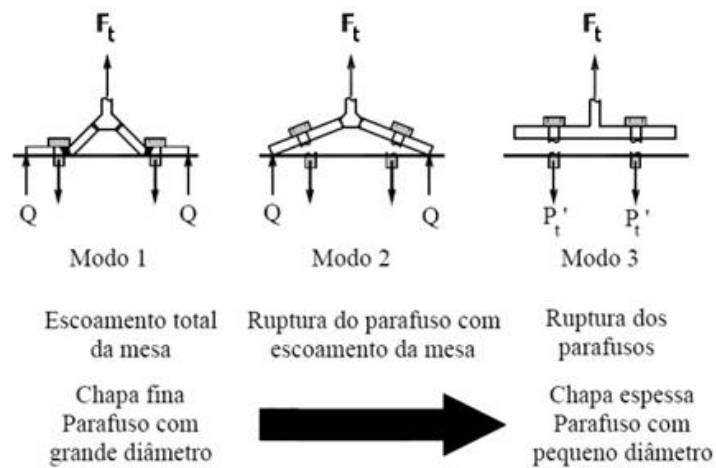


Figura 2. 10 – Modos de falha do “t-stub”.

Seguindo este modelo de análise, as normas em uso Brasileira NBR8800, Britânica BCSA e a Europeia Eurocode 3 (2010) tratam este assunto com pequenas variações na geometria para o modelo de cálculo do perfil T e o efeito alavanca.

O Eurocode 3 (2010) - Projeto de Estruturas de Aço - Parte 1.8: Projeto de Ligações apresenta uma formulação para o cálculo da resistência da ligação de acordo com a tabela 2.2 considerando o comprimento equivalente (L_{eff}) para cada linha de parafusos separadamente.

Tabela 2. 2 – Resistência $F_{T,Rd}$ do “t-stub”.

	Efeito alavanca		Sem Efeito alavanca
Modo 1	Método 1	Metodo2 (alternativo)	$F_{T,1,Rd} = M_{pl,1,Rd}/m$
Contra Chapa	$F_{T,1,Rd} = \frac{4 M_{pl,1,Rd}}{m}$	$F_{T,1,Rd} = \frac{(8n - 2e_w)M_{pl,1,Rd}}{2mn - e_w (m + n)}$	
Sem Contra Chapa	$F_{T,1,Rd} = \frac{4 M_{pl,1,Rd} + 2M_{bp,Rd}}{m}$	$F_{T,1,Rd} = \frac{(8n - 2e_w)M_{pl,1,Rd} + 4nM_{bp,Rd}}{2mn - e_w (m + n)}$	
Modo 2	$F_{T,1,Rd} = \frac{M_{pl,2,Rd} + n\sum F_{t,Rd}}{m + n}$		
Modo 3	$F_{T,3,Rd} = n\sum F_{t,Rd}$		

Modo 1 : Plastificação total do banzo;
 Modo 2: Rompimento dos parafusos e plastificação do banzo;
 Modo 3: Rompimento dos parafusos;

L_b =comprimento do parafuso sujeito ao alongamento, considerado igual ao comprimento de aperto, adicionado a metade da soma da altura da cabeça com a metade da altura da porca. Ou o comprimento do chumbador sujeito a alongamento, considerado igual a 8x o diâmetro nominal da rosca do chumbador com espessuras da camada de argamassa de selagem, da arruela e, ainda, com metade da altura da porca;

$$F_{T,1,Rd} = \frac{8,8m^3 A_s}{\sum L_{eff,1} * t_f^3};$$

$F_{T,1,Rd}$ = Resistencia de cálculo à tração da seção T do banzo;
 Q - Força de alavanca;
 $M_{pl,1,Rd} = 0,25\sum L_{eff,1} t_f^2 f_y / \gamma_{M0}$
 $M_{pl,1,Rd} = 0,25\sum L_{eff,2} t_f^2 f_y / \gamma_{M0}$
 $M_{pl,1,Rd} = 0,25\sum L_{eff,1} t_{bp}^2 f_{y,bp} / \gamma_{M0}$
 $n = e_{min}$ mas, $n \leq 1,25m$;
 $F_{T,1,Rd}$ = tensão resistente de um parafuso;
 $\sum F_{t,Rd}$ = valor total das forças para todos parafusos;
 $\sum L_{eff,1}$ = valor de $\sum L_{eff}$ para o modo 1;
 $\sum L_{eff,2}$ = valor de $\sum L_{eff}$ para o modo 2;
 e_{min}, m, t_f = representado nas figuras 3.5 e 3.6;
 $f_{y,bp}$ = tensão de escoamento da contra chapa;
 t_{bp} = espessura da contra chapa;
 $e_w = d_w / 4$;
 d_w = diâmetro da arruela ou diâmetro dos círculos circunscritos na porca ou cabeça do parafuso conforme o caso.

Nota 1: em ligações vigas-colunas ou emendas de vigas, poderá admitir a ocorrência do efeito alavanca.
 Nota 2: No método 2, admite-se que a força aplicada ao banzo de uma peça em T por um parafuso está uniformemente distribuída sob a arruela, ou sob a cabeça do parafuso ou sob a porca, conforme o caso, ver figura, em vez de concentrada no eixo do parafuso. Esta hipótese conduz um valor mais elevado para o modo 1, mas deixa inalterados os valores de $F_{T,1-2,Rd}$ e os modos 2 e 3.

Embora o comprimento L_{eff} não seja uma grandeza geométrica da ligação, pode ser definido como mostrado na figura 2.11.

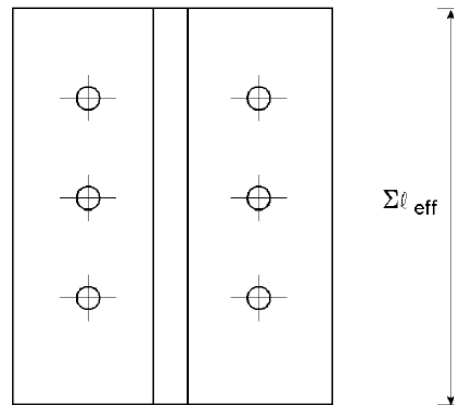
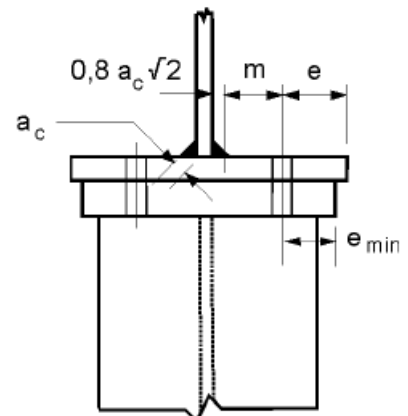
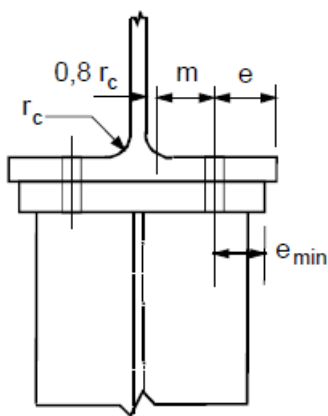
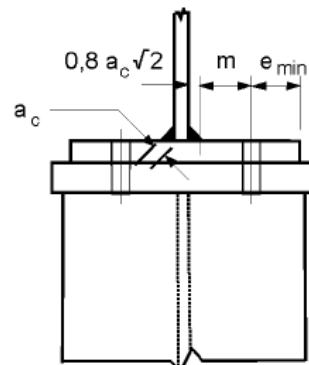
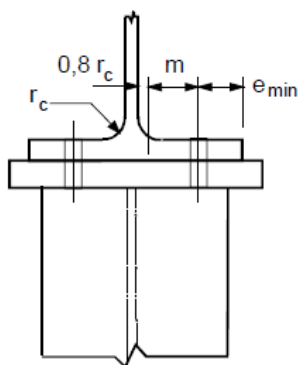


Figura 2. 11 – Somatório do comprimento efetivo L_{eff} .

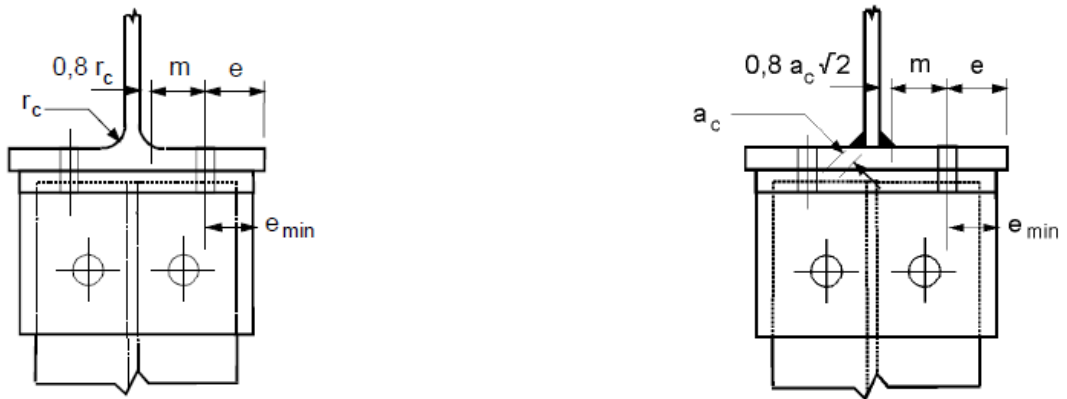
Tem-se também a definição dos parâmetros e , e_{min} , r_c e m , para os seguintes tipos de arranjos de ligação:



a) Chapa de topo mais estreita que o flange da coluna



b) Flange da coluna mais estreito que chapa de topo



c) Cantoneiras

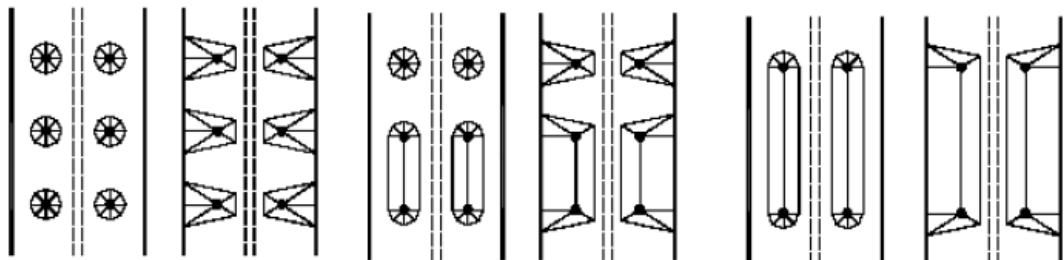
Figura 2. 12 – Definições de e, e_{min}, r_c e m.

Esta norma introduz o mecanismo do “t-stub” em três componentes dos 20 existentes no método, são elas: Flange da Coluna à Flexão (Componente 4), Chapa de Topo à Flexão (Componente 5) e Cantoneira à Flexão (Componente 6). A seguir segue um descritivo das duas componentes presentes na ligação.

2.2.1. Flange da coluna à flexão

Para esta componente é considerado o comprimento das linhas de furos separadamente ou em grupos, figura 2.13.

Os mesmos modos de falha são levados em consideração e o comprimento efetivo L_{eff} é mostrado na tabela 2.3 e 2.4.



a- Linhas Separadas

b- Linhas em grupos

c- Todas Linhas

Figura 2. 13 – Modos de ruptura das linhas de parafusos.

Tabela 2. 3 – Comprimento efetivo para flanges não enrijecidos.

Localização das Linhas de Parafusos	Linhas de Parafusos consideradas individualmente		Linhas de Parafusos consideradas como grupo	
	Formas Circulares ($l_{\text{eff,cp}}$)	Não Circulares ($l_{\text{eff,cp}}$)	Formas Circulares ($l_{\text{eff,cp}}$)	Não Circulares ($l_{\text{eff,cp}}$)
Linha Interna (abaixo do flange)	$2\pi m$	$4m + 1,25e$	$2p$	p
Linha Interna (acima do flange)	O menor entre: $2\pi m$ $\pi m + 2e_1$	O menor entre: $4m + 1,25e$ $2m + 0,625e + e_1$	O menor entre: $\pi m + p$ $2e_1 + p$	O menor entre: $2m + 0,625e + 0,5p$ $e_1 + 0,5p$
Modo 1	$l_{\text{eff},1} = l_{\text{eff,nc}}$ mas $l_{\text{eff},1} < l_{\text{eff,cp}}$		$\sum l_{\text{eff},1} = \sum l_{\text{eff,nc}}$ mas $\sum l_{\text{eff},1} < \sum l_{\text{eff,cp}}$	
Modo 2	$l_{\text{eff},2} = l_{\text{eff,nc}}$		$\sum l_{\text{eff},2} = \sum l_{\text{eff,nc}}$	

Tabela 2. 4– Comprimento efetivo para flanges enrijecidos.

Localização das Linhas de Parafusos	Linhas de Parafusos consideradas individualmente		Linhas de Parafusos consideradas como grupo	
	Formas Circulares ($l_{\text{eff,cp}}$)	Não Circulares ($l_{\text{eff,cp}}$)	Formas Circulares ($l_{\text{eff,cp}}$)	Não Circulares ($l_{\text{eff,cp}}$)
Linha adjacente ao enrijecedor	$2\pi m$	αm	$\pi m + p$	$0,5p + \alpha m - (2m + 0,625e)$
Linha Interna (abaixo do flange)	$2\pi m$	$4m + 1,25e$	$2p$	p
Linha Externa (acima do flange)	O menor entre: $2\pi m$ $\pi m + 2e_1$	O menor entre: $4m + 1,25e$ $2m + 0,625e + e_1$	O menor entre: $\pi m + p$ $2e_1 + p$	O menor entre: $2m + 0,625e + 0,5p$ $e_1 + 0,5p$
Linha Externa adjacente ao enrijecedor	O menor entre: $2\pi m$ $\pi m + 2e_1$	$e_1 + \alpha m - (2m + 0,625e)$	Não relevante	Não relevante
Modo 1	$l_{\text{eff},1} = l_{\text{eff,nc}}$ mas $l_{\text{eff},1} \leq l_{\text{eff,cp}}$		$\sum l_{\text{eff},1} = \sum l_{\text{eff,nc}}$ mas $\sum l_{\text{eff},1} \leq \sum l_{\text{eff,cp}}$	
Modo 2	$l_{\text{eff},2} = l_{\text{eff,nc}}$		$\sum l_{\text{eff},2} = \sum l_{\text{eff,nc}}$	

α obtido no gráfico da figura 3.9.

A figura 2.14 mostra o posicionamento das linhas de parafuso para o flange com enrijecedor.

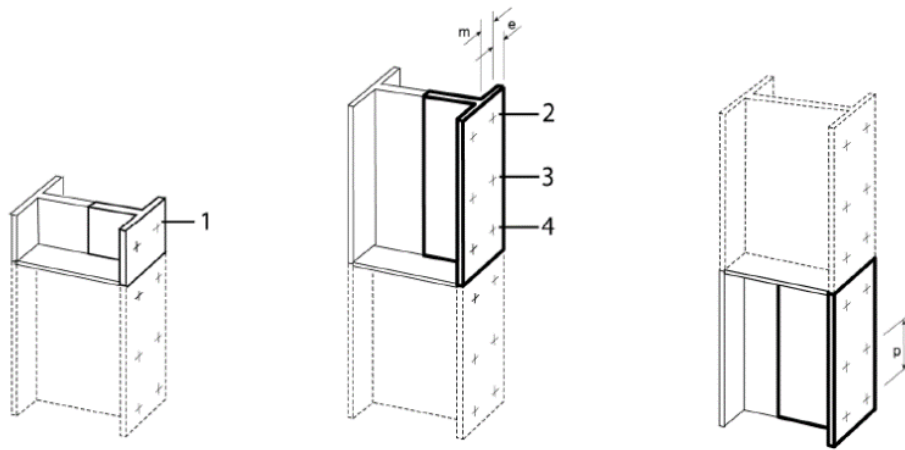


Figura 2. 14 – Modelo chapa de topo como “t-stubs” separados.

Onde:

1 - Linha de parafuso de extremidade e adjacente a um reforço;

2 - Linha de parafuso de extremidade;

3 - Linha de parafuso interior;

4 - Linha de parafuso adjacente a um reforço.

O parâmetro α é obtido no gráfico da figura 2.15, em função de m e e :

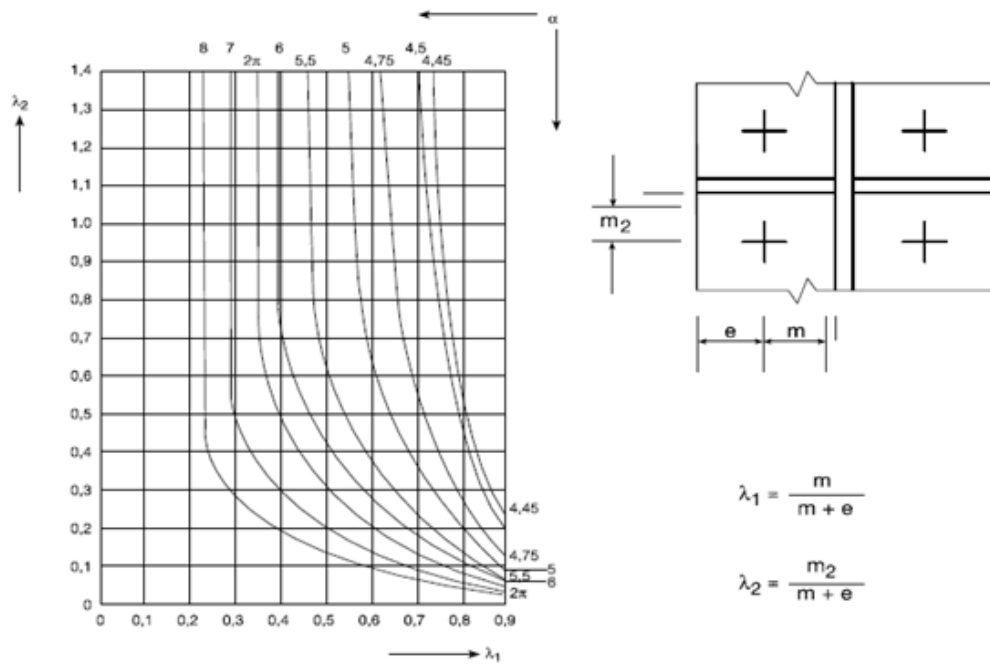


Figura 2. 15 – Valores de α para ligações com enrijecedores.

2.2.2. Chapa de topo sob flexão.

Esta componente também pode ser calculada considerando-se a formulação do “t-stub”. Os valores de resistência são calculados de acordo com a Tabela 2.2, obedecendo-se os mesmos critérios. Todavia, com algumas diferenças geométricas apresentadas na Figura 2.16. Nesta, observa-se a utilização do “t-stub” separado pela linha do flange, interno e externo, tanto para resistência quanto para modos de ruptura e rigidez de cada linha de parafusos.

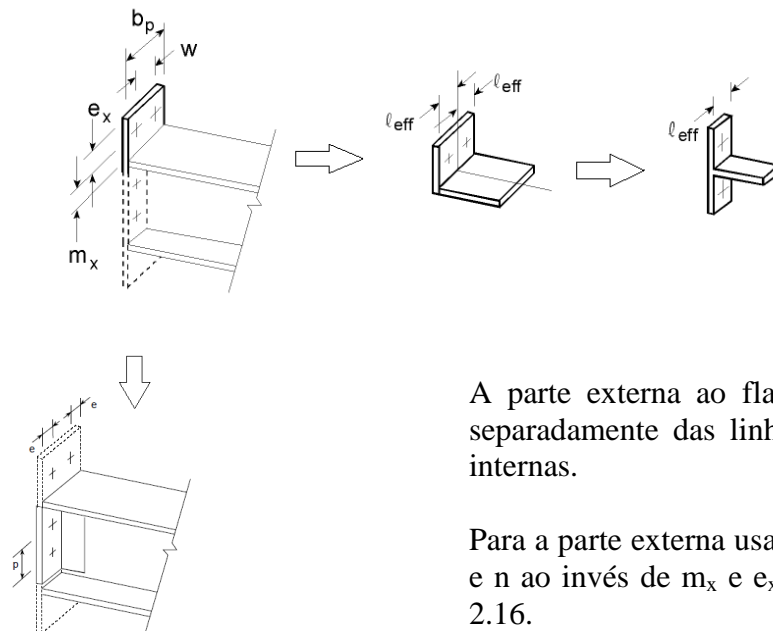


Figura 2. 16 – Parâmetros geométricos para cálculo da chapa de topo a flexão.

O comprimento efetivo L_{eff} para chapa de topo a flexão é dado na tabela 2.5.

Tabela 2. 5 – Comprimento efetivo para chapa de topo

Localização das Linhas de Parafusos	Linhas de Parafusos consideradas individualmente		Linhas de Parafusos consideradas como grupo	
	Formas Circulares ($l_{eff,cp}$)	Não Circulares ($l_{eff,cp}$)	Formas Circulares ($l_{eff,cp}$)	Não Circulares ($l_{eff,cp}$)
Linha adjacente ao enrijeecedor	O menor entre: $2\pi m_x$ $\pi m_x + w$ $\pi m_x + 2e$	O menor entre: $4m_x + 1,25e_x + 2m_x + 0,625e_x$ $0,5b_p$ $0,5w + 2m_x + 0,625e_x$	-	-
Linha Interna (abaixo do flange)	$2\pi m$	Am	$\pi m + p$	$0,5p + am - (2m + 0,625e)$
Outra linha abaixo do flange	$2\pi m$	$4m + 1,25e$	$2p$	p
Outra linha de parafuso de extremidade	$2\pi m$	$4m + 1,25e$	$\pi m + p$	$2m + 0,625e + 0,5p$
Modo 1	$l_{eff,1} = l_{eff,nc} \text{ mas } l_{eff,1} \leq l_{eff,cp}$		$\sum l_{eff,1} = \sum l_{eff,nc} \text{ mas } \sum l_{eff,1} \leq \sum l_{eff,cp}$	
Modo 2	$l_{eff,2} = l_{eff,nc}$		$\sum l_{eff,2} = \sum l_{eff,nc}$	

α obtido na do gráfico 3.1

2.3. Método das componentes – Eurocode 3 (2010)

O Método das componentes introduzido pelo Eurocode 3 (2010) foi idealizado depois de diversos estudos realizados na Europa principalmente por Zoetemeijer e deBack (1972). O método apresenta um conceito em que a resposta da ligação é determinada pelas propriedades mecânicas dos seus componentes.

O método propõe que o desempenho da ligação é dado pelo comportamento de cada um dos seus componentes, podendo ser aplicado a qualquer tipo de ligação em estrutura metálica. A determinação é feita com base nas propriedades de material e geometria nas zonas críticas da ligação, subdivididas em elementos constituintes, viga, chapa, parafusos e coluna.

É um método geral, baseado na distribuição plástica das forças de tração nas linhas de parafusos. Isto significa que a força em qualquer linha é determinada, não apenas pela sua distância até a linha de rotação da ligação, característica da tradicional distribuição triangular, mas também pela geometria de cada linha de parafuso como mostra a figura 2.17.

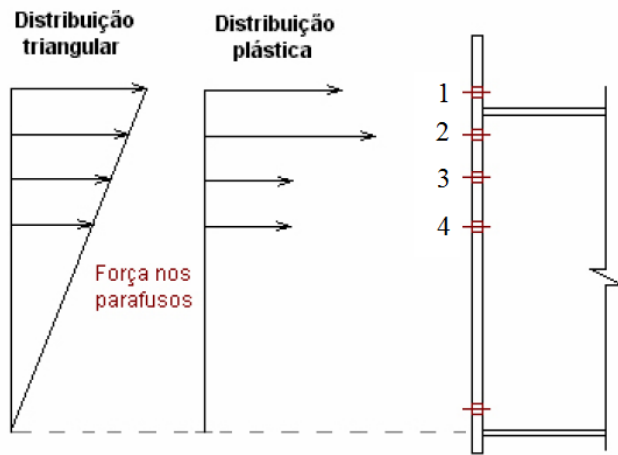


Figura 2. 17 – Distribuição triangular e plástica das forças.

A grande diferença do método está na verificação, tanto da coluna quanto da chapa de topo, através da formação de charneiras plásticas em torno dos parafusos e pelos perfis T equivalentes mostrados anteriormente.

A ligação é dividida em quatro regiões distintas, mostradas na figura 2.18, assim chamadas: zonas tracionada, comprimida, cisalhante e de cisalhamento vertical.

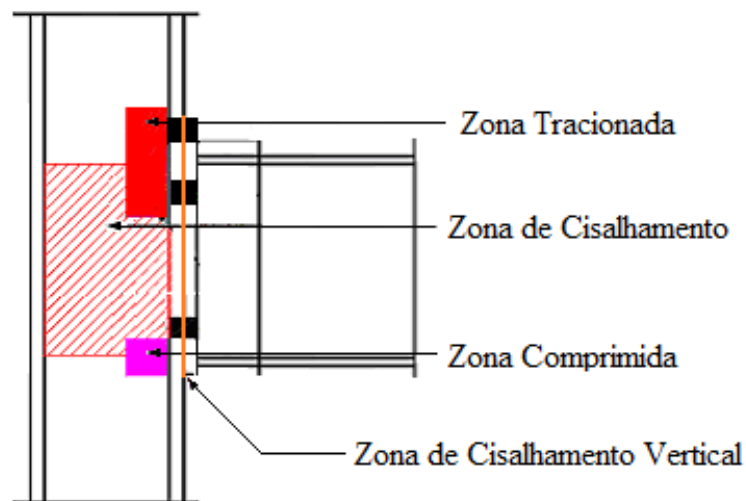


Figura 2. 18 - Zonas de recebimento de esforços.

Subdividindo essas regiões, o método propõe quinze verificações de resistência da ligação viga coluna, que são mostrados na tabela 2.6, ilustrados na figura 2.19.

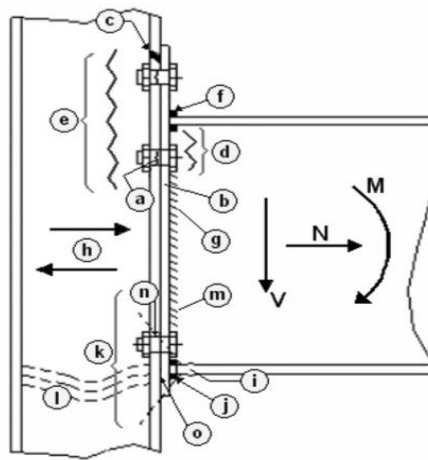


Figura 2. 19 – Ilustração das componentes verificadas pelo método.

Tabela 2. 6 – Componentes utilizadas nas ligações viga-coluna.

Região	Componente	Nome
Zona Tencionada	a	Tração nos parafusos
	b	Flexão da chapa de topo
	c	Flexão da mesa do pilar
	d	Tração da alma da viga
	e	Tração da alma do pilar
	f	Solda mesa/chapa de topo
	g	Solda alma/chapa de topo
Zona de Cisalhamento	h	Cisalhamento no painel de alma do pilar
Zona Comprimida	i	Mesa da viga
	j	Solda mesa/chapa de topo
	k	Enrugamento da alma do pilar
	l	Flambagem da alma do pilar
Zona de Cisalhamento Vertical	m	Solda alma/chapa de topo
	n	Cisalhamento nos parafusos
	o	Pressão de contato

Na figura 2.20 tem-se uma visão esquemática do método e algumas componentes utilizadas em ligações com chapa de topo entre vigas e colunas com perfis “I”.

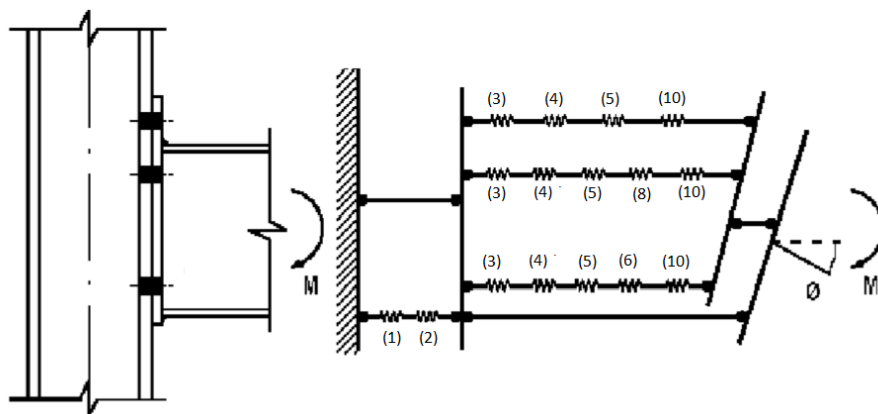


Figura 2. 20 – Esquema para análise da rigidez rotacional da ligação.

Cada uma das componentes mostradas acima possui rigidez que influenciam na rotação da ligação. Faella, Piluso e Rizzano (1996) definem as componentes como elementos de molas que combinados representam a rigidez rotacional da ligação.

Dando continuidade ao método, os elementos de cada linha são associados em série, nas linhas, e em paralelo entre elas. A figura 2.21, apresenta as associações e os coeficientes utilizados no cálculo da semirrigidez da ligação apresentada neste trabalho.

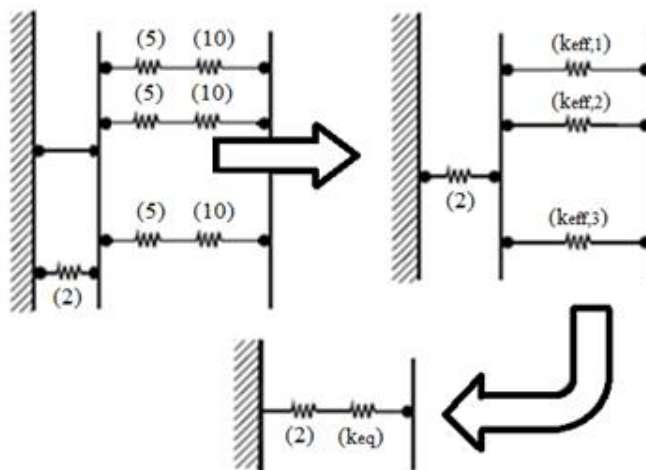


Figura 2. 21 – Procedimento de cálculo da semirrigidez rotacional.

Primeiramente, calcula-se para cada linha de parafuso tracionado, a rigidez efetiva das molas associadas em série “ $k_{eff,n}$ ”, dada pela equação:

$$k_{eff,n} = \frac{1}{\sum \frac{1}{k_{i,n}}}$$

Onde:

$k_{i,n}$ representa o valor do i-ésimo coeficiente na n-ésima linha de parafuso.

O próximo passo é calcular a rigidez equivalente “ k_{eq} ” das várias linhas de parafusos tracionados, associando-os em paralelo, pela seguinte equação:

$$k_{eq} = \frac{\sum k_{eff,n} h_n}{z_{eq}}$$

Onde:

h_n é a distância entre a linha do parafuso e o centro de compressão;

$k_{eff,n}$ é a rigidez equivalente da linha associado em série;

z_{eq} é dado pela equação:

$$z_{eq} = \frac{\sum k_{eff,n} h_n^2}{\sum k_{eff,n} h_n}$$

Por fim, determina-se a rigidez inicial rotacional através da seguinte equação:

$$S_j = \frac{E z^2}{\mu \left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_{eq}} \right)}$$

Onde:

E é módulo de elasticidade do aço;

k_1 e k_2 são valores calculados para a rigidez das componentes 1 e 2 respectivamente;

z é o braço de alavanca como mostrado na figura 2.22, abaixo;

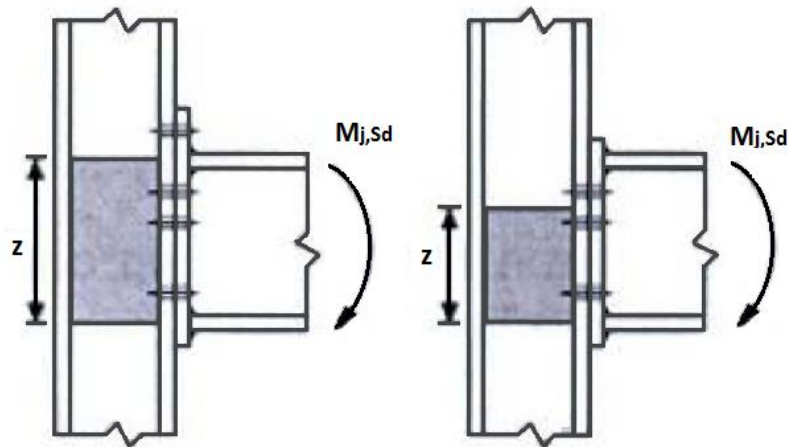


Figura 2. 22 – Centro de compressão e braço de alavanca “z”.

μ é a razão entre rigidezes $S_{j,ini}/S_j$ obtido através:

$$se M_{j,Sd} \leq \frac{2}{3} M_{j,Rd} \Rightarrow \mu = 1$$

$$se \frac{2}{3} M_{j,Rd} \leq M_{j,Sd} \leq M_{j,Rd} \Rightarrow \mu = \left(\frac{1,5 M_{j,Sd}}{M_{j,Rd}} \right)^{2,7}$$

Os 15 elementos mostrados na tabela 2.6 são apresentados pelo Eurocode 3 (2010), assim como, a formulação para o cálculo da resistência e do coeficiente de rigidez rotacional. Todos componentes devem ser verificados quanto a resistência, mas nem todos influenciam na rotação da ligação.

Outra consideração importante para o cálculo dos coeficientes, é que de acordo com o método, para que a formulação apresentada seja aplicável, considera-se que a alma da coluna não possua enrijecedores, além disso, a força normal proveniente da viga seja inferior a 5% da resistência plástica $N_{pl,Rd}$.

Em todos os casos de coeficientes mostrados abaixo, pode ocorrer o uso de enrijecedores que impedem a deformação das regiões, nesse caso não influenciam na rigidez rotacional da ligação e o coeficiente $k_i = \infty$.

O método também mostra quais os coeficientes a serem considerados para alguns tipos de ligação e no caso de ligações com chapa de topo, são consideradas combinações mostradas na tabela 2.7.

Tabela 2. 7 – Coeficientes indicados em ligações com chapa de topo segundo Eurocode 3 (2010).

Ligação viga-coluna aparafusadas com placa de topo	Número de linhas de parafusos tracionados	Coeficientes de rigidez k_i a considerar
Viga em apenas um lado	Uma	$k_1; k_2; k_3; k_4; k_5; k_{10}$
	Duas	$k_1; k_2; k_{eq}$
Vigas nos dois lados - Momentos iguais e sentido opostos	Uma	$k_2; k_3; k_4; k_5; k_{10}$
	Duas	$k_2; k_{eq}$
Vigas nos dois lados - Momentos diferentes	Uma	$k_1; k_2; k_3; k_4; k_5; k_{10}$
	Duas	$k_1; k_2; k_{eq}$
Ligação de continuidade de viga com chapas de extremidade parafusadas	Número de linhas de parafusos tracionados	Coeficiente de Rigidez k_i a considerar
Vigas nos dois lados - Momentos iguais e sentido opostos	Uma	k_5 (esquerdo); k_5 (direito); k_{10}
	Duas	k_{eq}

Com o objetivo de entender cada um dos componentes utilizados nas ligações viga coluna com chapa de topo, são apresentadas as formulações necessárias para o cálculo dos coeficientes indicados na tabela 2.7.

- Coeficiente K_1 – Alma da coluna ao corte

O coeficiente de rigidez do painel de alma da coluna submetido ao corte é dado pela equação:

$$k_1 = \frac{0,38 A_{vc}}{\beta z}$$

Onde:

$$A_{vc} = A - 2b_{fc}t_{fc} + (t_{wc} + 2r_c)t_{fc}$$

A é a área total da seção transversal do perfil da coluna;

b_{fc} é a largura do flange da coluna;

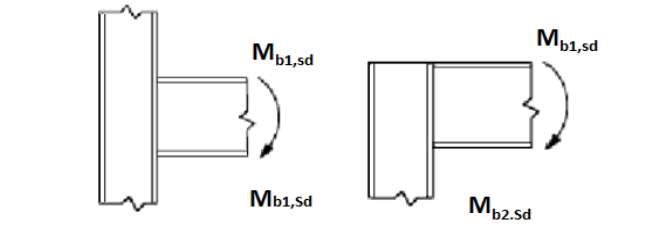
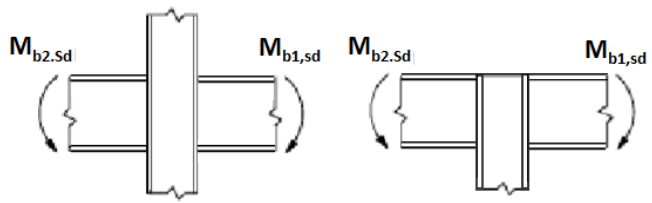
t_{wc} é a espessura da alma da coluna;

r_c é o raio de concordância;

t_{fc} é a espessura do flange;

β é um parâmetro de transformação de acordo com o tipo de ligação que pode ser obtido na tabela 2.8.

Tabela 2. 8 – Valores para o parâmetro de comparação β .

Tipo de Ligação	Tipo de Carregamento	β
	$M_{b1,sd}$	$\beta \approx 1$
	$M_{b1,sd} = M_{b2,sd}$	$\beta \approx 0$
	$M_{b1,sd} / M_{b2,sd} > 0$	$\beta \approx 1$
	$M_{b1,sd} / M_{b2,sd} < 0$	$\beta \approx 2$
	$M_{b1,sd} + M_{b2,sd} = 0$	$\beta \approx 2$

“ z ” é a altura da alma submetida ao cisalhamento descontando-se os flanges e os raios de concordância.

- Coeficiente K_2 – Alma da coluna comprimida

O coeficiente de rigidez para a componente alma da coluna, não enrijecida, submetida à compressão é dado pela seguinte expressão:

$$k_2 = \frac{0,7 b_{eff,c,wc} t_{wc}}{d_c}$$

Onde:

$b_{eff,c,wc}$, é dado pela equação:

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

t_{wc} é a espessura da alma da coluna;

d_c é a altura da alma coluna;

t_{fb} é a espessura do flange da viga;

a_p é a garganta da solda entre o flange da viga e a chapa de topo;

t_{fc} é a espessura do flange da coluna;

s é o raio de curvatura dos perfis laminados ou então a garganta da solda em perfis soldados;

s_p é o comprimento obtido pela dispersão à 45° através da chapa de extremidade (no mínimo igual a t_p e no máximo igual a $2t_p$).

- Coeficiente K_3 – Alma da coluna tracionada

O coeficiente de rigidez para a componente alma da coluna, não enrijecida, submetida à tração é similar ao componente anterior e é dado pela seguinte expressão:

$$k_3 = \frac{0,7 b_{eff,t,wc} t_{wc}}{d_c}$$

A diferença entre os dois componentes está na largura efetiva dada pela expressão:

$$b_{eff,t,wc} = t_{fb} + 2\sqrt{2}a_b + 5(t_{fc} + s)$$

Onde o coeficiente a_b é a garganta da solda entre o flange da viga e o pilar em ligações com vigas soldadas diretamente no pilar e no caso de ligações com chapa de topo $b_{eff,t,wc}$ é dado pela altura equivalente do “t-stub” dado pelo comprimento efetivo L_{eff} do flange da coluna, mostrado nas tabelas 2.3 e 2.4.

- Coeficiente K_4 – Flange da coluna a flexão

O coeficiente de rigidez para a componente do banzo da coluna, não enrijecida, submetida à flexão é dado pela seguinte expressão:

$$k_4 = \frac{0,9 l_{eff} t_{fc}^3}{m^3}$$

Onde:

L_{eff} é a altura efetiva do “t-stub” calculado na seção 2.2.1 e como mostrado, pode ser analisado separadamente ou em conjunto de parafusos;

t_{fc} é a espessura do flange da coluna;

m é mostrado na tabela 2.10.

- Coeficiente K_5 – Chapa de topo a flexão

O coeficiente de rigidez para a componente chapa de topo, não enrijecida, submetida à flexão é similar ao coeficiente anterior e é dado pelo seguinte:

$$k_5 = \frac{0,9 l_{eff} t_p^3}{m^3}$$

Onde:

t_p é a espessura da chapa.

- Coeficiente K_{10} – Parafusos Tracionado

O coeficiente de rigidez resultante relativo aos parafusos tracionados, é dado pela equação:

$$k_{10} = 1,6 \frac{A_s}{L_p}$$

Onde:

A_s é a área da seção do parafuso;

L_p é o comprimento total do parafuso sujeito ao alongamento, considerado igual ao comprimento de aperto (espessura total das chapas e perfis), adicionado a metade da soma altura da cabeça do parafuso e altura da porca.

Embora seja um método geral, e possa ser usado em vários tipos de ligações para a determinação da rigidez, foram apresentadas as formulações utilizadas no cálculo das ligações viga-coluna com chapa de topo. O Eurocode 3 (2010) apresenta formulações para alguns outros tipos de ligações.

3. Análise numérica

Neste capítulo, apresenta-se o desenvolvimento do modelo para avaliação numérica. Fazem-se necessárias algumas observações quanto à análise e utilização dos elementos, assim como, algumas hipóteses simplificadoras, para diminuir complexidade do modelo e também o tempo de processamento, sem que haja perda nos resultados.

A análise foi realizada através do software comercial Ansys, versão 12.0, que utiliza elementos finitos. Este programa possui uma gama de elementos que foram criados para representar materiais específicos através de elementos lineares, planos e volumétricos.

Buscando encontrar um modelo que represente de forma realista e satisfatória a ligação em estudo, foi desenvolvido estudo em pesquisas realizadas anteriormente e os elementos equivalentes utilizados no objeto deste trabalho.

Dentre eles vale salientar Maggi (Maggi, Yuri Ivan, 2000) em 2000, que através da modelagem por elementos finitos, obteve uma ligação equivalente a teórica de seu estudo.

Ressalta-se também o trabalho realizado por Rodrigues, M. C. (2009), que através da análise numérica, apresentou um modelo calibrado com os ensaios experimentais realizados por Lima (Lima, 2003).

Dando continuidade aos estudos e objetivos deste trabalho, as definições de algumas características do modelo numérico serão apresentadas, tais como: comportamento do material, tipo de análise e elementos finitos a utilizados, que foram feitos de acordo com os trabalhos realizados anteriormente, devido aos bons resultados dos mesmos.

Apresenta-se então, a descrição das características e definições dos elementos utilizados na realização deste trabalho.

3.1. Propriedades dos materiais

Para a representação dos materiais envolvidos na análise, foram adotados diagramas bilineares de tensão-deformação. Este modelo divide o comportamento elástico e plástico do material em dois segmentos de retas. A figura 3.1 apresenta, esquematicamente, o modelo mencionado.

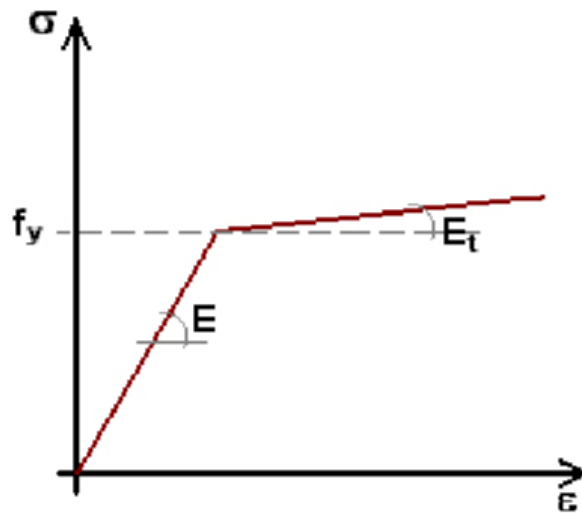


Figura 3. 1 – Representação do diagrama bilinear.

Onde:

E = Modulo de Elasticidade do Aço (Young);

F_y = Tensão de Escoamento do Aço

E_t = Modulo de Elasticidade após a Plastificação igual a $0,1 \cdot E$.

As condições em que se verifica a deformação plástica foram definidas através do critério de escoamento de Von Mises.

A reta com maior inclinação indica o comportamento elástico do material utilizado em cada um dos componentes. O valor limite representa a tensão de escoamento de cada um deles. Após este limite, tem-se a fase plástica do material.

Na análise, foi admitido valores teóricos segundo NBR8800-2008 para chapas e barras redondas roscadas e NBR14762-2010 para perfis formados a frio, mostrado na tabela 3.1.

Tabela 3. 1 - Tensão de Escoamento dos Componentes da ligação

Componentes	Tensão de escoamento (Fy)	Módulo de Elasticidade (E)
Viga (ZAR250)	250 (MPa)	205 (GPa)
Coluna (ZAR250)	250 (MPa)	205 (GPa)
Chapa de topo (A36)	250 (MPa)	205 (GPa)
Barras roscadas e porcas(A36)	250 (MPa)	205 (GPa)

Observando-se a ligação em estudo, assim como qualquer tipo de ligação estrutural feita através de chapas, observa-se a descontinuidade geométrica entre os elementos ligados e seus componentes de ligação (chapas e parafusos).

A interação entre cada elemento componente da ligação deve ser também estudada. Para isso são utilizados elementos finitos especiais com os quais é possível simular o contato entre parafusos, porcas, chapa de topo e pilar. Esses elementos serão descritos mais adiante.

3.2. Elementos finitos utilizados

A escolha dos tipos de elementos finitos utilizados é de fundamental importância nos resultados. Os elementos têm que proporcionar à ligação, uma representação mais próxima possível do real, para que se tenha resultados satisfatórios.

Ao mesmo tempo é fundamental que além da representatividade física dos materiais, o modelo também mostre eficiência computacional e otimização da análise. Em outras palavras, é necessária uma proporção entre qualidade dos resultados e economia computacional, visando um menor tempo de processamento.

Visto a complexidade do modelo estrutural em estudo, e o refinamento requerido nos resultados, neste estudo, assim como feito por Maggi (Maggi, Yuri Ivan,2000) e

mais recentemente por Rodrigues, M. C. (2009), foi utilizado elementos tetraédricos, que serão mostrados posteriormente.

Desta forma, analisando a geometria da ligação e trabalhos anteriores, escolheu-se utilizar um elemento plano para representar as vigas e pilar, e elemento sólido utilizado nas chapas de topo e barras. Além destes, foram necessários dois elementos de “contato”, que trabalham em parceria com um terceiro elemento base, para representar a descontinuidade geométrica entre os elementos da ligação. Esses elementos serão mostrados a seguir.

3.2.1. Elemento plano “SHELL181”

Este elemento foi utilizado nas vigas e na coluna do modelo, ele possui quatro nós com seis graus de liberdade em cada nó, e translações nos eixos x, y e z. A Figura 3.2 apresenta a geometria para este elemento.

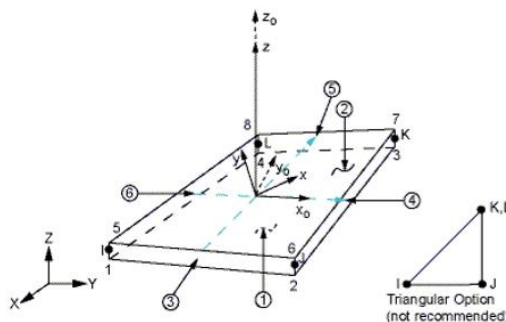


Figura 3. 2 – Geometria do elemento “SHELL181” (Ansys, 2012).

3.2.2. Elemento sólido “SOLID95”

O elemento “SOLID95”, mostrado na figura 3.3, foi utilizado nas chapas e barras redondas, possui 20 nós, cada um com graus de liberdade de translação nas direções X, Y e Z e pode ter qualquer orientação espacial. Esta característica é essencial, já que o modelo possui elementos não regulares junto aos furos e nos parafusos, que tem formas circulares. Possui também características de plasticidade,

admitindo a utilização do diagrama bilinear para representação do material, o que condiz com os objetivos desta análise.

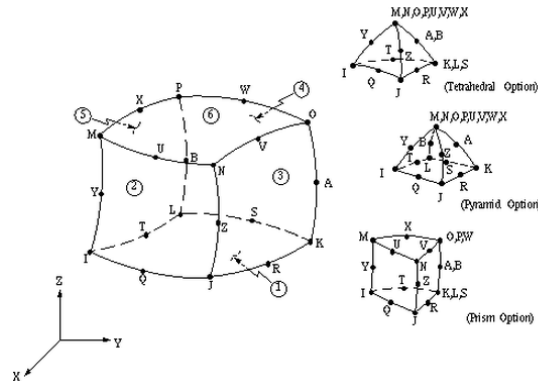


Figura 3. 3 – Elemento volumétrico “SOLID95” (Ansys, 2012).

Como realizado por Maggi (2000), uma observação importante diz respeito à utilização do elemento volumétrico em detrimento do elemento de casca nos elementos do parafuso/porcas e chapas.

Apesar dos elementos de casca ou até mesmo lineares, produzirem uma boa representação do modelo com uma quantidade menor de elementos – o que produziria uma economia no tempo de processamento – a sua representatividade quanto à simulação da espessura da chapa de topo e dos parafusos ficam comprometidos, principalmente pela consideração do contato entre os elementos. É necessário considerar a distribuição de tensões ao longo da espessura da chapa de topo e parafuso, isto não é possível com a utilização de elementos de casca ou lineares.

3.2.3. Elementos de contato “TARGE170”, “CONTA175” e “CONTA174”

Esse tipo de elemento é utilizado na simulação numérica para representar a interface de objetos diferentes na análise de elementos finitos. Seu uso estabelece novos termos na matriz de rigidez, que fornece informações ao processo da análise numérica quanto a interfaces de objetos distintos que deverão gerar tensões quando comprimidos

uns com os outros, mas quando forem tracionados, não terão esforços entre eles. Assim sendo, sua principal característica é apresentar rigidez na compressão e nenhuma rigidez quando tracionado.

A ligação viga-coluna está submetida a momento e possui algumas regiões que tem necessidade deste elemento de contato, para a interação entre suas superfícies. A interface entre a chapa de topo com a coluna é uma delas. Dependendo do tipo de esforço atuante na viga, esta região será comprimida e este esforço deverá caminhar da chapa para a coluna, mas também, pode ser tracionado e neste caso nenhum esforço será trocado entre as duas superfícies. Há também, outras regiões onde esse tipo de solicitação, ora comprimida, ora tracionada, acontecem tais como:

- Porca do parafuso e chapa de extremidade;
- Chapa de extremidade e flange da coluna;
- Corpo do parafuso e chapa de extremidade;
- Enrijecedores da Coluna;
- Corpo do parafuso coluna.

Com o objetivo representar melhor estas áreas, foram utilizados os elementos “TARGE170”, “CONTA175” e “CONTA174”. Os elementos de contato são utilizados sempre em par, onde um é o ponto base e o outro o elemento de contato.

O elemento “TARGE170” foi usado para representar superfície de base associada aos elementos de contato, mostrado na figura 3.4.

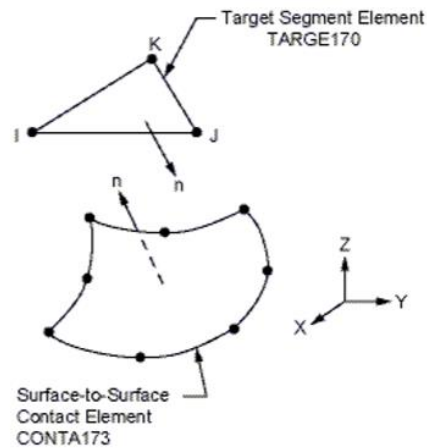
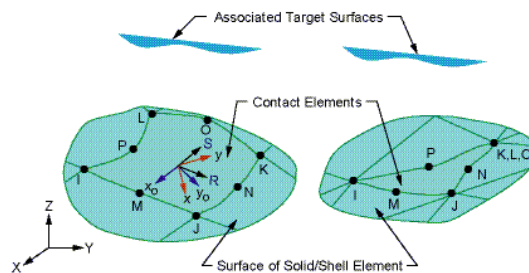


Figura 3. 4 – Elemento de contato “TARGE170” (Ansys, 2012).

Associado a este, estão os elementos de contato, “CONTA174” e “CONTA175”, através da superfície de contato partilhada através da constante real. Estes elementos também recebem os coeficientes de atritos (μ) das áreas de contato. O coeficiente de atrito utilizado no trabalho, assim como realizado por Rodrigues, M. C. (2009), foi igual a 0,25.

O elemento “CONTA174”, mostrado na figura 3.5 é usado quando as regiões de contato forem superficiais.



R = Elemento no eixo x para fricção isotrópica

x = Eixo do elemento para fricção ortotrópica, se paralelo ao eixo global x

x0 = Eixo do elemento para fricção ortotrópica, se não paralelo ao eixo global x

Figura 3. 5 - Elemento de contato CONTA174 (Ansys, 2012).

O elemento “CONTA175”, mostrado na figura 3.6 é utilizado quando as regiões de contato formam linhas e não superfícies. Neste trabalho, os pilares possuem elementos de casca, e o contato deles com os parafusos é através de linhas (furo) e superfícies (fuste do parafuso), por isso a escolha do mesmo.

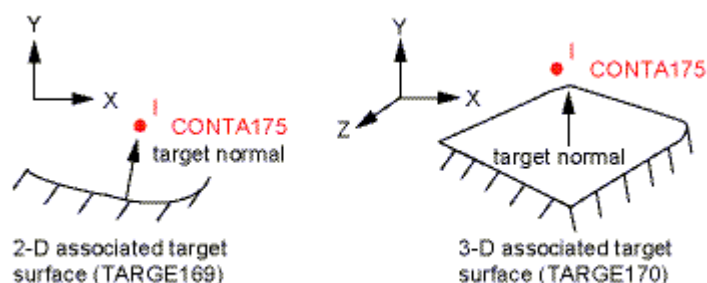


Figura 3. 6 – Elemento de contato CONTA175 (Ansys, 2012).

A figura 3.7 apresenta as regiões onde foram colocados os elementos de contato.

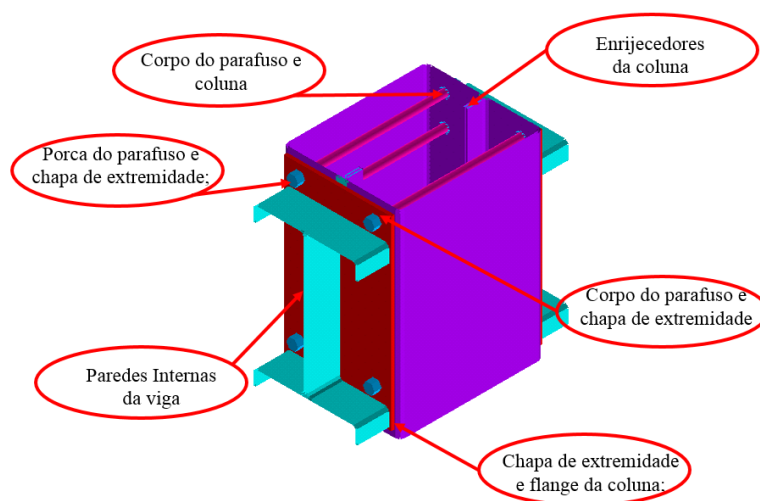


Figura 3. 7 – Localização dos elementos de contato.

3.3. Definição das malhas e elementos finitos

A definição da malha de elementos finitos para modelagem é parte essencial da análise e é realizado preliminarmente, a fim de se manter coerência nos resultados,

convergência do modelo e preferencialmente sem sobrecarregar o tempo de processamento de execução do programa.

O bom resultado é influenciado diretamente pelo refinamento da malha de elementos finitos, mas este é inversamente proporcional ao tempo de processamento, com isso, a relação entre esses dois parâmetros deve ser realizada até que o refinamento seja compatível com o requerido em termos de resultados.

Com base num estudo, realizado por Wanzek e Gebbeken (1999), a discretização da malha deve ser feita em relação a dois parâmetros: número de elementos necessários na espessura, de modo a permitir a correta representação do desenvolvimento das rótulas plásticas; e o grau de discretização necessário de modo a representar os problemas de flexão.

Como já visto anteriormente, o modelo é composto por duas vigas, soldadas nas extremidades a duas chapas, que por sua vez, serão parafusados ao pilar através de seis barras passantes e fixados por porcas. A figura 3.8 mostra a representação da malha do modelo total.

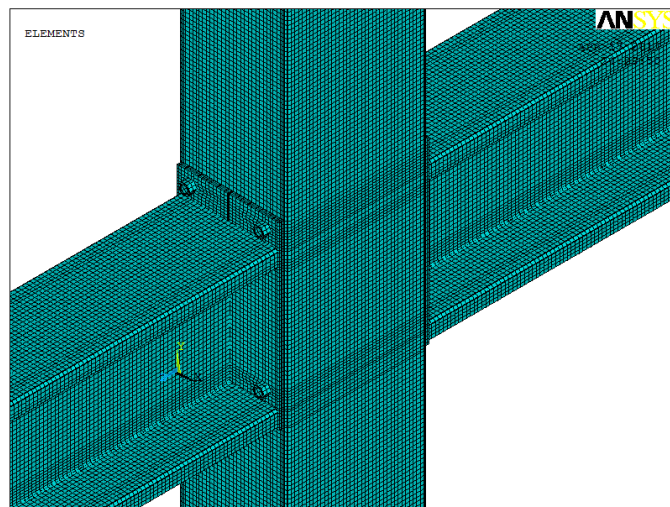


Figura 3. 8 - Representação da malha para o modelo total.

Na sequência, serão apresentados os detalhes da malha para cada um dos componentes da ligação.

3.3.1. Viga e chapa de topo

A malha de elementos finitos que compõe a viga e a chapa de topo está apresentada na figura 3.9 e 3.10. Os nós do plano de interseção entre a viga e a chapa foram acoplados e formaram um único bloco. Esse acoplamento representa a solda entre os dois componentes.

A viga foi modelada com elementos de casa. A espessura vista na imagem é devido a uma constante de espessura “ t_v ” dado ao elemento “SHELL181”.

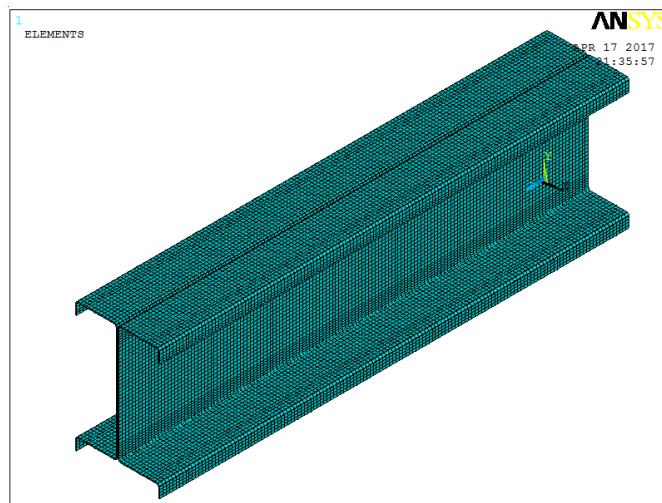


Figura 3. 9 – Representação da malha para viga.

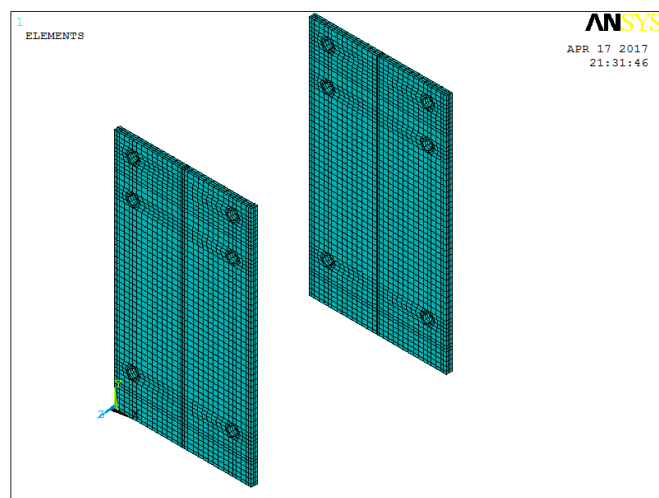


Figura 3. 10 – Representação da malha e detalhe do furo.

3.3.2. Coluna

Assim como a viga, a coluna também foi modelada com o elemento “SHELL181”. A espessura vista na figura 3.11 é referente a uma constante relacionada à espessura “ t_c ” dado ao elemento. Para simplificação da programação da APDL, a espessura da viga “ t_v ” é sempre igual à espessura da coluna “ t_c ”.

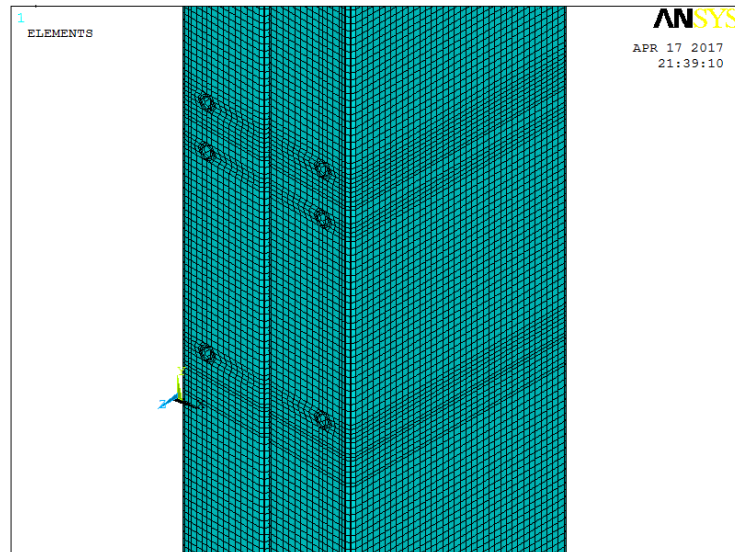


Figura 3. 11 – Representação da malha da coluna, detalhe do furo e vista superior.

3.3.3. Parafusos e porcas

Assim como as vigas e chapas de topo, os parafusos e porcas também fazem parte de um único bloco, isso também foi feito através do acoplamento dos nós no plano de interseção dos mesmos. A malha é mostrada na figura 3.12.

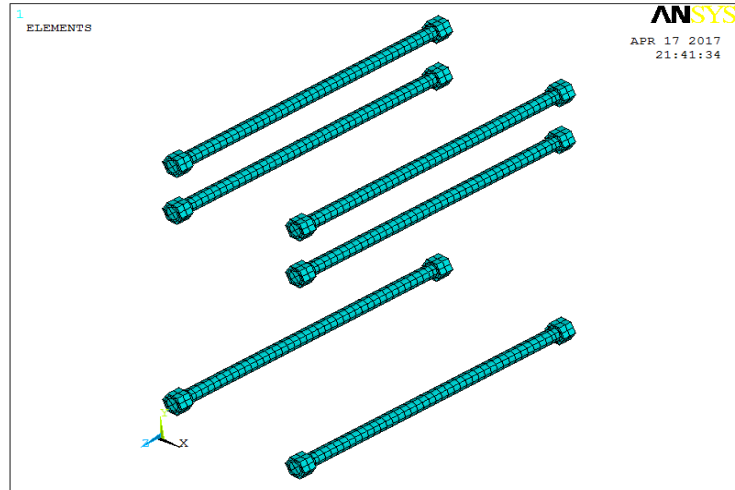


Figura 3. 12 – Representação da malha dos parafusos e porcas e detalhe da região de acoplamento dos elementos.

3.3.4. Soldas entre perfis da coluna e das vigas

As soldas entre os perfis “U” enrijecidos, tanto da coluna quanto das vigas, também foram modelados. Para isso foram criadas superfícies que fazem a continuidade das mesas dos perfis na região de junção dos mesmos. Foram utilizados os mesmos elementos dos perfis da viga e da coluna. A malha da solda é representada na figura 3.13 e 3.14.

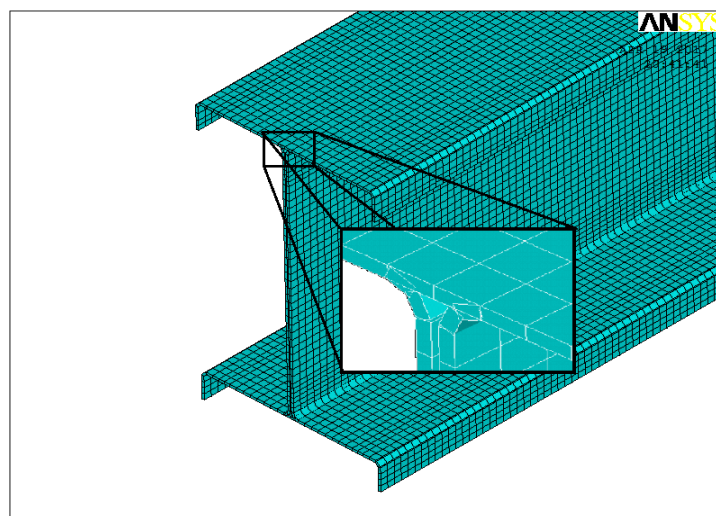


Figura 3. 13 – Representação da malha das soldas das vigas.

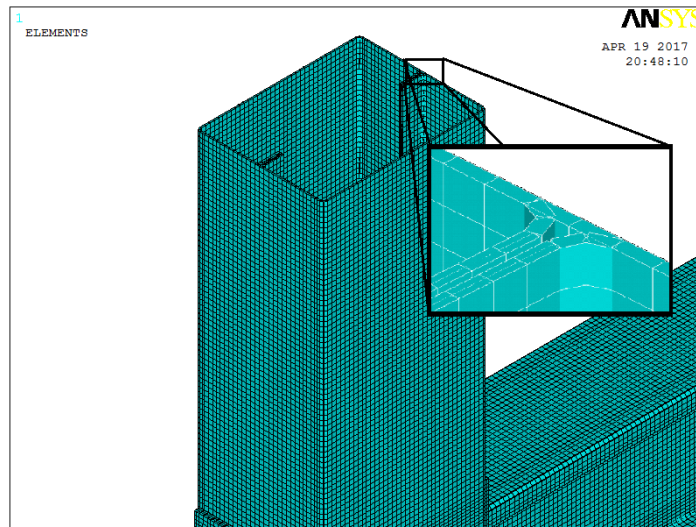


Figura 3. 14 – Representação da malha das soldas da coluna.

3.4. Carregamentos

O carregamento da viga foi realizado através da aplicação de forças na extremidade livre. O carregamento aplicado verticalmente, nas duas extremidades, de cima para baixo, e distribuído em oito “keypoints”, situados próximos ao flange superior e inferior na alma do perfil “I”. Cada nó recebeu uma carga de 500 kg, totalizando uma carga de 4000 kg.

O presente trabalho tem como objeto principal o estudo da semirrigidez inicial da ligação com chapa de topo, com isso a carga foi, tal que, o diagrama momento x rotação pudesse ser aferido, sem que nenhum dos limites de resistência fosse alcançado.

O carregamento foi realizado em passos, e após cada um, o deslocamento do da viga foi aferido no extremo da viga, formando o par ordenado momento (força do passo x comprimento da viga = 1m) em função da rotação. O posicionamento das cargas é apresentado na figura 3.15.

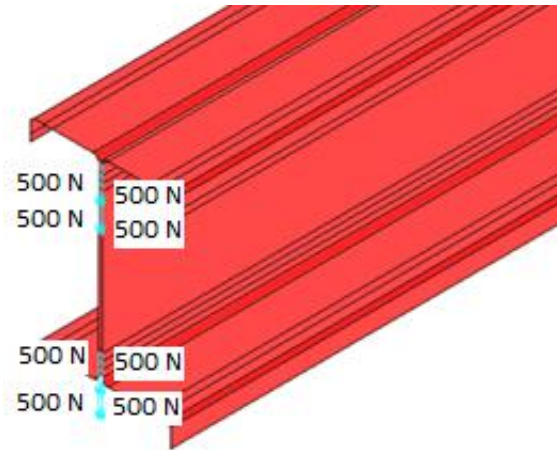


Figura 3. 15 – Posicionamento do carregamento na viga

3.5. Condições de contorno

As condições de contorno foram aplicadas com restrição a translação e rotação de todos os nós localizados nas extremidades inferior e superior do pilar. Estas restrições de deslocamentos, segundo MASIOLI (2011), impedem deslocamento de corpo rígido e garantem a não singularidade da matriz de rigidez.

As condições de contorno impostas aos nós da extremidade do pilar são ilustradas na figura 3.16 e 3.17 nas extremidades inferior e superior, respectivamente.

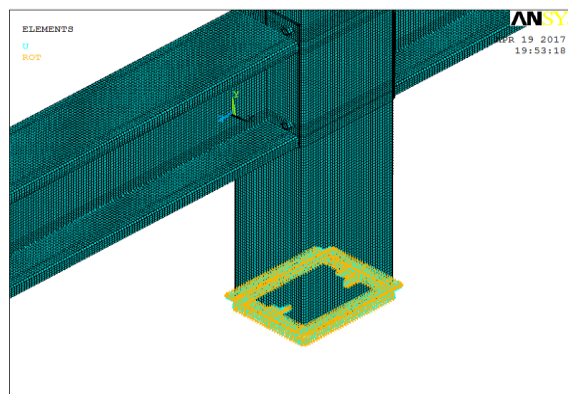


Figura 3. 16 – Condições de contorno extremidade inferior.

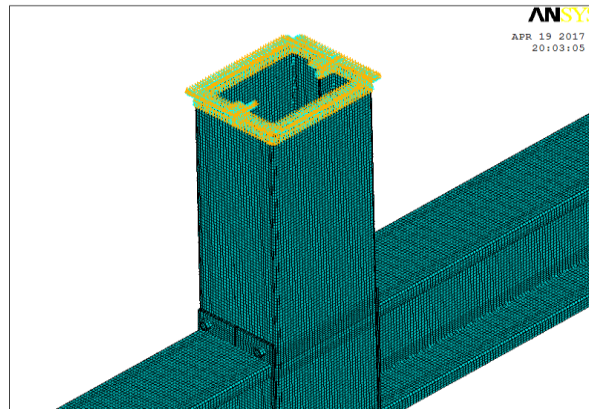


Figura 3. 17 – Condições de contorno extremidade superior.

Apresentado todo o embasamento teórico para o estudo da ligação em estudo, assim como as considerações referentes ao modelo numérico, o próximo capítulo 4 apresentará os resultados obtidos do programa Ansys, version 12.0.

3.6. Outras informações importantes

Além do que foi apresentado, cabem ainda outras informações importantes sobre o modelo e a análise numérica. O tempo de processamento total do modelo no programa Ansys, version 12.0 foi de aproximadamente 18 horas. Além disso, a quantidade de elementos utilizados é apresentada na tabela 3.2:

Tabela 3. 2 – Quantidade de elementos utilizados

Localização dos elementos	Tipo	Quantidade
Vigas, pilares	Shell181	78328
Chapas, Parafusos e Porcas	Solid 95	13920
Porca	Target 170	264
Chapa	Conta 174	264
Chapa	Target 170	4112
Pilar	Conta 174	3304
Furos chapa	Target 170	288
Parafusos	Conta 174	96
Parafusos	Target 170	1824
Furos pilar	Conta 174	96
Enrigeedor	Target 170	1600
Enrigeedor	Conta 174	1600

4. Resultado da Análise Numérica

Neste capítulo, apresentam-se os resultados referentes à análise numérica através do programa Ansys, versão 12.0.

Para isso, os resultados que melhor representam a ligação, assim como a verificação do comportamento de todo modelo, desde a aplicação do carregamento, caminho das tensões, e a distribuição de tensões em cada elemento será exposto, com enfoque principalmente na semirrigidez – objeto de estudo deste trabalho – mediante a variação das componentes da ligação e dos perfis utilizados, que influenciam diretamente os resultados.

Os resultados para semirrigidez, avaliação do momento gerado na ligação pela força aplicada nos extremos, em função da rotação da viga, são apresentados através das curvas momento x rotação. O momento é dado pela força multiplicado pelo braço de alavanca (comprimento da viga) e o ângulo dado pelo arco tangente da divisão entre o deslocamento do extremo da viga e o comprimento da mesma, em cada passo de carga.

Seguindo este dado, em cada subseção, será apresentada inicialmente uma análise simplificada de tensões e deformações do modelo, para melhor entendimento do comportamento e uso dos elementos utilizados neste trabalho.

Na sequência, serão apresentados os gráficos tensão x deformação, devidamente comentados das ligações parafusadas com chapa de topo, juntamente com as variações geométricas dos seguintes componentes:

- Espessura da chapa de topo;
- Espessura das vigas;
- Espessura dos pilares;
- Diâmetro dos parafusos;
- Altura dos pilares.

Os resultados analíticos, através do método das componentes, e comparação dos resultados, serão apresentados no próximo capítulo.

4.1. Vigas e aplicação das cargas nos extremos

O caminho das cargas se inicia com a aplicação do carregamento nos extremos das vigas. A força aplicada nas extremidades, produz inicialmente o deslocamento do perfil I, até que a rigidez da chapa inicie a absorção das tensões provenientes da viga, dando início ao aparecimento das tensões na região mais próxima ao pilar.

Os diagramas que apresentam o desenvolvimento das tensões de Von Mises ao longo da viga são mostrados na figura 4.1, onde fase inicial a), passo médio b) e final do carregamento c).

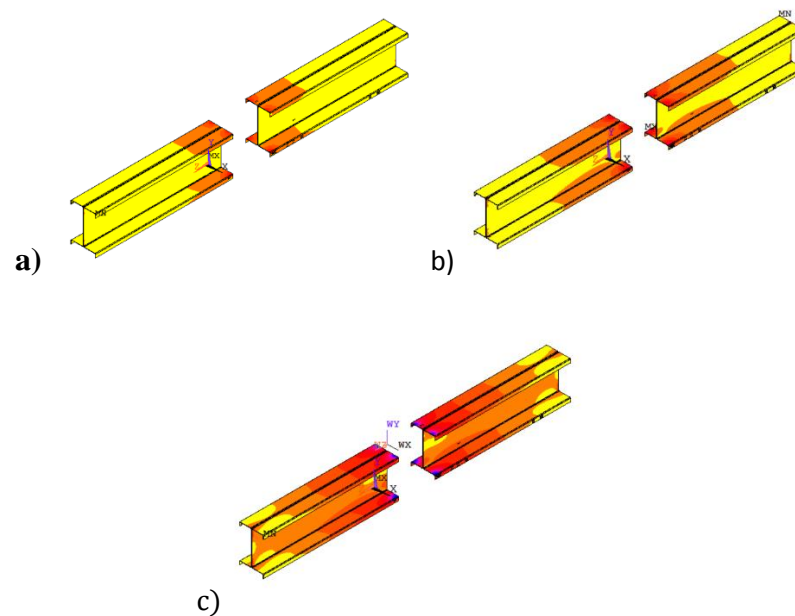


Figura 4. 1 – Desenvolvimento das tensões nas vigas, (a) início, (b) meio e (c) fim do carregamento (MPa).

A carga aplicada tem direção vertical de cima para baixo, com isso o flange superior se encontra tracionado e o inferior comprimido. A figura 4.2 mostra a distribuição de tensões na direção longitudinal a viga, em MegaPascal (MPa), e os sentidos das tensões, negativo para região tracionada e positiva para região comprimida.

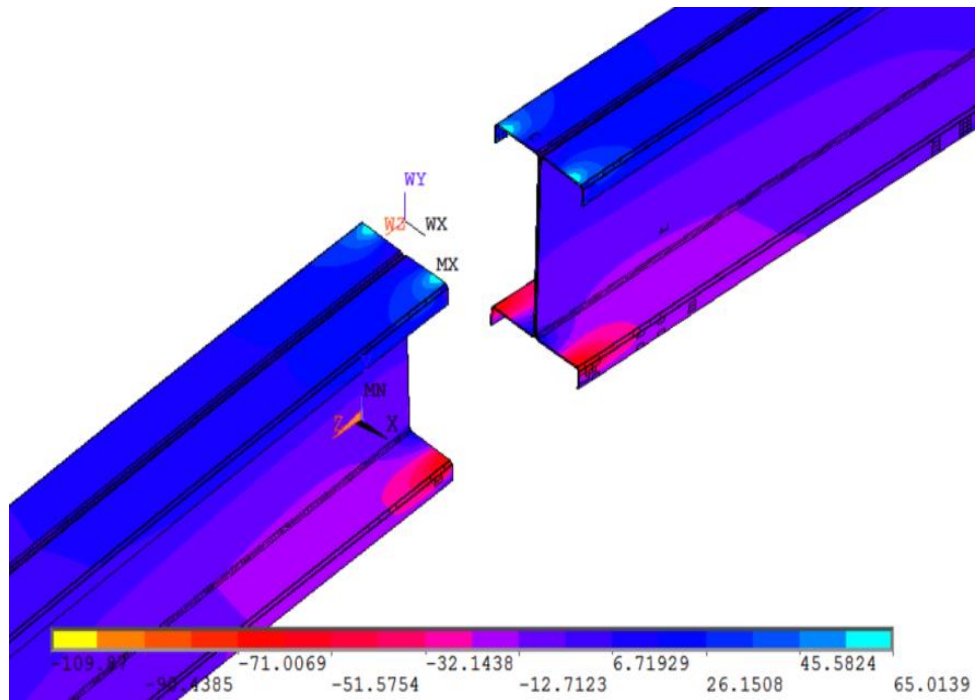


Figura 4. 2 – Diagrama de tensões na alma das vigas na direção “z”.

Uma forma de analisar e verificar o modelo é comparar os resultados numéricos com os valores analíticos esperados. Sabe-se que a tensão na região de transferência de carga nos flanges, intersecção com a chapa de topo é proporcional à força aplicada nos extremos e consequentemente ao momento $M = F \times L$, (onde M = momento, F = força aplicada e L = braço de alavanca. O gráfico 4.1 mostra o diagrama momento em função da tensão para o modelo numérico LVC14.

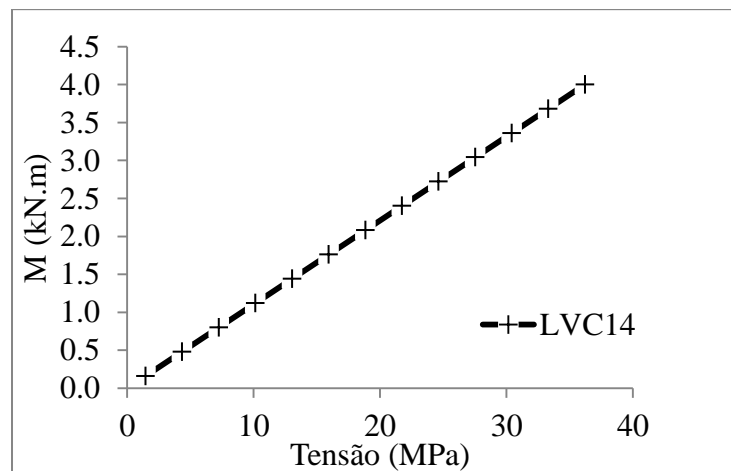


Gráfico 4. 1 - Momento na viga x tensão na intersecção da chapa com a viga

Como já foi dito, o presente trabalho estuda a semirrigidez inicial da ligação em estudo, com isso, é aplicada uma carga suficiente para tal propósito. Observa-se, então, o desenvolvimento linear do gráfico, devido ao modelo se encontrar totalmente na fase elástica e não atingir o escoamento.

O método das componentes, prescrito pelo Eurocode 3 (2010), não leva em consideração a rigidez relativa à inércia da viga, como o próprio método diz, ele mede a rigidez inicial da ligação.

Sabendo disso, como forma de avaliar os resultados da análise numérica e compará-las com o dimensionamento teórico, foram mensurados os deslocamentos dos extremos da viga.

No entanto sabe-se que ela possui flexão antes mesmo dos esforços encontrarem às chapas, conseqüentemente deslocamento, que interfere diretamente na semirrigidez, mas não é mensurado no método.

Visto isso, no cálculo da semirrigidez teórica através do método das componentes, o deslocamento da viga devido a flexão, antes de chegar a chapa foi desconsiderado da seguinte forma:

Sabe-se que o deslocamento teórico da viga, através da resistência dos materiais, é dado por:

$$\delta_v = \frac{PL_b^3}{3EI_b}$$

Onde:

δ_v = Deslocamento no extremo das vigas;

P = Carga aplicada no extremo das vigas;

L_b = Comprimento da viga;

E = Modulo de elasticidade do aço da viga;

I_b = Momento de inércia viga.

O valor de δ_b será descontado do deslocamento total da ligação, mensurados nos modelos de elementos finitos e apresentados nos gráficos momentos x rotação, para comparação com os modelos teóricos.

Com isso, como exemplo de cálculo, temos para o modelo LVC01 a tabela 4.1, que mostra os resultados retirados do programa Ansys, versão 12.0.

Sabendo-se que:

δ_m : Deslocamento total da ligação medido no extremo da viga;

δ_b : Deslocamento da viga dado por $\delta_b = \frac{PL_b^3}{3EI_b}$;

δ_l : Deslocamento da ligação utilizado no cálculo do ângulo " Φ " e determinação da semirrigidez da ligação - $\delta_l = \delta_m - \delta_b$;

F : Força do passo de carga;

M : Momento do passo de carga, utilizado direto no gráfico;

Tg Φ : Tangente do ângulo calculado pela relação entre o deslocamento da ligação, dado pela coluna 3 e o braço da viga, no caso igual a 1000 mm.

Φ : É o arco-tangente da relação dada na coluna 6;

$S_{j,ini,teo}$: É a semirrigidez da ligação dado pela relação entre os momentos e a rotação em cada passo de carga. A semirrigidez final é dada pela média entre os valores da coluna. Essa relação também mostra a inclinação do gráfico 4.2.

Tabela 4. 1 Cálculo do par ordenado ângulo e semirrigidez para o modelo LVC01

Método de Cálculo da Semirrigidez para o Método Numérico							
δ_m	δ_v	δ_l	F	M	Tg Φ	Φ	$S_{j,ini,teo}$
(mm)	(mm)	(mm)	(kN)	(kN*m)	($\times 10^{-3}$)	(rad. 10^{-3})	(kN/rad)
0,047	0,004	0,043	0,16	0,16	0,043	0,043	3.731,41
0,098	0,009	0,089	0,32	0,32	0,089	0,089	3.604,47
0,142	0,013	0,129	0,48	0,48	0,129	0,129	3.732,57
0,189	0,018	0,172	0,64	0,64	0,172	0,172	3.729,67
0,236	0,022	0,214	0,80	0,80	0,214	0,214	3.731,41
0,283	0,026	0,257	0,96	0,96	0,257	0,257	3.735,47
0,330	0,031	0,300	1,12	1,12	0,300	0,300	3.738,38
0,377	0,035	0,342	1,28	1,28	0,342	0,342	3.741,66
0,424	0,040	0,384	1,44	1,44	0,384	0,384	3.746,16
0,471	0,044	0,427	1,60	1,60	0,427	0,427	3.750,65
0,517	0,048	0,469	1,76	1,76	0,469	0,469	3.753,53
0,564	0,053	0,511	1,92	1,92	0,511	0,511	3.756,67
0,611	0,057	0,553	2,08	2,08	0,553	0,553	3.759,33
0,657	0,062	0,595	2,24	2,24	0,595	0,595	3.762,56
0,703	0,066	0,637	2,40	2,40	0,637	0,637	3.765,95
0,750	0,070	0,679	2,56	2,56	0,679	0,679	3.769,21

δ_m - Deslocamento do Modelo; δ_v - Deslocamento da Viga; δ_l - Deslocamento da Ligação; F - Força aplicada; M - Momento em função da força; Tg Φ - Tangente do ângulo; Φ - Ângulo; $S_{j,ini,teo}$ - Semirrigidez teórica

Com os pares ordenados momento x rotação, dados na tabela 4.1, é formado o gráfico 4.2. A inclinação da reta é a semirrigidez inicial da ligação.

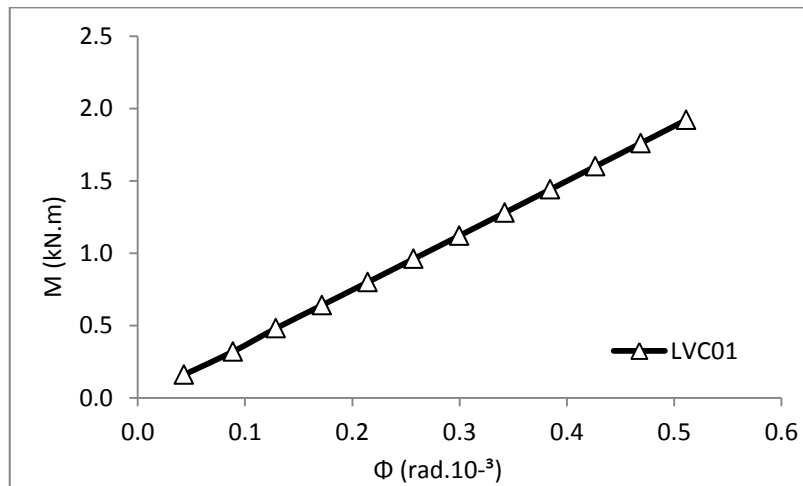


Gráfico 4. 2 - Momento x Rotação para ligação LVC01

4.2. Chapa de topo

A chapa de topo é a responsável por transferir os esforços das vigas para a coluna e parafusos. Como dito, o binário mostrado na figura 4.3 é devido aos esforços de tração, recebidos pelos parafusos e compressão absorvido pela chapa e transferidos para os pilares, originados dos flanges superior e inferior das vigas.

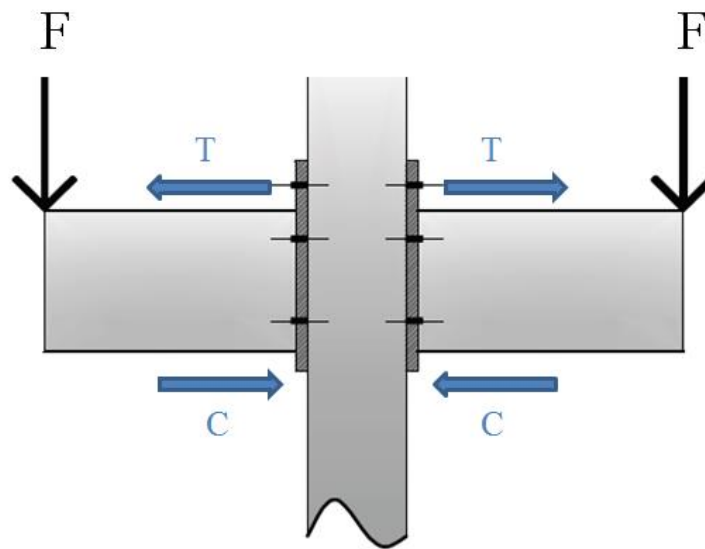


Figura 4. 3 – Tração e compressão devido ao momento na ligação.

Os esforços de compressão são transferidos para os pilares diretamente pelo contato com a chapa, mas os esforços de tração são recebidos pelos parafusos, também através do contato, que nesse caso é da cabeça ou porca com a chapa.

Como já explicado, o elemento de contato é responsável por transferir apenas esforços de compressão quando há o contato, com isso, quando os elementos ligados tendem a se afastar, ficam totalmente livres para se locomover. Isso pode ser visto nas figuras 4.4.

A figura 4.4, mostra vetor dos deslocamentos na ligação, a região inferior da viga transfere os esforços à chapa que transfere o esforço ao pilar e fletindo suas paredes. A figura está em escala aumentada em 300 vezes.

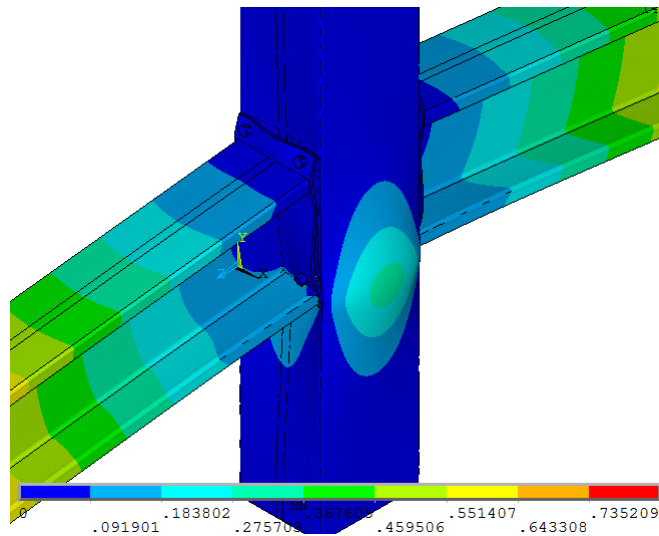


Figura 4. 4 Vista da Ligação (mm)

As figuras 4.5 e 4.6 mostram o diagrama de deslocamento das chapas de 8 mm e 9,5 mm, referentes aos modelos LVC11 e LVC13 respectivamente. Ambos modelos possuem mesma geometria e variam apenas a espessura da chapa. Observa-se a flexibilidade maior da chapa de 8 mm, mostrada abaixo. Para a chapa de 9,5 mm, observa-se o deslocamento menor devido a sua maior rigidez a flexão.

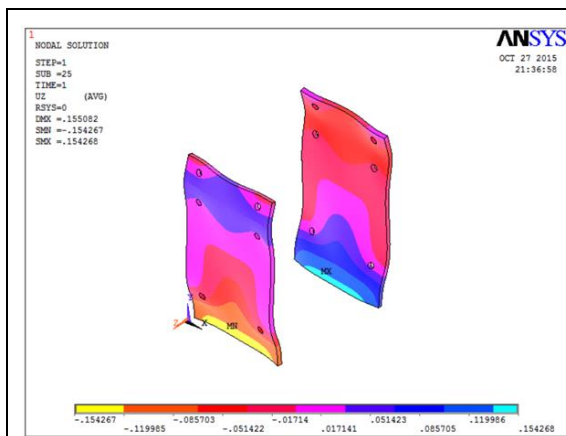


Figura 4. 5 – Deslocamento transversal chapa de topo modelo LVC11 (mm).

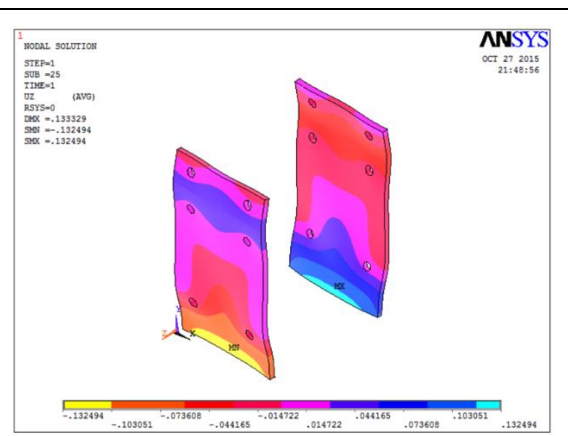


Figura 4. 6 – Deslocamento transversal chapa de topo modelo LVC13 (mm).

O diagrama de tensões da chapa de topo mostra uma concentração de tensões na em das soldas com viga. Nota-se também a concentração de tensões próxima aos furos da chapa, mostrado na figura 4.7.

As tensões de menor valor são representadas pelas cores em azul. As regiões de transferência de cargas se encontram na linha do flange superior e inferior, os enrijecedores pouco influenciam na transmissão das cargas para a chapa.

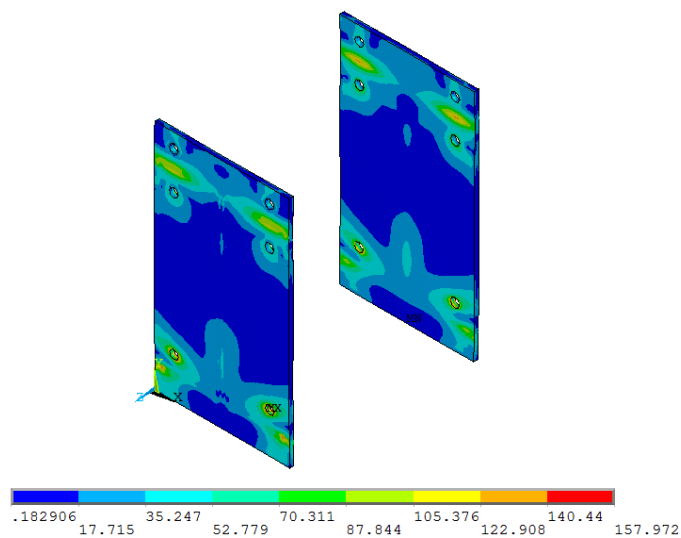


Figura 4. 7 – Tensão de Von Mises na chapa de topo (MPa)

4.3. Parafusos

Os parafusos são responsáveis pela transmissão dos esforços provenientes das vigas para o pilar. No caso da ligação em estudo, foram usadas barras roscadas que ultrapassam toda a altura do pilar.

Nas ligações com chapa de topo, os parafusos recebem basicamente dois tipos de esforços, tração e corte. Geralmente, devido ao momento negativo das vigas, as duas linhas de parafusos superiores estão totalmente tracionadas.

A figura 4.8, mostra o diagrama de tensões nos parafusos para o modelo LVC01 na direção longitudinal. A flexão da chapa induz a flexão nos parafusos (como pode ser visto na figura em escala aumentada em 50 vezes) e as maiores tensões na região inferior da primeira linha de parafusos e na região superior na linha número dois. A flexão também ocorre na linha três, mas neste caso os parafusos se encontram comprimidos.

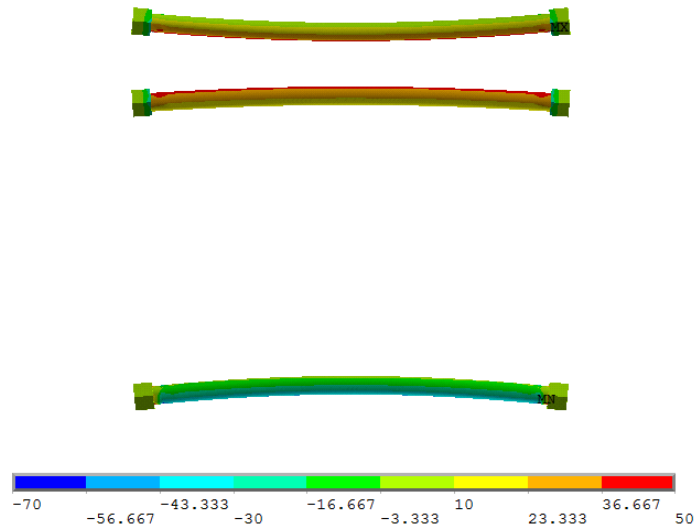


Figura 4. 8 – Diagrama de tensões eixo longitudinal aos parafusos de 12,5 mm (MPa)

A figura 4.9 apresenta o diagrama com escala aumentada em 100 vezes, o vetor deslocamento dos parafusos provocado pela flexão da chapa.

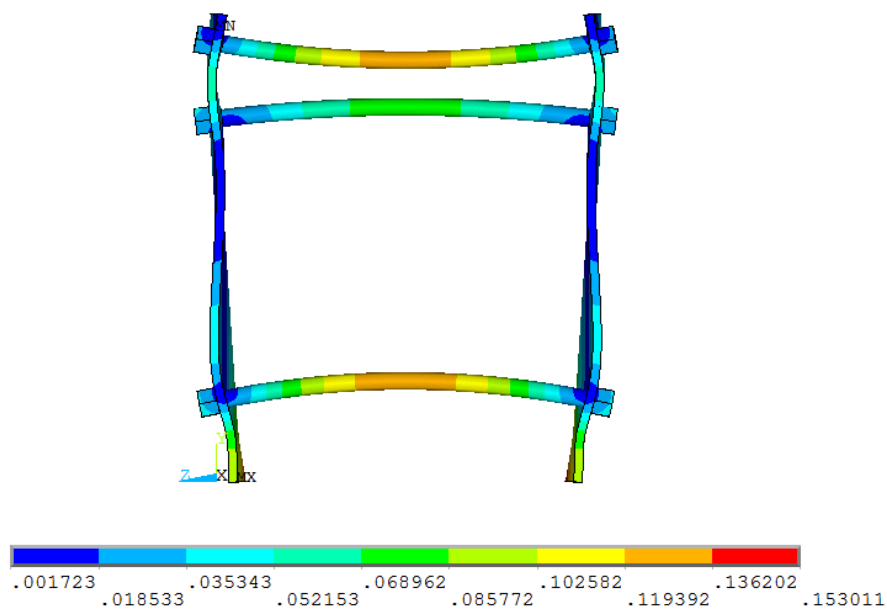


Figura 4. 9 – Flexão dos parafusos devido a chapa (mm).

Observa-se também o deslocamento simétrico em ambos os lados da ligação.

Os parafusos da região superior que se encontram tracionados são responsáveis pela semirrigidez da ligação, os parafusos da região comprimida não recebem esforços de compressão, pois estes são recebidos pelo pilar.

4.4. Pilares

O pilar é o elemento de sustentação do conjunto. Ele recebe, através das chapas e parafusos, todos os esforços provenientes da viga.

O esforço cortante da viga é recebido pelo pilar através dos parafusos e são absorvidos pelas paredes do tubo. A compressão proveniente do flange inferior da viga, como mostrado na a figura 4.10, se localiza a região com maior concentração de tensões.

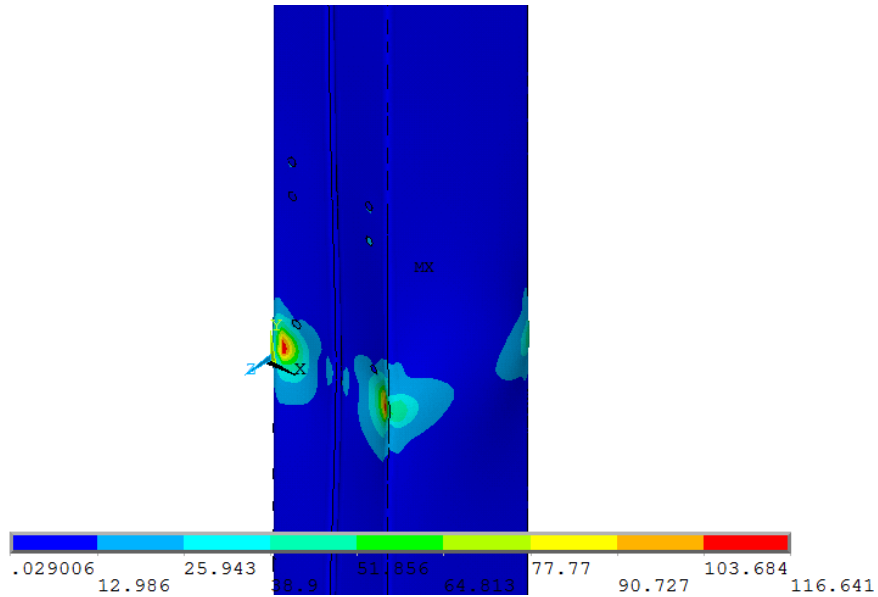


Figura 4. 10 - Diagrama de tensões de Von Mises devido a compressão do flange inferior da viga (MPa).

Os esforços de tração, como já foram mostrados, são recebidos pelos parafusos da linha superior. As forças aplicadas nos dois extremos das vigas têm o mesmo valor e sentido, com isso, o esforço de compressão recebido em ambos os lados do pilar são equivalentes. A compressão dos pilares causa a flexão das paredes laterais do perfil, mostrado na figura 4.12 (aumentado em 300 vezes).

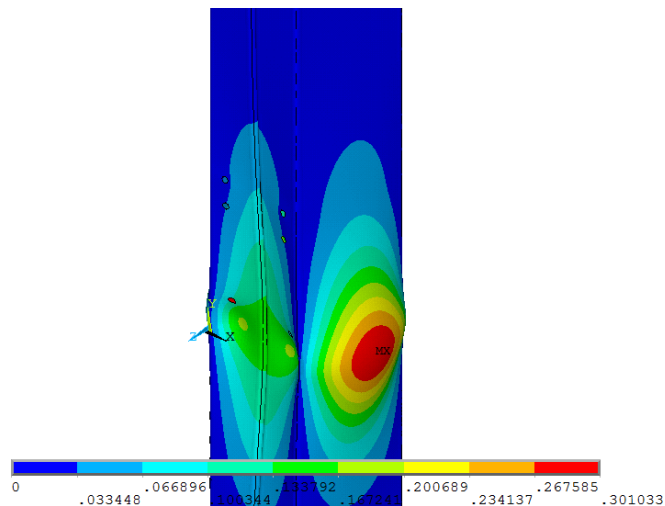


Figura 4. 11 – Deslocamentos das paredes dos perfis (mm).

O fenômeno de flexão pode ser visto também nos enrijecedores das colunas. A compressão do flange inferior empurra os enrijecedores fazendo-os abrir. A figura 4.12 mostra o diagrama de tensões de Von Mises. A região mais solicitada, azul, está na altura do flange inferior comprimido da ligação.

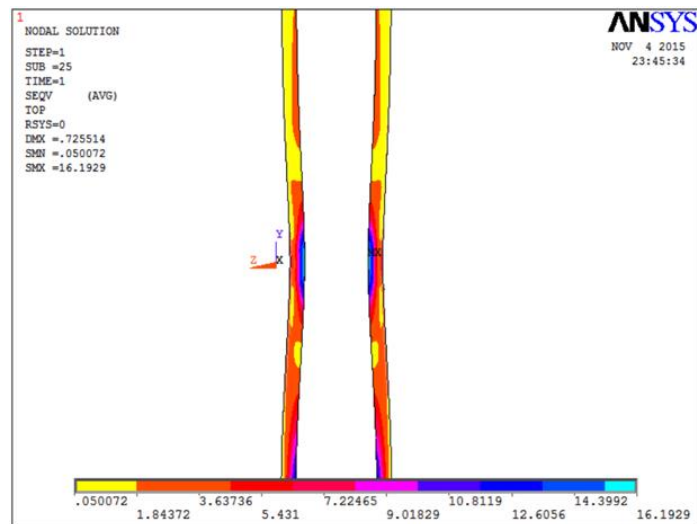
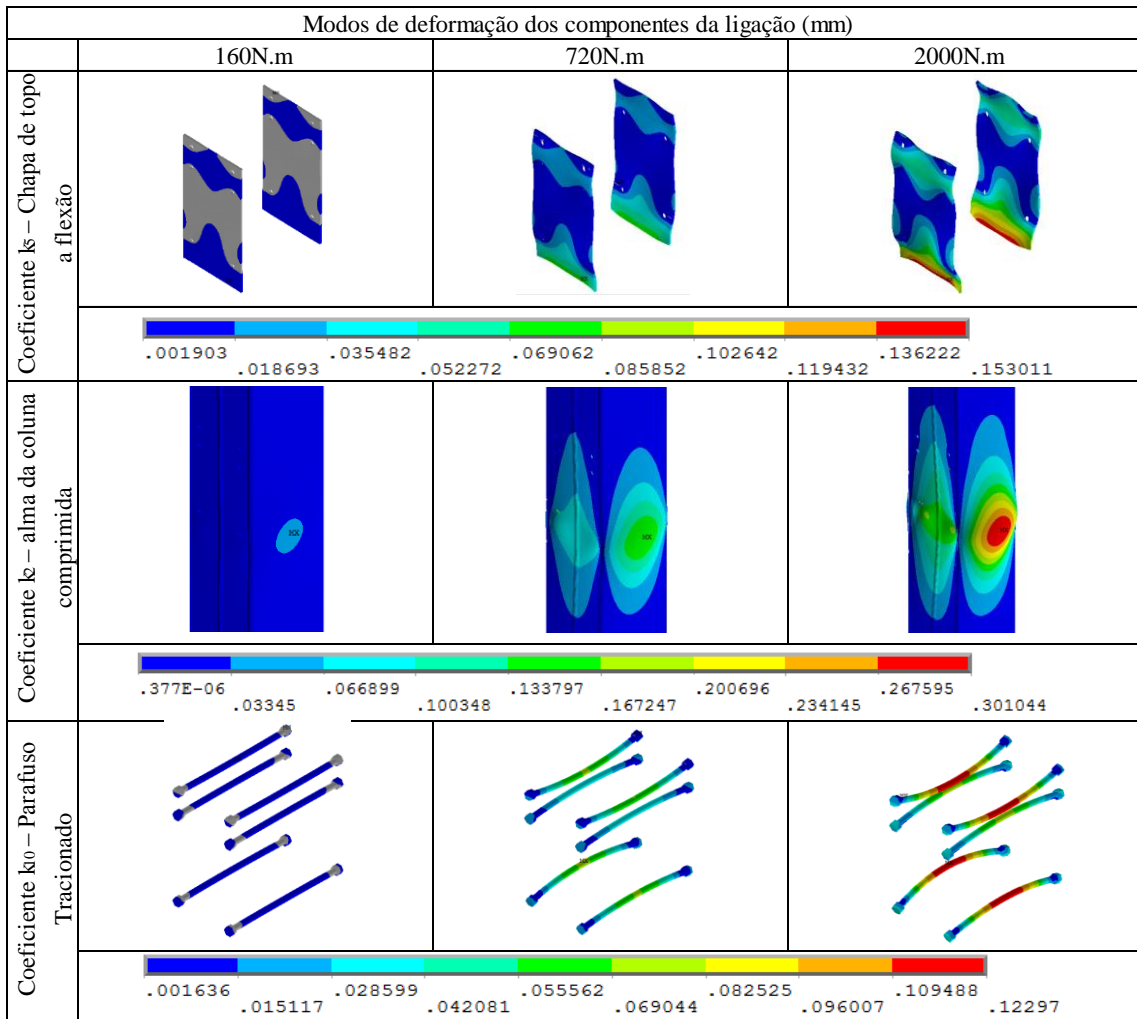


Figura 4. 12 - Tensões de Von Mises (MPa).

4.5. Deslocamentos

Para finalização da análise dos modelos, e posterior comparação entre eles, a tabela 4.3 apresenta os diagramas de deslocamentos em função dos momentos atuantes nas vigas. Os deslocamentos inicial, médio e final, dos componentes que diretamente interferem na semirrigidez da ligação para o modelo LVC01, são esboçados da seguinte forma:

Tabela 4. 2 – Defomação dos componetes da ligação.



Após esta análise de tensões e deslocamentos realizada para o modelo numérico, na próxima seção serão apresentados os gráficos de semirrigidez com as variações da geometria das seções do pilar, vigas, chapas de topo e barras passantes. Como já foi dito anteriormente, todos resultados foram retirados da análise através de elementos finitos e o programa Ansys, versão 12.0. A geometria e denominações de cada um dos modelos foi apresentada no capítulo 2, tabela 2.1.

4.6. Estudo Paramétrico

Nesta seção são apresentadas as curvas momento rotação de cada um dos modelos cuja a geometria é indicada na tabela 2.1. Quanto maior a inclinação da curva, maior é a rigidez. Para se estudar a influência de cada um dos componentes da ligação - espessura chapa de topo, espessura da viga e da coluna, diâmetro dos parafusos e a altura do pilar, foram criados quatro grupos e os resultados são apresentados abaixo.

4.6.1. Chapa de topo

O primeiro grupo de análise no programa Ansys, versão 12.0, é referente a variação da espessura da chapa de topo, sem que qualquer outro elemento seja modificado.

Foram realizadas quatro variações seguindo as espessuras de chapas encontradas no mercado de 6,3 mm a 12,5 mm.

A identificação dos modelos, conforme tabela 2.1, é mostrada no gráfico 4.3, assim como a espessura da chapa de topo de cada um deles.

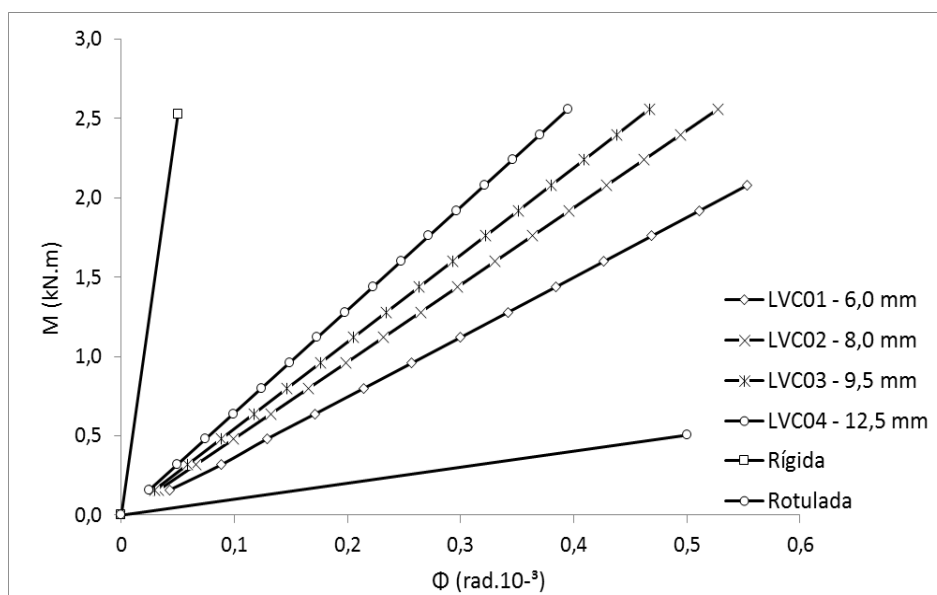


Gráfico 4. 3 - Curvas Momento x Rotação para variação da chapa de topo.

Observa-se que a rigidez da ligação é maior com o aumento da espessura da chapa de topo. A flexão da chapa é a responsável direta no deslocamento da viga e consequentemente na rigidez da ligação.

4.6.2. Espessura da viga e coluna

Seguindo os modelos apresentados na tabela 2.1, o gráfico 4.4, ilustra agora a variação da rigidez da ligação com a aumento da espessura da coluna e das vigas de 3,5 a 6,3 mm.

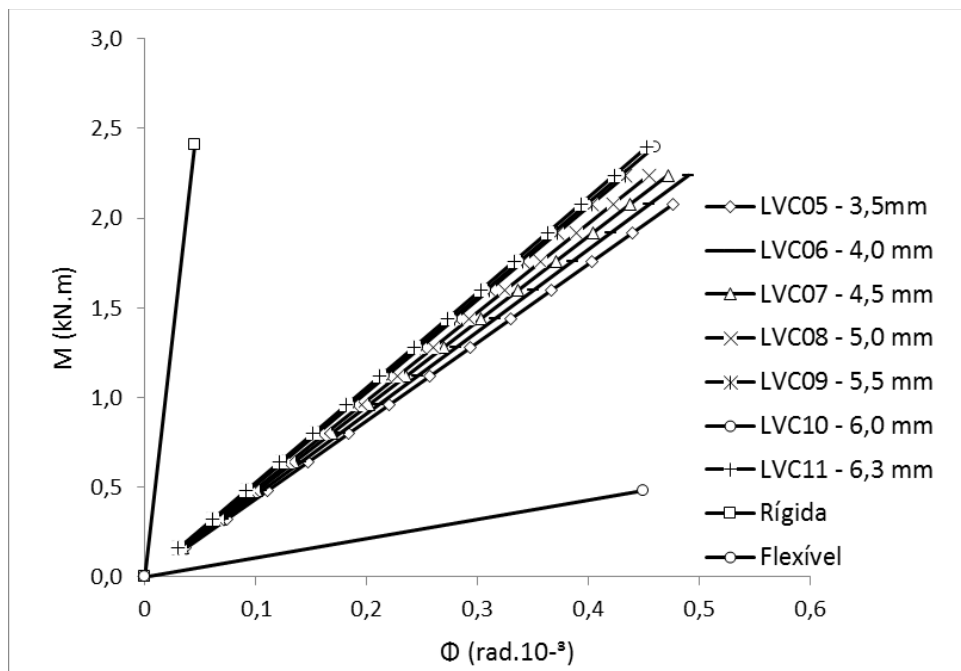


Gráfico 4. 4 - Curvas Momento x Rotação para variação das chapas das vigas e coluna da ligação.

Assim como a chapa de topo, o aumento da espessura da chapa do pilar e da viga também aumenta a rigidez da ligação.

A flexão das paredes laterais é a principal responsável pela rigidez deste componente. O aumento da espessura da viga, pouco influência na semirrigidez da ligação, como será mostrado nos resultados analíticos da próxima seção.

O responsável pela maior rigidez das ligações com perfis de espessuras maiores é o aumento do momento de inércia das paredes laterais dos pilares, ou seja, quanto maior a espessura, maior momento de inércia e conseqüentemente maior rigidez.

4.6.3. Diâmetro dos parafusos

Dando continuidade aos modelos apresentados na tabela 2.1, tem-se agora o gráfico 4.5, que mostra a variação da rigidez da ligação com a variação do diâmetro dos parafusos. Os parafusos utilizados foram apresentados na tabela 2.1, todos com diâmetros comerciais.

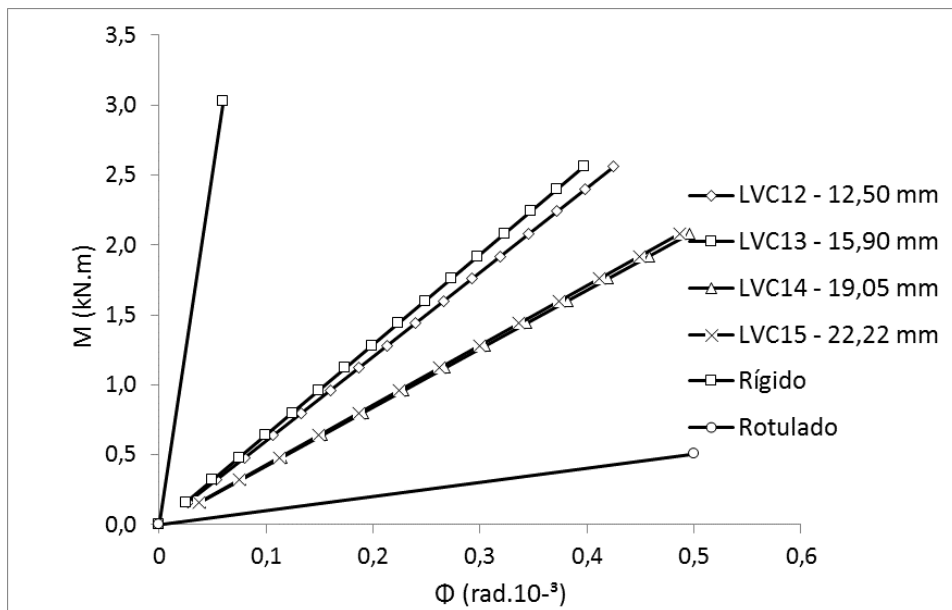


Gráfico 4. 5 - Curvas Momento x Rotação para variação diâmetro dos parafusos.

O coeficiente de rigidez relativo ao parafuso é dado em função do seu diâmetro e comprimento. Os modelos apresentados na tabela acima apresentam variação apenas

dos diâmetros, já que o comprimento dependente da altura da seção do pilar, mantido constante para os modelos apresentados.

Alem da descontinuidade na comparação dos quatro parafusos, se comparado os parafusos de 1/2" com 5/8" e 3/4" com 7/8", observa-se a diminuição da rigidez da ligação nos parafusos com maior diâmetro.

O efeito se deve ao fato de que a rigidez dos parafusos de 15,09 e 22,22, são tão grandes que não sofrem flexão na região inferior da ligação, fazendo com que a parede do pilar receba toda a carregamento vindo do flange inferior da viga, causando maior flexão da parede e consecutivamente menor rigidez.

4.6.4. Altura da seção do pilar

Por fim, variou-se a altura do pilar mantendo sua espessura igual a 6,3 mm. O gráfico 4.6 mostra a variação da rigidez da ligação com a altura do pilar de 200 mm a 350 mm.

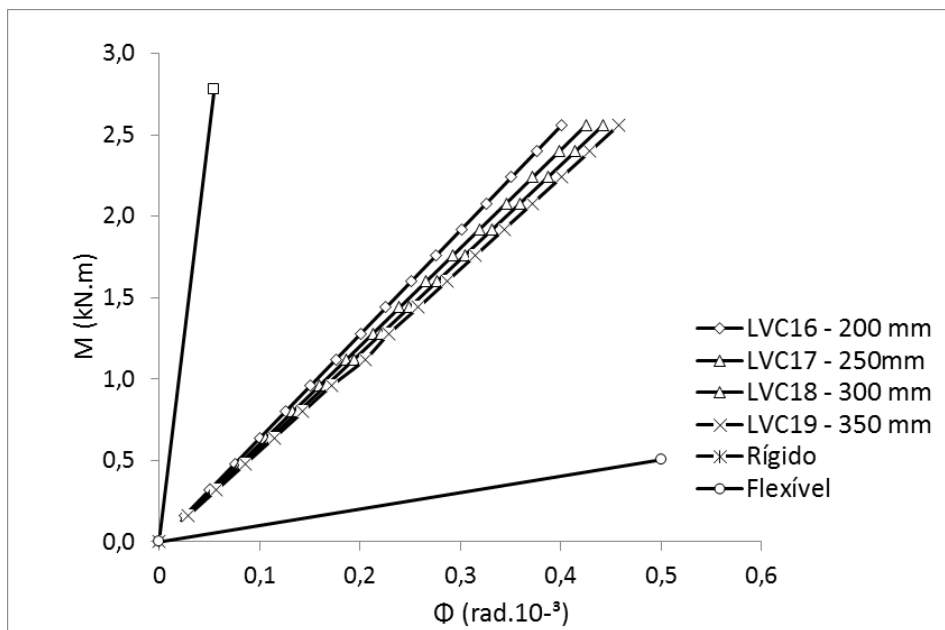


Gráfico 4. 6 – Curvas Momento x Rotação para variação altura do pilar.

O coeficiente de rigidez referente a flexão da alma do pilar, tem como principal fator de contribuição a relação altura/espessura – esbeltez – pode observar que, a rigidez é inversamente proporcional à altura dos pilares.

Isso se deve ao aumento redução da rigidez da chapa, conseqüentemente surge o efeito localizado apresentado na figura 4.11.

Com isso, foram apresentados os resultados referentes a análise numérica para os 19 modelos rodados no software Ansys, versão 12.0, assim como os gráficos de semirrigidez e os limites dados pelo Eurocode 3 (2010), rotulado e rígido, de cada um deles. Observa-se que todos se apresentaram na zona de semirrigidez. Segue no próximo capítulo a análise e comparação dos resultados entre a análise em elementos finitos e análise teórica da ligação.

5. Análise e Comparação dos Resultados

Neste capítulo será apresentada a avaliação teórica da semirrigidez da ligação em estudo através do método das componentes e assim como realizado por Romano (2001), será apresentada a origem da expressão de cada uma das componentes, para melhor justificar as modificações realizadas para a adequação da ligação ao método.

Como já citado anteriormente, as premissas de cálculo para o uso do método é que a ligação seja entre perfis de seção I, soldados ou laminados, com índices de esbeltez das seções limitados.

A ligação apresentada neste trabalho possui algumas características peculiares, que não se adequam ao método, são elas:

- Utilização de perfis formados por chapas finas e índices de esbeltez elevados,
- Pilares em perfis caixa;
- Parafusos passantes.

Com isso, para a utilização do método na ligação em estudo, algumas modificações na formulação foram propostas e verificadas com os 19 modelos em elementos finitos já apresentados.

5.1. Adaptação dos coeficientes do Método das Componentes para o modelo analisado

O método das componentes fornece 13 formulações que interferem diretamente na semirrigidez da ligação.

Para se chegar combinação de componentes que fornece a semirrigidez da ligação proposta neste trabalho e descrita neste capítulo, partindo dos coeficientes propostos na tabela 2.7 (vigas nos dois lados – momentos iguais e sentidos opostos), foram realizadas combinações/modificações para que ao fim do capítulo seja

apresentada uma equação que represente os resultados numéricos fornecidos pelo programa Ansys, versão 12.0 apresentado no capítulo 01.

Nas próximas seções serão apresentadas detalhadamente, as origens de cada uma das formulações, as adaptações para se chegar ao modelo proposto, e também os valores, em forma de tabela, dos parâmetros utilizados para se chegar à semirrígidez da ligação para o modelo LVC05, escolhida aleatoriamente.

5.2. Geometria do modelo LVC05

A tabela 5.1 apresenta as características geométricas da ligação em estudo nas células em branco. As células em amarelo apresentam características geométricas automáticas, calculadas através da geometria principal de cada modelo.

Tabela 5. 1– Tabela de características geométricas do modelo LVC05.

Propriedades Geometricas da Seção (m)			
Viga		Coluna	
Espessura (t_{fb})	0,0035	Espessura (t_{wc}/t_{fc})	0,0035
Altura (h_{wb})	0,2500	Altura (d_{wc})	0,2500
Lagura (b_{wb})	0,1700	Largura (b_{fc})	0,18
Enrijecedor	0,03	Beta	2,00
Soldas	0,0035	Braço de alavanca(z)	0,250
		$b_{eff,c,wc}$	0,057
		Enrijecedor (ec)	0,033
		Soldas (a_p)	0,00350
Chapa		Parafuso	
Espessura (t_p)	0,0080	Diâmetro Nominal	1/2
Geometria (l_{eff-L1})	0,0737	Diâmetro (D_b)	0,0127
Geometria (m-L1)	0,0612	Comprimento (L_b)	0,2660
e_x (m-L1)	0,0203	Área (A_s)	0,000127
m_x (m-L1)	0,0203		
g (L1)	0,1294		
Geometria (l_{eff-L2})	0,3854		
Geometria (m-L2)	0,0612		

5.3. Coeficiente K_2 – Alma da coluna comprimida

A primeira componente que interfere diretamente na semirrigidez da ligação é a “alma” da coluna comprimida, que neste caso passa a ser a parede do tubo.

Em ligações entre viga e coluna em perfis I, a força transmitida pelo flange da viga passa para o pilar através da chapa de topo. O flange do pilar recebe esta força e passa para a alma, causando seu esmagamento e contribuindo diretamente no comportamento momento x rotação da viga. Esta contribuição é mensurada pela pelo coeficiente k_2 .

A figura 5.1 mostra a compressão da alma, proposição feita pelo Eurocode 3 (2010) responsável pela rotação da ligação.

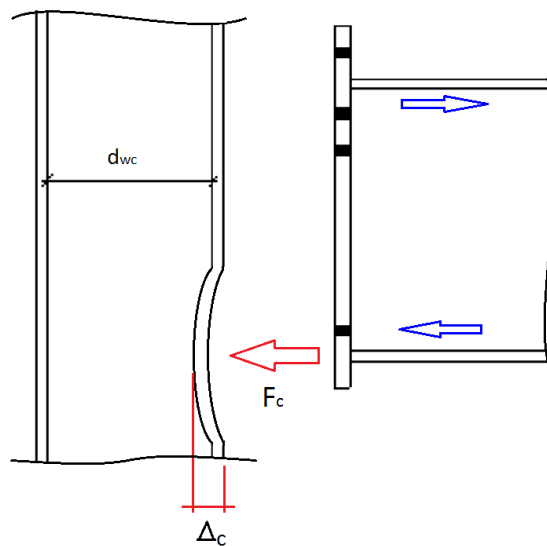


Figura 5. 1 – Deformação da alma do pilar em perfil I devido a compressão da viga.

O método considera que a força transmitida pela área da viga é dada por $F_c = \sigma_c \cdot A_c$, onde σ_c é a tensão de compressão e $A_c = 0,7 \cdot b_{wc} \cdot t_{wc}$, com isso, tem-se então:

$$F_c = \sigma_c * 0,7 * b_{wc} * t_{wc}$$

Onde a resistência da alma da coluna está sempre no regime elástico.

Considerando-se $\sigma_c = \varepsilon_c \cdot E$ e $\varepsilon_c = \Delta_c / d_c$, onde ε_c é a deformação devido a força normal na alma da viga, a força de compressão na viga será dada por:

$$F_c = \frac{0,7 b_{wc} \cdot t_{wc} \cdot \Delta_c \cdot E}{d_{wc}}$$

Expressando-se k_2 em função de F_c , a partir da relação força x deformação, tem-se:

$$k_2 = \frac{0,7 b_{eff,c,wc} \cdot t_{wc}}{d_c}$$

No caso da ligação em estudo, os perfis que formam as vigas e pilares possuem esbeltez elevada e o uso da equação $\sigma_c = \varepsilon_c \cdot E$, não pode ser usada diretamente, pois antes do seu esmagamento ocorre instabilidade devido a esbeltez. Este fenômeno deve ser avaliado e considerado no modelo. Este fenômeno pôde ser observado no modelo numérico conforme figura 4.11.

A compressão recebida pelas paredes do pilar gera o amassamento e também a flexão de suas paredes, esta flexão também deve ser mensurada na análise do coeficiente de rigidez k_2 .

Além disso, para a ligação com pilar em perfil caixa, ao invés de alma, o perfil tubular absorve as cargas de compressão vindas da viga através de suas paredes, como visto na figura 4.11. Com isso, a primeira modificação recebida pela formulação acima foi a inclusão de duas “almas”, que neste caso são as paredes do pilar. Com isso tem-se a seguinte expressão:

$$k_2 = \frac{0,7 b_{eff,c,wc} * 2t_{wc}}{d_c}$$

Onde:

t_{wc} é a espessura do pilar.

$B_{\text{eff,c,wc}} = t_{\text{fb}} + 2\sqrt{2}a_p + 5(t_{\text{fc}} + s) + s_p$ onde os valores são dados na tabela 2.1, com exceção do valor s . Este valor é referente a solda da viga com a chapa de topo e esta não foi considerada no modelo.

Para apresentar o desenvolvimento do coeficiente K_2 , será dado um passo à frente e apresentado também a semirrigidez final da ligação, já considerando também, os coeficientes ainda não apresentados, k_5 e k_{10} .

Continuando a avaliação da semirrigidez explicando a formulação acima, apenas com a consideração das duas paredes do perfil caixa, foi realizado todo o cálculo e comparado os resultados conforme apresentado na tabela 5.2.

Tabela 5. 2 – Relação semirrigidez modelo numérico e analítico para primeira variação de K_2

Relação de Semirrigidez Teórica e Numérica - Método das Componentes formulação direta				
Modelo	$S_{j,\text{ini,Ansys}} (1)$	$S_{j,\text{ini,teo}} (2)$	$(1)/(2)$	$(d_{wc})/(t_{wc})$
Unidade	(kN.m/rad)	(kN.m/rad)		
LVC01	3.738,07	6.350,66	59%	52,63
LVC02	4.844,72	10.568,94	46%	52,63
LVC03	5.417,06	12.194,21	44%	52,63
LVC04	6.475,70	14.734,33	44%	52,63
LVC05	4.362,16	8.691,80	50%	71,43
LVC06	4.559,29	9.346,74	49%	62,50
LVC07	4.747,35	10.177,79	47%	55,56
LVC08	4.926,91	10.944,73	45%	50,00
LVC09	5.222,91	11.652,90	45%	45,45
LVC10	5.210,87	12.307,53	42%	41,67
LVC11	5.291,29	12.676,69	42%	39,68
LVC12	6.018,20	14.633,21	41%	39,68
LVC13	6.448,29	16.751,78	38%	39,68
LVC14	4.227,06	17.919,63	24%	39,68
LVC15	4.279,17	18.666,98	23%	39,68
LVC16	6.379,74	17.403,73	37%	31,75
LVC17	6.018,20	14.633,21	41%	55,56
LVC18	5.786,66	12.635,15	46%	47,62
LVC19	5.586,04	11.123,63	50%	55,56

Como pode ser visto, o modelo analítico utilizando a equação com apenas a consideração da dupla alma, apresentou semirrigidez equivalente à metade da semirrigidez para o modelo numérico.

Como já foi dito, isto acontece devido a esbeltez do perfil da coluna, e sua flexão no momento que recebe a compressão na região do flange inferior da coluna. Foi necessário incluir o fenômeno da flexão ao modelo, através de coeficientes que aproximassem os resultados teóricos aos analíticos e se chegasse a equação que represente o modelo numérico.

Adicionando a expressão, um coeficiente de esbeltez “Q”, dado pela seguinte expressão:

$$Q = \frac{1}{25} \sqrt{d_{wc}/t_{wc}}$$

Onde os parâmetros são dados na tabela 5.1.

O coeficiente K_2 , agora modificado, passa a ter seguinte equação:

$$k_2 = \left(\frac{1}{25} \sqrt{d_{wc}/t_{wc}}\right) \frac{0,7 b_{eff,c,wc} * 2t_{wc}}{d_c}$$

Onde é considerado a flexão das paredes do tubo.

5.4. Coeficiente K_5 – Chapa de topo a flexão

Já mostrado anteriormente, o segundo coeficiente que influencia diretamente na rigidez da ligação em estudo é a flexão da chapa de topo, dado pelo coeficiente K_5 .

Segundo Jaspert, Steenhuis e Weinand (1995) o deslocamento neste caso é dado pelo comportamento de perfis “T” equivalentes que no regime elástico é dado por:

$$k_5 = \frac{0,9 l_{eff} t_p^3}{m^3}$$

Conforme mostrado por Romano (2001), esses autores, para a determinação do deslocamento do perfil “T” no regime elástico, determinam que o comprimento efetivo inicial é limitado pela formação da primeira rótula plástica na interseção do flange/alma, ponto A mostrado na figura 5.3.

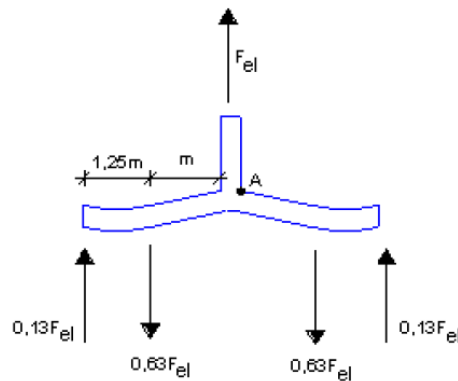


Figura 5. 2 – Ponto de formação da rotula plástica do perfil “T”.

O modelo desenvolvido por Jaspert, Steenhuis e Weinand (1995), indicado na figura 5.3, considera que 26% da força desenvolvida nos parafusos é devido ao efeito alavanca e determinam $L_{eff,ini}$ da seguinte forma.

Considera-se que o momento máximo no perfil “T” é dado por $M_{max} = 0,322F_{el}.m$ e a força máxima no regime elástico para a formação da rotula plástica no ponto A é dada por:

$$F_{el} = \frac{M_p}{0,322 * m} = \frac{0,25 * L_{eff,ini} * t^2}{0,322 * m} * f_y = \frac{L_{eff,ini} * t^2}{1,288 * m}$$

Por fim, a força máxima no regime elástico corresponde a 2/3 da capacidade resistente do perfil “T”, conclui-se que $L_{eff,ini}$ corresponde a $0,85.L_{eff}$, e determinada a relação entre a largura efetiva no regime plástico e no regime elástico, tem-se a rigidez translacional K_5 , dado pela equação abaixo.

$$k_5 = \frac{0,85 l_{eff} t_p^3}{m^3}$$

L_{eff} , t_p e m , apresentados no capítulo 2 deste trabalho.

No caso da chapa de topo à flexão e respectivo coeficiente K_5 , não foram necessárias modificações para o modelo em questão. A flexão da chapa não leva em questão elementos que alterem sua formulação pois os parâmetros já são bem conhecidos, além de não sofrerem influência de esbeltez, como o caso dos perfis.

5.5. Coeficiente K_{10} – Parafuso tracionado

O parafuso tracionado é outra componente que interfere na rigidez da ligação. Solicitados a esforços de tração, assim como mostrado na figura 5.3 e já pressuposto no cálculo da chapa a flexão, com as forças de alavanca representando 26% das forças de tração nos parafusos, os resultados obtidos por Jaspart, Steenhuis e Weidmand (1995), mostrado por Romano (2001), é apresentado a seguir.

Admite-se novamente o perfil “T” equivalente no regime elástico e considerando os efeitos das forças de alavanca tem-se:

$$\sigma_p = \frac{0,63 F_{el}}{A_s}$$

$$F_{el} = \frac{\sigma_p * A_s}{0,63} = 1,6 * \sigma_p * A_s$$

E sabendo-se que $\sigma_p = \varepsilon_p \cdot E$, $\varepsilon_p = \Delta / L_p$ e $K_6 = F_{e1} / E \cdot \Delta$, obtém-se:

$$k_{10} = 1,6 \frac{A_s}{L_b}$$

A_s e L_b , são dados na tabela 5.1.

Assim como a chapa a flexão, no caso do parafuso tracionado, não foi realizada nenhuma modificação na formulação proposta pelo método das componentes.

O diferencial neste trabalho é que os parafusos são passantes e devido a isso seus comprimentos são bem maiores que demonstrados pelo método, pois ultrapassam o perfil tubular.

5.6. Valores dos coeficientes de rigidez para o modelo LVC05

Após a inserção da geometria na tabela 5.1, determina-se os valores de cada um dos coeficientes de rigidez utilizados no cálculo da semirrigidez da ligação, conforme mostrado nos itens acima. A tabela 5.3 mostra os valores dos coeficientes de rigidez utilizados no cálculo da semirrigidez inicial da ligação. As indicações L1 e L2 denotam a posição das linhas de parafusos, de cima para baixo. O coeficiente K2 pertence a região comprimida da ligação e o método não o associa a nenhuma linha.

Tabela 5. 3 – Coeficientes de rigidez utilizados.

Componentes					
Alma à Compressão		Chapa Flexão		Parafuso	
K2=	0,0003581	K5-L1=	0,00405	k10-L1=	0,001524
Esbeltez	0,3211248	K5-L2=	0,00078	k10-L2=	0,001524

5.7. Associação dos coeficientes de rigidez da ligação do modelo LVC05

Posteriormente à determinação de cada um dos coeficientes de rigidez dos componentes atribuídos a ligação, eles são associados em série, dentro de cada uma das linhas de parafuso. A associação é feita através da seguinte formulação:

$$k_{eff,n} = \frac{1}{\frac{1}{k_{5,n}} + \frac{1}{k_{10,n}}}$$

Onde:

Onde n representa da n-ésima linha de parafuso.

Com isso, aplicando a formulação acima, tem-se a tabela 5.4, que apresenta os valores do coeficiente efetivo para cada linha de parafuso.

Tabela 5. 4 – Coeficiente de rigidez efetivo para as três linhas de parafuso.

Coeficientes de Rigides Efetivos das Linhas			
K efetivo em serie - L1		K efetivo em serie - L2	
Keff.1=	0,00111	Keff.2=	0,00051

Apesar da ligação em estudo possuir 3 linhas de parafusos, a linha localizada na região comprimida não interfere na semirrigidez da ligação. O coeficiente relativo a alma comprimida K_2 será associado posteriormente.

Após a associação na linha, e com o objetivo de chegar a um coeficiente único e final para a ligação, faz-se associação em paralelo entre os k_{eff} 's, obtendo o “ k_{eq} ” – coeficiente de rigidez equivalente. Este passo é realizado entre as regiões tracionada e comprimida, mas neste caso há apenas os coeficientes da região tracionada.

$$k_{eq} = \frac{k_{eff.1} * h_1 + k_{eff.2} * h_2}{z_{eq}}$$

Onde:

h_1 = altura da viga (h_{wb}) + distância entre o furo e a flange do perfil ($1,6D - D$ é o diâmetro do furo – dados na tabela 5.1);

h_2 = altura da viga (h_{wb}) - distância entre o furo e a flange do perfil ($1,6D - D$ é o diâmetro do furo – dados na tabela 5.1);

Obs.: o valor de $1,6 D$, é relativo à distância entre o furo e a flange do perfil da viga. Esta relação foi realizada para facilitar a automatização para a APDL e o modelo numérico.

$k_{eff,n}$ são os coeficientes efetivos dados na tabela 5.4;

z_{eq} é dado pela equação:

$$z_{eq} = \frac{k_{eff.1} * h_1^2 + k_{eff.2} * h_2^2}{k_{eff.1} * h_1 + k_{eff.2} * h_2}$$

Para o modelo LVC05 o valor da altura equivalente “ z_{eq} ” é dado na tabela 5.5.

Tabela 5. 5 – Braço de alavanca equivalente da ligação em estudo.

Braço de Alavanca (m)	
$z_{eq} =$	0,25882

Após as definições acima, a tabela 5.6 traz o coeficiente de rigidez efetivo das duas linhas de parafuso tracionados e também o coeficiente de rigidez relativo a alma da coluna a compressão “ K_2 ”.

Tabela 5. 6 – Coeficiente de Rigidez equivalente da região tracionada da ligação e coeficiente K_2 .

K Equivalente Comprimido e Tracionado			
K Equivalente Tracionado		K_2	
$K_{eq} =$	0,00173	$K_{eq} =$	0,00036

Por fim, obtido o coeficiente efetivo, juntamente com coeficiente da alma a compressão “ k_2 ”, mostrados na tabela 5.7, determina-se a rigidez inicial rotacional através da seguinte equação:

$$S_{j,ini} = \frac{Ez^2}{\mu \left(\frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_{eq}} \right)}$$

Onde:

E é módulo de elasticidade teórico do aço considerado $2,05 \cdot 10^{11}$ Pascal;

k_2 coeficiente de rigidez da ligação calculado na seção 5.3;

z é o braço de alavanca dado pela altura da viga (h_{wb});

$\mu = 1$ – pois $M_{j,sd} \leq \frac{2}{3} M_{j,Rd} \Rightarrow \mu = 1$

Assim, tem-se o coeficiente de rigidez da ligação, para o modelo LVC05, apresentado na tabela 5.7 em.

Tabela 5. 7 – Coeficiente de rigidez do modelo LVC05 (N/rad).

Semi-rigidez Inicial da Ligação	
Sj inicial=	3.802.253,1

5.8. Adaptações nas equações propostas pelo Eurocode 3 (2010)

Para se chegar a equações que avaliassem a ligação em estudo neste trabalho, como mostrado neste capítulo, foram necessárias algumas modificações na formulação proposta pelo Eurocode 3 (2010), adequando-o a norma NBR 14762, utilizada para o cálculo de perfis formados a frio e chapas finas.

Inicialmente tem-se que, entre os componentes que interferem na semirrigidez inicial da ligação com chapa de topo, a componente K_2 – Alma da coluna a compressão é a única que sofre influência da semirrigidez e pode interferir ou modificar a

formulação proposta pelo Eurocode 3 (2010). Outro elemento que também interfere na semirrigidez da ligação são os enrijecedores dos pilares.

A formulação proposta pelo Eurocode 3 (2010), e as componentes propostas não avaliaram a semirrigidez da ligação. Percebeu-se que os resultados da análise numérica se apresentavam muito mais rígidas do que os resultados relativos as formulações propostas pelo método das componentes. Isso ilustra que a esbeltez dos elementos formados a frio, interferem diretamente no método e na semirrigidez inicial da ligação.

Com isso, foram testados coeficientes ligados a esbeltez da parede dos pilares até se chegar ao seguinte coeficiente:

$$Q = \frac{1}{25} \sqrt{d_{wc}/t_{wc}}$$

Que inserida a formulação do coeficiente relativo a alma da coluna a compressão, expressa os resultados numéricos de forma mais aproximada.

Com a multiplicação do coeficiente Q pela formulação de K_2 , e as modificações apresentadas neste capítulo, a equação estimou de forma bem aproximada a análise numérica. O gráfico 5.8 ilustra a curva do resultado teórico e o modelo numérico do protótipo LVC01.

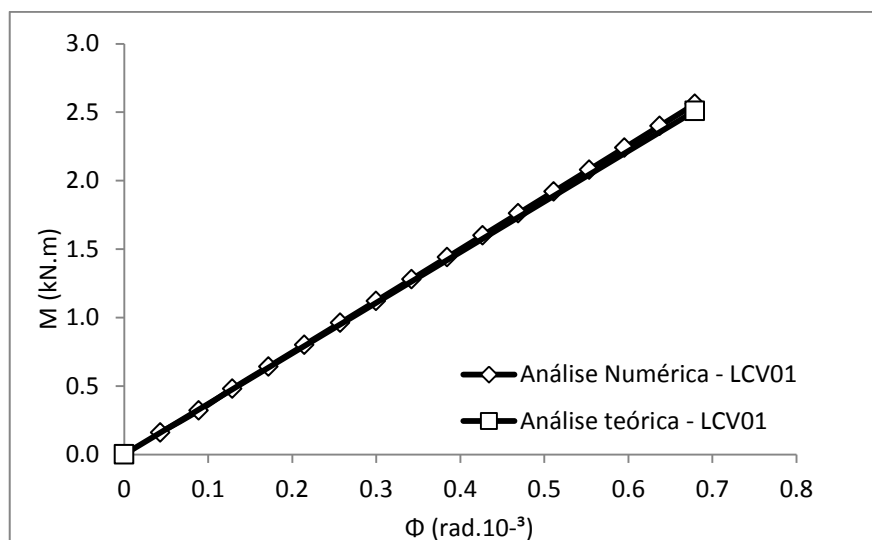


Gráfico 5. 1 – Curva comparativa de semirrigidez entre modelo teórico e numérico.

E por fim, a relação entre os resultados para os 19 modelos estudados, são apresentados na tabela 5.8.

Tabela 5. 8 – Relação entre resultados teóricos e resultados numéricos (Ansys 12.0).

Relação de Semirrigidez Teórica e Numérica - Método das Componentes formulação modificada			
Modelo	$S_{j,ini,Ansys} (1)$	$S_{j,ini,teo} (2)$	$(1)/(2)$
Unidade	(kN.m/rad)	(kN.m/rad)	
LVC01	3.738,07	3.299,26	1,13
LVC02	4.844,72	4.605,94	1,05
LVC03	5.417,06	5.223,11	1,04
LVC04	6.475,70	6.324,99	1,02
LVC05	4.362,16	3.802,25	1,15
LVC06	4.559,29	4.081,14	1,12
LVC07	4.747,35	4.421,57	1,07
LVC08	4.926,91	4.770,02	1,03
LVC09	5.222,91	5.090,01	1,03
LVC10	5.210,87	5.408,68	0,96
LVC11	5.291,29	5.595,88	0,95
LVC12	6.018,20	6.552,11	0,92
LVC13	6.448,29	6.670,88	0,97
LVC14	4.227,06	6.848,62	0,62
LVC15	4.279,17	6.955,04	0,62
LVC16	6.379,74	7.100,68	0,90
LVC17	6.018,20	6.552,11	0,92
LVC18	5.786,66	5.710,66	1,01
LVC19	5.586,04	5.229,30	1,07
$S_{j,ini,teo}$ - Semirrigidez teórica	$S_{j,ini,Ansys}$ - Semirrigidez Analítica		

Por fim, a multiplicação do coeficiente “Q” a equação do coeficiente K_2 , juntamente com a utilização dos coeficientes e relações indicados pelo método das componentes, proposto pelo Eurocode 3, apresentou um bom resultado em relação ao modelo numérico com variação máxima de aproximadamente 12% na relação entre avaliação teórica e numérica, o que foi considerado um bom resultado e a formulação proposta no capítulo 5 sendo representativa do modelo numérico.

Os modelos LVC13 e LVC15 são dois modelos que ficaram fora da curva na relação entre os modelos da análise teórica e numérica e não foram encontrados os fatores para isso.

5.9. Avaliação da semirrigidez da ligação

Foi apresentada a avaliação numérica através dos gráficos de rigidez relacionados a este método. Como exposto, os resultados numéricos e analíticos apresentaram-se aproximados e os gráficos apresentados no capítulo 4, esboçam também os resultados teóricos.

Por fim, pode ser visto que a ligação em estudo se enquadra no intervalo de semirrigidez dado pelo Eurocode 3 (2010) em todos os 19 modelos estudados.

6. Conclusões e Recomendações

Foi objetivo neste trabalho a avaliação numérica e analítica da semirrigidez da ligação viga-coluna - formados por perfis formados a frio - realizada através de chapas parafusadas. Inicialmente realizou-se um estudo numérico através do programa Ansys, version 12.0, para posterior avaliação analítica através da norma Europeia Eurocode 3 (2010).

O modelo da ligação em estudo não possui resultados experimentais, com isso, os modelos numéricos foram validados de forma qualitativa levando em conta análises de tensões e deslocamentos que representam o comportamento dos componentes em análise, vigas, colunas, chapas e parafusos.

Pensando nisso, o capítulo 4 apresentou, através do modelo numérico, o caminho das tensões e o comportamento de cada um dos componentes da ligação. Foram observados os seguintes fenômenos:

- Flexão da chapa de topo;
- Tração nos parafusos superiores;
- Flexo-compressão da parede da coluna;
- Flexão dos enrijecedores da coluna.

Outra verificação realizada neste momento foi o comportamento dos elementos de contato. Utilizados nas regiões localizadas entre superfícies como parafusos e chapas da coluna e chapa de topo, entre a face do pilar e chapa de topo, entre os enrijecedores dos perfis da viga e da coluna, e responsáveis pelas transferências de esforços perpendiculares e de atrito entre as superfícies onde são atribuídos. Foram considerados satisfatórios e recomendados para as ligações deste tipo.

Após avaliação dos resultados numéricos e fundamentação teórica sobre a metodologia de dimensionamento embasados nas normas e artigos técnicos sobre o assunto, partindo agora para estudo analítico da ligação, foi necessário conhecimento sobre método das componentes proposto pelo Eurocode 3, assim como do

comportamento dos perfis formados a frio, utilizados nas vigas e colunas da ligação em estudo, para compatibilização das equações propostas pelo método das componentes.

O capítulo 5 apresentou a metodologia de dimensionamento da ligação. Inicialmente foi aplicada a formulação direta apresentada pelo Eurocode 3, método aplicado em ligações vigas e colunas em perfis I, soldados ou laminados, ligados por parafusos através da chapa de topo e como mostrado, devido a diferença da ligação em estudo com o modelo proposto os resultados foram considerados insatisfatórios.

A principal característica dos perfis formados a frio é a utilização de chapas muito finas, com coeficiente de esbeltez elevados, não considerados pela formulação proposta pelo Eurocode 3. Além disso, o uso de perfil tubular na coluna, também é uma diferença a ser verificada.

Apesar de apresentarem essas diferenças, percebeu-se que os componentes K5 chapa de topo a flexão e K10 – parafuso a tração, apresentam comportamentos que não diferem do modelo original proposto pelo método, ou seja, a flexão da chapa e a tração nos parafusos não sofrem influência da esbeltez dos perfis formados a frio.

Com estas características consolidadas, o próximo passo foi comparar os resultados numéricos e analíticos. Apresentou-se na tabela 5.2 que a avaliação numérica trazia sempre deslocamento maiores que os resultados analíticos.

Como já mencionado, e comprovado em uma primeira avaliação, a variação da esbeltez das paredes dos pilares influenciavam diretamente na rigidez da ligação sendo que, quanto maior a esbeltez das chapas do pilar, maior era sua flexibilidade.

Com isso, foram testados coeficientes que levassem em conta a esbeltez das chapas das paredes dos pilares, até que a formulação apresentada no capítulo 5 representassem melhor os resultados numéricos.

Após algumas tentativas, chegou-se ao coeficiente “Q”, apresentado no capítulo 5, que aplicado ao coeficiente de rigidez relativo a componente K_2 – Alma da coluna comprimida, juntamente com a consideração de “duas almas” devido as duas paredes do perfil tubular, chegou-se a uma relação entre os coeficientes de rigidez da análise numérica e analítica com uma variação de 12%, para mais ou para menos, conforme mostrado na tabela 5.6.

A tabela 5.6 apresenta também que os modelos LVC14 e LVC15, ficaram com relação nos resultados dos modelos teórico e analíticos com relação superiores e foram desconsiderados na avaliação final do trabalho.

Estes resultados foram considerados satisfatórios e a formulação apresentada no capítulo 5 sendo representativa do modelo numérico apresentado no mesmo capítulo.

Como já citado, vale ressaltar que foram apresentados resultados de modelos numérico e analítico para a ligação em estudo, e apesar dos resultados terem sido considerados satisfatórios, devido a comparação entre eles, não elimina uma avaliação experimental para validação completa da formulação e também do modelo numérico expostos neste trabalho.

Um comentário adicional é que a avaliação proposta pelo método das componentes e o Eurocode 3 avalia a rigidez inicial da ligação, com isso, nos modelos numéricos, a ligação não foi em nenhum momento exposta a esforços de ruptura de qualquer um dos componentes da ligação.

Dito isso, e tendo em vista a continuação dos estudos realizados neste trabalho e avaliação do comportamento de ligações deste tipo através de modelos numéricos, analíticos ou experimentais, algumas modificações e ou considerações adicionais referentes ao que foi realizado são propostos:

- Validação experimental da ligação em estudo;
- Análise da ligação com os pilares preenchidos com concreto;
- Avaliação da ligação com apenas uma viga ligada;
- Avaliação da ligação com vigas solicitadas a momentos diferentes;
- Utilizar a semirrigidez da ligação em modelos estruturais em edifícios de andares múltiplos e comparação do uso de ligação considerada rotulada ou engastada;
- Redução do número de elementos finitos e utilização de diferentes elementos simplificados e avaliação da influência na ligação.

Visto isso, foi possível apresentar um modelo de formulação e proposições, através do uso de trabalhos anteriores e as normas vigentes, que representasse adequadamente o modelo numérico proposto através do programa Ansys versão 12.0.

Além disso, pôde ser visto de maneira geral, que os diferentes tipos de análise, independentemente do método de avaliação, numérica, analítica ou empírica, mesmo este último não sendo objeto de estudo direto deste trabalho, devem trazer resultados aproximados, além de comprovar a potencialidade da análise numérica na avaliação do comportamento estrutural e dimensionamento de estruturas, podendo ser utilizadas com validação de métodos de formas mais segura e econômica.

Referências Bibliográficas

AGERSOV, H. High Strength Bolted Connections Subjected to Prying. In: Journal of the Structural Division, ASCE, v.102, p. 161-175. 1976.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. ANSI/AISC 360-10: Specification Structural Steel Buildings Members. Chicago, 2010.

ANSYS, Ansys program version 12.0. Finite Element Software. S.1. Ansys Incorporation, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14762 - Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio – Procedimento, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800 - Projeto de Estrutura de Aço e de Estrutura Mista de Aço e Concreto de Edifícios, 2009.

AZIZINAMINI, A., BRADBURN, J. H. and RADZIMINSKI, L. B. Initial Stiffness of Semi-Rigid Steel Beam-to-Column Connections. In: Journal of Constructional Steel Research, v. 8, p. 71-90. 1987.

AZIZINAMINI, A. and RADZIMINSKI, L. B. Static and Cyclic Performance of Semi-Rigid Steel Beam-to-Column Connections. In: Journal of Structural Engineering, v. 115, nº 12, p. 2979-2999. 1989.

BAILEY, J. R. Strength and Rigidity of Bolted Beam-to-Column Connections. Conference on Joints Structures, University of Sheffield. 1970.

CARVALHO, L. C. V. de. Avaliação de Ligações Semi-Rígidas Aparafusadas em Estruturas de Aço, 1997. 208 f. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 1997.

CHAN, S. L. and CHUI, P. P. T. Non-Linear Static and Cyclic Analysis of Steel Frames with Semi-Rigid Connections. 1st ed. Oxford, United Kingdom: Elsevier Science Ltd, 2000. 336p.

CRUZ, P. J. S., SILVA, L. A. P. S. da S., RODRIGUES, D. S. and SIMÕES, R. A. D. Database for the Semi-Rigid Behaviour of Beam-to-Column Connections in seismic regions. In: Journal of Constructional Steel Research, v. 46 (120), p. 1-3. 1998.

DEL SÁVIO, A. A., MARTHA, L. F., ANDRADE, S. A. L., VELLASCO, P. C. G. S. and NETHERCOT, D.A. Generalised component-based model for beam-to-column connections including axial versus moment interaction. In: Journal of Constructional Steel Research, v. 65, p. 1876-1895. 2009.

EUROCODE 3: Design of steel structures. Part 1-8: Design of joints, 2010.

FAELLA, C., PILUSO, V. and RIZZANO, G. Structural steel semi-rigid connections: theory, design and software. 1st. CRC Press LLC, 2000. 328p.

FREITAS, A.M.S., MORAIS, C.S, RIBEIRO, L.F.L. Theoretical-Experimental Analysis of Bolted Beam-Column Connections in Cold Formed Steel Members. In: Eurosteel 2005 – 4th European Conference on steel and composite structures, masstricht: B, Hoffmeister and O, Hechler, v.A.p. 93-100.

FREITAS, A.M.S., Estudo do Comportamento Pós Crítico de Paredes Esbeltas de Perfis Metálicos, Rio de Janeiro, 1991, xiv, 114p, Coppe/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil 1991.

FU, Feng; LAM, Dennis and YE, Jianqiao. Parametric study of semi-rigid composite with 3-D finite element approach. In: Engineering Structures, v. 29, p. 888-898. 2007.

GIL, Beatriz, and BAYO, Eduardo. An alternative design for internal and external semi-rigid composite joints. Part II: Finite Element modelling and analytical study. In: Engineering Structures, v. 30, p. 232-246. 2007.

GONZAGA, L. G. M., Comportamento e Resistência de Ligações Viga-Pilar Parafusadas e Soldadas de Estruturas de Perfis de Aço Formados a Frio.

HIGAKI, V. E. Contribuição à análise estrutural de edifícios de aço com ênfase nas ligações semi-rígidas. 284 p., Tese Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

JASPART, J. P. Etude de la Semi-rigidité des Noeuds Poutre-colonne et Son Influence Sur la Résistance et la Stabilité des Structures en Acier, 1991. 412 f. Thèse de Doctorat, Université de Liège, Belgique, 1991.

JASPART, J. P., Recent Advances in the Field of Steel Joints Column Bases and Further Configurations for Beam-to-Column Joints and Beam Splices, 1997. 353 f. Chercheur qualifié du F.N.R.S., Université de Liège, Belgique, 1997.

KATTNER, M., and CRISINEL, M. Finite element modelling of semi-rigid composite joints. In: Computers and Structures, v. 78, p. 341-353. 1999.

KIM, Jeong; YOON, Joo-Cheol and KANG, Beom-Soo. Finite element analysis and modeling of structure with bolted joints. In: Applied Mathematical Modelling, v. 31, p. 895-911. 2007.

LIMA, L. R. O., VELLASCO, P. C. G. S., ANDRADE, S. A. L. Bolted Semi-Rigid Connections In The Column's Minor Axis. In: 2nd European Conference on Steel Structures - EUROSTEEL 1999, Praga, República Tcheca. Proceedings of the Second European Conference on Steel Structures – EUROSTEEL 1999. Editora da Universidade Técnica de Praga, 1999, v.2, p. 1-14.

LIMA, L. R. O., VELLASCO, P. C. G. S., ANDRADE, S. A. L., SILVA, L. A. P. S. Experimental and Mechanical Model for Predicting the Behaviour of Minor Axis Beam-to-Column Semi-Rigid Joints. In: International Journal of Mechanical Sciences. Inglaterra, Reino Unido, v. 44, n° 6, p. 1047-1065.2002.

Luís Simões da Silva, Ana M. Girão Coelho e Rui A. D. Simões (2001), Analytical valuation of the Moment-Rotation Response of Beam-to-Column Composite Joints under Static loading, Steel & Composite Structures, Techno - Press, 1, 2, 245-268

L. Gardner, N.Saari, F.Wang - Comparative experimental study of hot-rolled and cold-formed rectangular hollow sections

MAIOLA, C. H E MALITE, M.. Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, v. 9, n. 40, p.133-162, 2007.

MAGGI, Y. I. Análise do comportamento de ligações metálicas parafusadas viga-pilar com chapa de topo utilizando elementos finitos. Cadernos de Engenharia de Estruturas, v. 7, n. 28, p. 21-52, São Carlos, 2000.

- MAGGI, Y. I., GONÇALVES, R. M., LEON, R. T., RIBEIRO, L. F. L. Parametric analysis of steel bolted end plate connections using finite element modeling, *Journal of Constructional Steel Research*, v. 61, n.5, p. 689-708, 2005.
- MASIOLI, CALIL ZUMERLE. Análise teórica e experimental de ligações em aço entre pilar tubular de seção circular e viga seção I. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.
- MORAIS, C.S. Estudo teórico-experimental de ligações parafusadas em perfis formados a frio. Ouro Preto: PROPEC/UFOP, 2003. (Dissertação de Mestrado).
- MESQUITA, A. C. B. Caracterização e Sistematização do Comportamento Experimental de Ligações Metálicas e Mistas. 2002. 186 f. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Portugal, 2002.
- NETHERCOT, D. A., LI, T. Q., AHMED, B. Unified classification system for beam-to-column connections. *Journal of Constructional Steel Research*, v.45, n.1, p.39-65, 1998.
- PACKER, J. A., and MORRIS, L. J. A Limit State Design Method for the Tension Region of Bolted Beam-to-Column Connections. In: *The Structural Engineering*, v. 55, nº 10, p. 446-458. 1977.
- QUEIROZ, G. Análise Experimental e Análise Não-Linear de Nós Soldados semi-Rígidos. 1995. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Belo Horizonte, 1995.
- RATHBUN, J. C. Elastic Properties of Riveted Connections. In: *Transactions of ASCE*, v. 101, p. 524-563. 1936.
- RIBEIRO, L. F. L. Comportamento Estrutural de Ligações Viga-Coluna com chapa de Topo: Análise Teórico-Experimental. Tese de Doutorado – USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
- RIBEIRO, L. F. L., GONÇALVES, R. M., CASTIGLIONI, C. A. Beam-to-column end plate connections - An experimental analysis, *Journal of Constructional Steel Research*, Surrey - v. 46, p. 264-266, Inglaterra, 1998.

RODRIGUES, MONIQUE CORDEIRO Avaliação Estrutural de “T-Stub” em Ligações Viga - Coluna em Estruturas de Aço através do Método dos Elementos Finitos [Rio de Janeiro] 2007.

ROMANO, VICTOR PEREIRA. Dimensionamento de ligações Viga-Coluna com chapa de topo: Modelo do Eurocode 3. Ouro Preto: PROPEC/UFOP, 2001. (Dissertação de Mestrado).

SILVA, A.C. Estudo de ligações parafusadas em perfis formados a frio. Ouro Preto: PROPEC/UFOP, 2006. (Dissertação de Mestrado)

SURTEES, J. O. and MANN, A. P. End-Plate Connections in Plastically Designed Structures. Conference on Joints in Structures, University of Sheffield. 1970.

VELLASCO, P.C.G. da S.; ANDRADE, S.A.L. de; SILVA, J.G.S. da; LIMA, L.R.O. de; BRITO Jr, O. A parametric analysis of steel and composite portal frames with semirigid connections. In: Engineering Structures, v. 28, p. 543-556. 2006.

T. WANZEK and N. GEBBEKEN, “Numerical aspects for the simulation of end plate connections”. In: Numerical simulation of semi-rigid connections by the finite element method (Ed.: K.S. Viridi). Cost C1, Report of working group 6 – Numerical simulation, Brussels; 1-12 (1999).

WILSON, W. M. and MOORE, H. F. Tests to Determine the Rigidity of Riveted Joints in Steel Structures. Bulletin n° 104, Engineering Experiment Station, University of Illinois, Urban, IL, 1917.

YU, W. W. Cold-formed Steel Design, 3rd Ed., New York, John Wiley & Sons, Inc. 2000.

YOUNG, C. R. and JACKSON, K. B. The Relative Rigidity of Welded and Riveted Connections. In: Canadian J. Research, v. 11 (1-2), p. 62-134. 1934.

ZOETEMEIJER, P. E deBACK, J.(1972). High Strength Bolted Beam to Column Connections – The Computation of Bolts, T-Stub Flanges and Column Flanges, Report 6-72-13, Stevin Laboratory, Delft, Department of Civil Engineering, Delft University of Technology.

Anexos

Anexo 1 - APDL

!viga e coluna no eixo material correto
com os fy e parafuso

!teste na viga
!Acoplado todos nos do modelo para um
primeiro teste.

!Inicializa??o e defini?? de materiais

Finish
/clear
*get,nprocessadores,active,,nproc
/config,nproc,nprocesadores*3/4

/GRO,CURL,ON
/CPLANE,1
/REPLOT,RESIZE
WPSTYLE,,,,,,,,,0
!*
/NOPR

/PMETH,OFF,0
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
KEYW,PR_THERM,0
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_ELMAG,0
KEYW,MAGNOD,0
KEYW,MAGEDG,0
KEYW,MAGHFE,0
KEYW,MAGELC,0
KEYW,PR_MULTI,0
KEYW,PR_CFD,0

/GO
!*
/COM,
/COM,Preferences for GUI filtering have
been set to display:
/COM, Structural
!*
/PREP7
!*
!Geometria (Unidades em mm)

!Propriedades dos materiais
E=205000 !N/mm2
v=0.3

!Placa de Topo
tPl=6 !Espessura (tPl)
fych=250 !Material placa

!Coluna
tC=4.75 !espessura
da coluna
hc=250 !altura da
coluna
eC=0.13333*hC
!enrigecedor da coluna
rm=1.5*tC !linha de
centro da coluna
fyc=250 !resistencia da
coluna

!Parafuso
fypar=635 ![MPa], tensão de
escoamento do parafuso
fupar=825 ![MPa], tensão de
ruptura do parafuso
esupar=4/100 ![-], deformação à
tensão de ruptura do parafuso
esfpar=8/100 ![-], deformação
máxima do parafuso ainda na tensão de
ruptura
esf2par=12/100 ![-], deformação
máxima do parafuso no trecho
descendente da curva de resistência
tenfun=0.1 ![MPa], tensão de fundo da
relação constitutiva para evitar problemas
numéricos
DP=12.5
DF=DP !Di?etro do
Parafuso(DP)
LP=(hc/2+tPl) !Comprimento

!Porcas

C1=1.66*DP/2	!Diametro externo	!tbtemp,0
da porca		!TBDATA,,fyv,0.1,,,,
C2=sqrt(3)*C1/2	!Diam. interno da	
porca		!Coluna
CabP=DP	!Tamanho da	
porca		mptemp,,,,,,,,
fypor=650		mptemp,1,0
		MP,EX,2,E
!Viga		MP,PRXY,2,v
twF=4.75		!TB,BISO,2,1,2,
!Espessura Flange (twF)		!tbtemp,0
eV=1.5*df+2*twf		!TBDATA,1,fyc,0.1,,,,
!Enrijeecedor da Viga		
fyV=250	!Material	!Chapa
placa		mptemp,,,,,,,,
Lb=1000		mptemp,1,0
!Comprimento (Lb)		MP,EX,3,E
bV=85	!altura do	MP,PRXY,3,v
flange		!TB,BISO,3,
hV=250	!altura da	!tbtemp,0
alma		!TBDATA,1,fych,0.1,,,,
!df=16	!diametro do	
fu		!Porca
		mptemp,,,,,,,,
!Altura da coluna		mptemp,1,0
Linf=-500	!altura da coluna	MP,EX,4,E
abaixo da placa de topo		MP,PRXY,4,v
Lsup=hv+ev+2*twf+3.2*df+500		!TB,BISO,4,
!altura da coluna acima da placa de topo		!tbtemp,0
		!TBDATA,1,fypor,0.1,,,,
!Tipo de Elementos		!Parafuso
!ET,1,solid45		
!ET,2,solid186		!Dpar1=fypar/E !Material N°2: Parafusos
ET,3,SHELL181		(elástico multilinear)
!ET,4,solid185		!Spar1=fypar
ET,5,solid95		!Dpar2=esupar
!*		!Spar2=fupar
!Propriedades do a?		!Dpar3=esfpar
		!Spar3=fupar
!Viga		!Dpar4=esf2par
mptemp,,,,,,,,		!Spar4=fypar
mptemp,1,0		!Dpar5=1.2*esf2par
MP,EX,1,E	!Modulo de	!Spar5=tenfun
Elasticidade do A?		!Dpar6=10
MP,PRXY,1,v	!Coeficiente de	!Spar6=tenfun
poisson do A?		
!TB,BISO,1,1,2,		MP,EX,5,E
		MP,PRXY,5,v

!TB,KINH,5,1,6,	l,10,11
!TBPT,DEFI,Dpar1,Spar1	l,11,12
!TBPT,DEFI,Dpar2,Spar2	l,12,13
!TBPT,DEFI,Dpar3,Spar3	l,13,14
!TBPT,DEFI,Dpar4,Spar4	larc,14,15,9,1.5*twf
!TBPT,DEFI,Dpar5,Spar5	l,15,16
!TBPT,DEFI,Dpar6,Spar6	l,16,17
	l,17,18
!Constantes reais para espessura do perfil	larc,18,19,1,1.5*twf
	l,19,20
R,1,twf/1.5	l,20,21
R,2,tC/1.5	l,1,22
!Keypoints	!Criando as ?eas
k,1,twF,twF	lsel,s,loc,z,0
k,2,twF,eV	adrag,all,,,,,21
k,3,2*twf,twF+eV	ldele,21
k,4,1.6*df+1.5*twf-c1/2,twF+eV	!Placa de topo
k,5,1.6*df+1.5*twf+c1/2,twF+eV	k,200,0,0,0
k,6,bV,twF+eV	k,201,twf,0,0
k,7,bV+1.5*twf,2.5*twF+eV	k,202,2*twf,0,0
k,8,1.5*twf+bv,ev+1.6*df+2*twf-c2	k,203,bv,0,0
k,9,1.5*twf+bv,ev+1.6*df+2*twf	k,204,1.5*twf+bv,0,0
k,10,1.5*twf+bv,ev+1.6*df+2*twf+c2	k,206,2*twf+bv,twf
k,11,1.5*twf+bv,hv+twf-c2	k,207,2*twf+bv,ev
k,12,bV+1.5*twf,twf+hV	k,208,2*twf+bv,twf+ev
k,13,1.5*twf+bv,hv+twf+c2	k,209,2*twf+bv,twf*2.5+ev
k,14,bV+1.5*twf,eV+hV-0.5*twf	k,210,2*twf+bv, hV+twf
k,15,bV,hV+twf+ev	k,211,2*twf+bv,-0.5*twf+hv+ev
k,16,1.6*df+1.5*twf+c1/2,hV+twf+ev	k,212,2*twf+bv,hv+ev+twf
k,17,1.6*df+1.5*twf-c1/2,hV+twf+ev	k,213,2*twf+bv,hv+ev+2*twf+3.2*df
k,18,2*twF, hV+twf+ev	k,214, 1.5*twf+bv,hv+ev+2*twf +3.2*df
k,19,twf,eV+hV	k,215,bv,hv+ev+2*twf +3.2*df
k,20,twf,hv+twf+c2	k,216,2*twf,hv+ev+2*twf +3.2*df
k,21,twF,hV+twf	k,217,twf,hv+ev+2*twf +3.2*df
k,22,twf,twf,lb	k,218,0,hv+ev+2*twf +3.2*df
k,205,2*twf+bv,0,0	k,219,0,hv+ev+twf
!Linhas da Viga	k,220,0,hv+ev
l,1,2	k,221,0,hV+twf
larc,2,3,4,1.5*twf	k,222,0,twf*2+ev
l,3,4	k,223,0,twf+ev
l,4,5	k,224,0,ev
l,5,6	k,225,0,twf
larc,6,7,19,1.5*twf	
l,7,8	!Key Points auxiliares da placa de topo
l,8,9	para malha
l,9,10	

k,226,2*twF, twF
 k,227,bv, twF
 k,228,bv+1.5*twf, twF
 k,229,bv+1.5*twf, eV
 k,230,bv, eV
 k,231,bv+1.5*twf, twF+eV
 k,232,bv,2*twF+eV
 k,233,2*twF, 2*twF+eV
 k,234,twF, 2*twF+eV
 k,235,twF, twF+eV
 k,236,2*twF, hV+twf
 k,237,bv, hV+twf
 k,238,2*twF, eV+hV
 k,239,bv, eV+hV
 k,240,twF, hV+twf+ev
 k,241,bv+1.5*twf, hV+twf+ev
 k,242, 2*twF,eV
 k,251, twF , twF
 k,252, twF,eV
 k,253, 2*twF,twF+eV
 k,254, bV,twF+eV
 k,255,bV+1.5*twF,2.5*twF+eV
 k,256,bV+1.5*twf,twf+hV
 k,257,bV+1.5*twf,-0.5*twf+eV+hV
 k,258,bV,hV+twf+ev
 k,259,2*twF, hV+twf+ev
 k,260,twf,eV+hV
 k,261,twF,hV+twf

!Area dos parafusos e porcas

!porca linha 1

k,100,1.6*df+1.5*twf,hv+ev+2*twf+1.6*
 df
 k,101,1.6*df+1.5*twf+c1/2,hv+ev+2*twf
 +1.6*df+c2
 k,102,1.6*df+1.5*twf-
 c1/2,hv+ev+2*twf+1.6*df+c2
 k,103,1.6*df+1.5*twf-
 c1,hv+ev+2*twf+1.6*df
 k,104,1.6*df+1.5*twf-
 c1/2,hv+ev+2*twf+1.6*df-c2
 k,105,1.6*df+1.5*twf+c1/2,hv+ev+2*twf
 +1.6*df-c2
 k,106,1.6*df+1.5*twf+c1,hv+ev+2*twf+
 1.6*df

!furos

k,108,1.6*df+1.5*twf-DP/2,
 hv+ev+2*twf +1.6*df
 k,109,1.6*df+1.5*twf,hv+ev+2*twf
 +1.6*df +DP/2
 k,110,1.6*df+1.5*twf+DP/2,
 hv+ev+2*twf +1.6*df
 k,111,1.6*df+1.5*twf,hv+ev+2*twf
 +1.6*df -DP/2
 *Do,i,107,109
 larc,i+1,i+2,100,DP/2
 *enddo
 Larc,108,111,100,DP/2

!areas porcas

A,101,109,110,106
 A,101,102,109
 A,109,102,103,108
 A,103,108,111,104
 A,104,111,105
 A,111,105,106,110

!porca linha 2

k,112,1.6*df+1.5*twf,hv+twf
 k,113,1.6*df+1.5*twf+c1/2,hv+twf+c2
 k,114,1.6*df+1.5*twf-c1/2,hv+twf+c2
 k,115,1.6*df+1.5*twf-c1,hv+twf
 k,116,1.6*df+1.5*twf-c1/2,hv+twf-c2
 k,117,1.6*df+1.5*twf+c1/2,hv+twf-c2
 k,118,1.6*df+1.5*twf+c1,hv+twf

!furos

k,119,1.6*df+1.5*twf-DP/2,hv+twf
 k,120,1.6*df+1.5*twf,hv+twf+DP/2
 k,121,1.6*df+1.5*twf+DP/2, hv+twf
 k,122,1.6*df+1.5*twf,hv+twf-DP/2
 *Do,i,118,120
 larc,i+1,i+2,112,DP/2
 *enddo
 Larc,122,119,112,DP/2

!areas porcas

A,118,113,120,121
 A,113,114,120
 A,120,114,115,119
 A,115,116,122,119
 A,116,122,117
 A,122,117,118,121

!porca linha 3

k,123,1.6*df+1.5*twf, ev+1.6*df+2*twf
k,124,1.6*df+1.5*twf+c1/2,ev+1.6*df+2*
twf+c2
k,125,1.6*df+1.5*twf-
c1/2,ev+1.6*df+2*twf+c2
k,126,1.6*df+1.5*twf-
c1,ev+1.6*df+2*twf
k,127,1.6*df+1.5*twf-
c1/2,ev+1.6*df+2*twf-c2
k,128,1.6*df+1.5*twf+c1/2,ev+1.6*df+2*
twf-c2
k,129,1.6*df+1.5*twf+c1,ev+1.6*df+2*t
wf

!furos

k,123,1.6*df+1.5*twf,ev+1.6*df+2*twf,0
k,130,1.6*df+1.5*twf-DP/2,
ev+1.6*df+2*twf
k,131,1.6*df+1.5*twf,ev+1.6*df+2*twf
+DP/2
k,132,1.6*df+1.5*twf+DP/2,
ev+1.6*df+2*twf
k,133,1.6*df+1.5*twf,ev+1.6*df+2*twf -
DP/2
*Do,i,129,131
larc,i+1,i+2,123,DP/2
*enddo
Larc,133,130,123,DP/2

!area porcas

A,132,129,124,131
A,124,125,131
A,130,131,125,126
A,126,130,133,127
A,127,133,128
A,133,128,129,132

!kp auxiliar

k,134,1.6*df+1.5*twf+c1/2,hv+ev+2*twf
+3.2*df
k,135,1.6*df+1.5*twf+c1/2,hV+twf+ev
k,136,1.6*df+1.5*twf+c1/2,hV+ev
k,137,1.6*df+1.5*twf+c1/2,2*twf+eV
k,138,2*twf,hv+ev+2*twf+1.6*df+c2
k,139,2*twf,hv+ev+2*twf+1.6*df-c2
k,140,2*twf,hv+ev+2*twf+1.6*df
k,141,bv,hv+ev+2*twf+1.6*df+c2

k,142,bv,hv+ev+2*twf+1.6*df-c2
k,143,bv,hv+ev+2*twf+1.6*df
k,144,2*twf,hv+twf+c2
k,145,2*twf,hv+twf-c2
k,146,bv,hv+twf+c2
k,147,bv,hv+twf-c2
k,148,2*twf,ev+1.6*df+2*twf+c2
k,149,2*twf,ev+1.6*df+2*twf
k,150,2*twf,ev+1.6*df+2*twf-c2
k,151,bv,ev+1.6*df+2*twf+c2
k,152,bv,ev+1.6*df+2*twf
k,153,bv,ev+1.6*df+2*twf-c2

k,154,1.6*df+1.5*twf+c1/2,hv+ev+2*twf
+3.2*df

k,155,1.6*df+1.5*twf-c1/2,hv+ev+2*twf
+3.2*df
k,156,1.6*df+1.5*twf-c1/2,hV+twf+ev
k,157,1.6*df+1.5*twf-c1/2,hV+ev
k,158,2*twf,hv+ev+2*twf+1.6*df+c2
k,159,2*twf,hv+ev+2*twf+1.6*df-c2
k,160,2*twf,hv+ev+2*twf+1.6*df
k,161,0,hv+ev+2*twf+1.6*df+c2
k,162,0,hv+ev+2*twf+1.6*df-c2
k,163,0,hv+ev+2*twf+1.6*df
k,164,
1.5*twf+bv,hv+ev+2*twf+1.6*df+c2
k,165, 1.5*twf+bv,hv+ev+2*twf+1.6*df-
c2
k,166, 1.5*twf+bv,hv+ev+2*twf+1.6*df
k,167,
2*twf+bv,hv+ev+2*twf+1.6*df+c2
k,168, 2*twf+bv ,hv+ev+2*twf+1.6*df-
c2
k,169, 2*twf+bv ,hv+ev+2*twf+1.6*df
k,170,0,hv+twf+c2
k,171,0,hv+twf-c2
k,172,2*twf,hv+twf+c2
k,173,2*twf,hv+twf-c2
k,174,1.5*twf+bv,hv+twf+c2
k,175, 1.5*twf+bv,hv+twf-c2
k,176, 2*twf+bv,hv+twf+c2
k,177, 2*twf+bv,hv+twf-c2
k,178,0,ev+1.6*df+2*twf+c2
k,179,0,ev+1.6*df+2*twf
k,180,0,ev+1.6*df+2*twf-c2
k,181,2*twf,ev+1.6*df+2*twf+c2
k,182,2*twf,ev+1.6*df+2*twf

k,183,twf,ev+1.6*df+2*twf-c2
k,184, 1.5*twf+bv,ev+1.6*df+2*twf+c2
k,185, 1.5*twf+bv,ev+1.6*df+2*twf
k,186, 1.5*twf+bv,ev+1.6*df+2*twf-c2
k,187, 2*twf+bv,ev+1.6*df+2*twf+c2
k,188,2*twf+bv,ev+1.6*df+2*twf
k,189, 2*twf+bv,ev+1.6*df+2*twf-c2
k,190, 1.6*df+1.5*twf-c1/2,twf*2+ev
k,191, 1.6*df+1.5*twf-c1/2,twf+ev
k,192,1.6*df+1.5*twf+c1/2, twf+ev

k,193, 1.6*df+1.5*twf-c1/2,ev
k,194, 1.6*df+1.5*twf+c1/2,ev
k,195, 1.6*df+1.5*twf-c1/2,twf
k,196, 1.6*df+1.5*twf+c1/2,twf
k,197, 1.6*df+1.5*twf-c1/2,0
k,198, 1.6*df+1.5*twf+c1/2,0

!Forma?o das ?eas da Placa de topo (A11 a A50)

a,218,161,158,217
a,217,158,138,216
a,216,138,102,155
a,102,101,154,155
a,154,101,141,215
a,215,141,164,214
a,214,164,167,213
a,161,163,160,158
a,158,160,140,138
a,163,162,159,160
a,159,139,140,160
a,102,138,140,103
a,140,139,104,103
a,105,106,143,142
a,101,106,143,141
a,141,143,166,164
a,164,166,169,167
a,162,219,240,159
a,159,240,259,139
a,142,165,166,143
a,165,168,169,166
a,142,258,241,165
a,241,212,168,165
a,220,170,172,260
a,260,172,144,238
a,221,261,172,170
a,261,236,144,172
a,221,171,173,261

a,261,173,145,236
a,139,259,156,104
a,156,135,105,104
a,135,258,142,105
a,240,219,220,260
a,259,240,260,238
a,259,238,157,156
a,156,157,136,135
a,135,136,239,258
a,258,239,257,241
a,212,241,257,211
a,238,144,114,157
a,157,114,113,136
a,113,146,239,136
a,144,236,115,114
a,236,145,116,115
a,113,146,237,118
a,118,117,147,237
a,239,146,174,257
a,174,176,211,257
a,146,237,256,174
a,256,210,176,174
a,147,175,256,237
a,175,177,210,256
a,171,178,181,173
a,173,181,148,145
a,148,125,116,145
a,125,124,117,116
a,124,151,147,117
a,151,184,175,147
a,184,187,177,175
a,178,179,182,181
a,182,149,148,181
a,179,180,183,182
a,183,150,149,182
a,125,148,149,126
a,149,150,127,126
a,150,233,190,127
a,124,129,152,151
a,129,128,153,152
a,151,152,185,184
a,185,188,187,184
a,152,153,186,185
a,185,186,189,188
a,222,234,183,180
a,234,233,150,183
a,127,190,137,128
a,253,191,190,233
a,127,190,137,128

a,190,191,192,137
a,128,137,232,153
a,137,192,254,232
a,153,232,255,186
a,255,209,189,186
a,234,222,223,235
a,233,234,235,253
a,255,232,254,231
a,209,255,231,208
a,235,223,224,252
a,253,235,252,242
a,231,254,230,229
a,208,231,229,207
a,252,224,225,251
a,242,252,251,226
a,229,230,227,228
a,207,229,228,206
a,251,225,200,201
a,226,251,201,202
a,228,227,203,204
a,206,228,204,205
a,253,242,193,191
a,193,194,192,191
a,242,226,195,193
a,226,202,197,195
a,195,197,198,196
a,193,195,196,194
a,192,194,230,254
a,194,196,227,230
a,196,198,203,227

!Coluna

k,300,0,0,-tpl-tC/2
k,301,twf,0,-tpl-tC/2
k,302,2*twf,0,-tpl-tC/2
k,303,bv,0,-tpl-tC/2
k,315,bv,hv+ev+2*twf+3.2*df,-tpl-tC/2
k,316,2*twf,hv+ev+2*twf+3.2*df,-tpl-tC/2
k,317,twf,hv+ev+2*twf+3.2*df,-tpl-tC/2
k,318,0,hv+ev+2*twf+3.2*df,-tpl-tC/2
k,319,0,hv+ev+twf,-tpl-tC/2
k,320,0,hv+ev,-tpl-tC/2
k,321,0,hV+twf,-tpl-tC/2
k,322,0,twf*2+ev,-tpl-tC/2
k,323,0,twf+ev,-tpl-tC/2
k,324,0,ev,-tpl-tC/2
k,325,0,twf,-tpl-tC/2

!Key Points auxiliares da placa de topo para malha

k,326,2*twf, twf,-tpl-tC/2
k,327,bv, twf,-tpl-tC/2
k,330,bv, eV,-tpl-tC/2
k,332,bv,2*twf+eV,-tpl-tC/2
k,333,2*twf, 2*twf+ev,-tpl-tC/2
k,334,twf, 2*twf+eV,-tpl-tC/2
k,335,twf, twf+eV,-tpl-tC/2
k,336,2*twf, hV+twf,-tpl-tC/2
k,337,bv, hV+twf,-tpl-tC/2
k,338,2*twf, eV+hV,-tpl-tC/2
k,339,bv, eV+hV,-tpl-tC/2
k,340,twf, hV+twf+ev,-tpl-tC/2
k,342, 2*twf,eV,-tpl-tC/2

k,351, twf , twf,-tpl-tC/2
k,352, twf,eV,-tpl-tC/2
k,353, 2*twf,twf+eV,-tpl-tC/2
k,354, bV,twf+eV,-tpl-tC/2
k,355,bV+ twf,2*twf+eV,-tpl-tC/2
k,358,bV,hV+twf+ev,-tpl-tC/2
k,359,2*twf, hV+twf+ev,-tpl-tC/2
k,360,twf,eV+hV,-tpl-tC/2
k,361,twf,hV+twf,-tpl-tC/2

!Area dos parafusos e porcas

!porca linha 1

k,1100,1.6*df+1.5*twf,hv+ev+2*twf+1.6*df,-tpl-tC/2
k,1101,1.6*df+1.5*twf+c1/2,hv+ev+2*twf+1.6*df+c2,-tpl-tC/2
k,1102,1.6*df+1.5*twf-c1/2,hv+ev+2*twf+1.6*df+c2,-tpl-tC/2
k,1103,1.6*df+1.5*twf-c1,hv+ev+2*twf+1.6*df,-tpl-tC/2
k,1104,1.6*df+1.5*twf-c1/2,hv+ev+2*twf+1.6*df-c2,-tpl-tC/2
k,1105,1.6*df+1.5*twf+c1/2,hv+ev+2*twf+1.6*df-c2,-tpl-tC/2
k,1106,1.6*df+1.5*twf+c1,hv+ev+2*twf+1.6*df,-tpl-tC/2

!furos

k,1108,1.6*df+1.5*twf-DP/2,
hv+ev+2*twf+1.6*df,-tpl-tC/2

k,1109,1.6*df+1.5*twf,hv+ev+2*twf
 +1.6*df +DP/2,-tpl-tC/2
 k,1110,1.6*df+1.5*twf+DP/2,
 hv+ev+2*twf +1.6*df,-tpl-tC/2
 k,1111,1.6*df+1.5*twf,hv+ev+2*twf
 +1.6*df -DP/2,-tpl-tC/2
 *Do,i,1107,1109
 larc,i+1,i+2,1100,DP/2
 *enddo
 Larc,1108,1111,1100,DP/2

 !areas porcas
 A,1101,1109,1110,1106
 A,1101,1102,1109
 A,1109,1102,1103,1108
 A,1108,1103,1104,1111
 A,1104,1105,1111
 A,1111,1105,1106,1110

 !porca linha 2
 k,1112,1.6*df+1.5*twf,hv+twf,-tpl-tC/2
 k,1113,1.6*df+1.5*twf+c1/2,hv+twf+c2,-
 tpl-tC/2
 k,1114,1.6*df+1.5*twf-c1/2,hv+twf+c2,-
 tpl-tC/2
 k,1115,1.6*df+1.5*twf-c1,hv+twf,-tpl-
 tC/2
 k,1116,1.6*df+1.5*twf-c1/2,hv+twf-c2,-
 tpl-tC/2
 k,1117,1.6*df+1.5*twf+c1/2,hv+twf-c2,-
 tpl-tC/2
 k,1118,1.6*df+1.5*twf+c1,hv+twf,-tpl-
 tC/2

 !furos
 k,1119,1.6*df+1.5*twf-DP/2,hv+twf,-tpl-
 tC/2
 k,1120,1.6*df+1.5*twf,hv+twf+DP/2,-
 tpl-tC/2
 k,1121,1.6*df+1.5*twf+DP/2, hv+twf,-
 tpl-tC/2
 k,1122,1.6*df+1.5*twf,hv+twf-DP/2,-tpl-
 tC/2
 *Do,i,1118,1120
 larc,i+1,i+2,1112,DP/2
 *enddo
 Larc,1122,1119,1112,DP/2

 !areas porcas

A,1118,1113,1120,1121
 A,1113,1114,1120
 A,1120,1114,1115,1119
 A,1115,1116,1122,1119
 A,1116,1117,1122
 A,1122,1117,1118,1121

 !porca linha 3
 k,1123,1.6*df+1.5*twf,
 ev+1.6*df+2*twf,-tpl-tC/2
 k,1124,1.6*df+1.5*twf+c1/2,ev+1.6*df+2
 *twf+c2,-tpl-tC/2
 k,1125,1.6*df+1.5*twf-
 c1/2,ev+1.6*df+2*twf+c2,-tpl-tC/2
 k,1126,1.6*df+1.5*twf-
 c1,ev+1.6*df+2*twf,-tpl-tC/2
 k,1127,1.6*df+1.5*twf-
 c1/2,ev+1.6*df+2*twf-c2,-tpl-tC/2
 k,1128,1.6*df+1.5*twf+c1/2,ev+1.6*df+2
 *twf-c2,-tpl-tC/2
 k,1129,1.6*df+1.5*twf+c1,ev+1.6*df+2*t
 wf,-tpl-tC/2

 !furos
 k,1123,1.6*df+1.5*twf,ev+1.6*df+2*twf,
 -tpl-tC/2
 k,1130,1.6*df+1.5*twf-DP/2,
 ev+1.6*df+2*twf,-tpl-tC/2
 k,1131,1.6*df+1.5*twf,ev+1.6*df+2*twf
 +DP/2,-tpl-tC/2
 k,1132,1.6*df+1.5*twf+DP/2,
 ev+1.6*df+2*twf,-tpl-tC/2
 k,1133,1.6*df+1.5*twf,ev+1.6*df+2*twf
 -DP/2,-tpl-tC/2
 *Do,i,1129,1131
 larc,i+1,i+2,1123,DP/2
 *enddo
 Larc,1133,1130,1123,DP/2

 !area porcas
 A,1132,1129,1124,1131
 A,1124,1125,1131
 A,1130,1131,1125,1126
 A,1126,1127,1133,1130
 A,1127,1128,1133
 A,1133,1128,1129,1132

 !kp auxiliar

k,1134,1.6*df+1.5*twf+c1/2,hv+ev+2*twf+3.2*df,-tpl-tC/2
 k,1135,1.6*df+1.5*twf+c1/2,hV+twf+ev,-tpl-tC/2
 k,1136,1.6*df+1.5*twf+c1/2,hV+ev,-tpl-tC/2
 k,1137,1.6*df+1.5*twf+c1/2,2*twF+eV,-tpl-tC/2
 k,1138,2*twf,hv+ev+2*twf+1.6*df+c2,-tpl-tC/2
 k,1139,2*twf,hv+ev+2*twf+1.6*df-c2,-tpl-tC/2
 k,1140,2*twf,hv+ev+2*twf+1.6*df,-tpl-tC/2
 k,1141,bv,hv+ev+2*twf+1.6*df+c2,-tpl-tC/2
 k,1142,bv,hv+ev+2*twf+1.6*df-c2,-tpl-tC/2
 k,1143,bv,hv+ev+2*twf+1.6*df,-tpl-tC/2
 k,1144,2*twf,hv+twf+c2,-tpl-tC/2
 k,1145,2*twf,hv+twf-c2,-tpl-tC/2
 k,1146,bv,hv+twf+c2,-tpl-tC/2
 k,1147,bv,hv+twf-c2,-tpl-tC/2
 k,1148,2*twf,ev+1.6*df+2*twf+c2,-tpl-tC/2
 k,1149,2*twf,ev+1.6*df+2*twf,-tpl-tC/2
 k,1150,2*twf,ev+1.6*df+2*twf-c2,-tpl-tC/2
 k,1151,bv,ev+1.6*df+2*twf+c2,-tpl-tC/2
 k,1152,bv,ev+1.6*df+2*twf,-tpl-tC/2
 k,1153,bv,ev+1.6*df+2*twf-c2,-tpl-tC/2

 k,1154,1.6*df+1.5*twf+c1/2,hv+ev+2*twf+3.2*df,-tpl-tC/2
 k,1155,1.6*df+1.5*twf-c1/2,hv+ev+2*twf+3.2*df,-tpl-tC/2
 k,1156,1.6*df+1.5*twf-c1/2,hV+twf+ev,-tpl-tC/2
 k,1157,1.6*df+1.5*twf-c1/2,hV+ev,-tpl-tC/2
 k,1158,twf,hv+ev+2*twf+1.6*df+c2,-tpl-tC/2
 k,1159,twf,hv+ev+2*twf+1.6*df-c2,-tpl-tC/2
 k,1160,twf,hv+ev+2*twf+1.6*df,-tpl-tC/2
 k,1161,0,hv+ev+2*twf+1.6*df+c2,-tpl-tC/2

k,1162,0,hv+ev+2*twf+1.6*df-c2,-tpl-tC/2
 k,1163,0,hv+ev+2*twf+1.6*df,-tpl-tC/2
 k,1170,0,hv+twf+c2,-tpl-tC/2
 k,1171,0,hv+twf-c2,-tpl-tC/2
 k,1172,twf,hv+twf+c2,-tpl-tC/2
 k,1173,twf,hv+twf-c2,-tpl-tC/2
 k,1178,0,ev+1.6*df+2*twf+c2,-tpl-tC/2
 k,1179,0,ev+1.6*df+2*twf,-tpl-tC/2
 k,1180,0,ev+1.6*df+2*twf-c2,-tpl-tC/2
 k,1181,twf,ev+1.6*df+2*twf+c2,-tpl-tC/2
 k,1182,twf,ev+1.6*df+2*twf,-tpl-tC/2
 k,1183,twf,ev+1.6*df+2*twf-c2,-tpl-tC/2
 k,1190,1.6*df+1.5*twf-c1/2,twf*2+ev,-tpl-tC/2
 k,1191,1.6*df+1.5*twf-c1/2,twf+ev,-tpl-tC/2
 k,1192,1.6*df+1.5*twf+c1/2, twf+ev,-tpl-tC/2
 k,1193,1.6*df+1.5*twf-c1/2,ev,-tpl-tC/2
 k,1194,1.6*df+1.5*twf+c1/2,ev,-tpl-tC/2
 k,1195,1.6*df+1.5*twf-c1/2,twf,-tpl-tC/2
 k,1196,1.6*df+1.5*twf+c1/2,twf,-tpl-tC/2
 k,1197,1.6*df+1.5*twf-c1/2,0,-tpl-tC/2
 k,1198,1.6*df+1.5*twf+c1/2,0,-tpl-tC/2

!Forma?o das ?eas da Placa de topo (A11 a A50)

a,318,1161,1158,317
 a,317,1158,1138,316
 a,316,1138,1102,1155
 a,1102,1101,1154,1155
 a,1154,1101,1141,315
 a,1161,1163,1160,1158
 a,1158,1160,1140,1138
 a,1163,1162,1159,1160
 a,1159,1139,1140,1160
 a,1102,1138,1140,1103

 a,1140,1139,1104,1103
 a,1106,1105,1142,1143
 a,1101,1106,1143,1141
 a,1162,319,340,1159
 a,1159,340,359,1139
 a,320,1170,1172,360
 a,360,1172,1144,338

a,321,361,1172,1170
a,361,336,1144,1172
a,321,1171,1173,361

a,361,1173,1145,336
a,1139,359,1156,1104
a,1156,1135,1105,1104
a,1135,358,1142,1105
a,340,319,320,360
a,359,340,360,338
a,359,338,1157,1156
a,1156,1157,1136,1135
a,1135,1136,339,358
a,338,1144,1114,1157

a,1157,1114,1113,1136
a,1113,1146,339,1136
a,1144,336,1115,1114
a,336,1145,1116,1115
a,1113,1118,337,1146
a,1118,1117,1147,337
a,1171,1178,1181,1173
a,1173,1181,1148,1145
a,1148,1125,1116,1145
a,1125,1124,1117,1116

a,1124,1151,1147,1117
a,1178,1179,1182,1181
a,1182,1149,1148,1181
a,1179,1180,1183,1182
a,1183,1150,1149,1182
a,1125,1148,1149,1126
a,1149,1150,1127,1126
a,1150,333,1190,1127
a,1124,1129,1152,1151
a,1129,1128,1153,1152

a,322,334,1183,1180
a,334,333,1150,1183
a,1127,1190,1137,1128
a,353,1191,1190,333
a,1127,1190,1137,1128
a,1190,1191,1192,1137
a,1128,1137,332,1153
a,1137,1192,354,332
a,334,322,323,335
a,333,334,335,353

a,335,323,324,352

a,353,335,352,342
a,352,324,325,351
a,342,352,351,326
a,351,325,300,301
a,326,351,301,302
a,353,342,1193,1191
a,1193,1194,1192,1191
a,342,326,1195,1193
a,1193,1195,1196,1194

a,1192,1194,330,354
a,1194,1196,327,330
a,302,1197,1195,326
a,1195,1197,1198,1196
a,1196,1198,303,327

!continua?o da coluna

k,501,2*twf+bv-tC/2,0,-(tPl+eC)-tC/2
k,502,2*twf+bv-tC/2,0,-(tPl+1.5*tC)-tC/2
k,503,-(1.5*tC),0,-(tPl+1.5*tC)-tC/2
k,504,-(1.5*tC),0,-(hc/2+tPl)-tC/2
larc,502,303,504,1.5*tC
l,501,502
larc,503,300,501,1.5*tC
l,503,504

adrag,547,548,,,,,544
adrag,545,546,,,,,544

adrag,549,552,,,,,538
adrag,554,557,,,,,538

adrag,559,562,,,,,536
adrag,564,567,,,,,536

adrag,569,572,,,,,507
adrag,574,577,,,,,507

adrag,579,582,,,,,505
adrag,584,587,,,,,505

adrag,589,592,,,,,492
adrag,594,597,,,,,492

adrag,599,602,,,,,490
adrag,604,607,,,,,490

adrag,609,612,,,,,473

adrag,614,617,,,,,473
 adrag,619,622,,,,,463
 adrag,624,627,,,,,463
 adrag,629,632,,,,,461
 adrag,634,637,,,,,461
 adrag,639,642,,,,,457
 adrag,644,647,,,,,457
 adrag,649,652,,,,,452
 adrag,654,657,,,,,452
 adrag,659,662,,,,,443
 adrag,664,667,,,,,443
 adrag,669,672,,,,,413
 adrag,674,677,,,,,413
 adrag,679,682,,,,,415
 adrag,684,687,,,,,415
 adrag,689,692,,,,,398
 adrag,694,697,,,,,398
 !Restante da Coluna
 k,900,2*twf+bv-tC/2,Linf,-(tPl+eC)-tC/2
 k,901,2*twf+bv-tC/2,Lsup,-(tPl+eC)-tC/2
 1,901,291
 1,900,501
 allsel,all
 lsel,s,loc,y,0
 lsel,u,loc,z,0,-tpl-0.1
 lplot
 adrag,all,,,,,710
 allsel,all
 lsel,s,loc,y,hv+ev+2*twf +3.2*df
 lsel,u,loc,z,0,-tpl-0.1
 lplot
 ksll,s,1
 nummrg,kp,,,low
 lsel,s,loc,y,hv+ev+2*twf +3.2*df
 lsel,u,loc,z,0,-tpl-0.1
 lplot
 adrag,all,,,,,709
 allsel,all
 asel,s,loc,z,-tpl-0.1,-hc
 lsla,s,1
 lplot
 lovlap,all
 ksll,s,1
 kplot
 nummrg,kp,0,,,low
 lsel,s,loc,z,0
 lplot
 lovlap,all
 !volume da placa de topo
 asel,s,loc,z,0
 aplot
 Vext,all,,,0,0,-tpl
 !Area dos parafusos e porcas
 !porca linha 1
 k,700,1.6*df+1.5*twf,hv+ev+2*twf+1.6*df
 k,701,1.6*df+1.5*twf+c1/2,hv+ev+2*twf+1.6*df+c2
 k,702,1.6*df+1.5*twf-c1/2,hv+ev+2*twf+1.6*df+c2
 k,703,1.6*df+1.5*twf-c1,hv+ev+2*twf+1.6*df
 k,704,1.6*df+1.5*twf-c1/2,hv+ev+2*twf+1.6*df-c2
 k,705,1.6*df+1.5*twf+c1/2,hv+ev+2*twf+1.6*df-c2
 k,706,1.6*df+1.5*twf+c1,hv+ev+2*twf+1.6*df
 !furos
 k,708,1.6*df+1.5*twf-DP/2,hv+ev+2*twf +1.6*df
 k,709,1.6*df+1.5*twf,hv+ev+2*twf +1.6*df +DP/2
 k,710,1.6*df+1.5*twf+DP/2,hv+ev+2*twf +1.6*df
 k,711,1.6*df+1.5*twf,hv+ev+2*twf +1.6*df -DP/2
 *Do,i,707,709
 larc,i+1,i+2,700,DP/2

*enddo
Larc,708,711,700,DP/2
a,708,709,710,711
!areas porcas
A,701,709,710,706
A,701,702,709
A,709,702,703,708
A,703,708,711,704
A,704,711,705
A,711,705,706,710

!porca linha 2

k,712,1.6*df+1.5*twf,hv+twf
k,713,1.6*df+1.5*twf+c1/2,hv+twf+c2
k,714,1.6*df+1.5*twf-c1/2,hv+twf+c2
k,715,1.6*df+1.5*twf-c1,hv+twf
k,716,1.6*df+1.5*twf-c1/2,hv+twf-c2
k,717,1.6*df+1.5*twf+c1/2,hv+twf-c2
k,718,1.6*df+1.5*twf+c1,hv+twf

!furos
k,719,1.6*df+1.5*twf-DP/2,hv+twf
k,720,1.6*df+1.5*twf,hv+twf+DP/2
k,721,1.6*df+1.5*twf+DP/2, hv+twf
k,722,1.6*df+1.5*twf,hv+twf-DP/2
*Do,i,718,720
larc,i+1,i+2,712,DP/2
*enddo
Larc,722,719,712,DP/2
a,719,720,721,722
!areas porcas
A,718,713,720,721
A,713,714,720
A,720,714,715,719
A,715,716,722,719
A,716,722,717
A,722,717,718,721

!porca linha 3
k,723,1.6*df+1.5*twf, ev+1.6*df+2*twf
k,724,1.6*df+1.5*twf+c1/2,ev+1.6*df+2*
twf+c2
k,725,1.6*df+1.5*twf-
c1/2,ev+1.6*df+2*twf+c2
k,726,1.6*df+1.5*twf-
c1,ev+1.6*df+2*twf
k,727,1.6*df+1.5*twf-
c1/2,ev+1.6*df+2*twf-c2

k,728,1.6*df+1.5*twf+c1/2,ev+1.6*df+2*
twf-c2
k,729,1.6*df+1.5*twf+c1,ev+1.6*df+2*t
wf

!furos
k,723,1.6*df+1.5*twf,ev+1.6*df+2*twf,0
k,730,1.6*df+1.5*twf-DP/2,
ev+1.6*df+2*twf
k,731,1.6*df+1.5*twf,ev+1.6*df+2*twf
+DP/2
k,732,1.6*df+1.5*twf+DP/2,
ev+1.6*df+2*twf
k,733,1.6*df+1.5*twf,ev+1.6*df+2*twf -
DP/2
*Do,i,729,731
larc,i+1,i+2,723,DP/2
*enddo
Larc,733,730,723,DP/2
a,730,731,732,733

!area porcas
A,732,729,724,731
A,724,725,731
A,730,731,725,726
A,726,730,733,727
A,727,733,728
A,733,728,729,732

!volume das porcas
*Do,i,717,737
Vext,i,,,0,0,CabP
*enddo

!parafuso
Vext,717,,,0,0,-tPl
Vext,724,,,0,0,-tPl
Vext,731,,,0,0,-tPl

Vext,837,,,0,0,-(hc/2)-tC/2
Vext,842,,,0,0,-(hc/2)-tC/2
Vext,847,,,0,0,-(hc/2)-tC/2

!parafuso (para)
allsel,all
vsel,s,loc,z,-0.1-Tpl,-(hc/2+tPl)
vsel,a,,,146,148
cm,para,volume
ASLV,S,1

```

APLOT
CM,PARA1,AREA
cmsel,s,para
cmplot

!Coluna (col)
allsel,all
asel,s,loc,z,-tpl-0.1,-hc
CMSEL,U,PARA1
aplot
cm,col,area
allsel,all
cmsel,s,col
cmplot

!porca (por)
allsel,all
vsel,s,loc,z,-0.1,CabP+0.1
vplot
cm,por,volume
cmsel,s,por
cmplot

!Chapa (cha)
allsel,all
vsel,s,loc,z,0,-tpl
vsel,u,,,146,148
vplot
cm,cha,volume

!viga
allsel,all
Asel,s,loc,z,DP+0.1,lb-0.1
cm,viga,area

allsel,all
aplot

!Espelha o modelo

!VIGA
wpave,-( 1.5*tC),0,-(hc/2+tpl)-tC/2
csys,4
cmsel,s,viga
arSYM,Z,all, , , ,0,0
cm,viga,area
csys,0

wpave,2*twf+bv,hv+ev+2*twf+3.2*df
csys,4
cmsel,s,viga
ARSYM,x,viga, , , ,0,0
cm,viga,area
csys,0

!COLUNA
wpave,-( 1.5*tC),0,-(hc/2+tpl)-tC/2
csys,4
cmsel,s,col
ARSYM,Z,all, , , ,0,0
cm,col,area
csys,0
wpave,2*twf+bv,hv+ev+2*twf+3.2*df
csys,4
cmsel,s,col
ARSYM,x,all, , , ,0,0
cm,col,area
csys,0

!CHAPA
wpave,-( 1.5*tC),0,-(hc/2+tpl)-tC/2
csys,4
cmsel,s,cha
vSYM,Z,all, , , ,0,0
cm,cha,volume
csys,0
wpave,2*twf+bv,hv+ev+2*twf+3.2*df
csys,4
cmsel,s,cha
vSYM,x,all, , , ,0,0
cm,cha,volume
csys,0

!PARAFUSO
wpave,-( 1.5*tC),0,-(hc/2+tpl)-tC/2
csys,4
cmsel,s,para
vSYM,Z,all, , , ,0,0
cm,para,volume
csys,0
wpave,2*twf+bv,hv+ev+2*twf+3.2*df
csys,4
cmsel,s,para
vSYM,x,all, , , ,0,0
cm,para,volume
csys,0

```

```

!PORCA
wpave,-( 1.5*tC),0,-(hc/2+tPl)-tC/2
csys,4
cmsel,s,por
vSYM,Z,all, , , ,0,0
cm,por,volume
csys,0
wpave,2*twf+bv,hv+ev+2*twf+3.2*df
csys,4
cmsel,s,por
vSYM,x,all, , , ,0,0
cm,por,volume
csys,0

```

**!SOLDA ENTRE OS PERFIS DA VIGA
E DA COLUNA**

```

1,294,1200
1,932,1402
adrag,5640,,,,,715
adrag,5641,,,,,715
adrag,5642,,,,,544
adrag,5645,,,,,544
adrag,5648,,,,,538
adrag,5651,,,,,538
adrag,5654,,,,,536
adrag,5657,,,,,536
adrag,5660,,,,,507
adrag,5663,,,,,507
adrag,5666,,,,,505
adrag,5669,,,,,505
adrag,5672,,,,,492
adrag,5675,,,,,492
adrag,5678,,,,,490
adrag,5681,,,,,490
adrag,5684,,,,,473
adrag,5687,,,,,473
adrag,5690,,,,,463
adrag,5693,,,,,463
adrag,5696,,,,,461
adrag,5699,,,,,461
adrag,5702,,,,,457
adrag,5705,,,,,457
adrag,5708,,,,,452
adrag,5711,,,,,452
adrag,5714,,,,,443
adrag,5717,,,,,443
adrag,5720,,,,,413
adrag,5723,,,,,413

```

```

adrag,5726,,,,,415
adrag,5729,,,,,415
adrag,5732,,,,,398
adrag,5735,,,,,398
adrag,5738,,,,,744
adrag,5741,,,,,744
FLST,5,36,5,ORDE,2
FITEM,5,3474
FITEM,5,-3509
ASEL,R, , ,P51X
cm,solda1,area

```

```

!Solda da viga
1,15,657
1,6,639
adrag,5750,,,,,50
adrag,5751,,,,,50
1,615,699
1,597,681
adrag,5758,,,,,1484
adrag,5759,,,,,1484
asel,s,,,3510,3513
cm,solda2,area

```

```

cmsel,all
cmplot

```

```

!vIGA
cmsel,s,viga
cmsel,a,solda2
cmplot
lsla,s,1
ksll,s,1
kplot
NUMMRG,kp

```

```

!COLUNA
cmsel,s,COL
cmsel,a,solda1
cmplot
lsla,s,1
ksll,s,1
kplot
NUMMRG,kp

```

```

!PORCA
cmsel,s,POR
cmplot
aslv,s,1

```

lsla,s,1
ksll,s,1
kplot
NUMMRG,kp

!PARAFUSO
cmsel,s,PARA
cmplot
aslv,s,1
lsla,s,1
ksll,s,1
kplot
NUMMRG,kp

!CHAPA
cmsel,s,CHA
cmplot
aslv,s,1
lsla,s,1
ksll,s,1
kplot
NUMMRG,kp

cmsel,s,para
cmsel,a,por
aslv,s,1
lsla,s,1
ksll,s,1
kplot
NUMMRG,kp

n=7

!MALHA NA VIGA
allsel,all
cmsel,s,viga
aplot
aesize,all,N
MSHKEY,1 ! Tipo da malha: Mapeada
MAT,1 ! Material da aba
TYPE,3 ! Tipo do elemento da aba
REAL,1 ! Constante real do elemento da
aba
MSHAPE,0,2D ! Malha realizada com
elemento 2D
AMESH,ALL ! Gerando a malha

!MALHA SOLDADA DA VIGA
allsel,all

cmsel,s,solda2
aplot
aesize,all,N
MSHKEY,1 ! Tipo da malha: Mapeada
MAT,1 ! Material da aba
TYPE,3 ! Tipo do elemento da aba
REAL,1 ! Constante real do elemento da
aba
MSHAPE,0,2D ! Malha realizada com
elemento 2D
AMESH,ALL ! Gerando a malha
ASEL,ALL

!MALHA PARAFUSOS
allsel,all
cmsel,s,para
aslv,s,1
aesize,all,N
lsla,s,1
lplot
lsel,r,loc,z,0
lesize,all,,2
cmsel,s,para
aslv,s,1
lsla,s,1
lplot
lsel,r,loc,z,-(hc+2*tp1+tc)
lesize,all,,2
cmsel,s,para
VPLOT
MSHKEY,1 !Ti'po de malha Mapeada
MAT,5 !Material da aba
TYPE,5 !Tipo de elemento da barra
MSHAPE,0,3D !Malha com elemento
3D O NUMERO 0 INDICA ELEMENTO
TETRAEDRICO se =1 TRIANGULAR
VMESH,ALL !Gera a malha
VSEL,ALL !Comando de seleçã

!MALHA DAS PORCAS
cmsel,s,por
aslv,s,1
aesize,all,n
MSHKEY,1 !Ti'po de malha Mapeada
MAT,4 !Material da aba
TYPE,5 !Tipo de elemento da barra
MSHAPE,0,3D !Malha com elemento
3D
VMESH,ALL !Gera a malha

```

!Malha da placa de topo
allsel,all
Cmsel,s,cha
cmplot
aslv,s,1
lsla,s,1
lplot
lsel,s,loc,z,-0.1,-tpl+0.1
lsel,a,loc,z,-(hc+tpl+tc+0.1) ,-
(hc+2*tpl+tc-0.1)
lplot
lesize,all,,3
allsel,all
cmsel,s,cha
cmplot
AESIZE,ALL,n
MSHKEY,1 !Ti'po de malha Mapeada
MAT,3 !Material da placa
TYPE,5 !Tipo de elemento da barra
MSHAPE,0,3D !Malha com elemento
3D O NUMERO 1 INDICA ELEMENTO
TETRAEDRICO OU TRIANGULAR
VMESH,ALL !Gera a malha

!MALHA COLUNA
cmsel,s,col
aPLOT
aesize,all,n
MSHKEY,1 ! Tipo da malha: Mapeada
MAT,2 ! Material da aba
TYPE,3 ! Tipo do elemento da coluna
REAL,1 ! Constante real do elemento da
aba
MSHAPE,0,2D ! Malha realizada com
elemento 2D
AMESH,ALL !Gerando a malha

allsel,all
cmsel,s,solda1
aplot
aesize,all,N
MSHKEY,1 ! Tipo da malha: Mapeada
MAT,1 ! Material da aba
TYPE,3 ! Tipo do elemento da aba
REAL,1 ! Constante real do elemento da
aba
MSHAPE,0,2D ! Malha realizada com
elemento 2D

AMESH,ALL ! Gerando a malha
ASEL,ALL

/eshape,1.0
eplot

!Porca

cmsel,s,por
cmplot
aslv,s,1
aplot
asel,r,loc,z,-(hc+2*tpl+tc)
cm,por1,area
cmsel,s,por
aslv,s,1
aplot
asel,r,loc,z,0
cm,por2,area
cmsel,s,por2
cmplot
cmsel,a,por1
cmplot
cm,por1,area
cmsel,s,por1
cmplot
aplot
FLST,5,12,5,ORDE,12
FITEM,5,717
FITEM,5,724
FITEM,5,731
FITEM,5,3114
FITEM,5,3154
FITEM,5,3194
FITEM,5,3234
FITEM,5,3274
FITEM,5,3314
FITEM,5,3354
FITEM,5,3394
FITEM,5,3434
ASEL,u, ,P51X
aplot
cm,por1,area
cmsel,s,por1
cmplot
aplot

!chapa_porca
asel,all

```

FLST,5,36,5,ORDE,20
FITEM,5,21
FITEM,5,-38
FITEM,5,1971
FITEM,5,1977
FITEM,5,1981
FITEM,5,1986
FITEM,5,1991
FITEM,5,1995
FITEM,5,1999
FITEM,5,2005
FITEM,5,2009
FITEM,5,2014
FITEM,5,2019
FITEM,5,2023
FITEM,5,2027
FITEM,5,2033
FITEM,5,2037
FITEM,5,2042
FITEM,5,2047
FITEM,5,2051
ASEL,R, , ,P51X
aplot
FLST,5,36,5,ORDE,36
FITEM,5,1449
FITEM,5,1455
FITEM,5,1459
FITEM,5,1464
FITEM,5,1469
FITEM,5,1473
FITEM,5,1477
FITEM,5,1483
FITEM,5,1487
FITEM,5,1492
FITEM,5,1497
FITEM,5,1501
FITEM,5,1505
FITEM,5,1511
FITEM,5,1515
FITEM,5,1520
FITEM,5,1525
FITEM,5,1529
FITEM,5,2493
FITEM,5,2499
FITEM,5,2503
FITEM,5,2508
FITEM,5,2513
FITEM,5,2517
FITEM,5,2521

FITEM,5,2527
FITEM,5,2531
FITEM,5,2536
FITEM,5,2541
FITEM,5,2545
FITEM,5,2549
FITEM,5,2555
FITEM,5,2559
FITEM,5,2564
FITEM,5,2569
FITEM,5,2573
ASEL,a, , ,P51X
aplot
cm,cha2,area

!Parafuso em contato com a chapa
asel,all
FLST,5,48,5,ORDE,24
FITEM,5,838
FITEM,5,-841
FITEM,5,843
FITEM,5,-846
FITEM,5,848
FITEM,5,-851
FITEM,5,3017
FITEM,5,-3020
FITEM,5,3023
FITEM,5,-3026
FITEM,5,3029
FITEM,5,-3032
FITEM,5,3050
FITEM,5,-3053
FITEM,5,3056
FITEM,5,-3059
FITEM,5,3062
FITEM,5,-3065
FITEM,5,3083
FITEM,5,-3086
FITEM,5,3089
FITEM,5,-3092
FITEM,5,3095
FITEM,5,-3098
ASEL,R, , ,P51X
cm,para2,area

!Furos
asel,s,,,321
asel,a,,,330

asel,a,,,332
 asel,a,,,340
 asel,a,,,352
 asel,a,,,362
 asel,a,,,344
 asel,a,,,356
 asel,a,,,372
 asel,a,,,376
 asel,a,,,367
 asel,a,,,384
 asel,a,,,2039
 asel,a,,,2044
 asel,a,,,2054
 asel,a,,,2032
 asel,a,,,2003
 asel,a,,,2026
 asel,a,,,2013
 asel,a,,,2018
 asel,a,,,1985
 asel,a,,,1988
 asel,a,,,1974
 asel,a,,,1998
 asel,a,,,2507
 asel,a,,,2510
 asel,a,,,2520
 asel,a,,,2496
 asel,a,,,2525
 asel,a,,,2548
 asel,a,,,2535
 asel,a,,,2540
 asel,a,,,2561
 asel,a,,,2566
 asel,a,,,2554
 asel,a,,,2576
 asel,a,,,1517
 asel,a,,,1522
 asel,a,,,1510
 asel,a,,,1532
 asel,a,,,1481
 asel,a,,,1504
 asel,a,,,1491
 asel,a,,,1496
 asel,a,,,1463
 asel,a,,,1466
 asel,a,,,1452
 asel,a,,,1476
 aplot
 cm,furos,area

!Fases da viga para o contato
 asel,all
 FLST,5,14,5,ORDE,4
 FITEM,5,7
 FITEM,5,-13
 FITEM,5,873
 FITEM,5,-879
 ASEL,R, , ,P51X
 aplot
 cm,viga1,area
 asel,all
 FLST,5,14,5,ORDE,4
 FITEM,5,893
 FITEM,5,-899
 FITEM,5,913
 FITEM,5,-919
 ASEL,R, , ,P51X
 aplot
 cm,viga2,area

!UNIAO DOS ENRIGECEDORES DA COLUNA

CMSEL,S,COL
 ASEL,R,LOC,X,2*twf+bv-TC/2
 CM,COL2,AREA
 nsla,s,1
 cm,col2,node

CMSEL,S,COL
 ASEL,R,LOC,X,2*twf+bv+TC/2
 CM,COL3,AREA
 nsla,s,1
 cm,col3,node

!CONTATO DO FURO DA COLUNA
 COM O PARAFUSO
 !FURO DA COLUNA

CMSEL,S,COL
 LSLA,S,1
 FLST,5,48,4,ORDE,42
 FITEM,5,337
 FITEM,5,-340
 FITEM,5,353
 FITEM,5,-356
 FITEM,5,369
 FITEM,5,-372
 FITEM,5,1627

FITEM,5,1634
 FITEM,5,1637
 FITEM,5,1641
 FITEM,5,1644
 FITEM,5,1650
 FITEM,5,1653
 FITEM,5,1657
 FITEM,5,1661
 FITEM,5,1664
 FITEM,5,1669
 FITEM,5,1673
 FITEM,5,2005
 FITEM,5,2012
 FITEM,5,2015
 FITEM,5,2019
 FITEM,5,2022
 FITEM,5,2028
 FITEM,5,2031
 FITEM,5,2035
 FITEM,5,2039
 FITEM,5,2042
 FITEM,5,2047
 FITEM,5,2051
 FITEM,5,2383
 FITEM,5,2390
 FITEM,5,2393
 FITEM,5,2397
 FITEM,5,2400
 FITEM,5,2406
 FITEM,5,2409
 FITEM,5,2413
 FITEM,5,2417
 FITEM,5,2420
 FITEM,5,2425
 FITEM,5,2429
 LSEL,R, , ,P51X
 LPLOT
 CM,COL5,line
 nsll,s,1
 nplot
 cm,col5,node

 !PARAFUSO
 asel,all
 FLST,5,48,5,ORDE,24
 FITEM,5,853
 FITEM,5,-856
 FITEM,5,858
 FITEM,5,-861

FITEM,5,863
 FITEM,5,-866
 FITEM,5,3034
 FITEM,5,-3037
 FITEM,5,3039
 FITEM,5,-3042
 FITEM,5,3044
 FITEM,5,-3047
 FITEM,5,3067
 FITEM,5,-3070
 FITEM,5,3072
 FITEM,5,-3075
 FITEM,5,3077
 FITEM,5,-3080
 FITEM,5,3100
 FITEM,5,-3103
 FITEM,5,3105
 FITEM,5,-3108
 FITEM,5,3110
 FITEM,5,-3113
 ASEL,R, , ,P51X
 aplot
 CM,PARA5,area
 nsla,s,1
 nplot
 cm,para5,nodes

 !CONTATO DA COLUNA COM
 CHAPA

 !CONTATO DA COLUNA
 CMSEL,S,COL
 asel,u,loc,y,0,linf
 asel,u,loc,y, hv+ev+2*twf +3.2*df,lsup
 ASEL,R,LOC,Z,-TPL-TC/2
 apLOT
 CM,COL1,AREA
 ALLSEL,ALL
 CMSEL,S,COL
 asel,u,loc,y,0,linf
 asel,u,loc,y, hv+ev+2*twf +3.2*df,lsup
 ASEL,R,LOC,Z,-(HC+TPL+TC/2)
 CMSEL,A,COL1
 CM,COL1,AREA

 allsel,all

 !CHAPA
 cmsel,s,cha

cmplot		KEYOPT,16,7,0
aslv,s,1		KEYOPT,16,8,0
aplot		KEYOPT,16,9,1
asel,r,loc,z,-tpl		KEYOPT,16,10,2
aplot		KEYOPT,16,11,1
cm,cha1,area		KEYOPT,16,12,1
allsel,all		
cmsel,s,cha		KEYOPT,15,5,0
cmplot		! Generate the target surface
aslv,s,1		cmsel,s,para5
aplot		nsl,r,loc,z,-(hc/2+tpl)-tC/2
asel,r,loc,z,-(hc+tpl+tc)		NUMMRG,NODE,,,LOW
aplot		cmsel,s,para5
cmsel,a,cha1		cmplot
cm,cha1,area		TYPE,15
nsla,s,1		ESLN,S,0
cm,cha1,node		ESURF
		! Generate the contact surface
rs=0.1	!Rigidez do	cmsel,s,col5
contato		TYPE,16
ip=0	!Penetração	ESLN,S,0
inicial		ESURF
pb=1.65	!Pinball	*SET,_REALID,15
região		!ALLSEL
ic=1.61	!Initial	!ESEL,ALL
closure		!ESEL,S,TYPE,,15
		!ESEL,A,TYPE,,16
		!ESEL,R,REAL,,15
		!/PSYMB,ESYS,1
/COM, CONTACT PAIR CREATION -		!/PNUM,TYPE,1
START		!/NUM,1
/GSAV,cwz,gsav,,temp		!EPLLOT
MP,MU,15,,.3		!ESEL,ALL
MAT,15		!ESEL,S,TYPE,,3
MP,EMIS,15,7.88860905221e-031		!ESEL,A,TYPE,,4
R,15		!ESEL,R,REAL,,3
REAL,15		!CMSEL,A,_NODECM
ET,15,targe170		!CMDEL,_NODECM
ET,16,conta175		!CMSEL,A,_ELEMCM
R,15,,rs,ip,,	!obs.: o sinal	!CMDEL,_ELEMCM
negativo indica constante		!CMSEL,S,_KPCM
!RMORE,,1.0E20,0.0,1.0,		!CMDEL,_KPCM
!RMORE,0.0,0,1.0,,1.0,0.5		!CMSEL,S,_LINECM
!RMORE,0,1.0,1.0,0.0,,1.0		!CMDEL,_LINECM
!RMORE,10.0		!CMSEL,S,_AREACM
KEYOPT,16,1,0		!CMDEL,_AREACM
KEYOPT,16,2,0		!CMSEL,S,_VOLUCM
KEYOPT,16,4,0		!CMDEL,_VOLUCM
KEYOPT,16,5,0		!/GRES,cwz,gsav

```

!CMDEL,_TARGET
!CMDEL,_CONTACT
/COM, CONTACT PAIR CREATION -
END
!/MREP,EPLOT

!Definição dos elementos de contato

/PSYMB,ESYS,1

!placa de topo (chapa)

!frente
ET,6,TARGE170
KEYOPT,6,4,0
ALLSEL,ALL
cmsel,s,cha2
CMPLOT
nsla,s,1
nplot
TYPE,6
REAL,7
ESURF
ESEL,S,TYPE,,6
EPLOT

!PORCA

ET,7,CONTA174
R,7,,0.1,0,,
!KEYOPT,7,1,0
!keyopt,7,4,1
!KEYOPT,7,7,2
KEYOPT,7,8,2
KEYOPT,7,12,1
allsel,all
cmSEL,S,POR1
CMPLOT
NSLa,S,1
NPLOT
MP,MU,7,,3

TYPE,7
REAL,7
ESURF
ESEL,S,TYPE,,7
EPLOT

!COLUNA

ET,9,CONTA174
R,8,,0.1,0,,
RMORE,,,,tc/2,,
!keyopt,9,4,1
!KEYOPT,9,1,0
!KEYOPT,9,7,2
!KEYOPT,9,11,1
!keyopt,9,12,3
KEYOPT,9,8,2
KEYOPT,9,12,1
ALLSEL,ALL
!CMSEL,S,COL
!asel,u,loc,y,0,linf
!asel,u,loc,y, hv+ev+2*twf +3.2*df,lsup
!ASEL,R,LOC,Z,-TPL-TC/2
!apLOT
CMSEL,S,COL1
nsla,s,1
nplot
MP,MU,9,,3

TYPE,9
REAL,8
ESURF,ALL,top
ESEL,S,TYPE,,9
EPLOT

!fundo
ET,8,TARGE170
R,8,,0.1,0,,
RMORE,,,,tc/2,,
KEYOPT,8,5,5
allsel,all
cmsel,s,cha1
TYPE,8
REAL,8
ESURF
ESEL,S,TYPE,,8
EPLOT

!Elemento de contato nos Parafusos

ET,11,CONTA174
R,11,,0.1,0,,
!keyopt,11,4,1
!KEYOPT,11,1,0
!KEYOPT,11,7,2
KEYOPT,11,12,1

```

```
KEYOPT,11,8,2
allsel,all
cmsel,s,para2
cmplot
nsla,s,1
nplot
```

```
MP,MU,11,.3
TYPE,11
REAL,11
ESURF
ESEL,S,TYPE,,11
EPlot
```

```
!Elemento de contato nos Furos na chapa
ET,10,TARGE170
KEYOPT,10,5,5
ALLSEL,ALL
cmsel,s,furos
cmplot
nsla,s,1
nplot
TYPE,10
REAL,11
eSURF,,,
ESEL,S,TYPE,,10
EPlot
```

```
!ELEMENTO DE CONTATO ENTRE
OS ENRIGECEDORES DA COLUNA
```

```
!COLUNA
!enrigecedor 1
ET,20,CONTA174
R,20,,,0.1,0,,
RMORE,,,,tc,,
KEYOPT,20,8,2
KEYOPT,20,12,1
ALLSEL,ALL
CMSEL,S,COL2
nplot
MP,MU,20,.3
TYPE,20
REAL,20
ESURF,ALL,top
ESEL,S,TYPE,,20
EPlot
```

```
!enrigecedor 2
```

```
ET,21,TARGE170
R,20,,,0.1,0,,
RMORE,,,,tc,,
KEYOPT,21,5,5
allsel,all
cmsel,s,col3
TYPE,21
REAL,20
ESURF
ESEL,S,TYPE,,21
EPlot
```

```
/PSYMB,ESYS,0
allsel,all
cmsel,all
cmplot
```

```
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
/GRES,cwz,gsav
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
COM, CONTACT PAIR CREATION -
END
/MREP,EPlot
```

```
allsel,all
cmsel,s,cha
aslv,s,1
aplot
cm,chapa1,area
CMSEL,S,CHAPA1
CMsel,a,viga
nsla,s,1
nplot
nsl,r,loc,z,0
nplot
NUMMRG,NODE,,,,LOW
```

```

allsel,all
cmsel,s,cha
aslv,s,1
aplot
cm,chapa1,area
CMSEL,S,CHAPA1
CMsel,a,viga
cm,chapa1,area
nsla,s,1
nplot
nset,r,loc,z,-(hc+2*tpl+tc)
nplot
NUMMRG,NODE,,,,LOW

!roda com viga no eixo e com
deslocamento em restringido em x

!Engaste coluna
allsel,all
nset,s,loc,y,linf
nplot
d,all,all

allsel,all
nset,s,loc,y,lsup
nplot
d,all,all

/solu

!Carregamento na direção z na viga
allsel,all
kset,s,,36
kset,a,,656
kset,a,,33
kset,a,,650
kset,a,,32
kset,a,,648
kset,a,,29
kset,a,,642
fk,all,fy,-500
kplot

allsel,all
kset,s,,614
kset,a,,698
kset,a,,608
kset,a,,692
kset,a,,606

kset,a,,690
kset,a,,600
kset,a,,684
kplot
fk,all,fy,-500

!solução

finish
/sol
antype,0
nlgeom,1
NSUBST,25,25,25
OUTRES,ERASE
OUTRES,all,all
!arclen,1,0,0
!arctrm,u,100690,,ux
allsel,all
save
solve
finish

```