



Projeto Final de Graduação em Engenharia Civil

Avaliação Estrutural de "*T-Stubs*" em Ligações Viga-Coluna em Estruturas de Aço através do Método dos Elementos Finitos

Autora: Monique Cordeiro Rodrigues

Orientador:Luciano Rodrigues Ornelas de LimaCo-orientador:José Guilherme Santos da Silva

Centro de Tecnologia e Ciências Faculdade de Engenharia Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Agosto de 2007

Avaliação Estrutural de "*T-Stubs*" em Ligações Viga-Coluna em Estruturas de Aço através do Método dos Elementos Finitos

Monique Cordeiro Rodrigues

Projeto Final apresentado a Faculdade de Engenharia Civil da Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Civil. Ênfase: Estruturas.

Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada

Prof. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima – Orientador Departamento de Estruturas e Fundações – UERJ

Prof. José Guilherme Santos da Silva, DSc – Co-orientador Departamento de Engenharia Mecânica – UERJ

> **Prof. Pedro C. G. da S. Vellasco, PhD** Departamento de Estruturas e Fundações – UERJ

Universidade do Estado do Rio de Janeiro Agosto de 2007.

Ficha Catalográfica

RODRIGUES, MONIQUE CORDEIRO

Avaliação Estrutural de "T-Stubs" em Ligações Viga-Coluna em Estruturas de Aço através do Método dos Elementos Finitos [Rio de Janeiro] 2007.

xxii , 119 p. 29,7 cm (FEN/UERJ, Graduação, Faculdade de Engenharia Civil - Área de Concentração: Estruturas, 2005.)

v, 119 f. : il. ; 30 cm

Projeto Final - Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ

- 1. Introdução
- 2. Ligações Viga x Coluna
- 3. Caracterização do Modelo Numérico
- 4. Análise dos Resultados
- 5. Conclusões

I. FEN/UERJ II. Título (série)

A Minha Pequena Velha, que sempre me incentivou e esteve ao meu lado nas minhas escolhas e que hoje ilumina meu caminho do céu.

Agradecimentos

Aos meus pais e irmãs, que souberam suportar as horas de estudo e dedicação, estando presentes nos momentos de glória e dificuldades em minha vida e que me incentivaram a continuar a caminhada. Agradeço ao carinho e apoio.

Aos amigos que estiveram presentes dando auxilio nos estudos e com a amizade de todas as horas. Aos meus chefes, que sem a ajuda e compreensão deles este sonho não teria se realizado.

Ao LABCIV – Laboratório de Computação da Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da UERJ e a Alessandra, pelo suporte computacional.

Em especial ao meu orientador, Luciano Rodrigues Ornelas de Lima, que foi um grande professor e amigo, mostrando-se muito dedicado à profissão, sempre disposto a ajudar, mesmo com meus horários apertados.

E ao meu co-orientador pelo conhecimento transmitido durante este período.

Resumo

Rodrigues, Monique Cordeiro; Lima, Luciano Rodrigues Ornelas de (Orientador). Avaliação Estrutural de *"T-Stubs"* em Ligações Viga-Coluna em Estruturas de Aço através do Método dos Elementos Finitos. Rio de Janeiro, 2007. 119p. Projeto Final da Faculdade de Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

As ligações desempenham um papel fundamental no comportamento global das estruturas de aço. Inúmeros trabalhos de pesquisa têm sido desenvolvidos para entender o comportamento real de uma ligação e sua influência na resistência global dos pórticos e ligações viga-coluna de edificações em aço. Atualmente, a Norma Brasileira de estruturas de aço de edificações, NBR 8800, considera o comportamento das ligações entre duas situações extremas: rígidas ou flexíveis. Entretanto, algumas normas atuais de projeto de estruturas de aço, como o Eurocode 3, consideram que as ligações apresentam um comportamento intermediário, ou seja, semi-rígidas. Esta filosofia de projeto baseia-se no Método das Componentes, inicialmente desenvolvido por Zoetemeijer, para verificação da resistência da ligação e sua classificação quanto à rigidez rotacional. Este procedimento se desenvolve através de modelos mecânicos (modelos de molas) gerados por um conjunto de componentes rígidos e flexíveis onde cada componente da ligação é representada por uma mola translacional.

No entanto, outros projetos desenvolvidos verificaram que as componentes onde ocorrem a formação de mecanismos denominados "T-Stubs" poderiam ser melhor caracterizadas devido a deficiências no modelo estrutural adotado na sua caracterização, por não apresentarem uma boa convergência para estas componentes especificamente.

Desta forma, o projeto apresentará os resultados de caracterização destes mecanismos em "T-Stubs" obtidos através de um modelo de elementos finitos. Para tal, será realizada a análise não-linear geométrica e do material. Esta modelagem possibilitará efetuar uma análise paramétrica com o objetivo de se avaliar os principais parâmetros que influenciam no comportamento deste componente no que diz respeito a sua avaliação em termos de distribuição de tensões e deformações no modelo de forma global.

Palavras-chave

Estrutura de Aço; Ligações Viga-Coluna; Ligações Semi-Rígidas; Análise Experimental; Modelos Mecânicos; Método das Componentes; Normas Européias.

Abstract

Rodrigues, Monique Cordeiro; Lima, Luciano Rodrigues Ornelas de (Advisor). **Structural Evaluation of "T-Stubs" in Structural Steel Beam-to-Column Joints in based on Finite Elment Method**. Rio de Janeiro, 2007. 119p. Projeto Final da Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

The joints develop a fundamental role in the global behaviour of steel structures. Several researches are being developed to understand the real behaviour of a joint and its influence in the global frame capacity and beam-to-column joints of the steel's buildings. Nowadays, the Standard Brazilian of the steel portal frame design, NBR 8800, considers the joint behaviour between two extreme situations: rigid or pinned. However, some actual standards of the steel structures design, like Eurocode 3, consider that the joints present a intermediate behaviour, in other words, semi-rigid. This filosofy design is based on components method, initialy developed for Zoetemeyer, for joint capacity evaluation and its classification concerning the joint rotation stiffness. This component method is based on mechanical models (spring model) created by an association of rigids and flexible components of joints is represented by a translacional spring.

However, other design codes verified that the components where occur the mechanism formation called "T-Stub", these could be better describes due to deficiency in structural model adopted in its describition, because its don't performing a good agreement to this specifical component.

So, this work present an evaluation of the mechanisms considered in "T-Stubs" design based on finite element models. This way, it was considered the geometric and material non-linearities. This modelling possibilited a parametrical analysis with the objetive of evaluate the main parameters that influences this component behaviour in terms of stress and deformation destribution in the model.

Key-words

Steel Structural; Beam-to-Column Joints; Semi-Rigid Joints; Experimental Analysis; Mechanical Models; Component Method; European Codes; Bending Resistance; Plastic Mechanism, T-Stub.

Sumário

1. Introdução	18
1.1. Motivação	18
1.2. Evolução Histórica das Ligações Semi-Rígidas	
2. Ligações Viga x Coluna	
2.1. Introdução	23
2.2. Descrição do Método das Componentes	
2.2.1. Resistência à Flexão de uma Ligação	
2.2.2. Rigidez Inicial de uma Ligação	
2.3. Dimensionamento das Componentes	31
2.3.1. Componente 1 – Alma da coluna ao corte	
2.3.2. Componente 2 – Alma da coluna à compressão	
2.3.3. Componente 3 – Alma da coluna à tração	
2.3.4. Componente 4 – Mesa da coluna à flexão	
2.3.5. Componente 5 – Placa de extremidade à flexão	
2.3.6. Componente 7 – Mesa da Viga à compressão	
2.3.7. Componente 8 – Alma da viga à tração	
2.3.8. Componente 10 – Parafusos à tração	
3. Caracterização do Modelo Numérico	
3.1. Descrição do Modelo	44
3.2. Estudo da Malha	
3.3. Elemento de Contato	50
4. Análise dos Resultados	51
5. Conclusões	
Anexo A - Dimensionamento das Ligações – Modo de ruptura 01.	
A.1. Informações Gerais	

A.1.1. Características geométricas	68
A.1.2. Coeficientes de segurança	69
A.2. Cálculo das Componentes – Mesa da coluna à flexão	69
A.2.1. Parâmetros Geométricos	69
A.2.2. Comprimento efetivo do "T-Stub" equivalente	69
A.2.3. Resistência	70
A.2.4. Rigidez	71
Anexo B - Dimensionamento das Ligações – Modo de ruptura 02	73
B.1. Informações Gerais	73
B.1.1. Características geométricas	73
B.1.2. Coeficientes de segurança	74
B.2. Cálculo das Componentes – Mesa da coluna à flexão	74
B.2.1. Parâmetros Geométricos	74
B.2.2. Comprimento efetivo do "T-Stub" equivalente	74
B.2.3. Resistência	75
B.2.4. Rigidez	76
Anexo C - Dimensionamento das Ligações – Modo de ruptura 03	
C.1. Informações Gerais	
C.1.1. Características geométricas	
C.1.2. Coeficientes de segurança	79
C.2. Cálculo das Componentes – Mesa da coluna à flexão	79
C.2.1. Parâmetros Geométricos	79
C.2.2. Comprimento efetivo do "T-Stub" equivalente	79
C.2.3. Resistência	80
C.2.4. Rigidez	81
Anexo D - Arquivo APDL	83

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Classificação das ligações de acordo com sua rigidez	. 19
Figura 1.2 – Distribuição elástica de momentos fletores num pórtico simples	. 20
Figura 1.3 – Ligação de um pórtico de galpões com vigas inclinadas	. 21
Figura 2.1 – Propriedades para dimensionamento de uma ligação.	. 24
Figura 2.2 – Limites para classificação das ligações de acordo com a rigidez inicial	. 25
Figura 2.3 – Componentes de uma ligação com placa de extremidade [41]	. 28
Figura 2.4 – Modelo mecânico – ligação com placa de extremidade estendida [1]	. 28
Figura 2.5 – Procedimento para cálculo da rigidez rotacional	. 29
Figura 2.6 – Centro de compressão e braço de alavanca z	. 31
Figura 2.7 – Tensões normais e cisalhantes na zona comprimida da alma da coluna	. 33
Figura 2.8 – Propriedades geométricas da componente alma da coluna em compressão	. 33
Figura 2.9 – Identificação de " <i>T-Stubs</i> " em ligações viga-coluna	. 36
Figura 2.10 – Modos de ruptura de um " <i>T-Stub</i> " aparafusado	. 37
Figura 2.11 – Definição de parâmetros geométricos – componente 4.	. 37
Figura 2.12 – Modelos de linhas de ruptura para grupos de linhas de parafusos	. 38
Figura 2.13 – Definição de parâmetros geométricos – componente 5.	. 41
Figura 2.14 – Curvas para obtenção do coeficiente α (Eurocode 3)	. 41
Figura 3.1 – Geometria do Elemento SOLID45.	. 44
Figura 3.2 – Modelos da ligação de "T-Stubs"	. 45
Figura 3.3 – Geometria do LINK 10	. 46
Figura 3.4 – Modelos considerados para as ligações de "T-Stubs"	. 46
Figura 3.5 – Dimensões dos "T-Stubs"	. 47
Figura 3.6 – Detalhe do parafuso M12	. 48
Figura 3.7 – Malha de elementos finitos – Ligação " <i>T-Stub</i> "	. 49
Figura 3.8 – Resultados da calibração da malha	. 49
Figura 3.9 – Área de atuação do contato	. 50
Figura 4.1 – Aproximação da lei constitutiva do material	. 51
Figura 4.2 – Gráfico Forçax Deslocamento	. 51
Figura 4.3 – Deformada e deslocamento na direção z do modelo	. 52
Figura 4.4 – Tensões de Von Mises $-\Delta$ =1,6712 mm	. 53
Figura 4.5 – Tensões de Von Mises $-\Delta$ =2,0898 mm	. 53
Figura 4.6 – Tensões de Von Mises $-\Delta$ =10,0 mm	. 54
Figura 4.7 – Tensão de Von Mises para o modelo completo	. 55
Figura 4.8 – Deformada e deslocamento em z para o modelo completo	. 55
Figura 4.9 – Gráfico comparativo de resultados – modo de ruptura 1	. 55
Figura 4.10 – Tensões de Von Mises - modelo 2	. 56
Figura 4.11 – Gráfico comparativo de resultados – modo de ruptura 2	. 57

Figura 4.12 – Tensões de Von Mises - modelo 3.	57
Figura 4.13 – Gráfico comparativo de resultados – modo de ruptura 3	58

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Coeficiente de modificação de rigidez η	. 24
Tabela 2.2 – Valores aproximados para o parâmetro de transfomação β	. 32
Tabela 2.3 – Parâmetro de redução ω	. 35
Tabela 2.4 – Comprimentos efetivos de um "T-Stub", componente 4	. 38
Tabela 2.5 – Comprimentos efetivos de um "T-Stub", componente 5	. 40
Tabela 3.1 – Dimensões dos modelos utilizados	. 47

Lista de Símbolos

A	área total da seção transversal do perfil da coluna
A ₀	área do parafuso
A _{vc}	área de corte da alma da coluna
$\boldsymbol{b}_{\text{eff,c,wc}}$	largura efetiva da alma da coluna à compressão
$\boldsymbol{b}_{eff,t,wb}$	largura efetiva da alma da coluna à tração
b_{tf_f}	largura da mesa da coluna
${\sf B}_{t,{\sf Rd}}$	resistência de um parafuso à tração
E	módulo de elasticidade
\mathbf{f}_{ub}	tensão última do parafuso
f _y	tensão de escoamento do material
f _{y,wc}	tensão de escoamento da alma da coluna
f _{y,fc}	tensão de escoamento da mesa da coluna
$F_{T,1,Rd}$	resistência do t-stub à flexão – modo 1
$F_{T,2,Rd}$	resistência do t-stub à flexão – modo 2
$F_{T,3,Rd}$	resistência do t-stub à flexão – modo 3
$F_{i.Rd}$	resistência de cada linha de parafusos em tração
$F_{c,wc,Rd}$	resistência da alma da coluna à compressão
$F_{t,wc,Rd}$	resistência da alma da coluna à tração
$F_{c,fb,Rd}$	resistência da mesa da viga à compressão
$F_{t,\text{wb},\text{Rd}}$	resistência da alma da viga à tração
$F_{t,Rd}$	resistência de um parafuso à tração
h _i	distância da linha de parafusos ao centro de compressão
h _r	distância entre a linha de parafusos i ao centro de compressão
k ₁	coeficiente de rigidez da alma da coluna ao corte – componente 1
k ₂	coeficiente de rigidez da alma da coluna à compressão – componente 2
k ₃	coeficiente de rigidez da alma da coluna à tração – componente 3
k ₄	coeficiente de rigidez da alma da coluna à flexão – componente 4
k ₅	coeficiente de rigidez da placa de extremidade à flexão – componente 5
k 7	coeficiente de rigidez da mesa da viga à compressão– componente 7
k ₈	coeficiente de rigidez da alma da viga à tração – componente 8

k ₁₀	coeficiente de rigidez de um parafuso à tração
k _{eq}	rigidez equivalente das molas associadas em paralelo
$\mathbf{k}_{\text{eff},r}$	rigidez efetiva das molas associadas em série
k _{i,r}	valor de rigidez de cada uma das componentes
k_{wc}	fator de correção
$I_{\rm eff,1}$	largura efetiva do t-stub – modo 1
$I_{eff,cp}$	formas circulares
I _{eff,nc}	formas não-circulares
I _{eff,2}	largura efetiva do t-stub – modo 2
L _b	espessura de material a ser apertada pelos parafusos
$M_{j,Rd}$	momento resistente
$M_{\text{pl},1,\text{Rd}}$	momento resistente do t-stub à flexão – modo 1
${\rm M}_{\rm pl,2,Rd}$	momento resistente do t-stub à flexão – modo 2
$\rm M_{\rm c,Rd}$	momento resistente da seção transversal
n _b	número de linhas de parafusos em tração
n _c	número de componentes ativas em cada linha de parafusos
r	raio de concordância
S _{j,ini}	rigidez inicial rotacional
s _p	comprimento obtido pela dispersão à 45º através da placa de extremidade
t _{fc}	espessura da mesa da coluna
t _{fb}	espessura da mesa da viga
t _f	espessura da mesa do t-stub
t _p	espessura da placa de extremidade
t _w	espessura da alma da viga
t _{wc}	espessura da alma da coluna
$V_{wp,Rd}$	resistência da alma da coluna ao corte
$W_{\rm pl}$	módulo plástico da seção transversal
Z _{eq}	braço de alavanca
β	parâmetro de transformação
ф _{Cd}	capacidade de rotação
γмо	coeficiente de resistência
γм1	coeficiente de segurança

γ_{M2}	coeficiente de resistência	
$\lambda_1 e \lambda_2$	coeficientes	
$\overline{\lambda}_{p}$	esbeltez da placa de extremidade	
η	coeficiente de modificação de rigidez	
ρ	o fator de redução devido à flambagem da placa	
$\sigma_{\text{com,Ed}}$	m,Ed máxima tensão longitudinal de compressão	
ω	fator de redução	
μ	Coeficiente de atrito	

Lista de Abreviaturas

LABCIV	Laboratório de Computação em Engenharia Civil
Eurocode	European Committee for Standardisation
ECCS	European Convention for Constructional Steelwork
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro

"A aprendizagem é um simples apêndice de nós mesmos; onde quer que estejamos, está também nossa aprendizagem."

William Shakespeare

1. Introdução

1.1. Motivação

As ligações estruturais desempenham um papel fundamental no comportamento global das estruturas de aço. Baseando-se em uma tentativa de se entender o comportamento real de uma ligação e sua influência na resistência global dos pórticos de edificações em aço muitos trabalhos de pesquisa têm sido desenvolvidos. Com o entendimento do comportamento real das ligações, torna-se possível o desenvolvimento de novas recomendações de projeto para se avaliar as propriedades mecânicas das ligações e, conseqüentemente, os procedimentos de projeto de estruturas de edificios que considerem esta hipótese.

A principal motivação destes trabalhos de pesquisa tem caráter científico mas sempre buscando estruturas mais econômicas resultantes de um projeto mais coerente das ligações, bem como a melhoria dos processos de fabricação com respectiva redução dos custos de execução.

Atualmente, sabe-se que o comportamento real das ligações encontra-se entre duas situações extremas, ou seja, rígidas ou flexíveis.

Avaliando-se o momento fletor e a rotação associada de uma ligação viga-coluna, apresentada na Figura 1.1, percebe-se que uma ligação é classificada como rígida quando os membros ligados por ela sofrem a mesma rotação. Desta forma, as ligações estão submetidas a uma rotação global de corpo rígido que é a rotação absoluta do nó comumente utilizada na análise estrutural.

O outro extremo considera que a viga se comporta como simplesmente apoiada e a ligação é denominada flexível, Figura 1.1 (b).

Para casos intermediários, o momento transmitido será resultante da rotação relativa entre a viga e a coluna. A ligação é denominada, então, como semi-rígida, Figura 1.1 (c).

Uma análise global de uma estrutura, quando se utilizam ligações semi-rígidas ao invés de ligações rígidas ou flexíveis, modificam-se não apenas os deslocamentos ocorridos nesta estrutura, mas também, a distribuição e a magnitude das forças internas por toda a estrutura.



O dimensionamento de pórticos utilizando-se o conceito de ligações rígidas faz com que o momento máximo positivo atuante nas vigas do pórtico seja maior do que o projetado. Esta diferença que também gera um alivio de carga nas colunas pode levar ao colapso da estrutura em casos extremos ou, pelo menos, ao desconhecimento da segurança envolvida no projeto, destas peças. Isto ocorre porque o momento de engastamento perfeito existente na viga não é totalmente absorvido pela ligação.

Por outro lado, se o dimensionamento for executado utilizando os conceitos de ligações flexíveis, as colunas estarão sujeitas a flexo-compressão. Neste caso, apesar das vigas estarem superdimensionadas, um colapso das colunas, ou melhor, vigas-colunas, poderá ocorrer, e mais uma vez a segurança estrutural será desconhecida. Como exemplo, na Figura 1.2 são apresentados dois diagramas de momento fletor de um pórtico engastado, submetido a um carregamento uniformemente distribuído, onde as ligações viga-coluna são consideradas flexíveis ou semi-rígidas.

Em uma primeira análise, a utilização de ligações semi-rígidas em pórticos indeslocáveis mostra que os esforços na viga tornam-se menores. Ao refinar-se esta análise, pode-se também diminuir os tirantes utilizados no contraventamento do pórtico. No caso de ligações semi-rígidas em pórticos deslocáveis, estas contribuem com uma parcela da rigidez necessária a estabilidade lateral do mesmo, de forma mais econômica. Esta economia é advinda do fato de que na grande maioria dos casos, as ligações semi-rígidas são mais leves e envolvem menos componentes como soldas e parafusos quando comparadas com a solução rígida tradicional.

Uma análise da estabilidade de pórticos com ligações semi-rígidas exige uma modelagem adequada e precisa desta ligação. A curva momento *versus* rotação destas ligações apresenta um comportamento não-linear que pode ser avaliado através do Método dos Estados Limites. Na avaliação destes pórticos, a flexibilidade da ligação e os efeitos de segunda ordem estão intrinsecamente relacionados.



(a) ligações flexíveis (b) ligações semi-rígidas Figura 1.2 – Distribuição elástica de momentos fletores num pórtico simples

As ligações representam uma parcela pouco significativa do peso total da estrutura, porém, possuem preços de fabricação e montagem elevados. Avaliando-se estes fatores, soluções que consideram a economia representada pelo uso de ligações semi-rígidas, merecem uma análise mais refinada.

Uma das razões para esta economia provém do fato de que as ligações rígidas aparafusadas são caras e difíceis de serem montadas quando comparadas com a solução semi-rígida. Por outro lado, as ligações flexíveis não consideram uma parcela significativa de resistência que, ao ser considerada, pode minimizar o custo global da estrutura.

Algumas normas de projeto e dimensionamento de estruturas de aço atuais consideram que as ligações possuem um comportamento semi-rígido, como por exemplo, o Eurocode 3, parte 1.8 [12]. Estas normas, porém, somente consideram ligações submetidas ao corte e/ou ao momento fletor (Silva *et al.*, 2004) [1]. Esta regulamentação não considera a presença de esforço axial (tração/ compressão) nas ligações impondo apenas uma limitação empírica de 5% da resistência plastica da viga como esforço axial máximo para o qual os procedimentos disponíveis se mantém aplicáveis. Vale ressaltar que não existe nenhum fundamento teórico para justificar este limite de 5%. Existem alguns tipos de estruturas onde a presença do esforço axial deve ser avaliada, tais como:

- Pórticos de estruturas submetidos a carregamentos horizontais (terremotos ou cargas de vento), especialmente em estruturas não-contraventadas;
- Pórticos irregulares submetidos a cargas gravitacionais ou horizontais, especialmente em pavimentos incompletos;
- Ligações de pórticos de galpões onde a inclinação das vigas gera esforços axiais significantes nas ligações, ver Figura 1.3.



Figura 1.3 – Ligação de um pórtico de galpões com vigas inclinadas

1.2. Evolução Histórica das Ligações Semi-Rígidas

Um resumo do estado da arte de ligações estruturas em aço foi realizado por Chan and Chui [20] onde são citados diversos trabalhos efetuados nesta área. Desde os primeiros estudos que avaliaram a rigidez rotacional de ligações viga-coluna com rebites efetuados por Wilson e Moore [21] em 1917, centenas de ensaios têm sido realizados na tentativa de se investigar o real comportamento das ligações viga-coluna.

Anteriormente a 1950, ligações soldadas e rebitadas com cantoneiras foram testadas por Young e Jackson [22] em 1934 e por Rathbun [23] em 1936. Um pouco mais tarde, Bell *et al* [24] realizou alguns ensaios com o mesmo tipo de ligações, mas com parafusos de alta resistência.

Subseqüentemente o comportamento de ligações com placa de extremidade soldada verticalmente à mesa da coluna (*"header plate"*) foi investigação através de dezesseis ensaios realizados por Sommer [25] em 1969. Este mesmo autor realizou quatro ensaios de ligações aparafusadas com cantoneiras.

Ligações com placa de extremidade estendida e/ou ajustada à altura da viga começaram a ser utilizada por volta de 1960, sendo projetadas para transferir consideravelmente momentos fletores da viga para coluna. Estes tipos de ligações começaram a ser estudados na década de setenta. Dentre os diversos ensaios documentados na literatura, pode-se citar os realizados por Ostrander [26], Bailey [27] e Surtees & Mann [28], todos em 1970, por Agerskov [29] em 1976, além dos ensaios de Packer & Morris [30] em 1977 e Johnson & Walpole [31] em 1981. Todos estes autores procuraram avaliar a influência da utilização de enrijecedores na coluna de ligações com placa de extremidade.

Mas foi a partir de meados da década de oitenta que muitos pesquisadores realizaram ensaios de ligações semi-rígidas conforme revisão bibliográfica realizada por Mesquita [32] que cita um banco de dados onde estes ensaios estão catalogados,

denominado SERICON II. Neste banco de dados são citados diversos autores conforme apresentado a seguir.

Jaspart *et al.* [8] realizou em 1987, treze ensaios com três tipos básicos de ligações identificadas como sendo da serie 101 considerando ligações com placa de extremidade estendida, ligações com cantoneiras de alma e ligações com cantoneiras de apoio e de apoio.

Os dezesseis ensaios da série 102 foram realizados por Brozetti [16, 33] em 1980 que abordou ligações com placa de extremidade ajustada e estendida. Zoetemeijer, [16, 33] em 1981, foi o responsável pela realização dos sete ensaios que compõem a série 104 e também abordou ligações com extremidade ajustada.

Mas foi na Universidade de Innsbruck, Áustria, onde foi realizada a maior parte dos ensaios catalogados neste banco de dados. Em 1985, Klein [16, 33] realizou os vinte e cinco ensaios da série 105, todos com ligações soldadas onde foram considerados nós extremos e internos. Este tipo de ligação também foi objeto de estudo de outros dois autores, Braun [16, 33] em 1987 e Elimerer [16, 33] em 1988, que ensaiaram respectivamente, quinze ensaios da série 106 e quatro da série 107. Sabe-se que a série 108 foi composta por quarenta e cinco ensiaos realizados por Lener [16, 33] em 1988, mas apesar de serem apresentados os resultados destes ensaios, nenhuma consideração sobre a tipologia das ligações foi mencionada. Ainda na mesma instituição, em 1987, Humer [16, 33] realizou os seis ensaios da série 109 de ligações com placa de extremidade de nós internos com enrijecedores na mesa da coluna. Com relação à série 103, são apresentados cinqüenta e seis ensaios de ligações mistas com as mais variadas tipologias por diversos autores.

Azizinamini [34] realizou dezoito ensaios de ligações viga-coluna com cantoneiras de alma, de apoio e de topo submetidas a carregamento estático.

A partir da década de noventa, alguns ensaios de ligações metálicas começaram a ser efetuados também aqui no Brasil. Alguns dos principais trabalhos encontrados na literatura serão citados a seguir.

Queiroz [36] realizou, em 1995, uma série de ensaios de ligações soldadas.

Carvalho [37], em 1997, realizou três ensaios de ligações com cantoneiras de alma, cantoneiras de topo e apoio no eixo de maior inércia da coluna. Lima [38], em 1998, seguindo a mesma metodologia utilizada por Carvalho [37], também realizou três ensaios com o mesmo tipo de ligação, mas efetuadas segundo o eixo de menor inércia da coluna.

Em 1998, Ribeiro [40] realizou uma série de 35 ensaios de ligações com placa de extremidade onde procurou avaliar a influência da espessura da placa e o diâmetro dos parafusos no comportamento das ligações semi-rígidas.

2. Ligações Viga x Coluna

2.1. Introdução

As ligações estruturais em aço, conforme mencionado no capitulo anterior, são usualmente projetadas como rígidas ou simplesmente flexíveis. A primeira hipótese implica que não ocorra nenhuma rotação entre os membros conectados, ou seja, em qualquer ligação viga-coluna, a distribuição de momentos fletores ocorre de acordo com a rigidez a flexão destes membros. De forma recíproca, ao considerar que as ligações são flexíveis, admite-se que a rotação relativa na extremidade da viga é livre, isto é, o momento fletor na extremidade da viga é zero. Entretanto, sabe-se que todas as ligações, apesar de serem classificadas como rígidas, permitem uma certa deformação por flexão. Já as ligações consideradas flexíveis, possuem um certo grau de restrição desta rotação.

A caracterização da resistência destas ligações é representada basicamente, pela curva momento *versus* rotação das mesmas que é um dos dados mais importantes para o projeto e análise de pórticos semi-rígidos. Todavia, nesta análise, é necessário que as ligações sejam modeladas com bastante acurácia sendo extremamente importante conhecer-se o seu real comportamento.

A melhor forma de se obter o real comportamento destas ligações é através de ensaios experimentais realizados em laboratório. Entretanto, o elevado custo destes ensaios e a dificuldade de medição dos resultados experimentais, faz com que esta não seja uma técnica adotada correntemente na prática, limitando-se muitas vezes, a propósitos de investigação. Por outro lado, é através destes ensaios que se torna possível calibrar os diversos modelos existentes para avaliação do comportamento da ligação a partir das suas propriedades mecânicas e geométricas.

Na análise estrutural, uma ligação pode ser representada por uma mola rotacional que faz a ligação entre as linhas médias dos membros que chegam em um nó da estrutura conforme é apresentada na Figura 2.1. O projeto de uma ligação deve definir três propriedades básicas:

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



Figura 2.1 – Propriedades para dimensionamento de uma ligação.

O nível de sofisticação na modelagem do comportamento das ligações viga-coluna depende do tipo de análise estrutural global a ser executada. A curva momento *versus* rotação de uma ligação, usada na análise global de uma estrutura, pode ser simplificada adotando-se uma curva aproximada adequada, incluindo as aproximações lineares (por exemplo, bi-linear ou tri-linear), desde que esta esteja abaixo da curva real da ligação.

Dentre os tipos de análise a serem realizados em uma estrutura, pode-se citar: análise global elástica, análise global rígido-plástica e análise global elasto-plástica. Para uma análise global elástica, as ligações devem ser classificados de acordo com sua rigidez inicial rotacional S_{j,ini}. Neste tipo de análise, a rigidez rotacional pode ser simplificada por S_{j,ini}/ η , onde η pode ser obtido na Tabela 2.1.

Tipo de Ligação	Ligações	Outrso tipos de
	Viga-Coluna	ligações
Soldadas	2	3
Placa de Extremidade Aparafusada	2	3
Cantoneiras Aparafusadas	2	3,5
Placas de base	-	3

Tabela 2.1 - Coeficiente de modificação de rigidez n

Sendo assim, para se classificar as ligações de acordo com a rigidez inicial das mesmas, deve-se observar os limites apresentados na Figura 2.2.



Figura 2.2 – Limites para classificação das ligações de acordo com a rigidez inicial

Para uma análise global rígido-plástica, as ligações devem ser classificadas de acordo com sua resistência ao momento fletor. Já para uma análise elasto-plástica, as ligações devem ser classificadas tanto pela rigidez rotacional quanto pela resistência ao momento fletor.

Os métodos para predição do comportamento de ligações viga-coluna podem ser divididos em cinco diferentes categorias: modelos empíricos, modelos analíticos, modelos mecânicos, modelos de elementos finitos e ensaios experimentais. Dentre os métodos citados acima, os modelos mecânicos são os mais utilizados atualmente.

Os modelos mecânicos utilizados para predição do comportamento de ligações vigacoluna, geralmente conhecidos como modelos de molas, são baseados na simulação da ligação através da utilização de um conjunto de componentes rígidos e flexíveis. A nãolinearidade destes elementos é obtida por meio de leis constitutivas inelásticas adotadas para cada um dos elementos de mola.

A primeira diferença entre os modelos analíticos e mecânicos é que, nos modelos analíticos, as componentes da ligação são caracterizadas através de sua rigidez e resistência derivadas de conceitos básicos da análise estrutural elástica e estados limites, respectivamente. Por outro lado, os modelos mecânicos também utilizam valores de rigidez e resistência para a caracterização das ligações obtidas através de relações empíricas.

A segunda e provavelmente mais importante diferença é que nos modelos analíticos, a atenção é focada na predição da rigidez e do momento resistente da ligação enquanto que nos modelos mecânicos, pretende-se obter também a curva momento versus rotação da ligação.

Os modelos mecânicos têm sido desenvolvidos nos últimos vinte anos por vários pesquisadores, tais como Wales e Rossow [42], Chmielowiec and Richard [43], Tschemmernegg e Humer [44], Silva e Coelho [46], Silva *et al.* [47] e finalmente, Jaspart [48]. Estes modelos mecânicos são apropriados para se caracterizar a ligação desde que se tenha conhecimento das leis constitutivas de cada mola. Estas leis podem ser obtidas através de ensaios experimentados ou por meios analíticos.

O primeiro passo para o desenvolvimento de um modelo mecânico de uma ligação viga-coluna é identificação das componentes presentes na mesma. Estas representam as trajetórias de deformação existentes e os possíveis modos de ruptura da ligação. A componente referente às soldas é muito limitada no que diz respeito às deformações exibindo então, um modo de ruptura frágil. Por esta razão, as soldas não contribuem para a rigidez rotacional da ligação e sua ruptura deve ser absolutamente evitada, não sendo portanto, considerada como uma componente da ligação. Apenas sua resistência deve ser verificada. A seguir, apresenta-se o Método das Componentes por se tratar do modelo mecânico mais completo e utilizado no dimensionamento de ligações estruturais em aço presente no Eurocode 3 [12].

2.2. Descrição do Método das Componentes

O Eurocode 3 (2003) [12] utiliza estes modelos mecânicos para caracterizar o comportamento global de ligações viga-coluna através do Método das Componentes. A obtenção da curva momento *versus* rotação de ligações viga-coluna com a utilização deste método requer a realização dos seguintes passos:

- Identificação das componentes ativas da ligação viga-coluna a ser analisada;
- Obtenção das curvas força versus deslocamento de cada uma destas componentes;
- Associação das componentes em série e em paralelo para obtenção da curva momento versus rotação da ligação.

Até o presente momento, apenas três tipos de ligações viga-coluna são consideradas neste regulamento, ou seja, ligações completamente soldadas, ligações com placa de extremidade e finalmente, ligações com cantoneiras de topo e de apoio. Todavia, a aproximação feita por este método é suficientemente geral e permite que qualquer ligação viga-coluna seja decomposta em várias componentes relevantes ao seu dimensionamento.

Adicionalmente, diferentes níveis de refinamento podem ser adotados na análise do comportamento da curva força *versus* deslocamento de cada componente. Como um exemplo, qualquer fenômeno significativo que afete o comportamento da componente até a ruptura, tal como protensão dos parafusos, encruamento e efeitos de membrana, podem ser incluídos. Esta consideração leva a modelos sofisticados que podem ser usados para fins científicos ou para se obter curvas momento *versus* rotação não-lineares para serem utilizadas em métodos avançadas da análise estrutural.

Neste trabalho, serão abordados dois tipos de ligações aparafusadas. O primeiro com placa de extremidade ajustada à altura da viga e o segundo, com placa de extremidade estendida, isto é, caracterizada pela presença de pelo menos uma linha de parafusos fora da região compreendida entre as mesas da viga. A apresentação do método será efetuada baseada nas ligações com placa de extremidade estendida tendo em vista que, as ligações com placa de extremidade estendida tendo em vista que, as ligações com placa de extremidade estendida tendo em vista que, as ligações com placa de extremidade estendida tendo em vista que, as ligações com placa de extremidade estendida tendo em vista que, as ligações com placa de extremidade ajustada, representam uma simplificação da primeira.

Na Figura 2.3 pode-se facilmente identificar quais são as componentes presentes numa ligação com placa de extremidade estendida diferenciadas por estarem na zona tracionada ou na zona comprimida. Estas componentes são descritas abaixo onde o número entre parêntesis corresponde a identificação da componente de acordo com a nomenclatura presente no Eurocode 3 (2003) [12].

Algumas destas componentes são dependentes do número de linhas de parafusos na zona tracionada e da posição de cada linha de parafusos. Neste caso: mesa da coluna à flexão, placa de extremidade à flexão, parafusos à tração, alma da coluna à tração e mesa da coluna à tração. A contribuição destas componentes tem que ser avaliada considerandose o comportamento de cada linha de parafusos individualmente, ou seja, independente de outras linhas de parafusos e também, como parte de um grupo, isto é, considerando a possível interação com outras linhas de parafusos.

Com referência à ligação em estudo, o modelo mecânico adotado é apresentado na Figura 2.4 onde as componentes que influenciam tanto a resistência à flexão da ligação como também a rigidez à rotação, são representadas por meio de molas elasto-plásticas.



Figura 2.3 – Componentes de uma ligação com placa de extremidade [41].



Figura 2.4 – Modelo mecânico – ligação com placa de extremidade estendida [1].

2.2.1.Resistência à Flexão de uma Ligação

A resistência à flexão da ligação será dada pela eq. (2.1),

$$M_{j,Rd} = \sum_{i=1}^{n_b} h_i F_{i,Rd}$$
 (2.1)

onde F_{i,Rd} é a resistência de cada linha de parafusos em tração; n_b é o número de linhas de parafusos da zona tracionada e h_i é a distância da linha de parafusos ao centro de compressão adotado, ou seja, a linha média da mesa comprimida da viga.

No processo de cálculo da resistência de cada uma das linhas de parafusos em tração, a primeira linha a ser considerada deverá ser aquela que estiver mais distante do centro de compressão da ligação.

2.2.2.Rigidez Inicial de uma Ligação

Com referência ao cálculo da rigidez inicial rotacional da ligação, o processo de cálculo proposto pelo Eurocode 3 [12] é representado na Figura 2.5 onde pode-se observar que a resistência total da ligação é obtida combinando-se os valores de rigidez de cada uma das componentes, associadas em série e posteriormente, em paralelo.



Figura 2.5 – Procedimento para cálculo da rigidez rotacional

O primeiro passo é calcular para cada linha de parafusos em tração, a rigidez efetiva das molas associadas em série, $k_{eff,r}$, dada pela eq. (2.2),

$$k_{eff,r} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{nc} \frac{1}{k_{i,r}}}$$
(2.2)

onde n_c é o número de componentes ativas em cada linha de parafusos e $k_{i,r}$ é o valor de rigidez de cada uma das componentes.

Feito isto, torna-se necessário calcular a rigidez equivalente total das várias linhas de parafusos em tração, associadas em paralelo, através da eq. (2.3),

$$k_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^{nb} k_{eff,i} h_i}{Z_{eq}}$$
 (2.3)

onde h_r é a distância entre a linha de parafusos ao centro de compressão e z_{eq} é o braço de alavanca equivalente dado da eq. (2.4),

$$z_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^{nb} k_{eff,i} h_i^2}{\sum_{i=1}^{nb} k e_{ff,i} h_i}$$
(2.4)

Finalmente, a rigidez inicial rotacional S_{j,ini} será calculada pela eq. (2.5),

$$S_{j,ini} = \frac{Ez^2}{\mu \left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_{eq}}\right)}$$
(2.5)

onde E é o módulo de elasticidade do aço, $k_1 e k_2$ são os valores calculados para a rigidez das componentes 1 e 2, respectivamente, z é o braço de alavanca a ser considerado (ver Figura 2.6) e μ é uma razão entre rijezas (S_{j,ini} / S_j) obtido através da eq. (2.6).



Figura 2.6 – Centro de compressão e braço de alavanca z

A seguir, apresenta-se a formulação necessária para o cálculo da resistência e da rigidez de cada uma das componentes ativas em uma ligação com placa de extremidade estendida.

2.3. Dimensionamento das Componentes

De acordo com o Eurocode 3 [12], a formulação apresentada a seguir somente se aplica se o esforço axial nos membros que compõem a ligação for inferior a 10% da resistência plástica dos mesmos. Considera-se também, que a alma da coluna não possui enrijecedores.

2.3.1.Componente 1 – Alma da coluna ao corte

O dimensionamento desta componente somente será válido se d/t_w \leq 69 ϵ , onde $\epsilon = \sqrt{235 / f_y}$. A resistência ao corte da alma do pilar será dada pela eq. (2.7),

$$V_{wp,Rd} = \frac{0.9 f_{y,wc} A_{vc}}{\sqrt{3} \gamma_{M0}}$$
(2.7)

onde $f_{y,wc}$ é a tensão limite de escoamento da alma da coluna; γ_{M0} é o coeficiente de resistência referente a resistência da seção transversal tornado igual a 1,0 e A_{vc} é a área de corte da alma da coluna, eq. (2.8),

$$A_{vc} = A - 2b_{fc}t_{fc} + (t_{wc} + 2r_{c})t_{fc}$$
 (2.8)

onde A é a área total da seção transversal do perfil da coluna; b_{fc} é a largura da mesa da coluna; t_{wc} é a espessura da alma da coluna; r_c é o raio de concordância e t_{fc} é a espessura da mesa.

O coeficiente de rigidez do painel de alma da coluna, não enrijecido, submetido ao corte é dado pela eq. (2.9),

$$k1 = \frac{0,38A_{vc}}{\beta z}$$
 (2.9)

onde A_{vc} foi definida acima; β é um parâmetro de transformação de acordo com o tipo de ligação que pode ser obtido na Tabela 2.2 e z é a alttura da alma submetida ao cisalhamento decontando-se as mesas e os raios de concordância.

Tipo de ligação	Tipo de carregamento	β
M _{b1,Sd} M _{b1,Sd}	M _{b1,Sd}	β≈1
	$M_{b1,Sd} = M_{b2,Sd}$	$\beta = 0$
M _{b2,Sd} M _{b1,Sd} M _{b2,Sd} M _{b1,Sd}	$M_{b1,Sd} / M_{b2,Sd} > 0$	$\beta \approx 1$
	$M_{b1,Sd} / M_{b2,Sd} < 0$	$\beta \approx 2$
	$M_{b1,Sd} + M_{b2,Sd} = 0$	β≈ 2

Tabela 2.2 – Valores aproximados para o parâmetro de transfomação β

2.3.2.Componente 2 – Alma da coluna à compressão

A alma da coluna está sujeita a forças concentradas trasnmitidas pela mesa da viga. Estas forças produzem tensões normais horizontais que interagem com as tensões cisalhantes na zona do painel e com as tensões normais verticais devido à carga axial e ao momento fletor atuantes na extremidade da coluna, Figura 2.7.



Figura 2.7 – Tensões normais e cisalhantes na zona comprimida da alma da coluna

Conseqüentemente, a resistência do painel de alma da coluna submetido à compressão depende não apenas da força que é distribuída, através da placa de extremidade e da mesa da coluna, pela mesa comprimida da viga, mas também, pela interação entre as tensões localizadas. Sendo assim, a resistência do painel de alma da coluna sujeito à compressão será obtida através da eq. (2.10) e devem ser observadas as propriedades geométricas apresentadas na Figura 2.8.



Figura 2.8 – Propriedades geométricas da componente alma da coluna em compressão

$$\mathsf{F}_{\mathsf{c},\mathsf{wc},\mathsf{Rd}} = \frac{\omega \mathsf{k}_{\mathsf{wc}} \mathsf{b}_{\mathsf{eff},\mathsf{c},\mathsf{wc}} \mathsf{t}_{\mathsf{wc}} \mathsf{f}_{\mathsf{y},\mathsf{wc}}}{\gamma_{\mathsf{M0}}} \Leftrightarrow \mathsf{F}_{\mathsf{c},\mathsf{wc},\mathsf{Rd}} \le \frac{\omega \mathsf{k}_{\mathsf{wc}} \rho \mathsf{b}_{\mathsf{eff},\mathsf{c},\mathsf{wc}} \mathsf{t}_{\mathsf{wc}} \mathsf{f}_{\mathsf{y},\mathsf{wc}}}{\gamma_{\mathsf{M1}}}$$
(2.10)

onde ω é um fator de redução que leva em consideração os possíveis efeitos de interação com o corte no painel da alma da coluna e cujos valores são apresentados na Tabela 2.3, t_{wc} é a espessura da alma da coluna; f_{y,wc} é a tensão de escoamento da alma da coluna, γ_{M1} é um coeficiente de segurança correspondente a flambagem da placa, adotado igual a 1,1 e b_{eff,c,wc} a largura efetiva da alma da coluna à compressão obtida pela eq. (2.11),

considerando-se uma ligação com placa de extremidade aparafusada cuja coluna é constituída por um perfil laminado.

$$b_{eff,c,wc} = t_{fb} + 2\sqrt{2a_b} + 5(t_{fc} + r_c) + s_p$$
 (2.11)

onde s_p é o comprimento obtido pela dispersão à 45° através da placa de extremidade (no mínimo igual a t_p e no máximo igual a $2t_p$) e ρ é o fator de redução devido à flambagem da placa, eq (2.12),

$$\begin{array}{ll} \text{se} & \lambda p \leq 0,72 & \rho = 1,0 \\ \text{se} & \overline{\lambda p} > 0,72 & \rho = \frac{\left(\overline{\lambda p} - 0,2\right)}{{\lambda_p}^2} \end{array} \tag{2.12}$$

onde $\overline{\lambda p}$ é a esbeltez da placa dada pela eq. (2.13),

$$\overline{\lambda p} = 0,932 \sqrt{\frac{b_{eff,c,wc} d_{wc} f_{y,wc}}{Et^2_{wc}}}$$
 (2.13)

onde $d_{wc} = h_c - 2(t_{fc} + r_c)$ para perfis laminados; k_{wc} é um fator de correção que deve ser utilizado sempre que a máxima tensão longitudinal de compressão na alma, devido ao esforço axial ou momento fletor, exceda 0,7f_{y,wc} (adjacente ao raio de concordância para perfis laminados), eq. (2.14)¹

$$se \quad \sigma_{com,Ed} \leq 0.7 f_{y,wc} \qquad k_{wc} = 1,0$$

$$se \quad \sigma_{com,Ed} > 0.7 f_{y,wc} \qquad k_{wc} = 1,7 - \frac{\sigma_{com,Ed}}{f_{y,wc}}$$

$$(2.14)$$

onde $\sigma_{\text{com, Ed}}$ é máxima tensão longitudinal de compressão.

¹ Geralmente, o fator de redução k_{wc} é igual a 1 e nenhuma redução é necessária. Este fator pode ser omitido em cálculos preliminares quando a tensão longitudinal não é conhecida para ser verificado posteriormente.

Parâmetro de transformação β	Parâmetro de redução ω
$0 \le \beta \le 0,5$	ω = 1
0,5 < β < 1	$\boldsymbol{\omega} = \boldsymbol{\omega}_1 + 2 (1 - \beta) (1 - \boldsymbol{\omega}_1)$
$\beta = 1$	$\omega = \omega_1$
1 <β< 2	$\boldsymbol{\omega} = \boldsymbol{\omega}_1 + 2 \left(\beta - 1\right) \left(\boldsymbol{\omega}_2 - \boldsymbol{\omega}_1\right)$
$\beta = 2$	$\omega = \omega_2$
$\omega_{1} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1.3\left(\frac{b_{\text{eff,c,wc}} t_{\text{wc}}}{A_{\text{vc}}}\right)^{2}}}$	$\omega_{2} = \frac{1}{\sqrt{1+5,2\left(\frac{b_{eff,c,wc}} t_{wc}}{A_{vc}}\right)^{2}}}$

Tabela 2.3 – Parâmetro de redução ω

onde A_{vc} e β conforme definições anteriores.

A eq. (2.15) apresenta o coeficiente de rigidez para a componente alma da coluna, não enrijecida, submetida à compressão:

$$k_{2} = \frac{0.7b_{e_{ff,c,wc}}t_{wc}}{d_{c}}$$
(2.15)

2.3.3.Componente 3 – Alma da coluna à tração

Considerando-se a zona tracionada do painel de alma da coluna onde a força concentrada devido à mesa tracionada da viga é aplicada, a distribuição de tensões locais é similar ao caso da componente anterior. Portanto, de forma recíproca, a resistência da alma da coluna, submetida à tração pode ser calculada com a eq. (2.16),

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega b_{eff,c,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M0}}$$
(2.16)

onde $b_{eff,t,wc}$ é a largura da alma da coluna à tração e deve ser igual ao comprimento efetivo do "*T-Stub*", representando a mesa da coluna, descrito a seguir no §2.3.4 e obtido na Tabela 2.4 e ω é obtido na Tabela 2.3 substituindo-se $b_{eff,c,wc}$ por $b_{eff,t,wc}$.

O coeficiente de rigidez para a componente alma da coluna, não enrijecida, submetida à tração é obtido através da eq. (2.17),

$$k_{3} = \frac{0.7b_{eff,t,wc}t_{wc}}{d_{c}}$$
 (2.17)

2.3.4.Componente 4 – Mesa da coluna à flexão

O comportamento da componente mesa da coluna sujeita à flexão pode ser avaliado de forma equivalente ao de um *"T-Stub"* aparafusado. A resistência axial deste *"T-Stub"* aparafusado pode ser calculada considerando-se três diferentes tipos de mecanismos, Figura 2.10.

No caso de perfis cujas mesas tem espessura reduzida, ocorre o completo escoamento desta mesa sem que ocorra a ruptura dos parafusos (modo 1). Neste caso, o mecanismo de colapso é caracterizado pela formação de quatro rótulas plásticas, duas localizadas no eixo dos parafusos devido ao momento fletor provocado pelas forças de alavanca e as outras duas, localizadas no inicio do raio de concordância do perfil, na ligação entre a alma e a mesa do "*T-Stub*". Neste caso, para cada linha de parafusos calcula-se a força usando-se a eq. (2.18). Alguns dos parâmetros geométricos necessários são apresentados na Figura 2.11.

A Figura 2.9 caracteriza o "*T-Stub*" em uma ligação viga-coluna.



a) ligação viga-coluna



b) ligação "*T-Stub*" – modelo para ensaios




Figura 2.10 – Modos de ruptura de um "*T-Stub*" aparafusado.



Figura 2.11 – Definição de parâmetros geométricos – componente 4.

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd}}{m}$$
 (2.18)

onde $M_{pl,1,Rd}$ é obtido através da eq (2.19) e m é definido pela Figura 2.11,

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0.25 I_{eff,1} t^2 {}_{fc} f_{y,fc}}{\gamma_{M0}}$$
 (2.19)

onde $I_{eff,1}$ obtdo na Tabela 2.1; t_{fc} é a espessura da mesa do "*T-Stub*" e $f_{y,fc}$ é a tensão de escoamento da mesa da coluna.

As expressões para cálculo da largura efetiva consideram as diferentes posições de formação das rótulas plásticas. Em particular, no caso do mecanismo tipo 1 a largura efetiva

é dada pelo valor mínimo entre o calculado para formas circulares e para outras formas. Reciprocamente, para o mecanismo tipo 2 a largura efetiva corresponde às formas nãocirculares deve ser adotada. Na Tabela 2.4, as expressões para cálculo destes comprimentos efetivos, para ambos os casos (formas circulares e outras formas) são apresentadas, de acordo com a posição de cada linha de parafusos. Os parâmetros geométricos definidos na Figura 2.11 devem ser considerados.

Quando uma ligação possuir mais do que uma linha de parafusos em tração, três casos possíveis devem ser analisados, Figura 2.12. No primeiro caso, as linhas de ruptura desenvolvem-se separadamente para cada linha de parafusos. No segundo, quando somente algumas linhas de parafusos constituem um grupo. E no terceiro, o grupo de parafusos formado por todas as linhas de parafusos em tração. Para cada linha de parafusos, deve-se considerar sua contribuição individual e em grupo.



Figura 2.12 – Modelos de linhas de ruptura para grupos de linhas de parafusos.

Localização da	Linha de parafusos considerada individualmente			
linha de parafusos	Formas circulares (l _{eff,cp})	Outras formas (I _{eff,nc})		
Linha interna	2πm	4m + 1,25e		
Linha externa	O menor de $\int 2\pi m$	O menor de $\int 4m + 1,25e$		
	$\int \pi m + 2e_1$	$2m + 0,625e + e_1$		
Modo 1	$Ie_{\rm ff,1} = I_{\rm eff,nc}$, mas $Ie_{\rm ff,1} \leq Ie_{\rm ff,cp}$			
Modo 2	$Ie_{ff,2} = I_{eff,nc}$			
Localização da	Linha de parafusos considerada	como parte de um grupo de linhas de		
linha de parafusos	parafusos			
	Formas circulares (l _{eff,cp})	Outras formas (I _{eff,nc})		
Linha interna	2р	р		
Linha externa	O menor de $\int \pi m + p$	$\int 2m + 0.625e + 0.5p$		
Linha externa	O menor de $\begin{cases} \pi m + p \\ 2e_1 + p \end{cases}$	O menor de $\begin{cases} 2m + 0,625e + 0,5p \\ e_1 + 0,5p \end{cases}$		
Linha externa Modo 1	O menor de $\begin{cases} \pi m + p \\ 2e_1 + p \\ \sum \ le_{ff,1} = l_{eff,nc} , m \end{cases}$	$O \text{ menor de } \begin{cases} 2m + 0,625e + 0,5p \\ e_1 + 0,5p \end{cases}$ has $\sum e_{ff,1} \leq \sum e_{ff,cp}$		

Tabela 2.4 – Comprimentos efetivos de um "T-Stub", componente 4

No mecanismo tipo 2, o colapso ocorre pela formação de duas rótulas plásticas localizadas nas seções correspondentes à ligação entre a mesa e a alma do "*T-Stub*" e pela ruptura dos parafusos. Neste caso, as forças do efeito de alavanca tornam-se maiores provocando um aumento nas forças existentes nos parafusos que podem ocasionar a ruptura dos mesmos antes que as mesas atinjam completamente o escoamento nas seções correspondentes aos eixos dos parafusos. Logo, a eq (2.20) deve ser utilizada.

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2M_{pl,2,Rd} + n\Sigma B_{t,Rd}}{m+n}$$
 (2.20)

onde $M_{pl,2,Rd}$ é obtido através da eq. (2.21), m e n (igual a e_{min}) são definidos na Figura 2.11 e $B_{t,Rd}$ é a resistência a tração de um parafuso individualmente (a ser definida posteriormente).

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{0.25I_{eff,2}t^{2}f_{f}f_{y}}{\gamma_{M0}}$$
 (2.21)

onde l_{eff}, é obtido na Tabela 2.1.

Entretanto para perfis onde a espessura da mesa é ainda maior, o mecanismo tipo 3 pode provocar o colapso causado apenas pela ruptura dos parafusos. Neste caso, a resistência à tração dos parafusos irá controlar o dimensionamento, eq. (2.22).

$$F_{T,3,Rd} = \Sigma B_{t,Rd}$$
 (2.22)

A parcela de rigidez referente a esta componente é dada pela eq. (2.23)

$$k_{4} = \frac{0.9I_{eff}t_{tc}^{3}}{m^{3}}$$
 (2.23)

onde l_{eff},é o menor comprimento efetivo (tomado individualmente ou como parte de um grupo) para a linha de parafusos a ser avaliada apresentado na Tabela 2.1 e m é definido na Figura 2.11.

2.3.5.Componente 5 – Placa de extremidade à flexão

Conforme apresentado anteriormente, esta componente também pode ser avaliada considerando-se a formulação do "*T-Stub*" aparafusado. Sendo assim, os valores de resistência são calculados com as mesmas expressões da componente anterior, obedecendo-se os mesmos critérios. Porém, devem ser observadas as definições geométricas apresentadas na Figura 2.13. Nesta figura, pode-se perceber também que os grupos de linhas de parafusos de cada lado da placa de extremidade são tratados como "T-*Stubs*" equivalentes separados. Em placas de extremidade estendidas, a linha de parafusos localizada na parte estendida também deverá ser tratada como um "*T-Stub*" equivalente separado. A resistência e os modos de ruptura também devem ser determinados separadamente, para cada um dos "*T-Stubs*".

~	Linha de parafusos considerada individualmente					
Localização da linha de	Formas circulares	Outras formas				
paratusos	I _{eff,cp}	I _{eff,nc}				
	O menor de	O menor de				
		$[4m_{x} + 1,25e_{x}]$				
Linha acima da mesa	$\int 2\pi m_x$	e + 2m, + 0.625e,				
tracionada da viga	$\frac{1}{\pi}m_x + 2e$	0.5b				
	$\pi m_x + w$	0.5w + 2m + 0.6250				
	(^	$(0,5W + 2III_x + 0,025e_x)$				
Primeira linha abaixo da	2πm	αm				
mesa tracionada da viga		4				
Outra linha intermediaria	2πm	4m + 1,25e				
Linha na extremidade	2πm	4m + 1,25e				
Modo 1	$I_{eff,1} = I_{eff,nc} \text{ mas } I_{eff,1} \leq I_{eff,cp}$					
Modo 2	$I_{eff,2} = I_{eff,nc}$					
	Linha de narafusos c	Linha de parafusos considerada como parte de				
		•				
Localização da linha de	um grupo	·				
Localização da linha de parafusos	um grupo Formas circulares	Outras formas				
Localização da linha de parafusos	um grupo Formas circulares	Outras formas				
Localização da linha de parafusos Linha acima da mesa tracionada da viga	Formas circulares	Outras formas				
Localização da linha de parafusos Linha acima da mesa tracionada da viga Primeira linha abaixo da mesa tracionada da viga	um grupo Formas circulares I _{eff,cp} - πm + p	Outras formas I _{eff,nc} - 0,5p + αm - (2m + 0,625e)				
Localização da linha de parafusos Linha acima da mesa tracionada da viga Primeira linha abaixo da mesa tracionada da viga Outra linha intermediária	um grupo Formas circulares I _{eff,cp} - πm + p 2p	Outras formas I _{eff,nc} - 0,5p + αm – (2m + 0,625e) P				
Localização da linha de parafusos Linha acima da mesa tracionada da viga Primeira linha abaixo da mesa tracionada da viga Outra linha intermediária Linha na extremidade	$\frac{\text{um grupo}}{\text{Formas circulares}}$ $\frac{I_{\text{eff,cp}}}{-}$ $\pi m + p$ $2p$ $\pi m + p$	Outras formas $I_{eff,nc}$ 0,5p + α m - (2m + 0,625e) P 2m + 0,625e + 0,5p				
Localização da linha de parafusos Linha acima da mesa tracionada da viga Primeira linha abaixo da mesa tracionada da viga Outra linha intermediária Linha na extremidade Modo 1	$\frac{\text{Limit do paraticos o c}}{\text{Limit do paraticos o c}} = \frac{1}{\text{L}_{eff,cp}}$ $\frac{-\pi m + p}{2p}$ $\frac{2p}{\pi m + p}$ $\sum_{i=ff,1}^{i} = \sum_{i=ff,nc}^{i} \max_{i=1}^{i} \sum_{i=ff,nc}^{i} \max_{i=1}^{i} \sum_{i=1}^{i} \sum_{i=ff,nc}^{i} \max_{i=1}^{i} \sum_{i=1}^{i} \sum_{i$	$\begin{tabular}{ c c c c } \hline \textbf{Outras formas} \\ \hline \textbf{I}_{eff,nc} \\ \hline & - \\ \hline 0,5p + \alpha m - (2m + 0,625e) \\ \hline \textbf{P} \\ 2m + 0,625e + 0,5p \\ \hline \textbf{I}_{eff,1} \leq \sum \textbf{I}_{eff,cp} \\ \hline \end{tabular}$				

Tabela 2.5 – Comprimentos efetivos de um "T-Stub", componente 5

onde α é obtido com auxilio das curvas apresentadas na Figura 2.14.



Figura 2.13 – Definição de parâmetros geométricos – componente 5.

Os comprimentos efetivos serão calculados conforme as expressões apresentadas na Tabela 2.5. Torna-se necessária também a definição de dois coeficientes, $\lambda_1 e \lambda_2$, equações (2.24) e (2.25), respectivamente. Nestas duas equações, os parâmetros e, m₁ e m₂ são mostrados na Figura 2.14.



Figura 2.14 – Curvas para obtenção do coeficiente α (Eurocode 3).

Através da eq. (2.26), obtém-se a parcela de rigidez referente à componente placa de extremidade submetida à flexão.

$$k_{5} = \frac{0.9I_{eff}t_{p}^{3}}{m^{3}}$$
 (2.26)

onde l_{eff},é o menor comprimento efetivo (tomado individualmente ou como parte de um grupo) para a linha de parafusos a ser avaliada apresentado na Tabela 2.1 e m é definido na Figura 2.11.

2.3.6.Componente 7 – Mesa da Viga à compressão

O modelo mecânico apresentado na Figura 2.4 é direcionado para a obtenção da curva momento *versus* rotação de uma ligação viga-coluna. De fato, a componente mesa da viga à compressão atua como sendo uma limitação da resistência da ligação viga-coluna, não podendo ser maior que a resistência de projeto da viga. Isto significa que a máxima resistência da mesa da viga é compressão será dada pela eq. (2.27),

$$F_{c,fb,Rd} = \frac{M_{c,Rd}}{(h - t_{fb})}$$
 (2.27)

onde $M_{c,Rd}$ é o momento resistente da seção transversal, calculado utilizando-se a eq. (2.28); h é altura da viga e t_{fb} é a espessura da mesa da viga.

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl}f_{y}}{\gamma_{M0}}$$
 (2.28)

onde W_{pl} é o módulo plástico da seção; f_y é a tensão de escoamento e γ_{M0} é um coeficiente de resistência.

Para as componentes mesa da viga à compressão (7) e alma da viga à tração (8), o valor da rigidez deve ser tomado igual a infinito, ou seja, considerando-se que estas componentes possuem um comportamento rígido-plástico. Sendo assim, não é necessário considerar estas duas componentes no cálculo da rigidez global rotacional da ligação.

43

2.3.7.Componente 8 – Alma da viga à tração

A resistência desta componente é determinada com base nas considerações feitas para a componente alma da coluna à tração. Logo, levando-se em conta as propriedades geométricas e mecânicas da viga, a eq. (2.29) deve ser adotada. A largura efetiva b_{eff,t,wb} da alma da coluna à tração deve ser igual ao comprimento efetivo do "*T-Stub*" calculado para a componente placa de extremidade à flexão.

$$F_{t,wb,Rd} = \frac{b_{eff,t,wc} t_{wb} f_{y,wb}}{\gamma_{M0}}$$
 (2.29)

onde t_{wb} e $f_{y,wb}$ são, respectivamente, a espessura e a tensão limite de escoamento da alma da viga.

2.3.8.Componente 10 – Parafusos à tração

A resistência de um parafuso à tração é dada pela eq.(2.30),

$$F_{t,Rd} = \frac{0.6f_{ub}A_0}{\gamma_{M2}}$$
 (2.30)

onde f_{ub} é a tensão última do parafuso; A_0 é área da seção do parafuso e γ_{M2} é um coeficiente de resistência tomado igual a 1,25.

Finalmente, pela eq. (2.31), obtêm-se a parcela de rigidez da componente referente aos parafusos em tração.

$$k_{10} = \frac{1,6A_0}{L_b}$$
 (2.31)

onde L_b é tomado igual a espessura das chapas a serem ligadas mais as arruelas e metade da espessura da cabeça e da porca do parafuso.

3. Caracterização do Modelo Numérico

3.1. Descrição do Modelo

A modelagem numérica deste tipo de problema é complexa desde os requisitos adequados de representação da geometria da ligação até a lei constitutiva do material, condições de contorno e carregamento.

O modelo de elementos finitos utilizado neste trabalho para avaliação de uma ligação *"T-Stub"* aparafusada foi constituído de elementos sólidos com oito nós (SOLID45 – *Ansys Manual Reference,* 2003) [67] com três graus de liberdade por nó, nomeadamente, translações nas direções x, y e z. A Figura 3.1 representa o elemento SOLID45.



Figura 3.1 – Geometria do Elemento SOLID45.

O elemento sólido foi escolhido para a análise por apresentar maior precisão para definir o elemento de contato que será discutido posteriormente.

As propriedades do material utilizado foram: módulo de elasticidade E=200GPa e coeficiente de Poisson v=0,30. Para o aço, os valores de tensão de escoamento adotados na alma e mesa foram, respectivamente, 496 e 431 MPa. Foram utilizados parafusos M12, classe 8.8, com tensão de escoamento de 893 MPa. Adotou-se um comportamento bi-linear elasto-plástico perfeito para todos os materiais. Para as diversas geometrias utilizadas, efetuou-se uma análise não-linear completa considerando a não-linearidade geométrica e do material. Este tipo de análise possibilita obter uma resposta global da ligação efetuando uma comparação coerente entre os resultados obtidos através do Eurocode 3 (2003) [64],

experimentais e os numéricos no que diz ao estado limite último da ligação. O carregamento foi aplicado na forma de deslocamentos na extremidade da alma do "*T-Stub*", na direção z sendo adotado igual a 10,0mm. Não foi introduzida no modelo, a protensão nos parafusos.

Foram adotadas condições de simetria (ver Figura 3.2) entre os planos da alma do *"T-Stub"* e o contato entre as mesas através de elementos de mola LINK10, conforme Figura 3.3 (*Ansys Manual Reference,* 2003) [64]. Este elemento foi posicionado de acordo com a Figura 3.2 (b), tendo em vista que este elemento trabalha melhor quando usado em tração. O travamento do modelo na direção z foi efetuado através do travamento dos nós do corpo do parafuso conforme pode ser observado na Figura 3.2 (b).





c) parafuso completoFigura 3.2 – Modelos da ligação de "T-Stubs".

Com o objetivo de se caracterizar os três modos de ruína comentados anteriormente, foram adotados três modelos distintos de simulação numérica que são apresentados na Figura 3.4.











b) modelo 02

Figura 3.4 – Modelos considerados para as ligações de "T-Stubs".

As dimensões necessárias para a caracterização de cada modelo de "*T-Stub*" considerados neste trabalho são apresentados na Figura 3.5 e os respectivos valores na Tabela 3.1. A Figura 3.6 apresenta detalhe do parafuso utilizado.

Cabe ressaltar que os dados referentes ao modelo 1 foram obtidos do artigo de Bursi e Jaspart [65, 66] e comparados com o resultado experimental apresentado no mesmo. Este processo ocorreu a fim de que se pudesse calibrar a simulação numérica.



Figura 3.5 – Dimensões dos "T-Stubs".

Dimensão (mm)	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
HC	300,0	300,0	300,0
BFC	150,0	150,0	150,0
TFC	10,7	12,8	15,0
TWC	7,1	7,1	7,1
RC	15,0	15,0	15,0
LW	40,0	40,0	40,0
HD	45,0	45,0	45,0
BD	12,0	12,0	12,0
НН	8,8	8,8	8,8
BHI	17,4	17,4	17,4
BHC	15,1	15,1	15,1

Tabela 3.1 – Dimensões dos modelos utilizados



Figura 3.6 – Detalhe do parafuso M12

3.2. Estudo da Malha

A malha utilizada foi escolhida de forma que os elementos tivessem uma proporção e tamanho de forma a evitar problemas numéricos (Bursi and Jaspart, 1997) [48]. A Figura 3.2 (a) apresenta uma malha típica do modelo completo para caracterização do comportamento de uma ligação de um "*T-Stub*". Entretanto, como esta ligação possui dois eixos de simetria, adotou-se o modelo apresentado na Figura 3.2 (b).

Para a escolha da malha foram feitos testes com três tipos de malha distintas, conforme demostrado na Figura 3.7. Estas malhas eram compostas por 1596 elementos com 10977 nós, 2262 elementos com 11559 nós, 1951 elementos com 11430 nós, respectivamente, denominadas T1, T2 e T3. Verificou-se que os resultados encontrados das diferentes malhas eram próximos, considerando-se assim, a fim de diminuir o tempo de processamento, a malha menos carregada, ou seja, 1596 elementos com 10977 nós – Figura 3.7(a).

A Figura 3.8 mostra o gráfico de deslocamento *versus* força encontrado para cada uma das malhas estudadas, comprovando a proximidade dos resultados das malhas distintas.

É importante salientar que a parte inicial da curva, para a análise dos resultados será desprezada, por se tratar de ajustes iniciais do modelo, representando deslocamentos muito pequenos na ligação e que não influenciarão no resultado final do projeto. Estes deslocamentos iniciais ocorreram tendo em vista que não foi considerada a protensão nos parafusos.





- a) 1596 elementos e 10977 nós T1
- b) 2262 elementos e 11559 T2





Figura 3.7 – Malha de elementos finitos – Ligação "T-Stub".



Figura 3.8 – Resultados da calibração da malha.

3.3. Elemento de Contato

Com respeito ao fenômeno da interface do elemento em análise de elementos finitos, a penetração do elemento em zonas de contato é avaliada através da adição da interface especial ou elemento de contato. Geralmente, não é possível definir *a priori* as zonas que sofrem contato devido as diferenças de estágios de carga e correspondentes deformações.

Com o objetivo de descrever a ligação entre a cabeça do parafuso e a mesa do "*T*-*Stub*", foi implementado o elemento de contato nesta região, através da interação entre as superfícies. A introdução do elemento de contato desenvolveu-se através de aplicação de um coeficiente de atrito (μ) entre as áreas de contato, definidas como área de base (plano da mesa do "*T*-*Stub*") e a área de contato, que provocará o atrito entre as superfícies.

Para escolher o coeficiente de atrito adequado ao trabalho, foram desenvolvidos testes para verificar a variação de resultados. Foram desenvolvidos testes com coeficientes de atrito variando de 0,25 a 0,50. Os resultados apresentados para os diferentes coeficientes não apresentaram diferenças significativas, e por este motivo, foi considerado para o desenvolvimento do projeto o coeficiente de atrito (μ) igual a 0,25.

A Figura 3.9 representa área de atuação do contato entre a mesa e o parafuso.



Figura 3.9 – Área de atuação do contato.

4. Análise dos Resultados

Para comparação dos resultados com o modelo 01 foi considerado o resultado experimental apresentado por Jaspart (1998) [48], através do gráfico força x deslocamento - Figura 4.2. Verifica-se que a análise da parte inicial da curva obteve resultados satisfatórios comparados com o experimental. A diferença encontrada na região posterior deve-se ao fato de que a curva da lei constitutiva do material inserida no modelo considerou uma aproximação do que realmente acontece para o aço, conforme apresentado na Figura 4.1, transformando-a em dois seguimentos de reta, limitadas pela tensão de escoamento, diferente do que ocorre na realidade. Isto faz com que o modelo não apresente os mesmos alcances que o ensaio experimental. Todavia, a adoção desta lei consitutiva para o material facilita a identificação dos pontos onde ocorrem a formação de rótulas plásticas no modelo numérico.







Figura 4.2 – Gráfico Forçax Deslocamento.

A Figura 4.3 apresenta a deformada final do modelo numérico e o deslocamento na direção z.









Figura 4.3 – Deformada e deslocamento na direção z do modelo.

A Figura 4.4 apresenta os resultados da distribuição de tensões de Von Mises (em MPa) e sua evolução para o modelo, para um deslocamento aplicado de 1,6712mm. Conforme pode ser observado, neste nível de deslocamento pode-se verificar que a região mais solicitada é a mesa do "*T-Stub*". A Figura 4.5 apresenta a distribuição de Von Mises (em MPa) para o deslocamento de 2,0898mm. É possível verificar que neste incremento de carga, é o corpo do parafuso a região mais solicitada. A Figura 4.6 apresenta a distribuição de Von Mises (em MPa) para o deslocamento de 10,0mm. É possível verificar neste step a formação das duas rótulas plásticas na mesa do "*T-Stub*".







Figura 4.5 – Tensões de Von Mises - Δ=2,0898 mm.





d) localização do ponto na curva

Figura 4.6 – Tensões de Von Mises - Δ=10,0 mm.

Com estes resultados é possível verificar que no modelo estudado ocorre o modo de ruína 1 preconizado com base no Eurocode 3 (2003) [12]. Isto significa que, conforme apresentado na Figura 4.6, somente a mesa do *"T-Stub"* atingiu a plastificação, e como o modelo é reduzido, isto ocorre através do surgimento de duas rótulas plásticas.

A seguir, são apresentados na Figura 4.7, os resultados encontrados para a distribuição de tensões de Von Mises, na Figura 4.8 os deslocamentos e a deformada na direção z para o modelo completo do "*T-Stub*".



a) modelo completo







Figura 4.8 – Deformada e deslocamento em z para o modelo completo.

Com o cálculo apresentado no Anexo A - pode-se verificar que a resistência F_{Rd} para o "*T-Stub*' modelo 01 possui o valor de 116,53 kN, conforme apresentado no gráfico da Figura 4.9.



Figura 4.9 – Gráfico comparativo de resultados – modo de ruptura 1.

A fim de se verificar os demais modos de ruptura, foram ainda desenvolvidos outros dois modelos conforme apresentado no capítulo anterior.

O modelo 2 foi desenvolvido para a avaliação de um "*T-Stub*" cujo dimensionamento é controlado pelo modo de ruptura 2. Neste modo, pode-se verificar na Figura 4.10 que apresenta a distribuição das tensões de *Von Mises*, que tanto a mesa do "*T-Stub*" como o parafuso atingiram valores de tensões correspondentes à plastificação.



Figura 4.10 – Tensões de Von Mises - modelo 2.

Com o cálculo apresentado no Anexo B - pode-se verificar que a F_{Rd} possui o valor de 147,79 kN, conforme apresentado no gráfico da Figura 4.11.



Figura 4.11 – Gráfico comparativo de resultados – modo de ruptura 2.

O modelo 3 foi desenvolvido para apresentar o modo de ruína 3, caracterizado pela ruptura dos parafusos. Isto fica evidenciado na Figura 4.12, onde ocorre a plastificação completa do parafuso, podendo ser observado também o fenômeno de estricção do mesmo.



Figura 4.12 – Tensões de Von Mises - modelo 3.

Com o cálculo apresentado no Anexo C - pode-se verificar que a F_{Rd} possui o valor de 147,79 kN, conforme apresentado no gráfico da Figura 4.13.



Figura 4.13 – Gráfico comparativo de resultados – modo de ruptura 3.

5. Conclusões

Pode-se verificar através dos modelos realizados os três modos de ruína preconizados no Eurocode 3 (2003) [12]. O modelo 1 apresentou o modo de ruptura 1, onde ocorre a formação de rótulas plásticas na mesa do *"T-Stub"* e seu resultado pode ser comparado com o valor experimental. O modelo 2 apresentou o modo de ruptura 2, onde pode-se verificar a plastificação na mesa e no parafuso do modelo. O modelo 3 apresentou o modo de ruína 3, onde ocorre o plastificação apenas no parafuso.

O modelo numérico 1 apresentado, apesar de simplificado, ao ser comparado ao experimental, forneceu resultados aceitáveis no que diz respeito à identificação dos modos de ruína e dos valores encontrados para o mesmo. Para os outros dois modelos, os resultados encontrados também foram satisfatórios, em geral, no que diz respeito a análise dos modos de ruína possíveis para este tipo de ligação aparafusada e em relação aos valores encontrados.

Faz-se necessário um estudo mais apurado quanto ao material, a fim de se aproximar à realidade da lei constitutiva do mesmo ao modelo em estudo e assim, ter resultados mais aproximados ao experimental. Deste modo, os resultados poderão ser ainda melhores. Também para o melhoramento do modelo e a fim de diminuir as variações iniciais no resultado, deve-se aplicar a protensão inicial dos parafusos. Assim, a análise se aproximaria ainda mais da realidade.

Referências Bibliográficas

- LIMA, L. R. O. Avaliação de Ligações Viga-Coluna em Estruturas de Aço Submetidas a Flexão no Eixo de Menor Inércia. 1999. 189f. Dissertação de Mestrado
 Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 1999.
- LIMA, L. R. O. Avaliação de Ligações Viga-Coluna em Estruturas de Aço
 Submetidas a Flexão no Eixo de Menor Inércia. 1999. 189f. Dissertação de Mestrado
 Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 1999.
- LIMA, L. R. O. Avaliação de Ligações Viga-Coluna em Estruturas de Aço
 Submetidas a Flexão no Eixo de Menor Inércia. 1999. 189f. Dissertação de Mestrado
 Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 1999.
- FERREIRA, L. T. S. Sistemas Construtivos Semi-rígidos Mistos para Edificações,
 2000. 300f. Tese de Doutorado Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2000.
- 5 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.
- 6 SIMÕES, R. D. Comportamento de Ligações Mistas Viga-Pilar Sob Acções Estáticas e Cíclicas, 2000. 256f. Tese de Doutorado - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Portugal, 2000.
- 7 JASPART, J. P. Etude de la Semi-rigidité des Noeusds Poutre-colonne et Son Influence Sur la Résistance et la Stabilité des Structures en Acier, 1991. 412 f. Thése de Doctorat, Université de Liège, Belgique, 1991.
- 8 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.

- 9 NEVES, L. F. C. Nós Semi-rígidos em Estruturas Metálicas; Avaliação da Rigidez em Configurações de Eixo Fraco, 1996. 231 f. Tese de Mestrado - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Portugal, 1996.
- 10 NEVES, L. F. C. Nós Semi-rígidos em Estruturas Metálicas; Avaliação da Rigidez em Configurações de Eixo Fraco, 1996. 231 f. Tese de Mestrado - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Portugal, 1996.
- 11 EUROCODE 3, ENV 1993-1-1:1992/A2, Annex J, Design of Steel Structures Joints in Building Frames. CEN, European Committee for Standardisation, Document CEN/TC 250/SC 3, Brussels, 1998.
- 12 EUROCODE 3, prEN 1993-1-8, Design of steel structures Part 1.8: Design of joints ("stage 49 draft"), 2003.
- 13 LAURENT, F. Influence de L'effort Normal sur lê Calcul des Assemblages Semi-Rigides. 1994. 114 f. CUST – Mémoire presente en vue de l'obtention du diplome d'ingénieur, Universite Blaise Pascal – Clermont - Ferrand, Liege, Belgique, 1994.
- 14 CERFONTAINE, F. Etude analytique de l'interaction entre moment de flexion et effort normal dans les assemblages boulonnés. In: Construction Méttalique, nº 4, p. 1-25. 2001.
- SILVA, L. S. and COELHO, A.G. A analytical evaluation of the response of steel joints under bending and axial force. In: Computers & Structures, vol. 79, p. 873-881.
 2001.
- 16 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.
- 17 WALD F., ŠVARC M. Experiments with end plate joints subject to moment and normal force. In: Contributions to Experimental Investigation of Engineering Materials and Structures, CTU Reports No: 2-3, Prague, p. 1-13. 2001.

- 18 SOKOL Z., WALD F., DELABRE V., MUZEAU J. P., SVARC M. Design of end plate joints subject to moment and normal force. In: 3rd European Conference on Steel Structures, EUROSTEEL 2002, Coimbra, Portugal. Proceedings of the Third European Conference on Steel Structures – EUROSTEEL 2002. António Lamas and Luís Simões da Silva Editors, p. 1219-1228. 2002.
- 19 WALD F. Databank of M-N test Praha 2000. 2000. Disponível em: <u>http://www.fsv.cvut.cz/%7Ewald/COST-Praha-C12/INDEX.HTM</u> (acesso em: 25 jun. 2001.
- 20 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.
- 21 WILSON, W. M. and MOORE, H. F. **Tests to Determine the Rigidity of Riveted Joints in Steel Structures**. Bulletin nº 104, Engineering Experiment Station, University of Illinois, Urban, IL, 1917.
- 22 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.
- 23 RATHBUN, J. C. Elastic Properties of Riveted Connections. In: Transactions of ASCE, v. 101, p. 524-563. 1936
- 24 BELL, W. G., CHESSON, E. J. and MUNSE, W. H. Static Tests of Standard Riveted and Bolted Beam-to-Column Connections. University of Illinois, Engineering Experiment Station, Urban, IL. 1959.
- 25 SOMMER, W. H. Behaviour of Welded Header Plate Connections. 1969. Master's Thesis, University of Toronto, ON, Canada, 1969.
- OSTRANDER, J. R. An Experimental Investigation of End-Plate Connections. 1970.
 Master's Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, SK, Canada, 1970.

- 27 BAILEY, J. R. Strength and Rigidity of Bolted Beam-to-Column Connections. Conference on Joints Structures, University of Sheffield. 1970.
- 28 SURTEES, J. O. and MANN, A. P. End-Plate Connections in Plastically Designed Structures. Conference on Joints in Structures, University of Sheffield. 1970.
- 29 AGERSOV, H. **High Strength Bolted Connections Subjected to Prying**. In: Journal of the Structural Division, ASCE, v.102, p. 161-175. 1976.
- 30 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.
- 31 JOHNSON, N. D. and WALPOLE, W. R. Bolted End-Plate Beam-to-Column Connections Under Earthquake Type Loading. Research Report 81-7, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand. 1981.
- 32 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.
- 33 CRUZ, P. J. S., SILVA, L. A. P. S. and RODRIGUES, D. S. SERICON II: A Global Database for Tests on Structural Connections. In: Proceedings of COST C1 International Conference on the Control of Semi-Rigid Behaviour of Civil Engineering Structural Connections, Liege, Belgium. 1998.
- 34 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.
- 35 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.

- 36 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.
- 37 CARVALHO, L. C. V., ANDRADE, S. A. L. and VELLASCO, P. C. G. S. Experimental Analysis of Bolted Semi-Rigid Connections. In: Journal of Constructional Steel Reserarch. Londres: Elsevier, v.46, nº 1-3, p. 1-20. 1998.
- 38 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.
- 39 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, nº 6, p. 1047-1065. 2002.
- RIBEIRO, L. F. L. Comportamento Estrutural de Ligações Viga-Coluna com Chapa de Topo: Análise Teórico-Experimental. 1998. Tese de Doutorado USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
- 41 FAELLA, C., PILUSO, V. and RIZZANO, G. **Structural steel semi-rigid connections: theory, design and software**. 1st. CRC Press LLC, 2000. 328p.
- WALES, M. W. and ROSSOW, E. C. Coupled Moment-Axial Force Behaviour in Bolted Joints. In: Journal of Structural Engineering, ASCE, vol. 129, p. 1250-1266. 1983.
- 43 CHMIELOWIEC, M. and RICHARD, R. M. Moment Rotation Curves for Partially Restrained Steel Connections. In: Report to AISC, University of Arizona, 127. 1987.

- 44 TSCHEMMERNEGG, F. and HUMER, C. **A Non-Linear Joint in Steel Frames**. In: Connections in Steel Structures: Behaviour, Strength and Design, ed. R. Bjorhovde et al., Elsevier Applied Science, London, p. 158-165. 1987.
- 45 TSCHEMMERNEGG, F. and HUMER, C. **A Non-Linear Joint Model for the Design of Structural Steel Frames.** In: Costruzioni Metalliche, n^o 1. 1988.
- 46 SILVA, L.S., COELHO, A.G. and NETO, E. L. Equivalent Post-Buckling Models for the Flexural Behaviour of Steel Connections. In: Computers & Structures, vol. 77, p. 615-624. 2000.
- 47 SILVA, L. S., Lima, L. R. O. de, Vellasco, P. C. G. da S. and Andrade, S. A. L. de. Experimental and Numerical Assessment of Beam-to-Column Joints Under Bending and Axial Force. In: The First International Conference on Steel & Composite Structures, 1st ICSCS 2001, Pusan, Coréia. Proceedings of The First International Conference on Steel & Composite Structures. Pusan: Korea Advanced Institute of Science & Technology, 2001, v1, p.715-722.
- 48 JASPART, J. P. General Report: Session on Connections. In: Journal of Constructional Steel Research, v. 55, p. 69-89. 2000.
- 49 EN 10002 Metallic Materials Tensile Tests. Part1: Method of Test (at ambient temperature). 1990.
- 50 EN 10020 Steel Definition and Classification. 1989
- 51 EN 10025 Hot Rolled Products of Non-Alloy Structural Steel. 1994.
- 52 GAYLORD Jr., H. E., GAYLORD, C. N. and STALLMEYER, J. E. **Design of Steel Structures**. 3rd Edition, McGraw-Hill International Editions. 1992. 513p.
- 53 DALLY, J. W. and RILEY, W. F. **Experimental Stress Analysis**. 3rd ed. McGraw-Hill International Editions. 1991. 639p.

- 54 LIMA, L. R. O. de, SILVA, L. S. da, VELLASCO, P. C. G. da S. and ANDRADE, S. A. L. de. Experimental Analysis of Extended End-Plate Beam-to-Column Joints Under Bending and Axial Force. In: 3rd European Conference on Steel Structures, EUROSTEEL 2002, Coimbra, Portugal. Proceedings of the Third European Conference on Steel Structures EUROSTEEL 2002. António Lamas and Luís Simões da Silva Editors, p. 1121-1130. 2002.
- 55 NEVES, L. F. C., SILVA, L. A. P. S., VELLASCO, P. G. C. Ligações Viga-Coluna de Eixo Fraco Metálicas e Mistas: Avaliação Experimental sob Acções Estáticas Monotónicas. In: III CMM – Conferência Nacional de Construção Metálica e Mista, Aveiro, Portugal. Editado por Lammas & Silva, 2001, v. 1, p. 277-288.
- 56 GIONCU et al. Prediction of Available Ductility by Means of Local Plastic Mechanism Method: Ducttrot Computer Program. In: Moment Resistant Connections of Steel Frames in Seismic Areas – Design and Reliability. Edited by F. M. Mazzolani – E & FN Spon, Taylor e Francis Group. 2000.
- 57 OWENS, G. W., CHEAL, B. D. **Structural Steelwork Connections**, Butterworths & Co. Lda. 1989.
- 58 SILVA, L. A. P. S. da. Post-Limit Stiffness and Ductility of Endplate Beam-to-Column Steel Joints. In: Computers & Structures, v. 80, p. 515-531. 2001.
- 59 KUHLMANN, U., Influence of Axial Forces on the Component: Web Under Compression. In: Proceedings of COST-C1 Working Group Meeting,C1/WG2/99-01.Thessaloniki. 1999.
- 60 FEA LUSAS 13.3 User Manual, FEA Ltd, UK. 2001.
- 61 BORGES, L. **Software Non-Linear Numerical Analysis of Steel Connections**. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Portugal. 2003.
- 62 GERVÁSIO H., SILVA L. S. and BORGES, L. **Reliability Assessment of the Postlimit Stiffness and Ductility of Steel Joints**. In: 3rd European Conference on Steel Structures, EUROSTEEL 2002, Coimbra, Portugal. Proceedings of the Third European

Conference on Steel Structures – EUROSTEEL 2002. António Lamas and Luís Simões da Silva Editors, p. 1027-1038. 2002.

- BORGES, L. C. Probabilistic Evaluation of the Rotational Capacity of Steel Joints.
 2003. 190 f. Dissertação de Mestrado Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 2003.
- 64 Ansys, Inc. Theory Reference (version 8.1), 2003.
- JASPART, J. P., and BURSI, O. S. Basic issues in the finite element simulation of extended end plate connections, In: Computers and Structures, v. 69, p. 361-382.
 1998.
- 66 JASPART, J. P., and BURSI, O. S. Benchmarks for Finite Elements Modeling of Bolted Steel Connections, In: Journal of Constructional Steel Research, v. 43, p. 17-42. 1997.

Anexo A - Dimensionamento das Ligações – Modo de ruptura 01

A.1. Informações Gerais

A.1.1. Características geométricas

	tensão de escoamento	tensão de ruptura
	N/mm ² ou MPa	${ m N/mm}^2$ ou MPa
Alma da Coluna:	496,00	591,00
Mesa do Coluna:	431,00	595,00
Placa de Extremidade:	355,00	510,00
Parafusos à tração:	893,00	974,00
Solda:		576,00
Módulo de elasticidade.:	200000,00 N/	/mm ² ou MPa
Coluna: HE 300 A		
Altura (hc)	:	300 mm

Largura (bfc):	150 mm
Espessura da mesa (tfc):	10,7 mm
Espessura da alma (twc):	7,1 mm
Raio de curvatura (rc):	15 mm
Inércia (Ic):	8360 cm^4
Área (Ac):	53,8 cm ²
Placa de extremidade:	
	(mm)
Largura da placa:	150,00
Altura da placa:	380,00
Espessura da placa:	15,00
Distância vertical entre a mesa da viga	
e a extremidade da placa de extremidade:	80,00
Distância vertical entre a la linha de	
parafusos e a extremidade da placa	
de extremidade:	20,00
Distância vertical entre linhas	
de parafusos 1 e 2:	40,00
Distância vertical entre linhas	
de parafusos 2 e 3:	220,00
Distância horizontal entre parafusos:	90,00
Distância horizontal entre parafusos	
e a extremidade da placa de extremidade:	30,00
Distância vertical entre banzo inferior da	
viga e a extremidade da placa:	0,00

Parafusos:

Diâmetro do parafuso	12,00	mm
Área do parafuso (As = 0,8 * Ab):	84,30	mm ²
Diâmetro da arruela do parafuso:	23,91	mm
Diâmetro da porca	12,00	mm
Diâmetro dos furos	10,00	mm
Espessura da cabeça do parafuso:	8,80	mm
Espessura da porca	10,00	mm
Espessura total de arruelas por parafusos.:	3,00	mm
Comprimento do parafuso	38,10	mm

Soldas:

Espessura	da	solda	da	mesa	da	viga	(af):	8,00 mm
Espessura	da	solda	da	alma	da	viga	(aw):	8,00 mm

A.1.2. Coeficientes de segurança

Gama	$M_0.(resistência$	da	seção cla	asse 1, 2 ou 3 - página 53):	1,00
Gama	$M_1.(resistência$	do	membro a	flambagem - página 53):	1,00
Gama	$M_b.(resistência$	de	ligações	aparafusadas - página 137):	1,00
Gama	$M_w.(resistência$	de	ligações	soldadas – página 137):	1,00

A.2. Cálculo das Componentes – Mesa da coluna à flexão

A.2.1. Parâmetros Geométricos

= 30,00	=	e = distância horizontal entre o parafuso e a borda da coluna
= 30,00	=	emin = distância horizontal entre o parafuso e a borda da placa
= 104,45	=	m = distância entre o parafuso e o início do raio de curvatura
= 30,00	=	n= min(emin ; 1,25m)
= 5,98	=	ew = dw / 4
= 40,00	=	р

A.2.2. Comprimento efetivo do "T-Stub" equivalente

• Parafusos Tomados Individualmente

Formas circulares:		
2 Pi m:	leff,1=	656,28 mm
Formas não-circulares:		
4 m + 1,25 e::	leff,2=	455,30 mm

Primeira linha de parafusos		
Formas circulares:	leffcp=	656,28 mm
Formas não-circulares:	leffnc=	455,30 mm
	1 =	455,30 mm
Segunda linha de parafusos		
Formas circulares:	leffcp=	656,28 mm
Formas não-circulares:	leffnc=	455,30 mm
	1 =	455,30 mm
Parafusos tomados como grupo		
Grupo entre as linhas de parafusos número: (end <i>bolt row</i>)	1 e 2	
Formas circulares:		
Pi m + p:	1 =	368,14 mm
	leffcp=	736,28 mm
Formas não-circulares:		
2m + 0,625e + 0,5p:	1 =	247,65 mm
	leffnc=	495,30 mm
	leff,1=	495,30 mm
A.2.3. Resistência		
Resistência de dimensionamento de 1 parafuso: BtRd = (0,9 * fub * As) / Gama M_b	BtRd =	73,90 kN
Parafusos tomados individualmente		

a) Linha de parafusos número 1

```
Modo de ruptura no T-stub equivalente (tab. 6.2 - pagina 64)
Resistência plástica de dimensionamento do T-stub
Para escoamento completo da mesa (formas circulares ou não circulares)
Mpl1Rd = 0,25 \Sigmaleff,1 tf^2 fy / Gama M<sub>0</sub>.....
                                                   Mpl1Rd=
                                                            5616,72 N.m
Para ruptura dos paraf. c/ escoamento da mesa (formas não circulares)
Mpl2Rd = 0,25 \Sigmaleff,2 tf^2 fy / Gama M<sub>0</sub>.....:
                                                    Mpl2Rd=
                                                                5616,72 N.m
Modo 1 (escoamento completo da mesa).....:
                                                    F1Rd =
                                                                 215,10 kN
F1Rd = 4 * Mpl1Rd / m
Modo 2 (ruptura dos paraf. c/ esc. da mesa).....:
                                                    F2Rd =
                                                                 116,53 kN
F2Rd = (2Mpl2Rd + n\SigmaBtRd) / (m + n)
Modo 3 (ruptura dos parafusos).....
                                                    F3Rd =
                                                                  147,79 kN
F3Rd = \SigmaBtRd
Resistência.....:
                                                    FtRd(1) =
                                                                 116,53 kN
```

b) Linha de parafusos número 2

Modo de ruptura no T-stub equivalente (tab. 6.2 - pagina 64) Resistência plástica de dimensionamento do T-stub Para escoamento completo da mesa (formas circulares ou não circulares) Mpl1Rd = 0,25 Σ leff,1 tf^2 fy / Gama M₀.....: Mpl1Rd= 5616,72 N.m Para ruptura dos paraf. c/ escoamento da mesa (formas não circulares) Mpl2Rd = 0,25 Σ leff,2 tf² fy / Gama M₀..... Mpl2Rd= 5616,72 N.m F1Rd = Modo 1 (escoamento completo da mesa).....: 215,10 kN F1Rd = 4 * Mpl1Rd / m Modo 2 (ruptura dos paraf. c/ esc. da mesa).....: F2Rd = 116,53 kN $F2Rd = (2Mpl2Rd + n\Sigma BtRd) / (m + n)$ Modo 3 (ruptura dos parafusos).....: F3Rd = 147,79 kN F3Rd = Σ BtRd Resistência.....: FtRd(2) =116,53 kN

Parafusos tomados como grupo

a) Grupo entre linhas de parafusos 1 e 2

Modo de ruptura no T-stub equivalente (tab. 6.2 - pagina 64) Resistência plástica de dimensionamento do T-stub Para escoamento completo da mesa (formas circulares ou não circulares) Mpl1Rd = 0,25 Σ leff,1 tf² fy / Gama M₀..... Mpl1Rd= 6110,17 N.m Para ruptura dos paraf. c/ escoamento da mesa (formas não circulares) Mpl2Rd = 0,25 Σ leff,2 tf² fy / Gama M₀.....: Mpl2Rd= 6110,17 N.m F1Rd = 233,99 kN Modo 1 (escoamento completo da mesa).....: F1Rd = 4 * Mpl1Rd / mModo 2 (ruptura dos paraf. c/ esc. da mesa)....: F2Rd = 156,85 kN $F2Rd = (2Mpl2Rd + n\Sigma BtRd) / (m + n)$ Modo 3 (ruptura dos parafusos)..... F3Rd = 295,59 kN F3Rd = Σ BtRd

Resistência..... FtRd(1,2)= 156,85 kN

A.2.4. Rigidez

a) Comprimento efetivo do "T-Stub" equivalente

Linha de parafusos número 1 ("End bolt row")....: leff = 247,65 mm (1) 2Pi m = 656,28 mm 4 m + 1,25 e = 455,30 mm (1 - 2) Pi * m + p = 368,14 mm c/ p = 40,00 mm 2m+0,625e+0,5p= 247,65 mm (1 - 3) Pi * m + p = 458,14 mm c/ p = 130,00 mm 2m+0,625e+0,5p= 292,65 mm

```
Linha de parafusos número 2 ("Inner bolt row")..: leff = 130,00 mm

(2) 2Pi m = 656,28 mm

4 m + 1,25 e = 455,30 mm

(2-3-1) 2 p = 260,00 mm c/ p = 130,00 mm

p = 130,00

Linha de parafusos número 3 ("End bolt row")...: leff = 455,30 mm

2Pi m = 656,28 mm

4 m + 1,25 e = 455,30 mm

(leff é o menor comprimento efetivo para parafusos tomados individualmen-

te ou em grupo)
```

b) Coeficiente de Rigidez

Linha	de parafusos	número	1:	k4(1) =	0,24 mm
Linha	de parafusos	número	2:	k4(2) =	0,13 mm
Linha	de parafusos	número	3	k4(3) =	0,44 mm
(k4 =	0,90*beff*tfo	c^3/m^3)	1		
Anexo B - Dimensionamento das Ligações – Modo de ruptura 02

B.1. Informações Gerais

B.1.1. Características geométricas

	tensão de escoamento	tensão de ruptura
	N/mm ² ou MPa	N/mm^2 ou MPa
Alma da Coluna:	496,00	591,00
Mesa do Coluna:	431,00	595,00
Placa de Extremidade:	355,00	510,00
Parafusos à tração:	893,00	974,00
Solda:		576,00
Módulo de elasticidade.:	200000,00 N/m	m ² ou MPa

Coluna: HE 300 A

Altura (hc):	300	mm
Largura (bfc):	150	mm
Espessura da mesa (tfc)	12,8	mm
Espessura da alma (twc)	7,1	mm
Raio de curvatura (rc)	15	mm
Inércia (Ic):	8360	cm^4
Área (Ac):	53,8	cm^2

Placa de extremidade:

	(mm)
Largura da placa:	150,00
Altura da placa:	380,00
Espessura da placa:	15,00
Distância vertical entre a mesa da viga	
e a extremidade da placa de extremidade:	80,00
Distância vertical entre a la linha de	
parafusos e a extremidade da placa	
de extremidade:	20,00
Distância vertical entre linhas	
de parafusos 1 e 2:	40,00
Distância vertical entre linhas	
de parafusos 2 e 3	220,00
Distância horizontal entre parafusos:	90,00
Distância horizontal entre parafusos	
e a extremidade da placa de extremidade:	30,00
Distância vertical entre banzo inferior da	
viga e a extremidade da placa:	0,00

Parafusos:

Diâmetro do parafuso	12,00	mm
Área do parafuso (As = 0,8 * Ab):	84,30	mm ²
Diâmetro da arruela do parafuso:	23,91	mm
Diâmetro da porca	12,00	mm
Diâmetro dos furos	10,00	mm
Espessura da cabeça do parafuso:	8,80	mm
Espessura da porca	10,00	mm
Espessura total de arruelas por parafusos.:	3,00	mm
Comprimento do parafuso:	40,20	mm

Soldas:

Espessura	da	solda	da	mesa	da	viga	(af):	8,00 mm
Espessura	da	solda	da	alma	da	viga	(aw):	8,00 mm

B.1.2. Coeficientes de segurança

Gama	$M_0.(resistência$	da	seção cla	sse 1, 2 ou 3 - página 53):	1,00
Gama	$M_1.(resistência$	do	membro a	flambagem – página 53):	1,00
Gama	$M_{\rm b}.$ (resistência	de	ligações	aparafusadas – página 137):	1,00
Gama	$M_w.(resistência$	de	ligações	soldadas – página 137):	1,00

B.2. Cálculo das Componentes – Mesa da coluna à flexão

B.2.1. Parâmetros Geométricos

e = distância horizontal entre o parafuso e a borda da coluna	=	30,00 mm
emin = distância horizontal entre o parafuso e a borda da placa	=	30,00 mm
m = distância entre o parafuso e o início do raio de curvatura	=	104,45 mm
n= min(emin ; 1,25m)	=	30,00 mm
ew = dw / 4	=	5,98 mm
p	=	40,00 mm

B.2.2. Comprimento efetivo do "T-Stub" equivalente

• Parafusos Tomados Individualmente

Formas circulares:		
2 Pi m::	leff,1=	656,28 mm
Formas não-circulares:		
4 m + 1,25 e:	leff,2=	455,30 mm
Primeira linha de parafusos		
Formas circulares:	leffcp=	656,28 mm
Formas não-circulares:	leffnc=	455,30 mm
	1 =	455,30 mm

Segunda linha de parafusos		
Formas circulares:	leffcp=	656,28 mm
Formas não-circulares	leffnc=	455,30 mm
	1 =	455,30 mm
 Parafusos tomados como grupo 		
Grupo entre as linhas de parafusos número: (end <i>bolt row</i>) Formas circulares:	1 e 2	
Pi m + p::	1 =	368,14 mm
-	leffcp=	736,28 mm
Formas não-circulares:		
2m + 0,625e + 0,5p:	1 =	247,65 mm
	leffnc=	495,30 mm
	leff,1=	495,30 mm
B.2.3. Resistência		
Resistência de dimensionamento de 1 parafuso BtRd = (0,9 * fub * As) / Gama M _b	BtRd =	73,90 kN

• Parafusos tomados individualmente

a) Linha de parafusos número 1

```
Modo de ruptura no T-stub equivalente (tab. 6.2 - pagina 64)
Resistência plástica de dimensionamento do T-stub
Para escoamento completo da mesa (formas circulares ou não circulares)
Mpl1Rd = 0,25 \Sigmaleff,1 tf<sup>2</sup> fy / Gama M<sub>0</sub>.....
                                                   Mpl1Rd= 8037,76 N.m
Para ruptura dos paraf. c/ escoamento da mesa (formas não circulares)
Mpl2Rd = 0,25 \Sigmaleff,2 tf<sup>2</sup> fy / Gama M<sub>0</sub>.....
                                                   Mpl2Rd=
                                                                8037,76 N.m
                                                     F1Rd =
Modo 1 (escoamento completo da mesa).....:
                                                                  307,81 kN
F1Rd = 4 * Mpl1Rd / m
Modo 2 (ruptura dos paraf. c/ esc. da mesa).....:
                                                     F2Rd =
                                                                   152,54 kN
F2Rd = (2Mpl2Rd + n\Sigma BtRd) / (m + n)
Modo 3 (ruptura dos parafusos).....
                                                     F3Rd =
                                                                   147,79 kN
F3Rd = \SigmaBtRd
Resistência.....:
                                                     FtRd(1) =
                                                                  147,79 kN
```

b) Linha de parafusos número 2

```
Modo de ruptura no T-stub equivalente (tab. 6.2 - pagina 64)
Resistência plástica de dimensionamento do T-stub
Para escoamento completo da mesa (formas circulares ou não circulares)
Mpl1Rd = 0,25 \Sigmaleff,1 tf^2 fy / Gama M<sub>0</sub>.....:
                                                                  8037,76 N.m
                                                    Mpl1Rd=
Para ruptura dos paraf. c/ escoamento da mesa (formas não circulares)
Mpl2Rd = 0,25 \Sigmaleff,2 tf^2 fy / Gama M<sub>0</sub>.....:
                                                   Mpl2Rd=
                                                                 8037,76 N.m
Modo 1 (escoamento completo da mesa).....
                                                     F1Rd =
                                                                  307,81 kN
F1Rd = 4 * Mpl1Rd / m
Modo 2 (ruptura dos paraf. c/ esc. da mesa).....:
                                                    F2Rd =
                                                                  152,54 kN
F2Rd = (2Mpl2Rd + n\Sigma BtRd) / (m + n)
Modo 3 (ruptura dos parafusos).....
                                                    F3Rd =
                                                                  147,79 kN
F3Rd = \SigmaBtRd
Resistência.....:
                                                    FtRd(2) =
                                                                  147,79 kN
```

Parafusos tomados como grupo

a) Grupo entre linhas de parafusos 1 e 2

Modo de ruptura no T-stub equivalente (tab. 6.2 - pagina 64) Resistência plástica de dimensionamento do T-stub Para escoamento completo da mesa (formas circulares ou não circulares) Mpl1Rd = 0,25 Σ leff,1 tf² fy / Gama M₀..... Mpl1Rd= 8743,91 N.m Para ruptura dos paraf. c/ escoamento da mesa (formas não circulares) Mpl2Rd = 0,25 Σ leff,2 tf² fy / Gama M₀.....: Mpl2Rd= 8743,91 N.m Modo 1 (escoamento completo da mesa).....: F1Rd = 334,86 kN F1Rd = 4 * Mpl1Rd / m Modo 2 (ruptura dos paraf. c/ esc. da mesa).....: F2Rd = 196,02 kN $F2Rd = (2Mpl2Rd + n\Sigma BtRd) / (m + n)$ Modo 3 (ruptura dos parafusos)..... F3Rd = 295,59 kN F3Rd = Σ BtRd Resistência.....: FtRd(1,2) =196,02 kN

B.2.4. Rigidez

a) Comprimento efetivo do "T-Stub" equivalente

	Linha de parafusos	número 1 ("End bolt	row"):	leff =	247,65 mm
(1)	2Pi m = 656,28 m	m			
	4 m + 1,25 e =	455,30 mm			
(1 - 2)	Pi * m + p =	368,14 mm c/ p =	40,00 mm		
	2m+0,625e+0,5p=	247,65 mm			
(1 - 3)	Pi * m + p =	458,14 mm c/ p =	130,00 mm		
	2m+0,625e+0,5p=	292,65 mm			

```
Linha de parafusos número 2 ("Inner bolt row")..: leff = 130,00 mm

(2) 2Pi m = 656,28 mm

4 m + 1,25 e = 455,30 mm

(2-3-1) 2 p = 260,00 mm c/ p = 130,00 mm

p = 130,00

Linha de parafusos número 3 ("End bolt row")...: leff = 455,30 mm

2Pi m = 656,28 mm

4 m + 1,25 e = 455,30 mm

(leff é o menor comprimento efetivo para parafusos tomados individualmen-

te ou em grupo)
```

b) Coeficiente de Rigidez

Linha	de	parafusos	número	1:	k4(1)	=	0,41 mm
Linha	de	parafusos	número	2:	k4(2)	=	0,22 mm
Linha	de	parafusos	número	3:	k4(3)	=	0,75 mm
(k4 =	0,9	0*beff*tfo	c^3/m^3)	1			

Anexo C - Dimensionamento das Ligações – Modo de ruptura 03

C.1. Informações Gerais

C.1.1. Características geométricas

	tensão de escoamento	tensão de ruptura
	N/mm ² ou MPa	${ m N/mm}^2$ ou MPa
Alma da Coluna:	496,00	591,00
Mesa do Coluna:	431,00	595,00
Placa de Extremidade:	355,00	510,00
Parafusos à tração:	893,00	974,00
Solda:		576,00
Módulo de elasticidade.:	200000,00 N/m	m² ou MPa

Coluna: HE 300 A

Altura (hc):	300	mm
Largura (bfc):	150	mm
Espessura da mesa (tfc)	15	mm
Espessura da alma (twc)	7,1	mm
Raio de curvatura (rc)	15	mm
Inércia (Ic):	8360	cm^4
Área (Ac):	53,8	cm^2

Placa de extremidade:

	(mm)
Largura da placa:	150,00
Altura da placa:	380,00
Espessura da placa	15,00
Distância vertical entre a mesa da viga	
e a extremidade da placa de extremidade:	80,00
Distância vertical entre a la linha de	
parafusos e a extremidade da placa	
de extremidade:	20,00
Distância vertical entre linhas	
de parafusos 1 e 2	40,00
Distância vertical entre linhas	
de parafusos 2 e 3	220,00
Distância horizontal entre parafusos:	90,00
Distância horizontal entre parafusos	
e a extremidade da placa de extremidade:	30,00
Distância vertical entre banzo inferior da	
viga e a extremidade da placa:	0,00

Parafusos:

Diâmetro do parafuso	12,00	mm
Área do parafuso (As = 0,8 * Ab):	84,30	mm ²
Diâmetro da arruela do parafuso:	23,91	mm
Diâmetro da porca	12,00	mm
Diâmetro dos furos	10,00	mm
Espessura da cabeça do parafuso:	8,80	mm
Espessura da porca	10,00	mm
Espessura total de arruelas por parafusos.:	3,00	mm
Comprimento do parafuso:	42,40	mm

Soldas:

Espessura	da	solda	da	mesa	da	viga	(af):	8,00 mm
Espessura	da	solda	da	alma	da	viga	(aw):	8,00 mm

C.1.2. Coeficientes de segurança

Gama	$M_0.(resistência$	da	seção cla	sse 1, 2 ou 3 - página 53):	1,00
Gama	$M_1.(resistência$	do	membro a	flambagem – página 53):	1,00
Gama	$M_b.(resistência$	de	ligações	aparafusadas - página 137):	1,00
Gama	$M_w.(resistência$	de	ligações	soldadas - página 137):	1,00

C.2. Cálculo das Componentes – Mesa da coluna à flexão

C.2.1. Parâmetros Geométricos

e = distância horizontal entre o parafuso e a borda da coluna	=	30,00 mm
emin = distância horizontal entre o parafuso e a borda da placa	=	30,00 mm
m = distância entre o parafuso e o início do raio de curvatura	=	104,45 mm
n= min(emin ; 1,25m)	=	30,00 mm
ew = dw / 4	=	5,98 mm
p	=	40,00 mm

C.2.2. Comprimento efetivo do "T-Stub" equivalente

• Parafusos Tomados Individualmente

leff,1=	656,28 mm
leff,2=	455,30 mm
leffcp=	656,28 mm
leffnc=	455,30 mm
	<pre>leff,1= leff,2= leffcp=</pre>

Segunda linha de parafusos		
Formas circulares:	leffcp=	656,28 mm
Formas não-circulares:	leffnc=	455,30 mm

1

=

Parafusos tomados como grupo

Grupo entre as linhas de parafusos número: (end <i>bolt row</i>)	1 e 2	
Formas circulares:		
Pi m + p:	1 =	368,14 mm
	leffcp=	736,28 mm
Formas não-circulares:		
2m + 0,625e + 0,5p:	1 =	247,65 mm
	leffnc=	495,30 mm
	leff,1=	495,30 mm

C.2.3. Resistência

```
Resistência de dimensionamento de 1 parafuso..... BtRd = 73,90 kN BtRd = (0,9 * fub * As) / Gama M_b
```

Parafusos tomados individualmente

a) Linha de parafusos número 1

```
Modo de ruptura no T-stub equivalente (tab. 6.2 - pagina 64)
Resistência plástica de dimensionamento do T-stub
Para escoamento completo da mesa (formas circulares ou não circulares)
Mpl1Rd = 0,25 \Sigmaleff,1 tf<sup>2</sup> fy / Gama M<sub>0</sub>.....:
                                                  Mpl1Rd=
                                                              11038,18 N.m
Para ruptura dos paraf. c/ escoamento da mesa (formas não circulares)
Mpl2Rd = 0,25 Σleff,2 tf^2 fy / Gama M<sub>0</sub>..... Mpl2Rd=
                                                             11038,18 N.m
Modo 1 (escoamento completo da mesa).....:
                                                   F1Rd =
                                                                 422,72 kN
F1Rd = 4 * Mpl1Rd / m
Modo 2 (ruptura dos paraf. c/ esc. da mesa).....:
                                                    F2Rd =
                                                                 197,18 kN
F2Rd = (2Mpl2Rd + n\Sigma BtRd) / (m + n)
Modo 3 (ruptura dos parafusos).....
                                                    F3Rd =
                                                                 147,79 kN
F3Rd = \SigmaBtRd
Resistência.....:
                                                   FtRd(1) =
                                                                 147,79 kN
```

455,30 mm

b) Linha de parafusos número 2

```
Modo de ruptura no T-stub equivalente (tab. 6.2 - pagina 64)
Resistência plástica de dimensionamento do T-stub
Para escoamento completo da mesa (formas circulares ou não circulares)
Mpl1Rd = 0,25 \Sigmaleff,1 tf^2 fy / Gama M<sub>0</sub>.....:
                                                     Mpl1Rd=
                                                                 11038,18 N.m
Para ruptura dos paraf. c/ escoamento da mesa (formas não circulares)
Mpl2Rd = 0,25 \Sigmaleff,2 tf^2 fy / Gama M<sub>0</sub>.....:
                                                   Mpl2Rd=
                                                              11038,18 N.m
                                                     F1Rd =
                                                                   422,72 kN
Modo 1 (escoamento completo da mesa).....:
F1Rd = 4 * Mpl1Rd / m
Modo 2 (ruptura dos paraf. c/ esc. da mesa).....:
                                                     F2Rd =
                                                                  197,18 kN
F2Rd = (2Mpl2Rd + n\Sigma BtRd) / (m + n)
Modo 3 (ruptura dos parafusos).....
                                                     F3Rd =
                                                                  147,79 kN
F3Rd = \SigmaBtRd
Resistência.....:
                                                    FtRd(2) =
                                                                  147,79 kN
```

Parafusos tomados como grupo

b) Grupo entre linhas de parafusos 1 e 2

Modo de ruptura no T-stub equivalente (tab. 6.2 - pagina 64) Resistência plástica de dimensionamento do T-stub Para escoamento completo da mesa (formas circulares ou não circulares) Mpl1Rd = 0,25 Σ leff,1 tf² fy / Gama M₀..... Mpl1Rd= 12007,93 N.m Para ruptura dos paraf. c/ escoamento da mesa (formas não circulares) Mpl2Rd = 0,25 Σ leff,2 tf² fy / Gama M₀.....: Mpl2Rd= 12007,93 N.m Modo 1 (escoamento completo da mesa).....: F1Rd = 459,85 kN F1Rd = 4 * Mpl1Rd / m Modo 2 (ruptura dos paraf. c/ esc. da mesa).....: F2Rd = 244,58 kN $F2Rd = (2Mpl2Rd + n\Sigma BtRd) / (m + n)$ Modo 3 (ruptura dos parafusos).....: F3Rd = 295,59 kN F3Rd = Σ BtRd Resistência.....: FtRd(1,2) =244,58 kN

C.2.4. Rigidez

a) Comprimento efetivo do "T-Stub" equivalente

	Linha de parafusos	número 1 ("E	nd bolt	row"):	leff	=	247,65 mm
(1)	2Pi m = 656,28 m	m					
	4 m + 1,25 e =	455,30 mm					
(1 - 2)	Pi * m + p =	368,14 mm c/	p =	40,00 mm			
	2m+0,625e+0,5p=	247,65 mm					
(1 - 3)	Pi * m + p =	458,14 mm c/	p =	130,00 mm			
	2m+0,625e+0,5p=	292,65 mm					

```
Linha de parafusos número 2 ("Inner bolt row")..: leff = 130,00 mm

(2) 2Pi m = 656,28 mm

4 m + 1,25 e = 455,30 mm

(2-3-1) 2 p = 260,00 mm c/ p = 130,00 mm

p = 130,00

Linha de parafusos número 3 ("End bolt row")...: leff = 455,30 mm

2Pi m = 656,28 mm

4 m + 1,25 e = 455,30 mm

(leff é o menor comprimento efetivo para parafusos tomados individualmen-

te ou em grupo)
```

b) Coeficiente de Rigidez

Linha	de	parafusos	número	1	:	k4(1)	=	0,66	mm
Linha	de	parafusos	número	2	:	k4(2)	=	0,35	mm
Linha	de	parafusos	número	3	:	k4(3)	=	1,21	mm
(k4 =	0,9	0*beff*tfo	c^3/m^3)					

Anexo D - Arquivo APDL

Onde "E:"significa explicação.

!E: INICIO DO ARQUIVO !E: APAGA AS INFORMAÇÕES ANTERIORES E NOMEIA O ARQUIVO COM T_STUB !E: INICIA A ENTRADA DE DADOS E MUDA A VISUALIZAÇÃO DOS EIXOS FINISH /CLEAR,START /FILNAME,T_STUB /PREP7 /VIEW,1,1,1,1 /ANG,1 /REP,FAST !*******DEFINIÇÃO DE VARIAVEIS********* !E: ENTRA COM AS VARIÁVEIS DO ARQUIVO ! COLUNA !E: ENTRA COM AS VARIÁVEIS REFERENTES A COLUNA, CONFORME DESCRITO HC=300 !ALTURA BFC=150 !LARGURA DA MESA TFC=15 !ESPESSURA DA MESA TWC=7.1 !ESPESSURA ALMA RC=15 !RAIO DE CURVATURA LW=40 !LARGURA DO T-STUB

HD=45 !DISTÂNCIA VERTICAL EIXO SIMETRIA AO CENTRO FURO

!	/	********** /
!	I	* * TFC
!	I	**** **** /
!	I	* *
!	HC	**TWC
!	I	* *
!	I	**** ****
!	I	* *
!	/	* * * * * * * * * * * *

! /---BFC----/

```
! PARAFUSOS
```

!E: ENTRA COM AS VARIÁVEIS REFERENTES AO PARAFUSO, CONFORME DESCRITO

BD=12	!DIÂMETRO
HH=8.8	!ESPESSURA CABEÇA
BH=10	!DIÂMETRO FUROS
BHI=17.4	!DIÂMETRO INSCRITO CABEÇA PARAFUSO
BHC=0.5*SQRT(3)*BHI	!DIÂMETRO CIRCUNSCRITO CABEÇA PARAFUSO

!*********DIVISÃO MALHA *********

!E: DEFINE AS VARIÁVEIS REFERENTES A DIVISÃO DAS MALHAS

DIV_W_Z=4	!DIVISÃO DIREÇÃO Z (OBRIGATORIAMENTE N PAR)
DIV_W_ALL=2	!DIVISÃO DEMAIS DIRECOES
DIV_W_X=2	!DIVISAO INTERMEDIÁRIA

PTO_APL_DESL=0.5*HC !PONTO DE APLICAÇÃO

!********CARGA NA FORMA DE DESLOCAMENTOS ********

!E: DEFINE O DESLOCAMENTO APLICADA A ESTRUTURA

DESLOCAMENTO=10

!DESLOCAMENTO APLICADO

! PARAMETRIZAÇÃO

!E: DEFINE VARIÁVEIS SECUNDÁRIAS PARA FACILITAR A CONSTRUÇÃO DOS KEYPOINTS

A=(SQRT(((0.5*BHI)**2)+BHC**2))

B=(0.5*BD*BHC)/A

C=(SQRT(((0.25*BHC)**2)+(0.375*BHI)**2))

D=(0.5*BD*0.25*BHC)/C

E=(0.5*BH*BHC)/A

!*************CONSTRUÇÃO T-STUB*********

!**DEFINIÇÃO KEYPOINTS SE O T-STUB** !E: DEFINE OS KEYPOINTS DO T-STUB $! \, \ensuremath{\mathsf{E}}^:$ Comando K, Coordenada X, Coordenada Y, Coordenada Z !ALMA !PLANO YZ K,1,0.5*LW,0,0 K,2,0.5*LW,0,(TFC+0.2929*RC) K,3,0.5*LW,0,(TFC+RC) K,4,0.5*LW,0,0.25*HC K,5,0.5*LW,0.5*TWC,0.25*HC K,6,0.5*LW,0.5*TWC,(TFC+RC) K,7,0.5*LW,(0.5*TWC+0.2929*RC),(TFC+0.2929*RC) K,8,0.5*LW,(0.5*TWC+RC),TFC K,9,0.5*LW,(0.5*TWC+RC),(TFC+RC) !CENTRO DA CURVATURA K, 10, 0.5 * LW, (0.5 * TWC + RC), 0K,11,0.5*LW,(0.5*TWC+0.2929*RC),0 !MESA !PLANO XY K,12,0.5*LW,(HD-0.25*BHC),TFC K,13,0.5*LW,HD,TFC K, 14, 0.5*LW, (HD+0.25*BHC), TFCK,15,0.5*LW,(HD+0.5*BHC),TFC K,16,0.5*LW,0.5*BFC,TFC K,17,0.25*BHI,0.5*BFC,TFC K,18,0,0.5*BFC,TFC K,19,0,(HD+0.5*BH),TFC K,20,0,(HD+0.5*BHC),TFC K,21,0,(HD+0.5*BD),TFC K,22,0,(HD+0.25*BD),TFC K,23,0,HD,TFC K,24,0,(HD-0.25*BD),TFC K,25,0,(HD-0.5*BHC),TFC K,26,0,(HD-0.5*BH),TFC K,27,0,(HD-0.5*BD),TFC K,28,0,(0.5*TWC+RC),TFC K,29,0.25*BHI,(0.5*TWC+RC),TFC

K,30,0.375*BHI,(0.5*TWC+RC),TFC

!ALMA - REGIÃO DO PARAFUSO

!OCTAGONO

K,31,0.25*BHI,(HD-0.5*BHC),TFC

K,32,0.375*BHI,(HD-0.25*BHC),TFC

K,33,0.5*BHI,HD,TFC

K,34,0.375*BHI,(HD+0.25*BHC),TFC

K,35,0.25*BHI,(HD+0.5*BHC),TFC

!PARAFUSO

! MAIOR CIRCUNFERENCIA
K,36,(0.5*BD*(0.5*BHI))/A,HD-B,TFC
K,37,(0.5*BD*(0.375*BHI))/C,HD-D,TFC
K,38,0.5*BD,HD,TFC
K,39,(0.5*BD*(0.375*BHI))/C,HD+D,TFC
K,40,(0.5*BD*(0.5*BHI))/A,HD+B,TFC

!MEDIA CIRCUNFERENCIA

K,41,(0.5*BH*(0.5*BHI))/A,HD-E,TFC
K,42,(0.5*BH*(0.375*BHI))/C,HD-(0.5*BH*0.25*BHC)/C,TFC
K,43,0.5*BH,HD,TFC
K,44,(0.5*BH*(0.375*BHI))/C,HD+(0.5*BH*0.25*BHC)/C,TFC
K,45,(0.5*BH*(0.5*BHI))/A,HD+E,TFC

!MENOR CIRCUNFERENCIA

K,46,(0.25*BD*(0.5*BHI))/A,HD-(0.25*BD*BHC)/A,TFC
K,47,(0.25*BD*(0.375*BHI))/C,HD-(0.25*BD*0.25*BHC)/C,TFC
K,48,0.25*BD,HD,TFC
K,49,(0.25*BD*(0.375*BHI))/C,HD+(0.25*BD*0.25*BHC)/C,TFC
K,50,(0.25*BD*(0.5*BHI))/A,HD+(0.25*BD*BHC)/A,TFC



Figura D. 1 - Keypoints

!**CONSTRUCAO DAS LINHAS E ARCOS** !E: DEFINE AS LINHAS A PARTIR DOS KEYPOINTS FEITOS !E: COMANDO L,KEYPOINT INICIAL,KEYPOINT FINAL - FORMAÇÃO DE LINHAS RETAS !E: COMANDO LARC, KEYPOINT INICIAL, KEYPOINT FINAL, KEYPOINT CENTRO, RAIO - FORMAÇÃO DE ARCOS !ALMA !PLANO YZ L,1,2 L,2,3 L,3,4 L,4,5 ц,5,6 LARC, 6, 7, 9, RC LARC, 7, 8, 9, RC L,8,10 L,8,10 L,10,11 L,11,1 L,3,6 L,2,7 ц,7,11 !MESA !PLANO XY L,8,12 L,12,13 L,13,14 L,14,15

- L,17,18 L,18,20
- L,20,21
- L,21,19
- L,19,22
- L,22,23
- L,23,24
- L,24,26
- L,26,27
- L,27,25
- L,25,28
- L,28,29
- L,29,30
- L,30,8

!MESA - REGIÃO DO PARAFUSO

- ! OCTAGONO
- L,25,31
- L,31,32
- L,32,33
- L,33,34
- L,34,35
- L,35,20

! PARAFUSO

! MAIOR CIRCUNFERENCIA LARC, 27, 36, 23, 0.5*BD LARC, 36, 37, 23, 0.5*BD LARC, 37, 38, 23, 0.5*BD LARC, 38, 39, 23, 0.5*BD LARC, 39, 40, 23, 0.5*BD LARC, 40, 21, 23, 0.5*BD

!MEDIA CIRCUNFERENCIA LARC, 26, 41, 23, 0.5*BH LARC, 41, 42, 23, 0.5*BH LARC, 42, 43, 23, 0.5*BH LARC, 43, 44, 23, 0.5*BH LARC, 44, 45, 23, 0.5*BH LARC, 45, 19, 23, 0.5*BH

!MENOR CIRCUNFERENCIA

LARC,24,46,23,0.25*BD

LARC,46,47,23,0.25*BD

LARC, 47, 48, 23, 0.25*BD

LARC,48,49,23,0.25*BD

LARC,49,50,23,0.25*BD

LARC,50,22,23,0.25*BD

!LIGACOES INTERNAS

!E: DEFINE AS LINHAS INTERNAS DA MESA

L,31,29

L,32,30

L,32,12

L,33,13

L,34,14

L,35,15

L,35,17

L,23,50

L,50,45

L,45,40

L,40,35

L,23,49

L,49,44

L,44,39

L,39,34

L,23,48

L,48,43

L,43,38

L,38,33

L,23,47

L,47,42 L,42,37

L,37,32

L,23,46

L,46,41

L,41,36

L,36,31



Figura D. 2 - Linhas

!** DEFINIÇAO DAS AREAS **

!E: DEFINE AS ÁREAS A PARTIR DAS LINHAS FEITAS

!E: COMANDO AL,LINHA 1,LINHA 2,LINHA 3,LINHA 4

!PLANO YZ

AL,3,4,5,11

AL,2,11,6,12

AL,1,12,13,10

AL,13,7,8,9

!PLANO XY

AL,31,30,34,58

AL,32,58,35,59

AL,33,59,60,14

AL,60,36,61,15

AL,61,37,62,16

AL,62,38,63,17 AL,63,64,19,18 AL,39,21,20,64

! OCTAGONO

AL, 34, 29, 40, 84 AL, 35, 84, 41, 80 AL, 36, 80, 42, 76 AL, 37, 76, 43, 72 AL, 38, 72, 44, 68 AL, 39, 68, 45, 22

! MAIOR CIRCUNFERJNCIA

AL,28,46,83,40

AL,83,47,79,41

AL,79,48,75,42

AL,75,49,71,43

AL,71,50,67,44

AL,67,51,23,45

!MIDIA CIRCUNFERJNCIA

AL,46,27,52,82

AL,47,82,53,78

AL,48,78,54,74

AL,49,74,55,70

AL,50,70,56,66

AL,51,66,57,24

!MENOR CIRCUNFERJNCIA

AL,52,26,81

AL,53,81,77

AL,54,77,73

AL,55,73,69

AL,56,69,65

AL,57,65,25



Figura D. 3 - Áreas

!** DIVISAO DAS LINHAS PARA GERACAO DA MALHA **

!E: DEFINE O NÚMERO DE DIVISÕES DE CADA LINHA PARA A POSTERIOR FORMAÇÃO DA MALHA

!E: COMANDO LESIZE,LINHA,,,DIVISÃO

!PLANO YZ

!LINHAS PERTENCENTES A ALMA DA VIGA

LESIZE,3,,,DIV_W_Z

LESIZE,5,,,DIV_W_Z

LESIZE,4,,,DIV_W_ALL

LESIZE,10,,,DIV_W_ALL

LESIZE,11,,,DIV_W_ALL

LESIZE,12,,,DIV_W_ALL

LESIZE,2,,,DIV_W_ALL

LESIZE,6,,,DIV_W_ALL

!LINHAS PERTENCENTES A MESA DA VIGA LESIZE,1,,,DIV_W_ALL LESIZE,8,,,DIV_W_ALL LESIZE,13,,,DIV_W_ALL

LESIZE,7,,,DIV_W_X

LESIZE,9,,,DIV_W_X

!LINHAS PERTENCENTES A MESA DA COLUNA LESIZE,33,,,DIV_W_X LESIZE,60,,,DIV_W_X LESIZE,62,,,DIV_W_X LESIZE,61,,,DIV_W_X LESIZE,63,,,DIV_W_X LESIZE,19,,,DIV_W_X

LESIZE, 32, ,, DIV_W_ALL LESIZE, 35, ,, DIV_W_ALL LESIZE, 41, ,, DIV_W_ALL LESIZE, 47, ,, DIV_W_ALL LESIZE, 53, ,, DIV_W_ALL

LESIZE, 31,,,DIV_W_ALL LESIZE, 34,,,DIV_W_ALL LESIZE, 40,,,DIV_W_ALL LESIZE, 46,,,DIV_W_ALL LESIZE, 52,,,DIV_W_ALL

LESIZE,15,,,DIV_W_ALL
LESIZE,36,,,DIV_W_ALL
LESIZE,42,,,DIV_W_ALL
LESIZE,48,,,DIV_W_ALL
LESIZE,54,,,DIV_W_ALL

LESIZE,16,,,DIV_W_ALL LESIZE,37,,,DIV_W_ALL LESIZE,43,,,DIV_W_ALL LESIZE,49,,,DIV_W_ALL LESIZE,55,,,DIV_W_ALL

LESIZE,17,,,DIV_W_ALL
LESIZE,38,,,DIV_W_ALL
LESIZE,44,,,DIV_W_ALL
LESIZE,50,,,DIV_W_ALL
LESIZE,56,,,DIV_W_ALL

LESIZE,20,,,DIV_W_ALL

LESIZE,39,,,DIV_W_ALL LESIZE,45,,,DIV_W_ALL LESIZE,51,,,DIV_W_ALL LESIZE,57,,,DIV_W_ALL

LESIZE,22,,,DIV_W_ALL LESIZE,68,,,DIV_W_ALL LESIZE,72,,,DIV_W_ALL LESIZE,76,,,DIV_W_ALL LESIZE,80,,,DIV_W_ALL LESIZE,84,,,DIV_W_ALL LESIZE,29,,,DIV_W_ALL

LESIZE,23,,,DIV_W_ALL LESIZE,67,,,DIV_W_ALL LESIZE,71,,,DIV_W_ALL LESIZE,75,,,DIV_W_ALL LESIZE,79,,,DIV_W_ALL LESIZE,83,,,DIV_W_ALL LESIZE,28,,,DIV_W_ALL

LESIZE,24,,,DIV_W_ALL LESIZE,66,,,DIV_W_ALL LESIZE,70,,,DIV_W_ALL LESIZE,74,,,DIV_W_ALL LESIZE,78,,,DIV_W_ALL LESIZE,82,,,DIV_W_ALL LESIZE,27,,,DIV_W_ALL

LESIZE,25,,,DIV_W_ALL LESIZE,65,,,DIV_W_ALL LESIZE,69,,,DIV_W_ALL LESIZE,73,,,DIV_W_ALL LESIZE,77,,,DIV_W_ALL LESIZE,81,,,DIV_W_ALL LESIZE,26,,,DIV_W_ALL LESIZE,30,,,DIV_W_X LESIZE,58,,,DIV_W_X LESIZE,59,,,DIV_W_X LESIZE,14,,,DIV_W_X

LESIZE,21,,,DIV_W_X LESIZE,64,,,DIV_W_X LESIZE,18,,,DIV_W_X





!** EXTRUSAO DO T-STUB + PARAFUSO **

!E: EXTRUSÃO DO T-STUB PARA A FORMACAO DO VOLUME

!E: COMANDO VEXT,LINHA INICIAL, LINHA FINAL,CONTAGEM ENTRE AS LINHAS,0,0,ESPESSURA

!MESA + FUSTE DIRECAO Z

VEXT, 5, 18, 1, 0, 0, -TFC

VEXT, 25, 36, 1, 0, 0, -TFC

!ALMA DIRECAO X - FASE 1
VEXT,1,4,1,-(0.5*LW-0.375*BHI),0,0

!ALMA DIRECAO X - FASE 2
VEXT,127, , ,-0.125*BHI,0,0
VEXT,132,140,4,-0.125*BHI,0,0

!ALMA DIRECAO X - FASE 3
VEXT,158, , ,-0.25*BHI,0,0
VEXT,144,154,5,-0.25*BHI,0,0



Figura D. 5 - Extrusão

!** DIVISAO DAS LINHAS PARA GERACAO DA MALHA PARA S-EXTRUSAO **
!E: DEFINE O NÚMERO DE DIVISÕES DAS LINHAS FORMADAS NA EXTRUSÃO
!E: COMANDO LESIZE,LINHA,,,DIVISÃO

LESIZE,89,,,DIV_W_ALL
LESIZE,90,,,DIV_W_ALL
LESIZE,96,,,DIV_W_ALL
LESIZE,101,,,DIV_W_ALL

LESIZE,92,,,DIV_W_ALL LESIZE,135,,,DIV_W_ALL LESIZE,138,,,DIV_W_ALL LESIZE,141,,,DIV_W_ALL LESIZE,144,,,DIV_W_ALL LESIZE,147,,,DIV_W_ALL

LESIZE,91,,,DIV_W_ALL LESIZE,97,,,DIV_W_ALL LESIZE,107,,,DIV_W_ALL LESIZE,112,,,DIV_W_ALL LESIZE,117,,,DIV_W_ALL LESIZE,126,,,DIV_W_ALL

LESIZE,127,,,DIV_W_ALL
LESIZE,121,,,DIV_W_ALL
LESIZE,122,,,DIV_W_ALL

LESIZE,102,,,DIV_W_ALL LESIZE,106,,,DIV_W_ALL LESIZE,111,,,DIV_W_ALL LESIZE,116,,,DIV_W_ALL

LESIZE,131,,,DIV_W_ALL
LESIZE,132,,,DIV_W_ALL

LESIZE,86,,,DIV_W_X LESIZE,88,,,DIV_W_X

LESIZE,94,,,DIV_W_X LESIZE,99,,,DIV_W_X LESIZE,98,,,DIV_W_X LESIZE,93,,,DIV_W_ALL LESIZE,85,,,DIV_W_ALL LESIZE,103,,,DIV_W_ALL LESIZE,100,,,DIV_W_X

LESIZE,146,,,DIV_W_ALL LESIZE,152,,,DIV_W_ALL LESIZE,153,,,DIV_W_ALL LESIZE,154,,,DIV_W_ALL LESIZE,155,,,DIV_W_ALL LESIZE,159,,,DIV_W_ALL LESIZE,160,,,DIV_W_ALL LESIZE,164,,,DIV_W_ALL LESIZE,165,,,DIV_W_ALL LESIZE,169,,,DIV_W_ALL LESIZE,170,,,DIV_W_ALL LESIZE,174,,,DIV_W_ALL LESIZE,175,,,DIV_W_ALL LESIZE,179,,,DIV_W_ALL LESIZE,180,,,DIV_W_ALL LESIZE,183,,,DIV_W_ALL

LESIZE,216,,,DIV_W_ALL

LESIZE,217,,,DIV_W_ALL LESIZE,218,,,DIV_W_ALL LESIZE,219,,,DIV_W_ALL LESIZE,224,,,DIV_W_ALL LESIZE,225,,,DIV_W_ALL LESIZE,226,,,DIV_W_ALL LESIZE,227,,,DIV_W_ALL LESIZE,231,,,DIV_W_ALL LESIZE,232,,,DIV_W_ALL LESIZE,236,,,DIV_W_ALL LESIZE,237,,,DIV_W_ALL LESIZE,242,,,DIV_W_ALL LESIZE,243,,,DIV_W_ALL LESIZE,244,,,DIV_W_ALL LESIZE,245,,,DIV_W_ALL LESIZE,250,,,DIV_W_ALL LESIZE,251,,,DIV_W_ALL LESIZE,252,,,DIV_W_ALL LESIZE,253,,,DIV_W_ALL LESIZE,258,,,DIV_W_ALL LESIZE,259,,,DIV_W_ALL LESIZE,260,,,DIV_W_ALL LESIZE,261,,,DIV_W_ALL LESIZE,265,,,DIV_W_ALL LESIZE,266,,,DIV_W_ALL

LESIZE,100,,,DIV_W_X LESIZE,193,,,DIV_W_X LESIZE,194,,,DIV_W_X LESIZE,195,,,DIV_W_X LESIZE,196,,,DIV_W_X LESIZE,200,,,DIV_W_X LESIZE,201,,,DIV_W_X LESIZE,205,,,DIV_W_X LESIZE,206,,,DIV_W_X LESIZE,210,,,DIV_W_X !EXTRUSAO COMPLEMENTO ALMA
VEXT,129,146,17,0,0,0.25*HC
VEXT,169, , ,0,0,0.25*HC



Figura D. 6 – Extrusão da alma

!DIVISAO LINHAS PARA APLICACAO MALHA - COMPLEMENTO ALMA LESIZE,269,,,DIV_W_ALL LESIZE,267,,,DIV_W_ALL LESIZE,268,,,DIV_W_X LESIZE,270,,,DIV_W_X LESIZE,271,,,DIV_W_Z LESIZE,272,,,DIV_W_Z LESIZE,273,,,DIV_W_Z LESIZE,274,,,DIV_W_Z LESIZE,275,,,DIV_W_ALL LESIZE,276,,,DIV_W_ALL LESIZE,277,,,DIV_W_ALL LESIZE,278,,,DIV_W_Z LESIZE,279,,,DIV_W_Z LESIZE,280,,,DIV_W_ALL LESIZE,281,,,DIV_W_ALL LESIZE,282,,,DIV_W_ALL LESIZE,283,,,DIV_W_ALL $\texttt{LESIZE}, \texttt{284}, , , \texttt{DIV}_W_Z$ LESIZE,285,,,DIV_W_Z LESIZE,286,,,DIV_W_Z LESIZE,287,,,DIV_W_Z

!-----CABECA DO PARAFUSO PARA O ELEMENTO DE CONTATO-----

!E: CRIAÇÃO DE KEYPOINTS PARA A CABEÇA DO PARAFUSO

!**CABECA DO PARAFUSO**

!KEYPOINTS

!E: DEFINE OS KEYPOINTS DA CABEÇA DO PARAFUSO

!E: COMANDO K,COORDENADA X,COORDENADA Y,COORDENADA Z

!PLANO XY

K,200,0,(HD+0.5*BH),TFC+0.02
K,201,0,(HD+0.5*BHC),TFC+0.02
K,202,0,(HD+0.5*BD),TFC+0.02
K,203,0,(HD+0.25*BD),TFC+0.02
K,204,0,HD,TFC+0.02
K,205,0,(HD-0.25*BD),TFC+0.02
K,206,0,(HD-0.5*BHC),TFC+0.02
K,208,0,(HD-0.5*BD),TFC+0.02

! OCTAGONO

K,209,0.25*BHI,(HD-0.5*BHC),TFC+0.02
K,210,0.375*BHI,(HD-0.25*BHC),TFC+0.02
K,211,0.5*BHI,HD,TFC+0.02
K,212,0.375*BHI,(HD+0.25*BHC),TFC+0.02
K,213,0.25*BHI,(HD+0.5*BHC),TFC+0.02

! MAIOR CIRCUNFERENCIA

K,214,(0.5*BD*(0.5*BHI))/A,HD-B,TFC+0.02
K,215,(0.5*BD*(0.375*BHI))/C,HD-D,TFC+0.02
K,216,0.5*BD,HD,TFC+0.02
K,217,(0.5*BD*(0.375*BHI))/C,HD+D,TFC+0.02
K,218,(0.5*BD*(0.5*BHI))/A,HD+B,TFC+0.02

!MEDIA CIRCUNFERENCIA

K,219,(0.5*BH*(0.5*BHI))/A,HD-E,TFC+0.02
K,220,(0.5*BH*(0.375*BHI))/C,HD-(0.5*BH*0.25*BHC)/C,TFC+0.02
K,221,0.5*BH,HD,TFC+0.02

K,222,(0.5*BH*(0.375*BHI))/C,HD+(0.5*BH*0.25*BHC)/C,TFC+0.02
K,223,(0.5*BH*(0.5*BHI))/A,HD+E,TFC+0.02

!MENOR CIRCUNFERENCIA

K,224,(0.25*BD*(0.5*BHI))/A,HD-(0.25*BD*BHC)/A,TFC+0.02
K,225,(0.25*BD*(0.375*BHI))/C,HD-(0.25*BD*0.25*BHC)/C,TFC+0.02
K,226,0.25*BD,HD,TFC+0.02
K,227,(0.25*BD*(0.375*BHI))/C,HD+(0.25*BD*0.25*BHC)/C,TFC+0.02
K,228,(0.25*BD*(0.5*BHI))/A,HD+(0.25*BD*BHC)/A,TFC+0.02

!LINHAS

!E: DEFINE AS LINHAS A PARTIR DOS KEYPOINTS FEITOS PARA A CABEÇA DO PARAFUSO
!E: COMANDO L,KEYPOINT INICIAL,KEYPOINT FINAL - FORMAÇÃO DE LINHAS RETAS
!E: COMANDO LARC,KEYPOINT INICIAL,KEYPOINT FINAL,KEYPOINT CENTRO,RAIO - FORMAÇÃO DE ARCOS

!PLANO XY

L,201,202

L,202,200

- L,200,203
- L,203,204
- L,204,205
- L,205,207
- L,207,208

L,208,206

! OCTAGONO

L,206,209

- L,209,210
- L,210,211
- L,211,212

L,212,213

L,213,201

! MAIOR CIRCUNFERENCIA LARC,208,214,204,0.5*BD LARC,214,215,204,0.5*BD LARC,215,216,204,0.5*BD LARC, 216, 217, 204, 0.5*BD LARC, 217, 218, 204, 0.5*BD LARC, 218, 202, 204, 0.5*BD

!MIDIA CIRCUNFERENCIA LARC,207,219,204,0.5*BH LARC,219,220,204,0.5*BH LARC,220,221,204,0.5*BH LARC,221,222,204,0.5*BH LARC,222,223,204,0.5*BH

!MENOR CIRCUNFERENCIA LARC,205,224,204,0.25*BD LARC,224,225,204,0.25*BD LARC,225,226,204,0.25*BD LARC,226,227,204,0.25*BD LARC,227,228,204,0.25*BD

!LIGACOES INTERNAS

- L,209,214
- L,210,215
- L,211,216
- L,212,217
- L,213,218
- L,201,202

L,219,214

- L,220,215
- L,221,216
- L,222,217
- L,223,218

L,224,219

- L,225,220
- L,226,221

L,227,222 L,228,223 L,204,224 L,204,225

L,204,226

L,204,227

L,204,228

!AREAS

!E:	DEFINE	AS	ÁREAS	A	PARTIR	DAS	LINH	IAS	FEITA	4S
!E:	COMANDO) Al	.,LINHA	. 1	L,LINHA	2,L	INHA	3,1	LINHA	4

! OCTAGONO

AL, 295, 302, 320, 296 AL, 320, 303, 321, 297 AL, 321, 304, 322, 298 AL, 322, 305, 323, 299 AL, 323, 306, 324, 300 AL, 324, 307, 288, 301

! MAIOR CIRCUNFERENCIA
AL,294,308,325,302
AL,325,309,326,303
AL,326,310,327,304
AL,327,311,328,305
AL,328,312,329,306

AL,329,313,289,307

!MEDIA CIRCUNFERENCIA

AL, 293, 314, 330, 308 AL, 330, 315, 331, 309 AL, 331, 316, 332, 310 AL, 332, 317, 333, 311 AL, 333, 318, 334, 312 AL, 334, 319, 290, 313 MENOR CIRCUNFERENCIA

AL,292,335,314

AL,335,336,315

AL,336,337,316

AL,337,338,317

AL,338,339,318

AL,339,291,319

!** DIVISAO DAS LINHAS PARA GERACAO DA MALHA **

!E: DEFINE O NÚMERO DE DIVISÕES DAS LINHAS

!E: COMANDO LESIZE,LINHA,,,DIVISÃO

!LINHAS PERTENCENTES A MESA DA COLUNA LESIZE,296,,,DIV_W_ALL LESIZE,297,,,DIV_W_ALL LESIZE,298,,,DIV_W_ALL LESIZE,299,,,DIV_W_ALL LESIZE,300,,,DIV_W_ALL LESIZE,301,,,DIV_W_ALL

LESIZE,302,,,DIV_W_ALL LESIZE,303,,,DIV_W_ALL LESIZE,304,,,DIV_W_ALL LESIZE,305,,,DIV_W_ALL LESIZE,306,,,DIV_W_ALL LESIZE,307,,,DIV_W_ALL

LESIZE, 308,,,DIV_W_ALL LESIZE, 309,,,DIV_W_ALL LESIZE, 310,,,DIV_W_ALL LESIZE, 311,,,DIV_W_ALL LESIZE, 312,,,DIV_W_ALL LESIZE, 313,,,DIV_W_ALL

LESIZE,314,,,DIV_W_ALL
LESIZE,315,,,DIV_W_ALL
LESIZE,316,,,DIV_W_ALL

LESIZE,317,,,DIV_W_ALL LESIZE,318,,,DIV_W_ALL LESIZE,319,,,DIV_W_ALL

LESIZE,288,,,DIV_W_ALL LESIZE,289,,,DIV_W_ALL LESIZE,290,,,DIV_W_ALL LESIZE,291,,,DIV_W_ALL LESIZE,292,,,DIV_W_ALL LESIZE,293,,,DIV_W_ALL LESIZE,294,,,DIV_W_ALL LESIZE,295,,,DIV_W_ALL

LESIZE,335,,DIV_W_ALL
LESIZE,330,,DIV_W_ALL
LESIZE,325,,DIV_W_ALL
LESIZE,320,,DIV_W_ALL

LESIZE,336,,,DIV_W_ALL
LESIZE,331,,,DIV_W_ALL
LESIZE,326,,,DIV_W_ALL
LESIZE,321,,,DIV_W_ALL

LESIZE, 337, , , DIV_W_ALL LESIZE, 332, , , DIV_W_ALL LESIZE, 327, , , DIV_W_ALL LESIZE, 322, , , DIV_W_ALL

LESIZE, 338,,,DIV_W_ALL LESIZE, 333,,,DIV_W_ALL LESIZE, 328,,,DIV_W_ALL LESIZE, 323,,,DIV_W_ALL

LESIZE,339,,,DIV_W_ALL LESIZE,334,,,DIV_W_ALL LESIZE,329,,,DIV_W_ALL LESIZE,324,,,DIV_W_ALL !** EXTRUSAO DO T-STUB + PARAFUSO **

!E: EXTRUSÃO DO T-STUB PARA A FORMACAO DO VOLUME

!E: COMANDO VEXT,LINHA INICIAL, LINHA FINAL,CONTAGEM ENTRE AS LINHAS,0,0,ESPESSURA

!CABECA DIRECAO Z

VEXT, 195, 218, 1, 0, 0, HH

!** DIVISAO DAS LINHAS PARA GERACAO DA MALHA PARA EXTRUSAO **

!CABECA

LESIZE,340,,,DIV_W_ALL LESIZE,341,,,DIV_W_ALL LESIZE,342,,,DIV_W_ALL LESIZE,343,,,DIV_W_ALL LESIZE,344,,,DIV_W_ALL LESIZE,345,,,DIV_W_ALL LESIZE,346,,,DIV_W_ALL LESIZE,347,,,DIV_W_ALL LESIZE,348,,,DIV_W_ALL LESIZE,349,,,DIV_W_ALL LESIZE,350,,,DIV_W_ALL LESIZE,351,,,DIV_W_ALL LESIZE,352,,,DIV_W_ALL LESIZE,353,,,DIV_W_ALL LESIZE,354,,,DIV_W_ALL LESIZE,355,,,DIV_W_ALL LESIZE,356,,,DIV_W_ALL LESIZE,357,,,DIV_W_ALL LESIZE,358,,,DIV_W_ALL LESIZE,359,,,DIV_W_ALL LESIZE,360,,,DIV_W_ALL LESIZE,361,,,DIV_W_ALL LESIZE,362,,,DIV_W_ALL LESIZE,363,,,DIV_W_ALL LESIZE,364,,,DIV_W_ALL LESIZE,365,,,DIV_W_ALL LESIZE,366,,,DIV_W_ALL

LESIZE,367,,,DIV_W_ALL LESIZE,368,,,DIV_W_ALL LESIZE,369,,,DIV_W_ALL LESIZE,370,,,DIV_W_ALL LESIZE, 371, , , DIV_W_ALL LESIZE,371,,,DIV_W_ALL LESIZE,373,,,DIV_W_ALL LESIZE,374,,,DIV_W_ALL LESIZE,374,,,DIV_W_ALL LESIZE,376,,,DIV_W_ALL LESIZE,377,,,DIV_W_ALL LESIZE,378,,,DIV_W_ALL LESIZE,379,,,DIV_W_ALL LESIZE,380,,,DIV_W_ALL LESIZE,381,,,DIV_W_ALL LESIZE,382,,,DIV_W_ALL LESIZE,383,,,DIV_W_ALL LESIZE,384,,,DIV_W_ALL LESIZE,385,,,DIV_W_ALL LESIZE,386,,,DIV_W_ALL LESIZE,387,,,DIV_W_ALL LESIZE,388,,,DIV_W_ALL LESIZE,389,,,DIV_W_ALL LESIZE,390,,,DIV_W_ALL LESIZE,391,,,DIV_W_ALL LESIZE,392,,,DIV_W_ALL LESIZE,393,,,DIV_W_ALL LESIZE,394,,,DIV_W_ALL LESIZE, 395,,,DIV_W_ALL LESIZE,396,,,DIV_W_ALL LESIZE,397,,,DIV_W_ALL LESIZE,398,,,DIV_W_ALL LESIZE,399,,,DIV_W_ALL LESIZE,400,,,DIV_W_ALL LESIZE,401,,,DIV_W_ALL LESIZE,402,,,DIV_W_ALL LESIZE,403,,,DIV_W_ALL LESIZE,404,,,DIV_W_ALL

LESIZE,405,,,DIV_W_ALL

LESIZE,406,,,DIV_W_ALL

LESIZE,407,,,DIV_W_ALL

LESIZE,408,,,DIV_W_ALL

LESIZE,409,,,DIV_W_ALL

LESIZE,410,,,DIV_W_ALL

LESIZE,411,,,DIV_W_ALL

LESIZE,412,,,DIV_W_ALL

LESIZE,413,,,DIV_W_ALL

LESIZE,414,,,DIV_W_ALL

 $\texttt{LESIZE}, 415, , , \texttt{DIV}_W_\texttt{ALL}$

LESIZE,416,,,DIV_W_ALL

LESIZE,417,,,DIV_W_ALL

LESIZE,418,,,DIV_W_ALL

LESIZE,419,,,DIV_W_ALL

!LIGAÇAO DA CABECA E CORPO DO PARAFUSO

VEXT,25,36,1,0,0,0.02

!AREAS DE 295 A 332



Figura D. 7 – Corpo do Parafuso

!** DIVISAO DAS LINHAS PARA GERACAO DA MALHA PARA S-EXTRUSAO **

*DO,I,420,461 LESIZE,I,,,DIV_W_ALL

*ENDDO

!-----TERMINA O PARAFUSO------
!********* CARACTERISTICAS DO MATERIAL *********

!E: DEFINE AS CARACTERISTICAS DO MATERIAL

!** DEFINICAO DO TIPO DE ELEMENTO - SOLIDO ** !E: DEFINE O ELEMENTO SOLIDO POR SER O MELHOR PARA O CONTATO

!E: COMANDO ET,N ELEMENTO,TIPO DE ELEMENTO

ET,1,SOLID45

!** APLICACAO DA SIMETRIA **

!E: APLICA A SIMETRIA DO T-STUB GERANDO O T-STUB EM ESTUDO COMPLETO

!E: COMANDO VSYMM,EIXO DE SIMETRIA,LINHAS PARA SIMETRIA,,0,0

VSYMM,X,ALL, ,0,0



Figura D. 8 – Aplicação da Simetria

!** DEFINICAO DAS COMPONENTES **

!E: CRIA VARIÁVEIS COM OS DIFERENTES COMPONENTES PARA APLICAÇÃO DO MATERIAL

- !E: CRIA UM GRUPO COM OS VOLUMES DA ALMA
- !E: COMANDO DE SELECAO DE VOLUME
- ! VSEL,S(NOVO) OU A(ADICIONAR A OUTRO),,,VOLUME1,VOLUME2,CONTAGEM
- !E: COMANDO DE CRIACAO DE GRUPO
- ! CM,NOME DO GRUPO,TIPO DE ELEMENTO (AREA OU VOLUME)
- !E: COMANDO PARA RETIRAR ELEMENTOS COINCIDENTES
- ! NUMMRG,TIPO DE ELEMENTOS (KP, NODE, AREA...),,,,LOW

!ALMA

VSEL,S,,,27,28,1	!	SELECIONA	UM	SUBSETP	DE	VOLUME
VSEL,A,,,31,32,1						

VSEL,A,,,36,37,1
VSEL,A,,,39,41,1
VSEL,A,,,104,105,1
VSEL,A,,,108,109,1
VSEL,A,,,113,114,1
VSEL,A,,,116,118,1
CM,ALMA,VOLU
NUMMRG,KP,,,,LOW
NUMMRG,NODE,,,,LOW

!PARAFUSO

VSEL,S,,,15,26,1 VSEL,A,,,42,65,1 VSEL,A,,,66,77,1 VSEL,A,,,92,103,1 VSEL,A,,,119,142,1 VSEL,A,,,143,154,1 CM,PARAFUSO,VOLU NUMMRG,KP,,,,LOW

!MESA

VSEL,S,,,1,14,1 VSEL,A,,,29,30,1 VSEL,A,,,38 VSEL,A,,,33,35,1 VSEL,A,,,78,91,1 VSEL,A,,,106,107,1 VSEL,A,,,110,112,1 VSEL,A,,,115 CM,MESA,VOLU NUMMRG,KP,,,,LOW NUMMRG,NODE,,,,LOW

!** DEFINICAO DO MATERIAL - ACO COM E = 200000 MPa E NI = 0.45 **

!E: DEFINE A CARACTERISTICA DO MATERIAL UTILIZADO

!E: COMANDO MP,EX,N MATERIAL,VALOR DE E

- !E: COMANDO MP,PRXY,N MATERIAL, VALOR DE NI
- !E: COMANDO PARA APLICAÇÃO DO MATERIAL BI-LINEAR
- ! TB, BISO, N MATERIAL, 1, 2,
- ! TBTEMP,0
- ! TBDATA,,TENSAO,ANGULO DA SEGUNDA RETA
- !E: COMANDO PARA SELECIONAR UM GRUPO
- ! CMSEL, S, NOME DO GRUPO
- !E: COMANDO PARA APLICAR O MATERIAL

! MAT, N MATERIAL

- !E: COMANDO PARA GERAR A MALHA DO VOLUME
- ! VMESH,N VOLUME

! MATERIAL 1

MP, EX, 1, 200000

MP,PRXY,1,0.45

TB,BISO,1,1,2,

TBTEMP,0

TBDATA,,496.0,0.3

CMSEL,S,ALMA

VMESH,ALL

! MATERIAL 2

MP, EX, 2, 200000

MP, PRXY, 2, 0.45

TB,BISO,2,1,2,

TBTEMP,0

TBDATA,,431.0,0.3

CMSEL,S,MESA

MAT,2

VMESH,ALL

! MATERIAL 3
MP,EX,3,200000
MP,PRXY,3,,0.45
TB,BISO,3,1,2,

TBTEMP,0

TBDATA,,893.0,0.3

CMSEL, S, PARAFUSO

MAT,3

VMESH,ALL

!******** APLICACAO DO LINK 10 *********
!E: APLICA O LINK 10 - ELEMENTO DE MOLA PARA CARACTERIZAR A SIMETRIA
!E: COMANDO PARA CHAMAR UM GRUPO

! CMSEL, S, NOME DO GRUPO

! PARAFUSO

cmsel,s,parafuso
aslv,s
asel,r,loc,z,0

cm,apoio_par,area

allsel

asel,s,loc,z,0

cmsel,u,apoio_par

nsla,s,1

ngen,2,10000,all,,,,,33.333

nsel,r,loc,z,0

*get,numnodes,node,,count

nsel,a,loc,z,33.333

!DEFINIR KEYOPTIONS

!DEFINIR CONSTANTES REAIS

!E: DEFINE AS CONSTANTES REAIS PARA O MATERIAL

ET,2,LINK10 KEYOPT,2,2,0 KEYOPT,2,3,0 R,1,1e6,,

```
!MATERIAL LINEAR ELASTICO PARA O LINK10
!MATERIAL 4
MPTEMP,,,,,,,,
```

MPTEMP,1,0

MPDATA, EX, 4,, 200000

MPDATA, PRXY, 4,,0.45

type,2

mat,4

real,1

*do,ii,1,numnodes

*get,in,node,,num,min

e,in+10000,in

nsel,u,,,in

*enddo

!APOIO DO PARAFUSO

cmsel,s,apoio_par

nsla,s,1

d,all,uz

nsel,s,loc,z,33.333

d,all,all

allsel

asel,s,loc,y,0 nsla,s,1 d,all,uy



Figura D. 9 – LINK 10

!******** APLICACAO DO DESLOCAMENTO NA EXTREMIDADE DA ALMA ********

!E: APLICA O DESLOCAMENTO

!E: COMANDO D,N KEYPOINT,DIRECAO (UX,UY OU UZ), VALOR

asel,s,loc,z,pto_apl_desl

nsla,s,1

d,all,uz,DESLOCAMENTO

allsel

!ELEMENTO DE CONTATO

!E: INSERI O ELEMENTO DE CONTATO ENTRE A CABEÇA DO PARAFUSO E MESA

!E: COMANDO DO VALOR DO COEFICIENTE DE ATRITO

! MP, MU, 1, VALOR

!E: COMANDO PARA DEFINIR A CONSTANTE REAL

! R,N MATERIAL

CM,_NODECM,NODE

CM,_ELEMCM,ELEM

CM,_KPCM,KP

- CM,_LINECM,LINE
- CM,_AREACM,AREA
- CM,_VOLUCM,VOLU

/GSAV,cwz,gsav,,temp

MP, MU, 1, 0.25

MAT,1

MP, EMIS, 1, 7.88860905221e-031

R,3 REAL,3 ET,3,170 ET,4,174

R,3,,,0.1,0.1,0, RMORE,,,1.0E20,0.0,1.0, RMORE,0.0,0,1.0,,1.0,0.5 RMORE,0,1.0,1.0,0.0,,1.0

KEYOPT,4,4,0

KEYOPT,4,5,0

KEYOPT,4,7,0

KEYOPT,4,8,0

KEYOPT,4,9,0

KEYOPT,4,10,2

KEYOPT,4,11,0

KEYOPT,4,12,0

KEYOPT,4,2,0

KEYOPT, 3, 5, 0

! GERANDO O APOIO DE CONTATO !E: GERA A SUPERFICIE DE APOIO PARA O CONTATO !E: COMANDO ASEL,S(NOVO) OU A(ADICIONAR),N AREA !E: CRIA UM GRUPO COM AS AREAS SELECIONADAS

!E: COMANDO CM,NOME,TIPO

ASEL, S, , , 13

ASEL,A,,,14

ASEL,A,,,15

ASEL,A,,,16

ASEL,A,,,17

ASEL,A,,,18

ASEL,A,,,374

ASEL,A,,,379

ASEL,A,,,383

ASEL,A,,,387 ASEL,A,,,391 ASEL,A,,,395 CM,_TARGET,AREA

TYPE,3 NSLA,S,1 ESLN,S,0 ESLL,U ESEL,U,ENAME,,188,189 ESURF CMSEL,S,_ELEMCM

! GERANDO A SUPERFICIE DE CONTATO !E: GERA A SUPERFICIE DO CONTATO !E: COMANDO ASEL,S(NOVO) OU A(ADICIONAR),N AREA !E: CRIA UM GRUPO COM AS AREAS SELECIONADAS !E: COMANDO CM,NOME,TIPO

ASEL,A,,,196 ASEL,A,,,197 ASEL,A,,,198 ASEL,A,,,199

ASEL,S,,,195

- ASEL,A,,,200
- ASEL,A,,,201
- ASEL,A,,,202
- ASEL,A,,,203 ASEL,A,,,204
- ASEL,A,,,205
- ASEL,A,,,206
- ASEL,A,,,521
- ASEL,A,,,527
- ASEL,A,,,532
- ASEL,A,,,537
- ASEL,A,,,542
- ASEL,A,,,547

ASEL, A, ,, 552 ASEL, A, ,, 557 ASEL, A, ,, 561 ASEL, A, ,, 565 ASEL, A, ,, 569 ASEL, A, ,, 573 CM, _CONTACT, AREA

TYPE,4

NSLA,S,1 ESLN,S,0

ESURF

ALLSEL

ESEL,ALL

ESEL,S,TYPE,,3

ESEL, A, TYPE,, 4

ESEL, R, REAL, , 3

/PSYMB,ESYS,1

/PNUM,TYPE,1

/NUM, 1

EPLOT

ESEL,ALL

ESEL,S,TYPE,,3

ESEL, A, TYPE,,4

ESEL, R, REAL, , 3

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 /MREP,EPLOT



Figura D. 10 – Elemento de Contato

! /REPLOT, RESIZE

FINISH

/SOL

!E: DESCREVE A NÃO LINEARIDADE GEOMÉTRICA

CNVTOL,U, ,0.001,2, ,

ANTYPE,0

TIME, DESLOCAMENTO

NLGEOM,1

NSUBST,100,1000,10

OUTRES, ERASE

OUTRES, ALL, ALL

! / STATUS, SOLU

SOLVE

!E: RODA O PROGRAMA

/POST1

CMSEL,S,MESA

CMPLOT

/MREP,EPLOT

!*

/EFACET,1

PLNSOL, S,EQV, 0,1.0

ESEL,S,ENAME,,mesa