



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia em Ciências

Faculdade de Engenharia

Monique Cordeiro Rodrigues

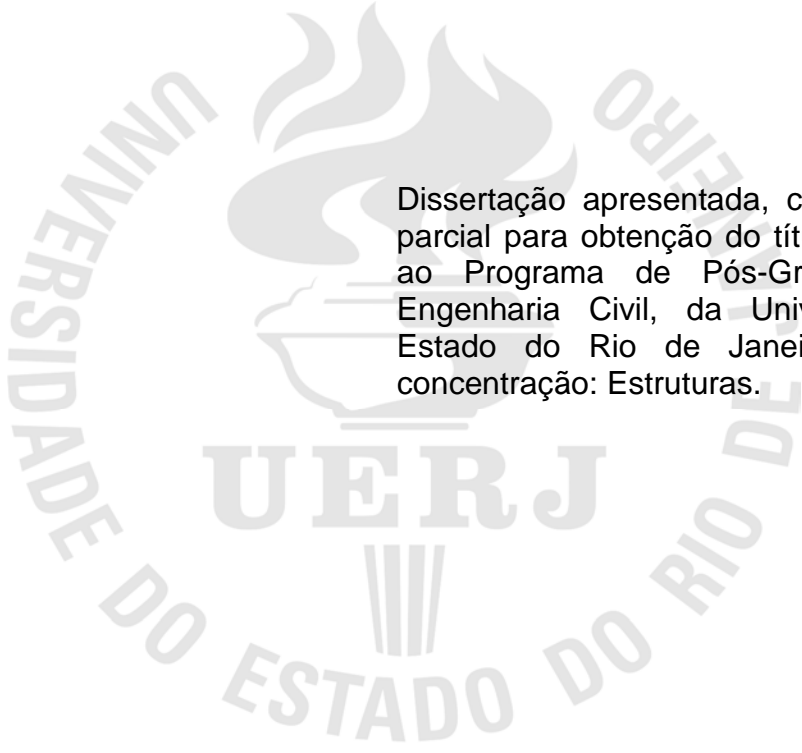
**Modelagem numérica de ligações viga-coluna em aço
sob momento fletor e força normal**

Rio de Janeiro

2009

Monique Cordeiro Rodrigues

**Modelagem numérica de ligações viga-coluna em aço
sob momento fletor e força normal**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Orientador: Luciano Rodrigues Ornelas de Lima
Coorientador (es): José Guilherme Santos da Silva
Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco

Rio de Janeiro

2009

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / CTCB

R696 Rodrigues, Monique Cordeiro.
Modelagem numérica de ligações viga-coluna em aço sob momento fletor e
força normal. / Monique Cordeiro Rodrigues. – 2009.
178 f.

Orientador : Luciano Rodrigues Ornelas de Lima
Coorientador(es): José Guilherme Santos da Silva
Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco

Dissertação (mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro,
Faculdade de Engenharia.

1. Aço – Estruturas. 2. Vigamento (Construção civil).
3. Ligas(Metalurgia).I.Lima, Luciano Rodrigues Ornellas de.
II. Silva, José Guilherme Santos da. III. Vellasco, Pedro Colmar
Gonçalves da Silva. IV. Universidade do Estado do Rio de Janeiro.
Faculdade de Engenharia. V. Título.

CDU 624.014.2

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial
desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Monique Cordeiro Rodrigues

**Modelagem numérica de ligações viga-coluna em aço
sob momento fletor e força normal.**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Aprovado em:

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima (Orientador)

Departamento de Estruturas e Fundações – UERJ

Prof. Dr. José Guilherme Santos da Silva (Coorientador)

Departamento de Engenharia Mecânica– UERJ

Prof. Pedro C. G. da Silva Vellasco, PhD (Coorientador)

Departamento de Estruturas e Fundações – UERJ

Prof. Dr. Raul Rosas e Silva

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Dr. Sebastião A. L. de Andrade

Departamento de Estruturas e Fundações – UERJ

Rio de Janeiro

2009

DEDICATÓRIA

A Minha Pequena Velha, que no lugar onde estiver, continua a iluminar meus caminhos.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Jorge e Lucimeli, irmãs, Michelle e Melissa, e cunhado, Alexandre, 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. Incluo também neste agradecimento minha companheira de noites acordadas, Anna Jullia.

À Família Cordeiro, ou melhor, Hamster de Asas, porque não corremos, voamos. Obrigada pela alegria das reuniões em família.

Ao estimado Rene Rodrigues, por me ensinar que até nos piores momentos podemos observar o lado positivo das coisas. Obrigada pela compreensão, possibilitando que pudesse realizar mais este sonho.

Às amigas de trabalho, Livia, Meire, e agora mais longe mais também especial, Patrícia, pela companhia em todos os momentos, bons e ruins, destes últimos anos. Obrigada pelo companheirismo.

A Christina, que soube escutar todos os desabafos destes últimos tempos difíceis e que sempre apoiou, esteve presente e acreditou em minha capacidade. Não tenho palavras para agradecer sua amizade. Obrigada.

Aos meus amigos de sempre, pela amizade de todas as horas, mesmo com o pouco tempo devido aos estudos. Com carinho especial, aos meus amigos de faculdade André e Fernanda, que estiveram presentes durante estes dois anos de mestrado, com a amizade peculiar do casal.

A UERJ, presente em mais uma conquista, ao LABCIV – Laboratório de Computação da Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da UERJ, que possibilitou as análises computacionais e a Alessandra, pelo apoio e pela amizade nas longas horas de estudo no laboratório.

E aos meus co-orientadores, professores Pedro Vellasco e José Guilherme, pelo conhecimento transmitido durante este período.

A CAPES pelo apoio a pesquisa através da bolsa de estudo.

Em especial ao meu orientador, Luciano Rodrigues Ornelas de Lima, mais uma vez ao meu lado nesta fase de estudos, disposto a ajudar, mesmo com meus horários apertados, sendo um exemplo de professor, e um amigo querido. Que esta parceria possa ser mantida por mais longos anos.

*“Aprender é a única coisa de que a mente
nunca se cansa, nunca tem medo e
nunca se arrepende.”*

Leonardo da Vinci

RESUMO

RODRIGUES, Monique Cordeiro. *Modelagem numérica de ligações viga-coluna em aço sob momento fletor e força normal*. Rio de Janeiro, 2009. 178p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009.

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. Atualmente, a Norma Brasileira de estruturas de aço de edificações, NBR 8800, considera o comportamento das ligações entre duas situações extremas: rígidas, onde não ocorre nenhuma rotação entre os membros conectados, transferindo momento fletor, força cortante e força normal; ou flexíveis, caracterizadas pela liberdade de rotação entre os membros conectados, impedindo a transmissão de momento fletor. Outras normas de projeto de estruturas de aço, consideram que as ligações apresentam um comportamento intermediário, ou seja, semi-rígidas, que podem estar submetidas a uma combinação de momento fletor e esforço normal. Porém, mesmo com a combinação, estas normas não consideram a presença de esforço normal (tração e/ou compressão). Uma limitação empírica de 5% da resistência plástica da viga é a única condição imposta no Eurocode 3. Para o estudo da ligação semi-rígida será utilizada a filosofia do Método das Componentes, que verifica a resistência da ligação e sua classificação quanto à rigidez rotacional, desenvolvida através de modelos mecânicos (modelos de molas). O objetivo deste trabalho é descrever alguns resultados de caracterização de ligações viga-coluna com placa de extremidade ajustada à altura da viga obtidos através de um modelo de elementos finitos. Para tal, será realizada uma análise não-linear geométrica e de material. Esta análise possibilitará 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. *Numerical modeling of steel beam-to-column joints subjected to bending and normal force*. Rio de Janeiro, 2009. 178p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009.

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 Brazilian Code of the Steel Portal Frame Design, NBR 8800, considers the joint behaviour between two extreme situations: rigid, where any rotations don't occur between the connected members, transferring substantial bending moments, and also shear and axial forces; or pinned, its characterised by almost free rotation movement between the connected elements that prevents the transmission of bending moments. However, some actual codes of the steel structures project, consider that the joints present an intermediate behaviour, in other words, semi-rigid, that may be subjected to a combination of bending moment and axial force. But, these codes don't consider the presence of axial force (tension and/ or compression). A single empirical limitation of 5% of the beam's plastic axial capacity is the only enforced provision in Eurocode 3. This filosofy design is based on components method, 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 joints components represented by a translacional spring. The objective of this present work is describing some results of flush endplate semi-rigids beam-to-column joints obtained across finite elements method and geometric and material non-linear analises. These consider the main parameters that influence the components behaviour about the stress and deformation distribution.

Keywords: Steel structural; Beam-to-column joints; Semi-rigid joints; Experimental analysis; Mechanical models; Component method; European codes; Bending resistance; Plastic mechanism.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Classificação das ligações de acordo com sua rigidez	23
Figura 1.2 – Distribuição elástica de momentos fletores num pórtico simples	24
Figura 1.3 – Ligação de um pórtico de galpões com vigas inclinadas.....	25
Figura 2.1 – Propriedades para dimensionamento de uma ligação	33
Figura 2.2 – Rigidez inicial a ser usada na análise global elástica (Eurocode 3,1998), (Eurocode 3, 2003)	34
Figura 2.3 – Limites para classificação das ligações de acordo com a rigidez inicial	35
Figura 2.4 – Aproximação bi-linear da curva momento <i>versus</i> rotação (Eurocode 3, 1998), (Eurocode 3, 2003)	36
Figura 2.5 – Aproximação da curva momento <i>versus</i> rotação (Eurocode 3, 1998), (Eurocode 3, 2003)	36
Figura 2.8 – Procedimento para cálculo da rigidez rotacional.....	41
Figura 2.9 – Centro de compressão e braço de alavanca z.....	43
Figura 2.10 – Tensões normais e cisalhantes na zona comprimida da alma da coluna	45
Figura 2.11 – Propriedades geométricas da componente alma da coluna em compressão.....	46
Figura 2.12 – Identificação de “ <i>T-Stubs</i> ” em ligações viga-coluna.....	49
Figura 2.13 – Modos de ruptura de um “ <i>T-Stub</i> ” aparafusado	50
Figura 2.14 – Definição de parâmetros geométricos – componente 4	50
Figura 2.15 – Modelos de linhas de ruptura para grupos de linhas de parafusos	51
Figura 2.16 – Definição e parâmetro geométricos – componente 5	54
Figura 2.17 – Curvas para obtenção do coeficiente α (Eurocode 3).	56
Figura 2.18 – Modelo mecânico proposto por Finet (Laurent, 1994).....	59
Figura 2.19 – Diagrama de interação de uma ligação com placa de extremidade estendida.....	61
Figura 2.20 – Interação entre três linhas de parafusos e definição de F_j^{Rd}	63
Figura 2.21 – Ligação viga-coluna soldada com respectivo modelo de molas (Silva <i>et al</i> , 2001)	64
Figura 2.22 – Caracterização do comportamento das componentes (Silva <i>et al</i> , 2001)	65

Figura 2.23 – Curva momento <i>versus</i> rotação – modelo e experimental	65
Figura 2.24 – Curvas momento <i>versus</i> rotação com esforço normal de compressão	66
Figura 2.25 – Curvas momento <i>versus</i> rotação com esforço normal de compressão (Wald <i>et al</i> , 2001).....	67
Figura 2.26 – Curvas momento <i>versus</i> rotação com esforço normal de compressão (Wald <i>et al</i> , 2001).....	67
Figura 2.27 – Curva de comparação entre tipos de carregamentos.....	68
Figura 2.28 – Consideração sobre a área efetiva das mesas comprimidas (Wald <i>et al</i> , 2001)	69
Figura 2.29 – Modelo mecânico da placa de extremidade (Wald <i>et al</i> , 2001).....	70
Figura 2.30 – Curvas momento <i>versus</i> rotação – ensaios SN (Wald <i>et al</i> , 2001)	72
Figura 2.31 – Pórtico estudado – artigo Daniūnas e Urbonas (Daniūnas <i>et al</i> , 2008)	73
Figura 2.32 – Fluxograma de análise das ligações semi-rígidas.....	73
Figura 3.1 – Dimensões dos perfis laminados IPE240, HEB240 e HEB200	76
Figura 3.2 – Detalhe do parafuso M20 classe 20.9 (Lima, 2003).....	77
Figura 3.4 – Detalhe das ligações utilizadas nos ensaios com placa de extremidade ajustada (série FE).....	77
Figura 3.7 – Curvas momento <i>versus</i> rotação com respectivas descargas (Lima, 2003).....	85
Figura 3.8 – Deformações ocorridas nos ensaios FE.....	86
Figura 4.1 – Curvas tensão-deformação dos materiais.....	90
Figura 4.2 – Esquema da posição dos leitores de deslocamento	92
Figura 4.3 – Geometria do elemento SOLID 185 (Ansys, 2008)	93
Figura 4.4 – Geometria do elemento SHELL 181 (Ansys, 2008).....	94
Figura 4.5 – Modelo numérico – ligação viga-coluna com placa de extremidade ajustada à altura da viga	96
Figura 4.6 – Modelo Numérico – detalhes da viga	96
Figura 4.7 – Modelo Numérico – Coluna e Placa de Extremidade	97
Figura 4.8 – Modelo Numérico – Parafusos	97
Figura 4.9 – Área de atuação do contato	99
Figura 4.11 – Geometria do elemento CONTA 173 (Ansys, 2008)	100
Figura 4.12 – Gráfico momento <i>versus</i> rotação - numérico e experimental – FE01	101

Figura 4.13 – Rigidez Inicial – numérico e experimental – FE01.....	102
Figura 4.14 – Momento Resistente – numérico – FE01	104
Figura 4.15 – Comparação dos resultados obtidos - FE01	105
Figura 4.16 – Distribuição de tensões de <i>Von Mises</i> , em MPa – FE01 –.....	106
Figura 4.17 – Distribuição de tensões de <i>Von Mises</i> , em MPa - FE01 –	107
Figura 4.20 – Localização do extensômetro 10.....	110
Figura 4.21 – Curva momento <i>versus</i> deformação (extensômetro 10)	110
Figura 4.22 – Curva momento <i>versus</i> deformação (extensômetro 23)	112
Figura 4.23 – Curva momento <i>versus</i> deformação (extensômetro 24)	112
Figura 4.24 – Curva momento <i>versus</i> deformação (extensômetro 22)	113
Figura 4.25 – Curva momento <i>versus</i> deformação (extensômetro 28)	113
Figura 5.1 – Gráfico momento <i>versus</i> rotação - numérico e experimental – FE03..	118
Figura 5.2 – Rigidez Inicial – numérico e experimental – FE03.....	119
Figura 5.3 – Momento Resistente – numérico – FE03	119
Figura 5.4 – Distribuição de tensões de <i>Von Mises</i> , em MPa – FE03 -	120
Figura 5.8 – Rigidez Inicial – numérico e experimental – FE05.....	124
Figura 5.9 – Momento Resistente – numérico – FE05	124
Figura 5.10 – Distribuição de tensões de <i>Von Mises</i> , em MPa – FE05 –.....	126
Figura 5.15 – Momento Resistente – numérico – FE06	130
Figura 5.16 – Distribuição de tensões de <i>Von Mises</i> , em MPa – FE06 –.....	132
Figura 5.18 – Distribuição de tensões de <i>Von Mises</i> , em MPa – FE06 –.....	134
Figura 5.21 – Momento Resistente – numérico – FE08	136
Figura 5.22 – Distribuição de tensões de <i>Von Mises</i> , em MPa – FE08 –.....	138
Figura 5.26 – Curvas momento <i>versus</i> rotação – numérico.....	142
Figura 5.27 – Curvas momento <i>versus</i> deformação – componente 5 – extensômetro 23.....	144
Figura 5.28 – Curvas momento <i>versus</i> deformação – componente 5 – extensômetro 24.....	145
Figura 5.29 – Curvas momento <i>versus</i> deformação – componente 7 – extensômetro 29.....	146
Figura 5.30 – Curvas momento <i>versus</i> deformação – Componente 7 – extensômetro 30.....	147
Figura 5.31 – Curvas momento <i>versus</i> deformação – Componente 7 – extensômetro 31.....	147

Figura 5.32 – Curvas momento versus deformação – Componente 7 – extensômetro 32	148
Figura 5.33 – Curvas momento versus rotação – FE3	149
Figura 5.34 – Curvas momento versus rotação – FE5	150
Figura 5.35 – Curvas momento <i>versus</i> rotação – FE6	151
Figura 5.36 – Curvas momento <i>versus</i> rotação – FE8	152

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Coeficiente de modificação de rigidez η	34
Tabela 2.2 – Valores aproximados para o parâmetro de transformação β	44
Tabela 2.3 – Parâmetro de redução ω	48
Tabela 2.5 – Comprimentos efetivos de um “ T-Stub”, componente 5	55
Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas do material – viga e parafusos (Lima, 2003)	80
Tabela 3.2 – Propriedades mecânicas do material – coluna e placa de extremidade (Lima, 2003)	81
Tabela 3.3 – Tabela resumo dos dados experimentais das propriedades mecânicas dos materiais (Lima, 2003).....	82
Tabela 3.4 – Descrição dos carregamentos aplicados nos ensaios.....	83
Tabela 3.5 – Dimensionamento das componentes – Ensaios FE	84
Tabela 3.6 – Valores experimentais para $M_{j,Rd}$ e $S_{j,ini}$	87
Tabela 4.1 – Tabela resumo das tensões utilizadas após a correção da lei constitutiva do material.....	89
Tabela 5.1 – Valores de N.....	116
Tabela 5.2 – Valores de $M_{j,Rd}$	117
Tabela 5.3 – Valores de $S_{j,ini}$	117

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LABCIV	Laboratório de Computação em Engenharia Civil
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
PUC-Rio	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
EUROCODE	European Committee for Standardisation
ECCS	European Convention for Constructional Steelwork
DEC	Departamento de Engenharia Civil
FCTUC	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

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
$b_{eff,c,wc}$	largura efetiva da alma da coluna à compressão
$b_{eff,t,wb}$	largura efetiva da alma da coluna à tração
b_{tf}	largura da mesa da coluna
$B_{t,Rd}$	resistência de um parafuso à tração
E	módulo de elasticidade
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
$F_{t,wb,Rd}$	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
$k_{eff,r}$	rigidez efetiva das molas associadas em série
$k_{i,r}$	valor de rigidez de cada uma das componentes
k_{wc}	fator de correção
$l_{eff,1}$	largura efetiva do t-stub – modo 1
$l_{eff,cp}$	formas circulares
$l_{eff,nc}$	formas não-circulares
$l_{eff,2}$	largura efetiva do t-stub – modo 2
L_b	espessura de material a ser apertada pelos parafusos
$M_{j,Rd}$	momento resistente
$M_{pl,1,Rd}$	momento resistente do t-stub à flexão – modo 1
$M_{pl,2,Rd}$	momento resistente do t-stub à flexão – modo 2
$M_{c,Rd}$	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 45° 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_{pl}	módulo plástico da seção transversal
Z_{eq}	braço de alavanca
β	parâmetro de transformação

ϕ_{Cd}	capacidade de rotação
γ_{M0}	coeficiente de resistência
γ_{M1}	coeficiente de segurança
γ_{M2}	coeficiente de resistência
λ_1 e λ_2	coeficientes
$\bar{\lambda}_p$	esbeltez da placa de extremidade
η	coeficiente de modificação de rigidez
ρ	o fator de redução devido à flambagem da placa
$\sigma_{com,Ed}$	máxima tensão longitudinal de compressão
ω	fator de redução
μ	Coeficiente de atrito

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	22
1.1 Motivação	22
1.2 Evolução Histórica das Ligações Semi-Rígidas.....	27
1.3 Objetivos e Metodologia.....	30
1.4 Escopo.....	30
2 LIGAÇÕES VIGA X COLUNA	32
2.1 Introdução.....	32
2.2 Tipos de análise para a ligação.....	33
2.3 Métodos para Análise de Ligações Viga-Coluna	36
2.4 Descrição do Método das Componentes	38
2.4.1 Resistência à Flexão de uma Ligação	40
2.4.2 Rigidez Inicial de uma Ligação.....	41
2.5 Dimensionamento das Componentes	43
2.5.1 Componente 1 – Alma da coluna ao corte.....	43
2.5.2 Componente 2 – Alma da coluna à compressão	45
2.5.3 Componente 3 – Alma da coluna à tração.....	48
2.5.4 Componente 4 - Mesa da coluna à flexão	49
2.5.5 Componente 5 – Placa de extremidade à flexão	53
2.5.6 Componente 7 – mesa da viga à compressão.....	56
2.5.7 Componente 8 – Alma da viga à tração.....	57
2.5.8 Componente 10 – Parafusos à tração	58
2.6 Combinação entre Esforço Normal e Momento Fletor.....	58
2.6.1 Pesquisas de Laurent Finet (Laurent, 1994).....	58
2.6.2 Pesquisas de J. P. Jaspert (Jaspert, 1997)	59
2.6.3 Pesquisas de Frederic Cerfontaine (Cerfontaine, 2001).....	60
2.6.3.1 Diagrama de Interação	60
2.6.4 Pesquisas de Luís Silva e Ana Coelho (Silva <i>et al</i> , 2001)	64
2.6.5 Pesquisas de Frantisek Wald (Wald <i>et al</i> , 2001), (Lima, 2003).....	66
2.6.5.1 Modelo de Cálculo Proposto.....	68
2.6.6 Pesquisas de Daniūnas e Urbonas (Daniūnas <i>et al</i> , 2008)	73
2.6.7 Pesquisas de Del Savio <i>et al</i> . (Del Sávio <i>et al</i> , 2005), (Del Sávio <i>et al</i> , 2009).....	74

3 ENSAIOS EXPERIMENTAIS	75
3.1 Introdução.....	75
3.2 Justificativa dos Ensaio Experimentais	75
3.3 Ensaio Experimentais – Série FE.....	78
3.4 Propriedade Mecânicas e Geométricas	79
3.5 Cálculo das ligações	82
3.6 Resultados Encontrados	84
4 CALIBRAÇÃO DO MODELO NÚMÉRICO PROPOSTO.....	88
4.1 Introdução.....	88
4.2 Algoritmo Numérico e Estratégias de Análise Não-Linear	88
4.3 Cálculo para a rotação real da ligação.....	91
4.4 Modelo Numérico Proposto.....	92
4.4.1 Descrição do Modelo.....	92
4.4.2 Estudo da Malha	95
4.4.3 Elemento de Contato.....	98
4.4.4 Calibração do Modelo Numérico.....	100
4.5 Avaliação das curvas momento <i>versus</i> deformação	109
4.5.1 Comportamento mesa da coluna à flexão (4)	109
4.5.2 Comportamento da placa de extremidade à flexão (5).....	111
4.5.3 Comportamento da alma da viga à tração (8).....	112
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS	115
5.1 Introdução.....	115
5.2 Discussão dos resultados	115
5.2.1 FE03 ($N=-4\%N_{pl}$)	117
5.2.2 FE05 ($N=-20\%N_{pl}$)	123
5.2.3 FE06 ($N=-27\%N_{pl}$)	129
5.2.4 FE08 ($N=+10\%N_{pl}$)	135
5.3 Comparação Global da Ligação.....	141
5.4 Avaliação das Componentes Individuais	143
5.4.1 Placa de extremidade à flexão (5)	143
5.4.2 Mesa Inferior da viga à compressão (7).....	145
5.5 Comparação Modelo Numérico <i>versus</i> Modelo de Cerfontaine	148

5.5.1 FE03 ($N=-4\%N_{pl}$)	149
5.5.2 FE05 ($N=-20\%N_{pl}$)	149
5.5.3 FE06 ($N=-27\%N_{pl}$)	150
5.5.4 FE08 ($N=+10\%N_{pl}$)	151
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	153
6.1 Introdução.....	153
6.2 Conclusões.....	155
6.3 Trabalhos futuros	156
Anexo A - Dimensionamento das Ligações – FE01	164
A.1. Informações Gerais.....	164
A.1.1. Características Mecânicas.....	164
A.1.2. Características Geométricas.....	164
A.1.3. Coeficientes de Segurança.....	166
A.2. Cálculo das Componentes.....	166
A.2.1. Alma da coluna ao corte (6.2.6.1).....	166
A.2.2. Alma da coluna à compressão (6.2.6.2).....	167
A.2.3. Mesa da coluna à flexão (6.2.4.4)	167
A.2.4. Alma da coluna à tração (6.2.6.3).....	171
A.2.5. Flexão da placa de extremidade (6.2.6.5)	172
A.2.6. Parafusos à tração (6.2.6.12)	174
A.2.7. Mesa da viga à compressão (6.2.6.7)	174
A.2.8. Alma da viga à tração (6.2.6.3).....	175
A.3. Associação das componentes (molas) em série e em paralelo	175
A.3.1. Resistência	175
A.3.2. Rigidez Inicial.....	176
A.3.3. Curva momento versus rotação.....	177
A.3.4. Verificação da resistência ao corte.....	177
A.3.5. Resultados	178

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 edifícios 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: rígidas ou flexíveis.

Avaliando-se o momento fletor e a rotação associada de uma ligação viga-coluna, apresentada na Figura 0.1 (a), 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.

Para o outro extremo, os membros da ligação apresentam rotações diferentes entre si e a ligação é denominada flexível, Figura 0.1 (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 0.1 (c).

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

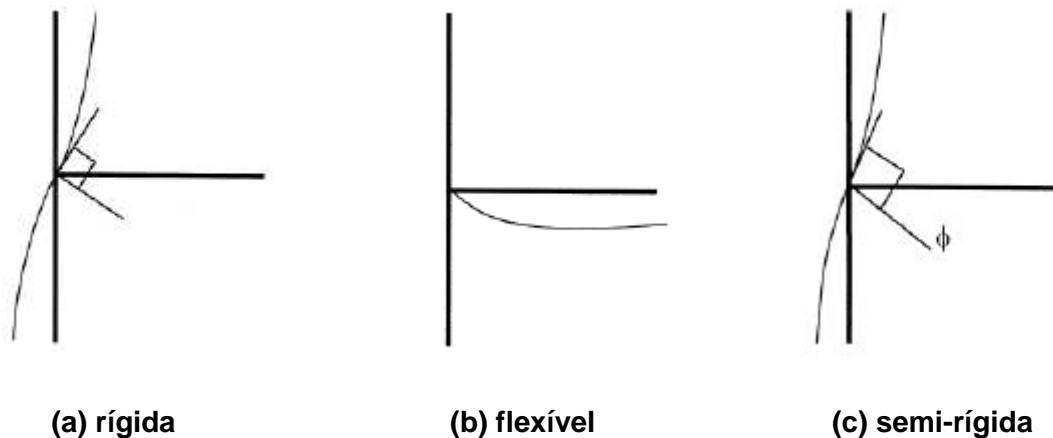


Figura 0.1 – Classificação das ligações de acordo com sua rigidez

No caso de carregamentos verticais, o dimensionamento de pórticos utiliza o conceito de ligações rígidas, e o momento máximo positivo atuante nas vigas do pórtico é maior do que o projetado. Esta diferença, que também gera um alívio 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 poderão estar sujeitas a flexo-compressão. Neste caso, apesar das vigas estarem super dimensionadas - um colapso das colunas, ou melhor, vigas-colunas - poderá ocorrer e mais uma vez a segurança será desconhecida. Como exemplo, na Figura 0.2 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, quando comparado ao dimensionamento realizado para o caso de ligações flexíveis. 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.

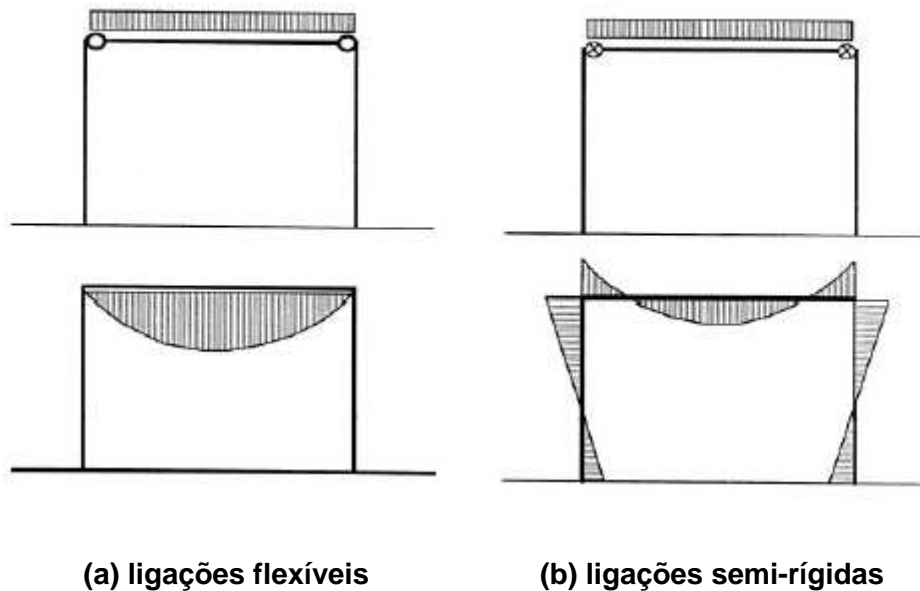


Figura 0.2 – Distribuição elástica de momentos fletores num pórtico simples

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 considerem 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-rígidas. 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 (Eurocode 3, 2003). Estas normas, porém, somente consideram ligações submetidas ao corte e/ou ao momento fletor (Silva *et al.*, 2003) (Lima, 2003). Esta regulamentação não considera a presença de esforço normal (tração/ compressão) nas ligações impondo apenas uma limitação empírica de 5% da resistência plástica da viga como esforço normal máximo para o qual os procedimentos disponíveis se mantém aplicáveis. Vale ressaltar que não existe nenhum fundamento teórico para justificar este limite de 5%.

A presença de força normal pode reduzir significativamente a resistência à flexão de certas ligações em estruturas de aço e a sua não consideração pode conduzir a dimensionamentos com pouca confiabilidade.

Existem alguns tipos de estruturas onde a presença do esforço normal deve ser avaliada, tais como:

- Pórticos de estruturas submetidos a carregamentos horizontais (terremotos ou carga 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 que possuem esforços axiais significantes nas ligações, ver Figura 0.3;
- Estruturas submetidas a explosões como nos casos onde estas são alvos de ataques terroristas.



Figura 0.3 – Ligação de um pórtico de galpões com vigas inclinadas

Um outro exemplo de uma estrutura onde a combinação de esforços de flexão e normal existe foi avaliada por Del Sávio *et al.* (Del Sávio *et al.*, 2005), correspondendo ao sistema vierendeel com ligações semi-rígidas conforme apresentado na Figura 0.4. Nestes pórticos, a princípio, as ligações semi-rígidas foram escolhidas porque conduzem a soluções mais econômicas.

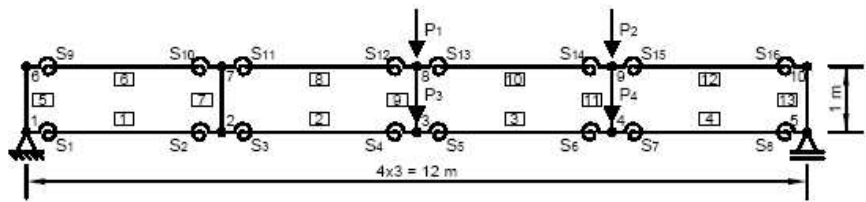
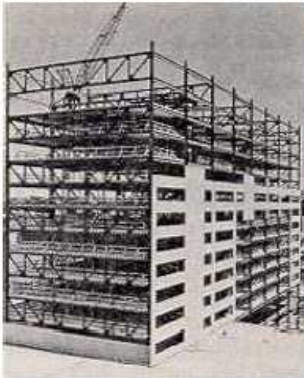


Figura 0.4 – Modelo estrutural idealizado para a viga de vierendeel (Del Sávio *et al.*, 2005)

Com o objetivo de investigar estas ligações viga-coluna, submetidas a momento fletor e força normal, alguns autores têm proposto modelos para o dimensionamento das mesmas. Todavia, as propostas iniciais não foram devidamente validadas ou calibradas com resultados experimentais. Dentre estes trabalhos, pode-se citar Jaspert (Jaspert, 1997), Finet (Laurent, 1994), Cerfontaine (Cerfontaine, 2001) e Silva & Coelho (Silva *et al.*, 2001).

Somente com Wald (Lima, 2003), (Wald *et al.*, 2001), que passaram a ser realizados alguns ensaios experimentais em laboratório para ligações viga-coluna em placa de extremidade estendida e ligações de emendas de vigas submetidas a momento fletor e esforço normal de compressão. Os resultados obtidos nestes ensaios foram utilizados na calibração do modelo proposto pelo mesmo autor. Estes trabalhos serão abordados com mais ênfase no capítulo dois desta dissertação.

1.2 Evolução Histórica das Ligações Semi-Rígidas

Um resumo do estado da arte de ligações estruturais em aço foi realizado por Chan and Chui (Chan *et al*, 2000) 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 (Wilson *et al*, 1917) 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 (Young *et al*, 1934) em 1934 e por Rathbun (Rathbun, 1936) em 1936. Um pouco mais tarde, Bell *et al* (Bell *et al*, 1959) 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 investigado através de dezesseis ensaios realizados por Sommer (Sommer, 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 utilizadas 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 (Ostrander, 1970), Bailey (Bailey, 1970) e Surtees & Mann (Surtees *et al*, 1970), todos em 1970; por Agerskov (Agersov, 1976), além dos ensaios de Packer & Morris (Packer *et al*, 1977) e Johnson & Walpole (Ribeiro, 1998) 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 (Mesquita, 2002), 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*. (Lima, 2003), (Cruz *et al*, 1998), (Cruz *et al*, 1998) realizou em 1987 treze ensaios com três básicas ligações identificadas como sendo da série 101,

considerando ligações com placa de extremidade estendida, ligações com cantoneiras de alma e ligações com cantoneiras de apoio.

Os dezesseis ensaios da série 102 foram realizados por Brozetti (Cruz *et al*, 1998) (Cruz *et al*, 1998) em 1980, que abordou ligações com placa de extremidade ajustada e estendida. Zoetemeijer, (Cruz *et al*, 1998), (Cruz *et al*, 1998) em 1981, foi 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 (Cruz *et al*, 1998) (Cruz *et al*, 1998) 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 (Cruz *et al*, 1998), (Cruz *et al*, 1998) em 1987 e Elimerer (Cruz *et al*, 1998), (Cruz *et al*, 1998) em 1988, que ensaiaram respectivamente, quinze ensaios da série 106 e quatro ensaios da série 107. Sabe-se que a série 108 foi composta por quarenta e cinco ensaios realizados por Lener (Cruz *et al*, 1998), (Cruz *et al*, 1998) 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 (Cruz *et al*, 1998), (Cruz *et al*, 1998), realizou os seis ensaios da série 109 de ligações com placa de extremidade de nós internos com seis enrijecedores na mesa da coluna. Com relação à série 103, são apresentados cinquenta e seis ensaios de ligações mistas com as mais variadas tipologias por diversos autores.

Azizinamini (Lima, 2003) 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 (Queiroz, 1995) realizou, em 1995, uma série de ensaios de ligações soldadas.

Carvalho (Carvalho *et al*, 1998), em 1997, realizou três ensaios de ligações com cantoneiras de alma, cantoneiras de topo e apoio no eixo de maior inércia da coluna. Lima (Lima, 2003), em 1998, seguindo a mesma metodologia utilizada por Carvalho (Carvalho *et al*, 1998), também realizou três ensaios com o mesmo tipo de ligação, mas efetuados segundo o eixo de menor inércia da coluna. Em 2003, ainda

Lima (Lima, 2003) realizou mais oito ensaios de ligações com placa de extremidade ajustada e oito para placa de extremidade estendida.

Em 1998, Ribeiro (Ribeiro, 1998) 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.

Modelos numéricos vem sendo desenvolvidos, baseados nos ensaios experimentais, para se conseguir aproximar os resultados. Kattner e Crisinel (Kattner *et al*, 1999), desenvolveram modelos numéricos através do método de elementos finitos, para caracterizar um modelo bi-dimensional que simule o comportamento de ligações viga-coluna mistas, apresentando a influência do dimensionamento da ligação para a estrutura global. Entretanto os modelos desenvolvidos apresentam limitações de aplicações, podendo ser utilizado apenas para o caso específico do estudo realizado.

Em 2006, Vellasco *et al.* (Vellasco *et al*, 2006) publicaram um trabalho onde era apresentada uma análise paramétrica de pórticos mistos, aço-concreto, com ligações semi-rígidas. Para a análise foram considerados parâmetros como a rigidez da ligação, o sistema estrutural e a estabilidade lateral do pórtico, baseada no Eurocode 3, através de um modelo em elementos finitos, considerando a não-linearidade geométrica e do material e o comportamento semi-rígido da ligação. Com o estudo, foi possível verificar a economia de 15% em termos de peso de aço se comparada a métodos convencionais.

Kim, Yoon e Kang (Kim *et al*, 2007), em 2007 apresentaram uma análise com modelagem através de elementos finitos para estruturas com ligações aparafusadas, onde foram pesquisados quatro modelos distintos, considerando-se a protensão dos parafusos e elementos de contato.

Gil e Bayo (Gil *et al*, 2007), também em 2007, apresentaram modelos numéricos para ligações semi-rígidas mistas, como uma configuração alternativa para o projeto, baseados nos ensaios experimentais realizados em um outro artigo, de própria autoria, comparando o desempenho das estruturas convencionais e da alternativa proposta. Os estudos apresentaram melhoria em relação ao método convencional aplicado.

Feng Fu (Fu *et al*, 2007), em 2007, realizou análise paramétrica para estudar as ligações semi-rígidas mistas com aproximação por elementos finitos 3D, conseguindo representar os modos de falha existentes neste tipo de ligação.

Verificou-se que, com o aumento da espessura da placa de extremidade, houve aumento de capacidade de resistência ao momento fletor, porém pouco significativo.

Daniūnas e Urbonas (Daniūnas *et al*, 2008), em 2008, estudaram as ligações semi-rígidas em pórticos estruturais, através de placa de extremidade aparafusadas, sujeitas a esforço normal e momento fletor, utilizando o método das componentes. O estudo demonstrou que a aplicação do esforço normal na estrutura influencia a rigidez rotacional, a distribuição das tensões e deslocamentos do pórtico.

Del Sávio (Del Sávio *et al*, 2009), em 2009, apresentou formulação para generalizar o modelo para ligações viga-coluna submetidas a esforço normal e momento fletor. Seu artigo lista os métodos que podem ser utilizados para a avaliação dos esforços e é descrita a formulação proposta para a verificação desta análise, que foi comparada a ensaios experimentais realizados por Lima (Lima, 2003).

1.3 Objetivos e Metodologia

O objetivo deste trabalho consiste em avaliar o comportamento estrutural de ligações viga-coluna com placa de extremidade ajustada à altura da viga, submetidas a momento fletor e esforço normal de tração ou compressão, através de uma análise numérica baseada no método dos elementos finitos, na tentativa de averiguar a limitação empírica de 5% imposta pelo Eurocode 3 (Eurocode 3, 2003).

A metodologia utilizada nesta avaliação consistiu na comparação dos resultados numéricos com resultados experimentais realizados em outros trabalhos, onde foram estudadas também ligações com placa de extremidade estendida, propondo-se um modelo mecânico elasto-plástico, baseado nas recomendações de projeto apresentada pelo Eurocode 3 (Eurocode 3, 2003).

1.4 Escopo

O presente capítulo apresentou a motivação para o desenvolvimento deste trabalho, especificou os principais objetivos a serem alcançados, além de mostrar uma pequena descrição do conteúdo de cada capítulo conforme pode ser observado a seguir.

No capítulo dois são apresentadas algumas considerações sobre ligações viga-coluna e uma descrição do método das componentes por se tratar do

procedimento mais completo para o projeto de ligações semi-rígidas em estruturas em aço.

No capítulo três são descritos os ensaios experimentais realizados por Lima (Lima, 2003), que serão utilizados como base de comparação ao estudo numérico das ligações viga-coluna com placa de extremidade ajustada à altura da viga analisadas no presente trabalho.

No capítulo quatro apresenta-se a calibração do modelo numérico proposto, feita através de comparação com os ensaios experimentais apresentados no capítulo três. Serão descritas as premissas utilizadas no modelo desenvolvido no *Ansys*, apresentando apenas os resultados realizados para ligações viga-coluna com placa de extremidade ajustada à altura da viga com aplicação de momento fletor.

O capítulo cinco, utilizando a mesma metodologia aplicada no capítulo quatro, apresentará os resultados e as discussões sobre a análise das ligações com placa de extremidade submetidas a momento fletor e força normal. Haverá também a comparação dos resultados com o modelo proposto por Cerfontaine, e calculado por Nunes (Nunes, 2006), (Nunes *et al*, 2007), (Nunes *et al*, 2006), (Nunes *et al*, 2005), em sua dissertação.

Finalmente no capítulo seis, são tecidas as considerações finais com as principais conclusões obtidas, além de algumas propostas para trabalhos futuros.

2 LIGAÇÕES VIGA X COLUNA

2.1 Introdução

As ligações estruturais em aço, conforme mencionado no capítulo 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 à flexão destes membros. De forma análoga, 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 de 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 precisão adequada, sendo extremamente importante se conhecer o seu real comportamento.

A melhor forma de 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, $S_{j,Rd}$;
- Capacidade de rotação, Φ_{cd} .

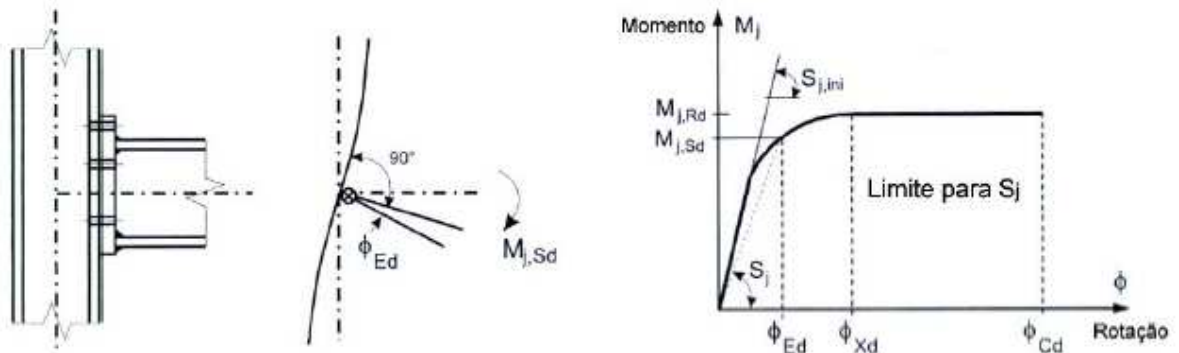


Figura 2.1 – Propriedades para dimensionamento de uma ligação

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 esteja abaixo da curva real da ligação.

2.2 Tipos de análise para a ligação

As características das leis constitutivas adotadas dependem do tipo de análise a ser efetuada para as ligações em estudo, segundo as recomendações do Eurocode 3 (Eurocode 3, 2003), que propõem três tipos de análises diferentes:

- análise global elástica;
- análise global rígido-plástica;
- análise global elasto-plástica.

Para a análise global elástica, as ligações são classificadas de acordo com sua rigidez inicial rotacional $S_{j,ini}$. Neste tipo de análise, a rigidez rotacional pode ser simplificada por $S_{j,ini}/\eta$, onde η pode ser obtido na . Porém, pode-se simplificar o processo, adotando o procedimento a seguir:

- enquanto o momento aplicado na ligação, $M_{j,Sd}$ não exceder $2/3 M_{j,Rd}$, a rigidez inicial da ligação $S_{j,ini}$ deve ser usada - (a);
- quando o momento aplicado na ligação, $M_{j,Sd}$ ultrapassar $2/3 M_{j,Rd}$, a rigidez inicial da ligação adotada deve ser $S_{j,ini} / \eta$ - (b);
- alternativamente, permite-se adotar o valor de $S_{j,ini}/\eta$ para a rigidez inicial da ligação na análise global elástica, para todos os valores de momento fletor $M_{j,Sd}$ conforme apresentado na (c).

Tabela 2.1 – Coeficiente de modificação de rigidez η

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

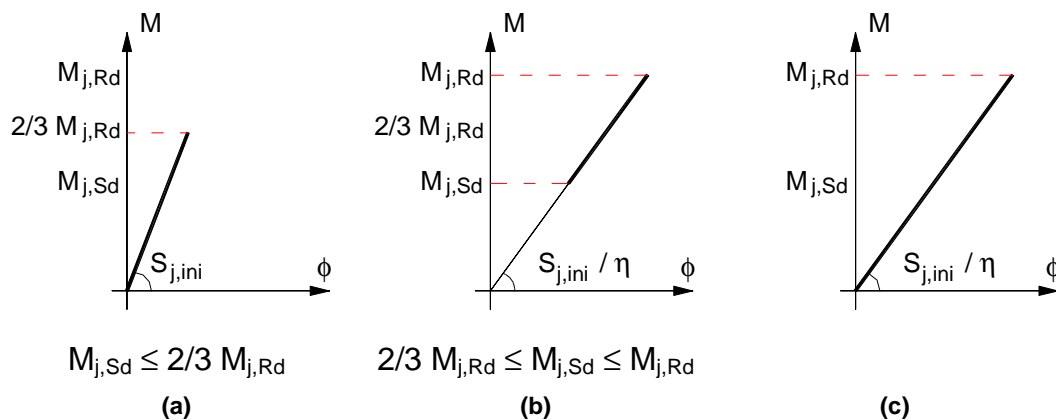


Figura 2.2 – Rigidez inicial a ser usada na análise global elástica (Eurocode 3,1998), (Eurocode 3, 2003)

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

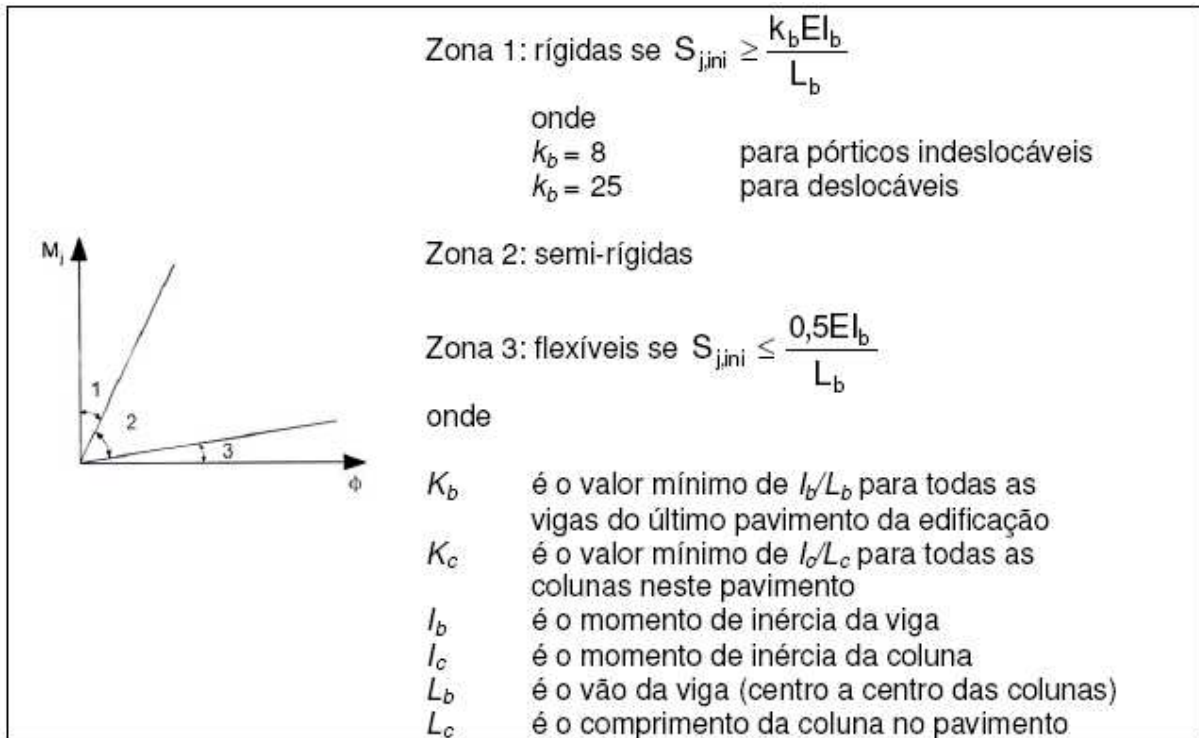


Figura 2.3 – Limites para classificação das ligações de acordo com a rigidez inicial

As ligações, quando analisadas como global rígido-plástica, são classificadas conforme sua resistência ao momento fletor, ou seja, ligações com resistência parcial ou completa. Neste tipo de análise, nenhuma consideração sobre a rigidez inicial a ser adotada é exigida.

Quando se utiliza a análise global elasto-plástica, as ligações são classificadas de acordo com sua rigidez inicial e a resistência. Para esta análise a curva momento *versus* rotação é simplificada adotando-se a representação bi-linear apresentada na , onde o valor η é igual a 2 para ligações aparafusadas com placa de extremidade.

Para a análise deste projeto será utilizada a aproximação da curva de forma multilinear, conforme apresentada na , que representa de forma mais real, a curva a ser utilizada para análise.

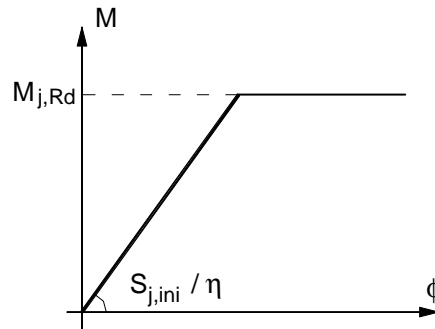


Figura 2.4 – Aproximação bi-linear da curva momento *versus* rotação (Eurocode 3, 1998), (Eurocode 3, 2003)

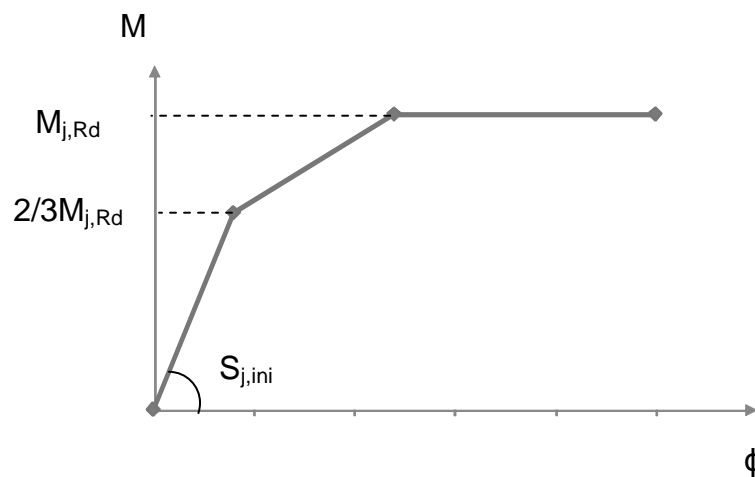


Figura 2.5 – Aproximação da curva momento *versus* rotação (Eurocode 3, 1998), (Eurocode 3, 2003)

2.3 Métodos para Análise de Ligações Viga-Coluna

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 viga-coluna, geralmente conhecidos como modelos de molas, são

baseados na simulação da ligação através da utilização de um conjunto de componentes rígidos e flexíveis. A não-linearidade 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 (Wales *et al*, 1983), Chmielowiec and Richard (Chmielowiec *et al*, 1987), Tschemmerneegg e Humer (Tschemmerneegg *et al*, 1987), (Tschemmerneegg *et al*, 1988), Silva e Coelho (Silva *et al*, 2000), Silva *et al*. (Silva *et al*, 2001) e finalmente, Jaspert (Jaspert, 2000). 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 meio analíticos.

O primeiro passo para o desenvolvimento de um modelo mecânico de uma ligação viga-coluna é a identificação das componentes presentes na mesma. Estas representam as trajetórias de deformação existente 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 (Eurocode 3, 2003).

2.4 Descrição do Método das Componentes

O Eurocode 3 (Eurocode 3, 2003) utiliza 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: ligações completamente soldadas, ligações com placa de extremidade e 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 usado para fins científicos ou para se obter curvas momento *versus* rotação não-lineares para serem utilizadas em métodos avançados da análise estrutural.

Neste trabalho, será abordado um tipo específico de ligação aparafusada: placa de extremidade ajustada à altura da viga. Porém, o método de dimensionamento será realizado sobre placa de extremidade estendida, caracterizada pela presença de pelo menos uma linha de parafusos fora da região compreendida entre as mesas da viga, tendo em vista que, as ligações com placa de extremidade ajustada são uma simplificação deste método.

Na Figura 2.6 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 (Eurocode 3, 2003).

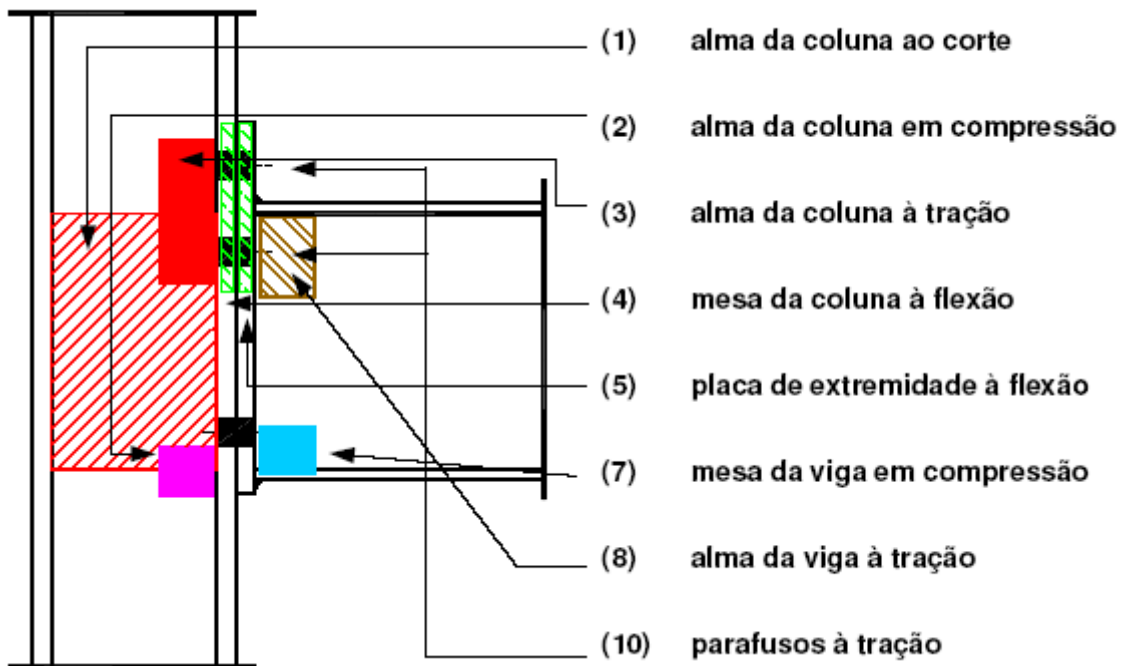


Figura 2.6 – Componentes de uma ligação com placa de extremidade (Faella *et al*, 2000).

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 considerando-se 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 2.7, 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.

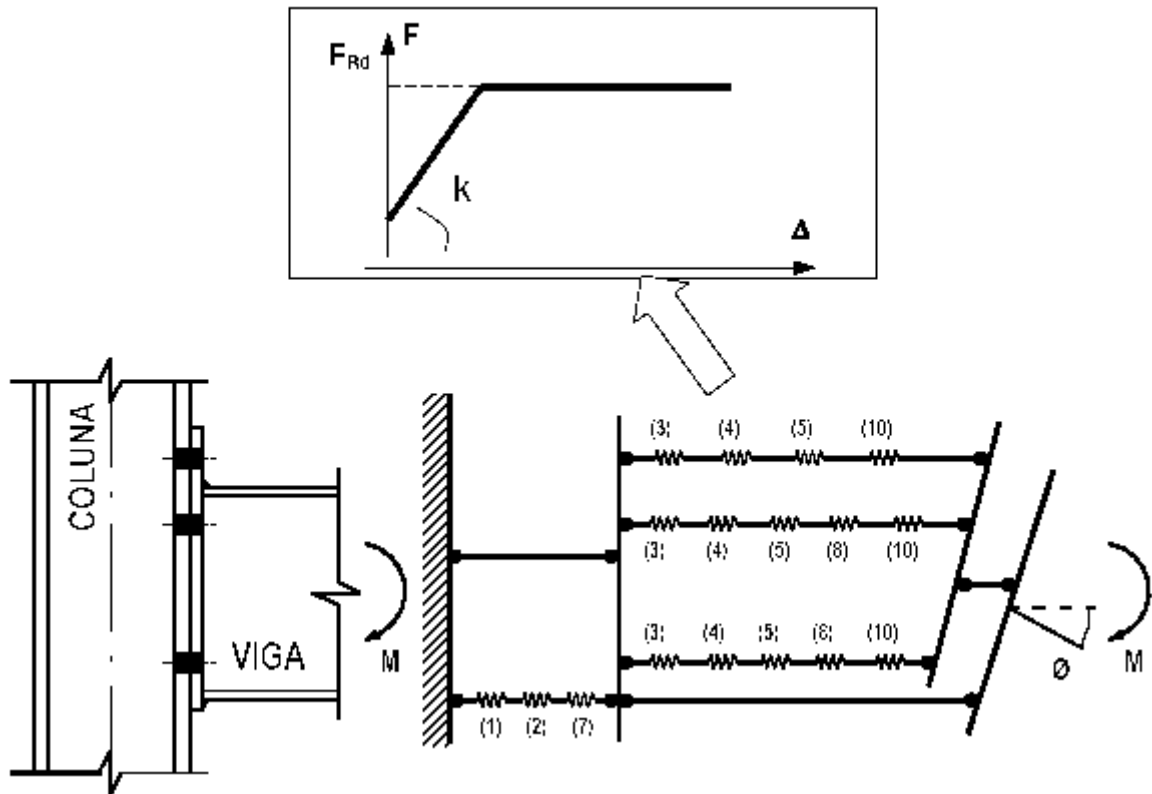


Figura 2.7 – Modelo mecânico – ligação com placa de extremidade estendida

2.4.1 Resistência à Flexão de uma Ligação

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

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

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.

2.4.2 Rigidez Inicial de uma Ligação

Com referência ao cálculo da rigidez inicial rotacional da ligação, o processo de cálculo proposto pelo Eurocode 3 (Eurocode 3, 2003) é representado na Figura 2.8 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.

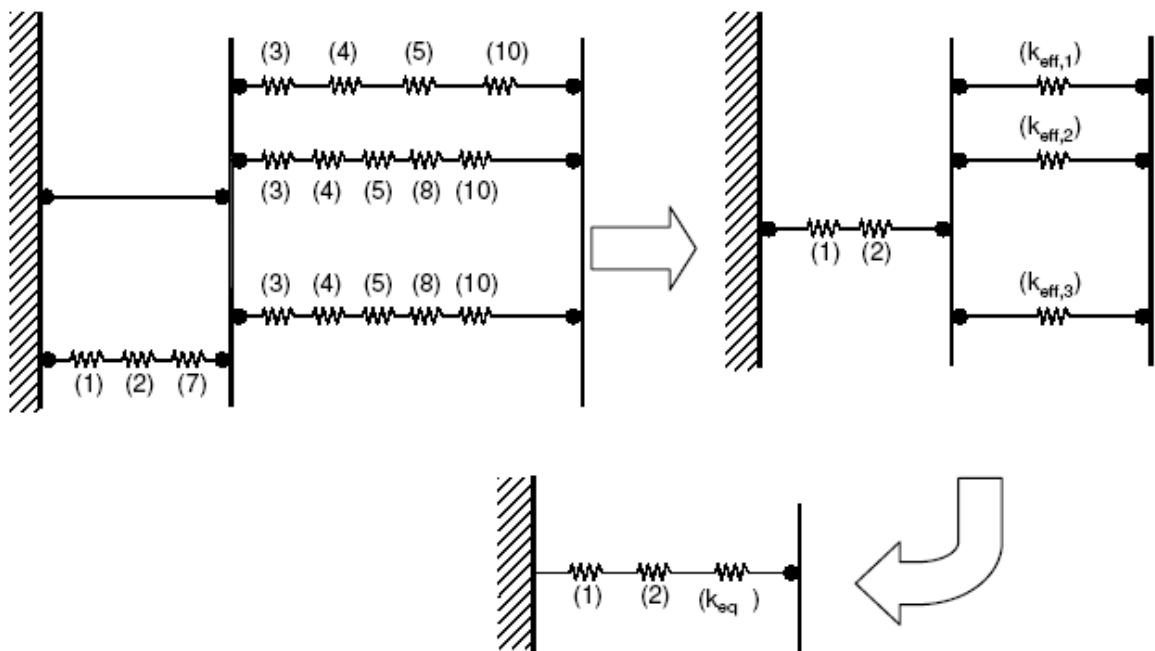


Figura 2.8 – Procedimento para cálculo da rigidez rotacional

A rigidez da componente mesa da viga em compressão (k_7) não é considerada no cálculo da rigidez da ligação, pois tem seu valor adotado igual a infinito.

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

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

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 da linha i .

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),

$$k_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^{n_b} k_{eff,r} h_i}{z_{eq}} \quad (2.3)$$

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

$$z_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^{n_b} k_{eff,i} h_i^2}{\sum_{i=1}^{n_b} k_{eff,i} h_i} \quad (2.4)$$

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

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

Onde E é módulo de elasticidade do aço, k_1 e k_2 são valores calculados para a rigidez das componentes 1 e 2 respectivamente, z é o braço de alavanca a ser considerado (ver Figura 2.9), e μ é uma razão entre rijezas ($S_{j,ini}/S_j$) obtido através da eq. (2.6),

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

$$\text{se } \frac{2}{3} M_{j,Rd} \leq M_{j,Sd} \leq M_{j,Rd} \rightarrow \mu = \left(\frac{1,5 M_{j,Sd}}{M_{j,Rd}} \right)^{2,7} \quad (2.6)$$

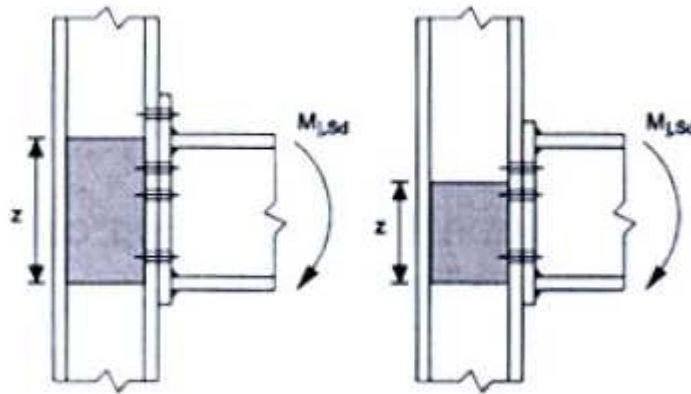


Figura 2.9 – Centro de compressão e braço de alavanca z

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.

2.5 Dimensionamento das Componentes

De acordo com o Eurocode 3 (Eurocode 3, 2003), a formulação apresentada a seguir somente se aplica se o esforço normal nos membros que compõem a ligação for inferior a 5% da resistência plástica dos mesmos. Considera-se também que a alma da coluna não possui enrijecedores.

2.5.1 Componente 1 – Alma da coluna ao corte

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

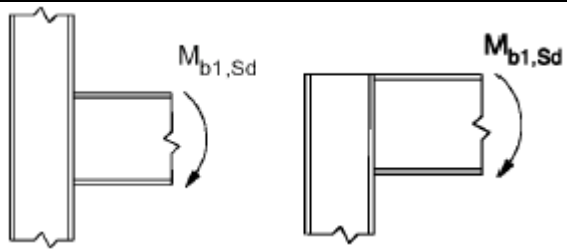
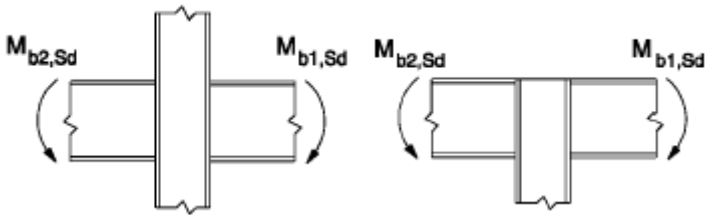
$$V_{wp,Rd} = \frac{0,9f_{y,wc} A_{vc}}{\sqrt{3}\gamma_{M0}} \quad (2.7)$$

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 tornando igual 1,0 e A_{vc} é a área de corte da alma da coluna, sendo dada pela eq (2.8),

$$A_{vc} = A - 2b_{fc}t_{fc} + (t_{wc} + 2r_c)t_{fc} \quad (2.8)$$

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.

Tabela 2.2 – Valores aproximados para o parâmetro de transformação β

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

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

$$k_1 = \frac{0,38A_{vc}}{\beta z} \quad (2.9)$$

Onde A_{vc} foi definida pela eq. (2.8); 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 altura da alma submetida ao cisalhamento descontando-se as mesas e os raios de concordância.

2.5.2 Componente 2 – Alma da coluna à compressão

A alma da coluna está sujeita a forças concentradas transmitidas pela mesa da via. 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 normal e ao momento fletor atuantes na extremidade da coluna, conforme Figura 2.10.

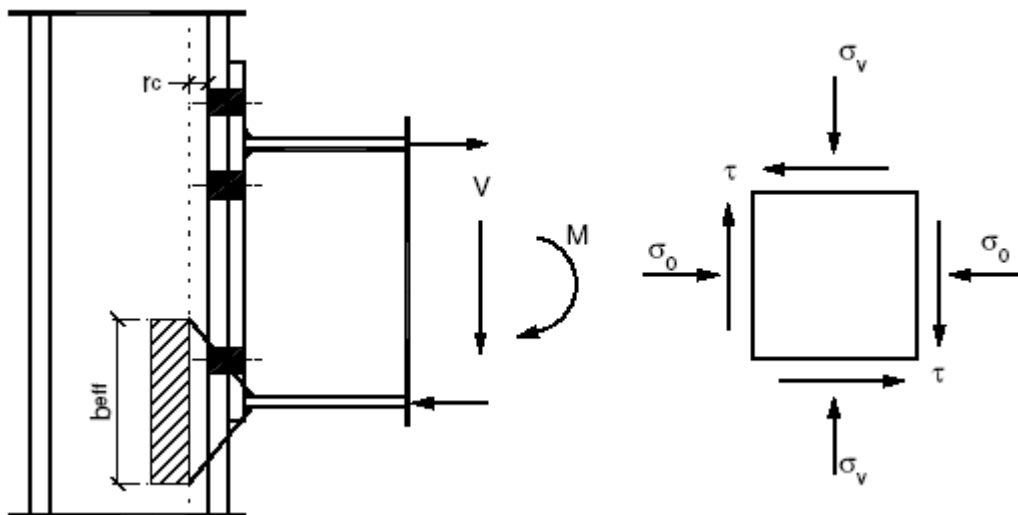


Figura 2.10 – Tensões normais e cisalhantes na zona comprimida da alma da coluna

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 sujeita à compressão será obtida através da eq. (2.10) e devem ser observadas as propriedades geométricas apresentadas na Figura 2.11.

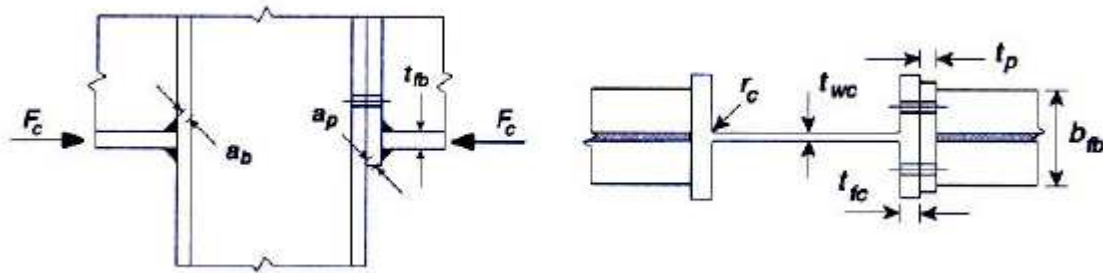


Figura 2.11 – Propriedades geométricas da componente alma da coluna em compressão

$$F_{c,wc,Rd} = \frac{\omega k_{wc} b_{eff,c,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} \Leftrightarrow F_{c,wc,Rd} \leq \frac{\omega k_{wc} \rho b_{eff,c,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M1}} \quad (2.10)$$

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.

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

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),

$$\begin{aligned} \text{Se } \bar{\lambda}_p \leq 0,72 \quad \rho &= 1,0 \\ \text{Se } \bar{\lambda}_p > 0,72 \quad \rho &= \frac{(\bar{\lambda}_p - 0,2)}{\lambda_p^2} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Onde $\bar{\lambda}_p$ é a esbeltez da placa dada pela eq. (2.13),

$$\bar{\lambda}_p = 0,932 \sqrt{\frac{b_{\text{eff},c,wc} d_{wc} f_{y,wc}}{Et_{wc}^2}} \quad (2.13)$$

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 normal ou momento fletor, exceda $0,7f_{y,wc}$ (adjacente ao raio de concordância para perfis laminados), eq (2.14)¹,

$$\begin{aligned} \text{Se } \sigma_{\text{com,Ed}} \leq 0,7f_{y,wc} \quad k_{wc} &= 1,0 \\ \text{Se } \sigma_{\text{com,Ed}} > 0,7f_{y,wc} \quad k_{wc} &= 1,7 - \frac{\sigma_{\text{com,Ed}}}{f_{y,wc}} \end{aligned} \quad (2.14)$$

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

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

$$k_2 = \frac{0,7b_{\text{eff},c,wc} t_{wc}}{d_c} \quad (2.15)$$

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.

Tabela 2.3 – Parâmetro de redução ω

Parâmetro de transformação β	Parâmetro de redução ω
$0 \leq \beta \leq 0,5$	$\omega = 1$
$0,5 \leq \beta \leq 1$	$\omega = \omega_1 + 2(1-\beta)(1-\omega_1)$
$\beta = 1$	$\omega = \omega_1$
$1 < \beta < 2$	$\omega = \omega_1 + 2(1-\beta)(\omega_2 - \omega_1)$
$\beta = 2$	$\omega = \omega_2$
$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 \left(\frac{b_{\text{eff},c,wc} t_{wc}}{A_{vc}} \right)^2}}$	$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{1 + 5,2 \left(\frac{b_{\text{eff},c,wc} t_{wc}}{A_{vc}} \right)^2}}$

Onde A_{vc} e β conforme definições anteriores.

2.5.3 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),

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

Onde $b_{\text{eff},t,wc}$ 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 no §2.3.4 e obtido na Tabela 2.4 e ω é obtido na Tabela 2.3 substituindo-se $b_{\text{eff},c,wc}$ por $b_{\text{eff},t,wc}$.

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

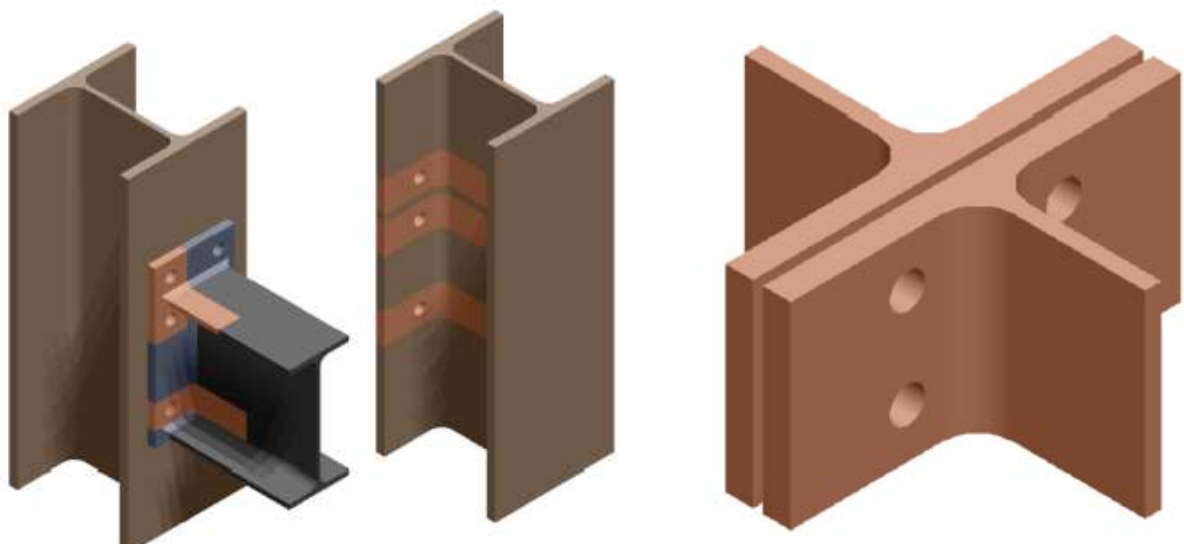
$$k_3 = \frac{0,7b_{\text{eff,t,wc}} t_{\text{wc}}}{d_c} \quad (2.17)$$

2.5.4 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 normal deste “T-Stub” aparafusado pode ser calculada considerando-se três diferentes tipos de mecanismos, isto é, modos 1, 2 e 3, respectivamente, conforme Figura 2.13.

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 início 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 2.14.

A Figura 2.12 caracteriza o “*T-Stub*” em uma ligação viga-coluna.



(a) ligação viga-coluna

(b) ligação “*T-stub*” – modelo para ensaios

Figura 2.12 – Identificação de “*T-Stubs*” em ligações viga-coluna

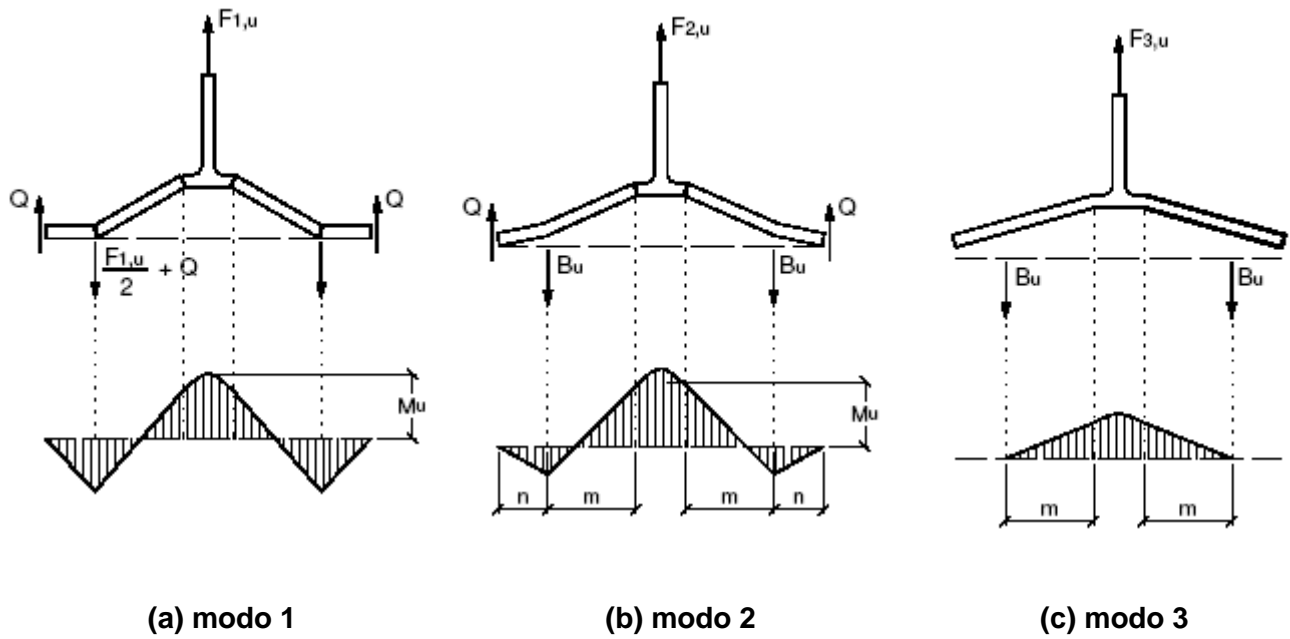


Figura 2.13 – Modos de ruptura de um “*T-Stub*” aparafusado

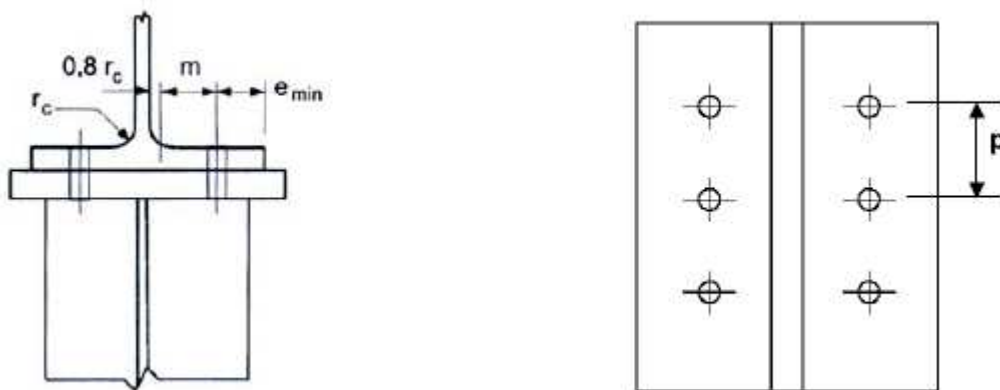


Figura 2.14 – Definição de parâmetros geométricos – componente 4

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

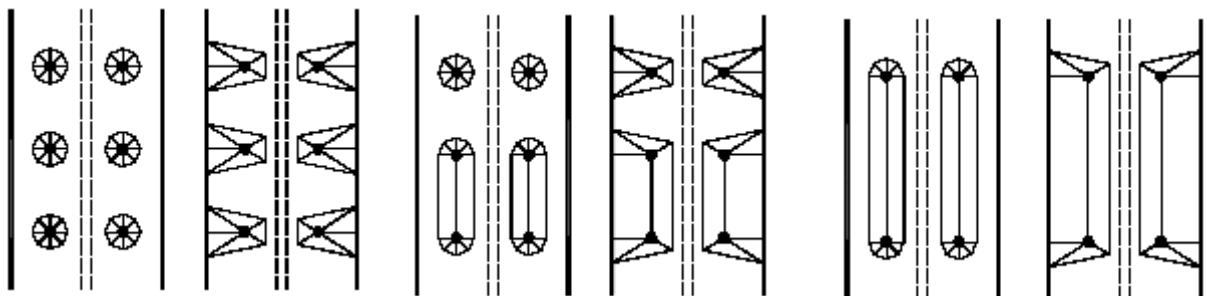
Onde $M_{pl,1,Rd}$ é obtido através da eq. (2.19) e m é definido pela Figura 2.14,

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0,25l_{eff,1}t_{fc}^2 f_{y,fc}}{\gamma_{M0}} \quad (2.19)$$

Onde $l_{eff,1}$ obtido na ; $t_{y,fc}$ 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 não-circulares que 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 2.14 devem ser considerados.

Quando uma ligação possuir mais do que uma linha de parafusos em tração, três casos possíveis devem ser analisados, conforme Figura 2.15. 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.



(a) linha individual

(b) como parte de um grupo

(c) grupo completo

Figura 2.15 – Modelos de linhas de ruptura para grupos de linhas de parafusos

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

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

No mecanismo tipo 2, o colapso ocorre pela formação de duas rótulas plásticas localizadas nas seções correspondentes à ligação entre a mesa e 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,

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

Onde $M_{pl,2,Rd}$ é obtido através da eq. (2.21), m e n (igual a e_{min}) são definidos na Figura 2.15 e $B_{t,Rd}$ é a resistência a tração de um parafuso individualmente (a ser definida posteriormente).

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{0,25I_{eff,2}t_1^2f_y}{\gamma_{M0}} \quad (2.21)$$

Onde I_{eff} é obtido na Tabela 2.4.

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),

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

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

$$k_4 = \frac{0,9I_{eff}t_{tc}^3}{m^3} \quad (2.23)$$

Onde I_{eff} é o menor comprimento efetivo (tomado individualmente ou como parte de um grupo) para linha de parafusos a ser avaliada apresentada na Tabela 2.4 e m é definido na Figura 2.15.

2.5.5 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 os mesmos critérios. Porém, devem ser observados as definições geométricas apresentadas na Figura 2.16. Nesta figura, pode-se perceber também que os grupos de linhas de parafusos de cada lado da placa de

extremidade são tratados como “*T-Stub*” 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-Stub*s”.

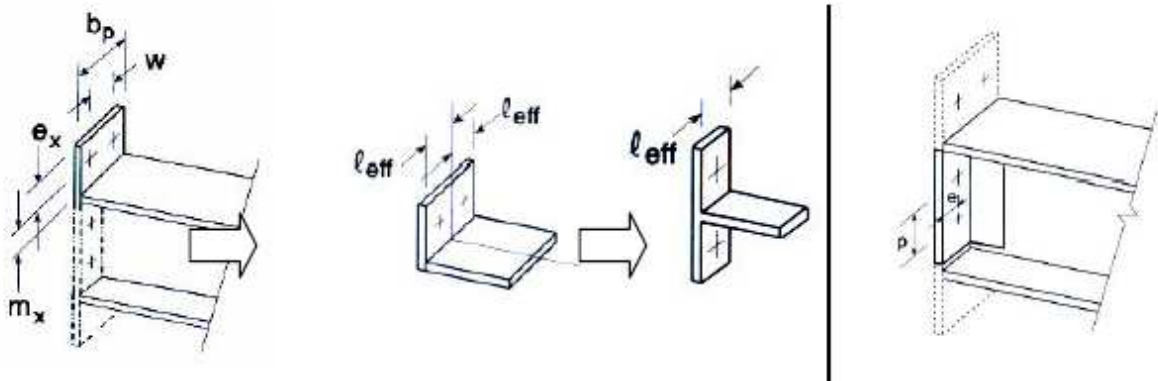


Figura 2.16 – Definição e parâmetro geométricos – componente 5

Os comprimentos efetivos serão calculados conforme as expressões apresentadas na Tabela 2.5. Torna-se necessária também a definição de dois coeficientes, λ_1 e λ_2 , equações (2.25) e (2.26), respectivamente. Nestas duas equações, os parâmetros e , m_1 e m_2 são mostrados na Figura 2.17.

Através da eq. (2.24), obtém-se a parcela de rigidez referente à componente placa da extremidade submetida à flexão.

$$k_5 = \frac{0,9I_{\text{eff}} t_p^3}{m^3} \quad (2.24)$$

Onde I_{eff} é o menor comprimento efetivo (tomado individualmente ou como parte de um grupo) para linha de parafusos a ser avaliada apresentada na Tabela 2.5 e m é definido na Figura 2.14.

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

Localização da linha de parafusos	Linha de parafusos considerada individualmente	
	Formas circulares ($l_{eff,cp}$)	Outras formas ($l_{eff,nc}$)
Linha acima da mesa tracionada da viga	O menor de $\begin{cases} 2\pi m_x \\ \pi m_x + 2e \\ \pi m_x + w \end{cases}$	O menor de $\begin{cases} 4m_x + 1,25e_x \\ e + 2m_x + 0,625e_x \\ 0,5b_p \\ 0,5w + 2m_x + 0,625e_x \end{cases}$
Primeira linha abaixo da mesa tracionada da viga	$2\pi m$	αm
Outra linha intermediária	$2\pi m$	$4m + 1,25e$
Linha na extremidade	$2\pi m$	$4m + 1,25e$
Modo 1	$l_{eff,1} \leq l_{eff,cp}$, mas $l_{eff,1} \leq l_{eff,nc}$	
Modo 2	$l_{eff,2} = l_{eff,nc}$	
Localização da linha de parafusos	Linha de parafusos considerada como parte de um grupo de linhas de parafusos	
	Formas circulares ($l_{eff,cp}$)	Outras formas ($l_{eff,nc}$)
Linha acima da mesa tracionada da viga	-	-
Primeira linha abaixo da mesa tracionada da viga	$\pi m + p$	$0,5p + \alpha m - (2m + 0,625e)$
Outra linha intermediária	$2p$	p
Linha na extremidade	$\pi m + p$	$2m + 0,625e + 0,5p$
Modo 1	$\sum l_{eff,1} = l_{eff,nc}$, mas $\sum l_{eff,1} \leq \sum l_{eff,cp}$	
Modo 2	$\sum l_{eff,2} = \sum l_{eff,nc}$	

Onde α é obtido com auxílio das curvas apresentadas na Figura 2.17.

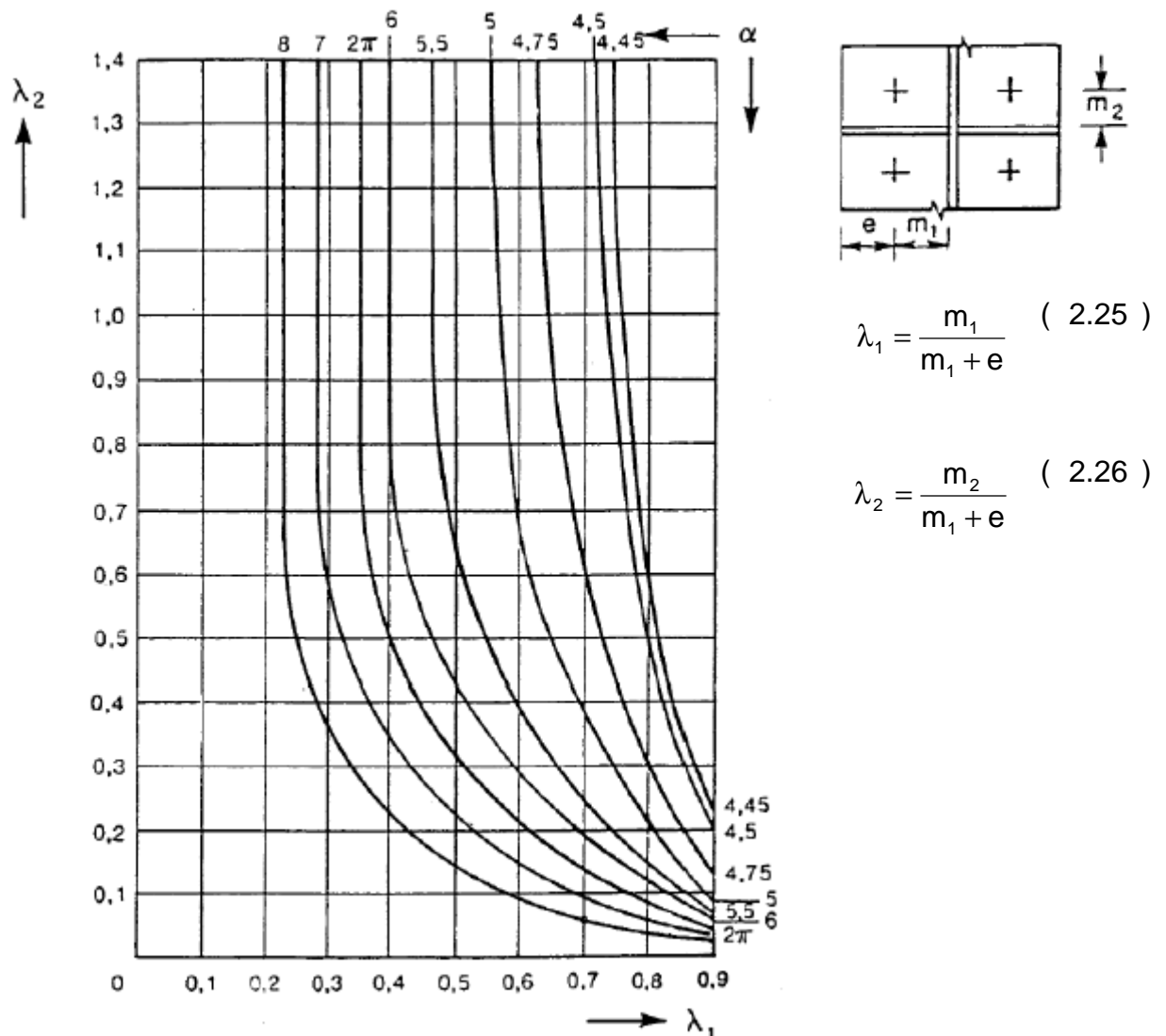


Figura 2.17 – Curvas para obtenção do coeficiente α (Eurocode 3).

2.5.6 Componente 7 – mesa da viga à compressão

O modelo mecânico apresentado na Figura 2.7 é direcionado para 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 à compressão será dada pela eq. (2.27),

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

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

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

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.

2.5.7 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,

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

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

2.5.8 Componente 10 – Parafusos à tração

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

$$F_{t,Rd} = \frac{0,6f_{ub}A_0}{\gamma_{M2}} \quad (2.30)$$

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 parcela de rigidez da componente referente aos parafusos em tração.

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

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.

2.6 **Combinação entre Esforço Normal e Momento Fletor**

De acordo com a formulação apresentada acima, pode-se verificar que nas ligações onde existe esforço normal de tração ou compressão atuando juntamente com o momento fletor, as componentes tendem a ter seu comportamento individual afetado, modificando assim, o comportamento global desta ligação. Isto ocorre porque o esforço normal pode provocar um alívio em determinadas componentes ou aumentar a carga de outras.

A seguir, são apresentados alguns trabalhos realizados nesta área, porém, sem comparação com resultados obtidos experimentalmente.

2.6.1 Pesquisas de Laurent Finet (Laurent, 1994)

F. Laurent desenvolveu um software para dimensionamento de ligações sujeitas à esforços normais e momento fletor, baseado em um modelo mecânico representado na Figura 2.18. Neste trabalho, foram respeitadas as seguintes condições:

- Cada uma das componentes é representada por uma mola unidirecional obedecendo-se as regras propostas pelo Eurocode 3 (Eurocode 3, 2003);
- O comportamento das componentes é não-linear a fim de se caracterizar a curva momento *versus* rotação real das ligações;
- As forças internas atuantes na ligação são equilibradas com as forças externas;
- A resistência de uma determinada componente não pode ser ultrapassada;
- A capacidade última de deformação de uma dada componente não pode ser atingida.

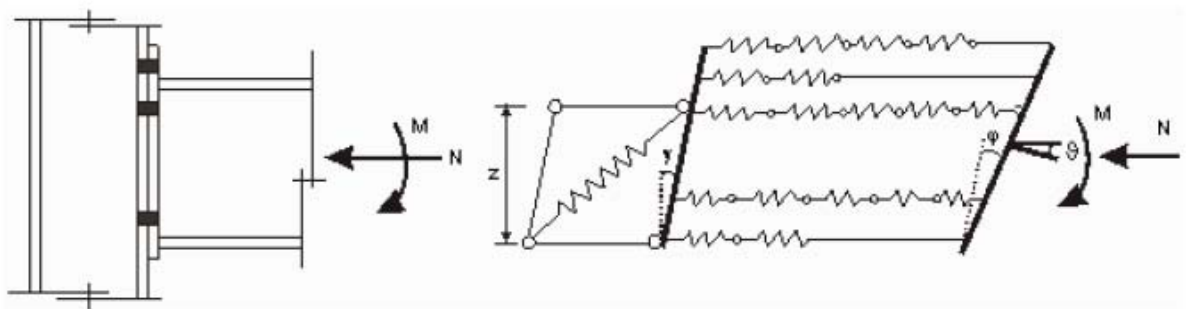


Figura 2.18 – Modelo mecânico proposto por Finet (Laurent, 1994)

Entretanto, neste trabalho, não foi apresentada nenhuma aplicação do modelo proposto, limitando-se a tecer alguns comentários sobre como caracterizar melhor o comportamento global das ligações através do modelo mecânico.

2.6.2 Pesquisas de J. P. Jaspart (Jaspart, 1997)

Jaspart, em sua tese de “agregação”, ampliou o campo de utilização do *software* desenvolvido inicialmente por Finet, para ligações com várias linhas de parafusos em tração, levando-se em consideração o efeito de grupo entre estas diversas linhas de parafusos. Este efeito é extremamente complexo tendo em vista que, nos modelos mecânicos propostos, estas componentes são consideradas desacopladas.

2.6.3 Pesquisas de Frederic Cerfontaine (Cerfontaine, 2001)

F. Cerfontaine desenvolveu um modelo analítico baseado no método das componentes onde isolou a componente do painel de alma da coluna submetido ao cisalhamento. Este modelo caracteriza o comportamento global das ligações submetidas a momento fletor e esforço normal. Aqui serão apresentados alguns comentários sobre este modelo.

2.6.3.1 Diagrama de Interação

Inicialmente, um diagrama de interação – momento fletor *versus* esforço normal – de uma ligação aparafusada é proposto. Este diagrama define uma curva dentro da qual deve estar o par momento fletor – esforço normal aplicado à ligação de forma que esta não atinja a ruína. Obviamente que, se este par estiver fora da região delimitada por esta curva, a ligação não pode resistir aos esforços aplicados. A Figura 2.19 apresenta um exemplo de um diagrama de interação para uma ligação aparafusada com placa de extremidade estendida com cinco linhas de parafusos onde os sentidos indicados para o momento fletor e o esforço normal na ligação são considerados positivos.

Esta curva de interação pode ser definida analiticamente para qualquer ligação aparafusada, sendo caracterizada por N linhas de parafusos e duas linhas em compressão (uma superior, na direção da mesa superior da viga e outra inferior) resultando em $n = N + 2$ linhas no total. As linhas de parafusos só podem trabalhar em tração, ou seja, a resistência das mesmas deve ser sempre maior ou igual a zero. De forma análoga, o esforço nas linhas em compressão deve ser menor ou igual a zero.

Neste modelo, assume-se que todas as linhas e, conseqüentemente, todas as componentes, possuem ductilidade infinita. Como apenas o comportamento na ruína é colocado em evidência aqui e, considerando-se a hipótese de comportamento dúctil, uma análise perfeitamente plástica da ligação, baseada na aplicação do teorema estático (Laurent, 1994) pode ser considerada, ou seja, deve-se encontrar uma distribuição de esforços internos que esteja em equilíbrio com os esforços externos, satisfazendo-se os critérios de ruína.

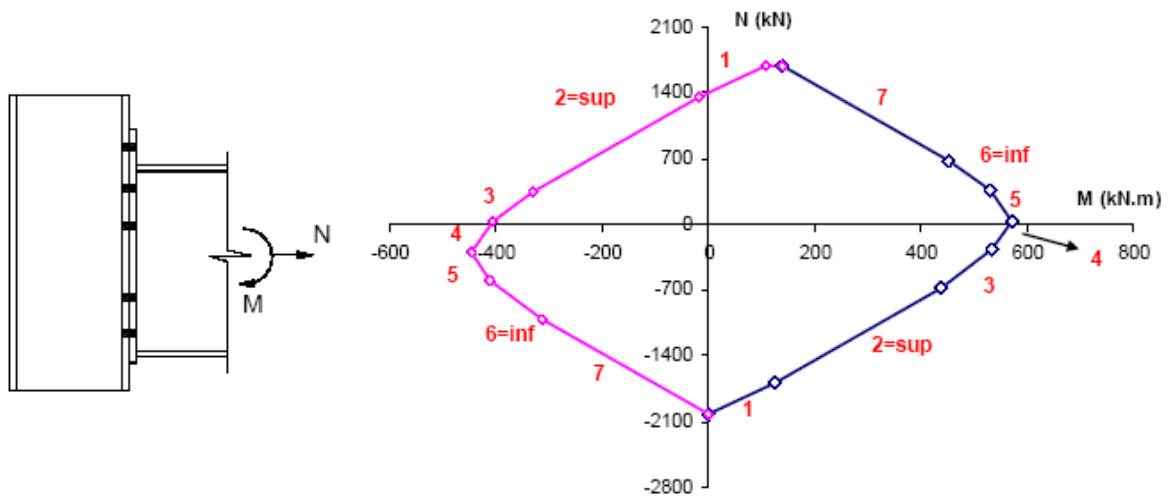


Figura 2.19 – Diagrama de interação de uma ligação com placa de extremidade estendida

A determinação da resistência, a partir do teorema estático, implica que a distribuição dos esforços encontrados na ruína satisfaça as equações de equilíbrio. Para uma ligação submetida a momento fletor M e esforço normal N , tem-se,

$$M = \sum_{i=1}^n h_i \cdot F_i \text{ e } N = \sum_{i=1}^n F_i \quad (2.32)$$

Onde F_i representa a resistência da linha i e h_i é o braço de alavanca desta linha. O ponto cujo braço de alavanca é nulo é o ponto onde aplicam-se os esforços M e N .

O momento fletor e o esforço normal são relacionados entre si através de uma excentricidade dada pela eq. (2.33):

$$e = \frac{M}{N} \quad (2.33)$$

Torna-se necessário então, estabelecer os critérios de resistência para as diferentes linhas de uma ligação, seguindo as recomendações propostas pelo Eurocode 3 (Eurocode 3, 2003).

Conforme apresentado anteriormente, para se definir a rigidez de uma linha de parafusos, por exemplo, é importante conhecer o coeficiente de rigidez e o limite elástico das diferentes componentes considerados no nível de cada linha. Logo, uma linha será representada por uma série de molas que representam cada uma das componentes, sendo a resistência desta igual a resistência da componente mais fraca desta linha. Vale ressaltar também que devem ser considerados os efeitos de grupo entre duas linhas de parafusos $[m,p]$ fornecendo um valor de resistência de grupo F_{mp}^{Rd} . Portanto, torna-se interessante descrever os critérios de resistência que os esforços devem satisfazer, para todas as componentes:

$$\sum_{i=m}^p F_i \leq F_{mp}^{Rd\alpha} \quad m = 1, \dots, p \quad \text{e} \quad p = m, m+1, \dots, n \quad (2.34)$$

Onde $F_{mp}^{Rd\alpha}$ é a resistência de grupo incluindo as linhas m e p para a componente α . Nos casos onde m é igual a p , $F_{mp}^{Rd\alpha}$ nada mais é do que a resistência individual da linha m para a componente α .

Este critério pode ser escrito para cada uma das componentes α e pode-se perceber então que esta componente α , para a qual $F_{mp}^{Rd\alpha}$ é mínima, e que vai definir a resistência de grupo $[m,p]$, sendo denominada F_{mp}^{Rd} . Esta situação é representada na Figura 2.20 para uma ligação com três linhas de parafusos numerados de 1 a 3. Esta representação omite as linhas em compressão (superior e inferior) pois estas não interagem com as linhas em tração, não intervindo na definição dos grupos.

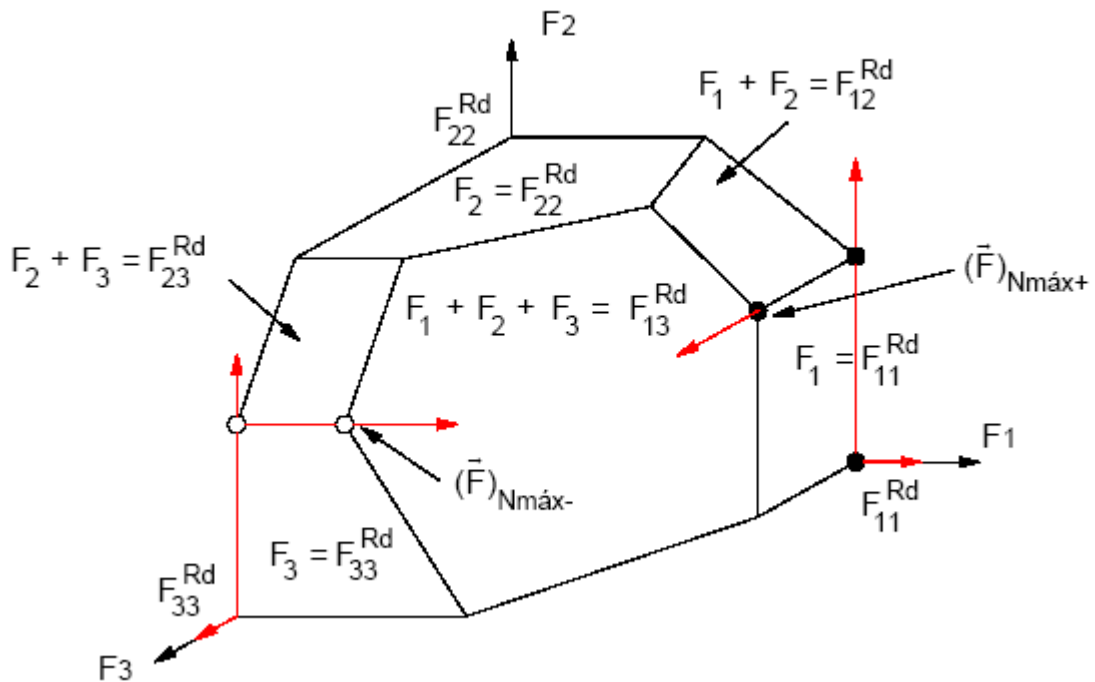


Figura 2.20 – Interação entre três linhas de parafusos e definição de F_j^{Rd}

Na verdade, o gráfico apresentado pode representar a interação entre três linhas de parafusos quaisquer numeradas r , s e t para uma ligação com n linhas. De fato, esta representação dos esforços nas três linhas é uma representação gráfica de um “hiperplano” particular definido pela equação abaixo,

$$F_i = \alpha_i \text{ para } \forall i \quad i \neq r, s, t \quad (2.35)$$

Partindo das equações de equilíbrio e dos critérios de ruína, aos quais as linhas consideradas devem satisfazer, a aplicação passo a passo do teorema estático fornece o teorema apresentado a seguir:

“O critério de interação entre o momento fletor (M) e o esforço normal (N) na ruína é descrito por um conjunto de $2n$ segmentos de reta paralelos 2 a 2, cuja inclinação é sucessivamente o braço de alavanca (h_k) das n linhas e, ao longo destes segmentos, a força (F_k) varia entre 0 e a máxima resistência da linha, definindo-se assim, dois pontos do segmento.”

2.6.4 Pesquisas de Luís Silva e Ana Coelho (Silva *et al*, 2001)

Silva e Coelho propuseram um modelo equivalente, onde cada mola não-linear foi substituída por duas molas elásticas equivalentes, utilizando-se uma formulação de energia e uma análise de estabilidade pós-limite. Este modelo analítico foi aplicado a uma ligação soldada extraída do banco de dados SERICON II (Klein 105.010), (Cruz *et al*, 1998), apresentada da Figura 2.21.

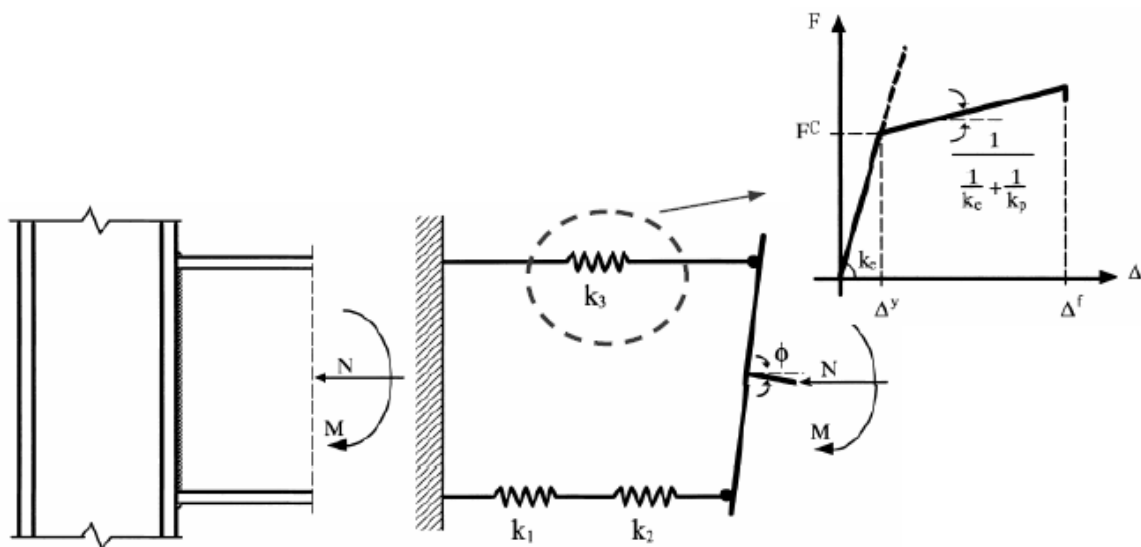


Figura 2.21 – Ligação viga-coluna soldada com respectivo modelo de molas (Silva *et al*, 2001)

Seguindo as recomendações existentes no Eurocode 3 (Eurocode 3, 2003), a ligação foi caracterizada através do modelo mecânico, cujas molas têm o comportamento bi-linear e, posteriormente, substituído por um modelo elástico equivalente com quatro graus de liberdade, conforme na Figura 2.22:

- $q_1 = \phi$ =rotação total da ligação;
- q_2 =rotação das barras rígidas de comprimento L_c (mola comprimida);
- q_3 =rotação das barras rígidas de comprimento L_t (mola tracionada);
- L_1 =ponto de aplicação do esforço normal.

Vale ressaltar que as duas molas da região em compressão são substituídas por um única mola utilizando a equação para associação de molas em série apresentada anteriormente.

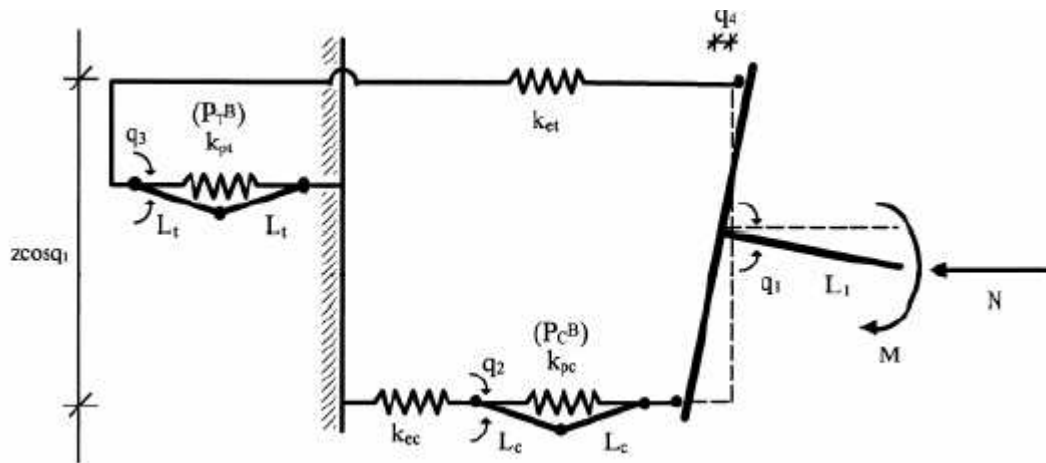


Figura 2.22 – Caracterização do comportamento das componentes (Silva *et al*, 2001)

A única comparação com resultado experimentação realizada foi a curva momento *versus* rotação para a ligação submetida apenas a momento fletor que pode ser observada na Figura 2.23 apresentando resultados satisfatórios.

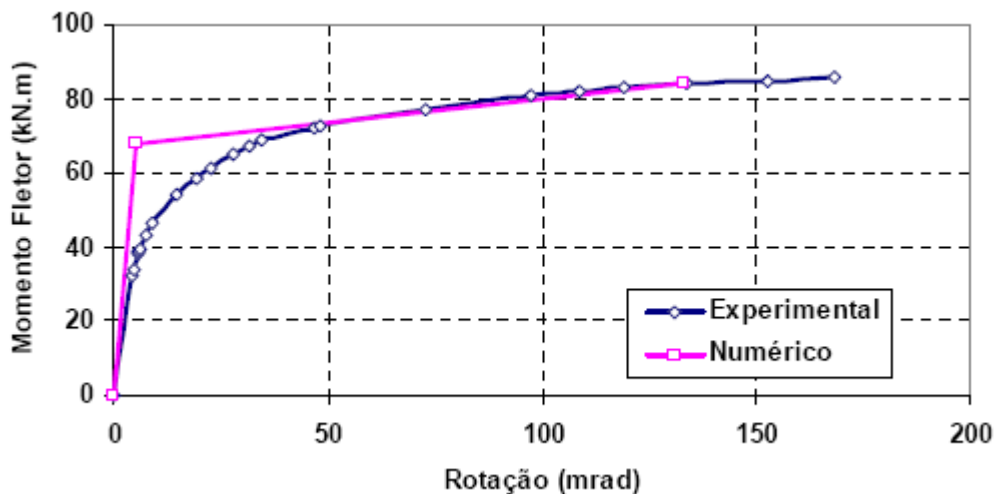


Figura 2.23 – Curva momento *versus* rotação – modelo e experimental

Finalmente, são apresentadas as curvas momento *versus* rotação para três níveis diferentes de esforço normal de compressão aplicado, iguais a 5, 10 e 20% da resistência da viga, respectivamente – Figura 2.24.

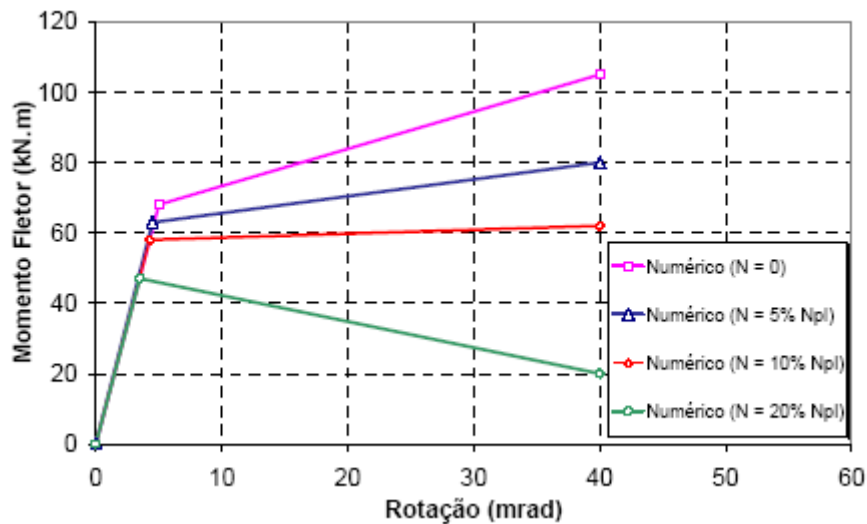
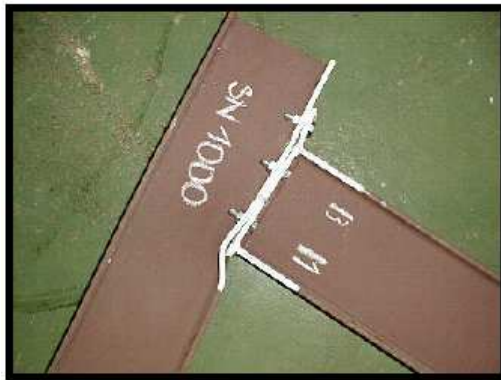


Figura 2.24 – Curvas momento *versus* rotação com esforço normal de compressão

2.6.5 Pesquisas de Frantisek Wald (Wald *et al*, 2001), (Lima, 2003)

Wald realizou alguns ensaios de ligações viga-coluna e ligações de emendas de vigas submetidas a esforços de compressão e momento fletor.

Na Figura 2.25, são apresentados os modos de ruína para cada tipo de ensaio. Pode-se perceber que, para os ensaios de ligações viga-coluna com placa de extremidade, a ruptura ocorreu pela compressão da alma da coluna. Já para os ensaios de emendas de vigas, a ruptura ocorreu pela compressão da mesa da viga. A configuração dos ensaios com o sistema de aplicação de carga pode ser observado na Figura 2.26.



(a) placa de extremidade estendida



(b) emenda de vigas

Figura 2.25 – Curvas momento *versus* rotação com esforço normal de compressão
(Wald *et al*, 2001)



(a) placa de extremidade estendida
(SN1000)



(b) emenda de vigas (NN1000)

Figura 2.26 – Curvas momento *versus* rotação com esforço normal de compressão
(Wald *et al*, 2001)

É importante ressaltar que deve-se distinguir carregamento proporcional e não-proporcional. Para o primeiro caso, a rigidez inicial é menor do que para o segundo. Isto ocorre devido a presença do esforço normal máximo que solicita a ligação desde o início do ensaio, mantendo a placa de extremidade em contato com a mesa da coluna, mesmo para valores baixos de momento fletor onde apenas as componentes em compressão contribuem para deformação da ligação. Um exemplo desta diferença pode ser observada na Figura 2.27.

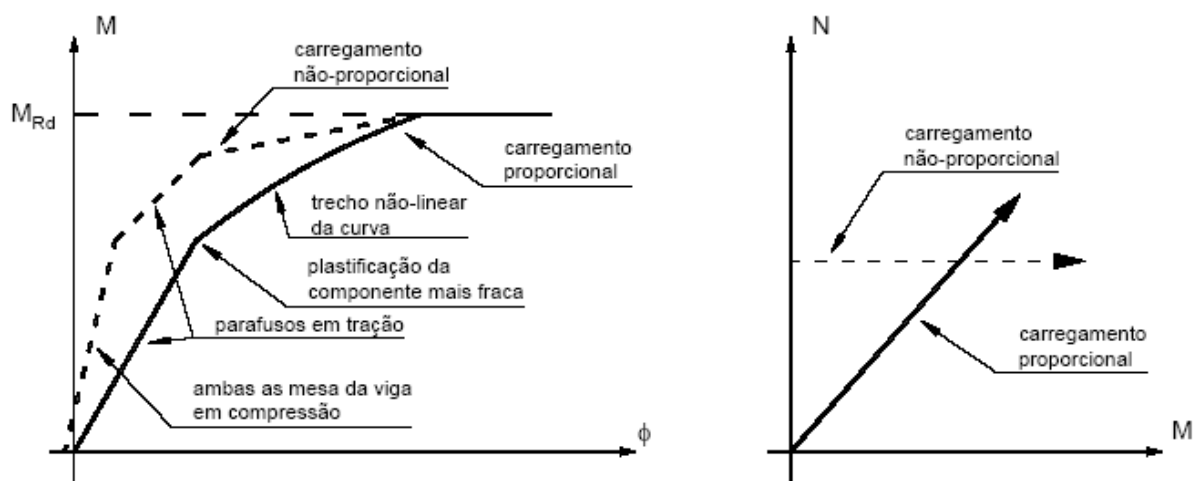


Figura 2.27 – Curva de comparação entre tipos de carregamentos

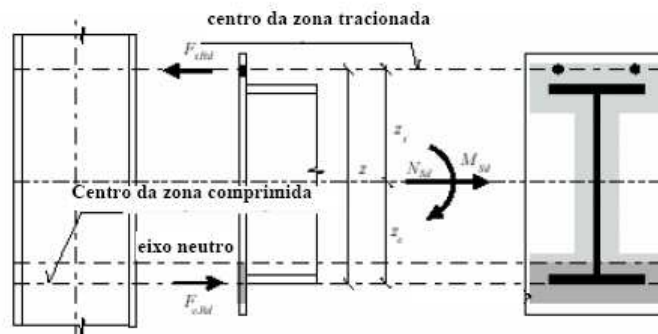
2.6.5.1 Modelo de Cálculo Proposto

O modelo proposto para avaliação da resistência a flexão e a rigidez inicial da ligação leva em consideração a área das mesas da viga, negligenciando-se a parcela da alma da viga. Assume-se que as forças de compressão, $F_{c,b,Rd}$ e $F_{ct,Rd}$, atuam no centro de compressão situado na linha média da mesa comprimida da viga e a força de tração, $F_{t,Rd}$, na linha de parafusos, Figura 2.28 (a). No caso de existir duas ou mais linhas de parafusos, a resistência da zona tracionada é obtida através da força resultante destas linhas de parafusos, Figura 2.28 (b). Para efeitos de simplificação, este modelo considera apenas o caso de carregamento proporcional.

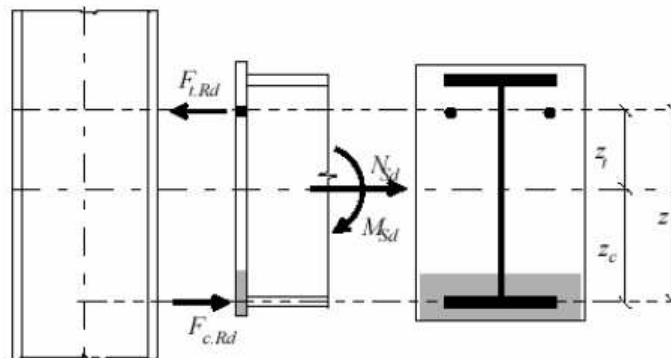
Utilizando-se as equações de equilíbrio e observando-se a figura anterior, obtém-se as equações para o cálculo das forças de compressão e de tração, lembrando ainda que, a excentricidade $e = M_{Sd}/N_{Sd} \leq -z_c$.

$$\frac{M_{Sd}}{z} + \frac{N_{Sd} \cdot z_c}{z} \leq F_t \quad (2.36)$$

$$\frac{M_{Sd}}{z} - \frac{N_{Sd} \cdot z_t}{z} \leq -F_c \quad (2.37)$$



(a)



(b)

Figura 2.28 – Consideração sobre a área efetiva das mesas comprimidas (Wald et al, 2001)

Como $e = M_{Sd}/N_{Sd} = M_{Rd}/N_{Rd}$ que é igual a uma constante para carregamentos proporcionais, as duas equações anteriores podem ser reescritas e assim, tem-se a equação para o momento fletor resistente da ligação, apresentada a seguir.

$$M_{Rd} = \text{mínimo} \frac{F_t \cdot z}{\frac{z_c}{e} + 1}; \frac{F_c \cdot z}{1 - \frac{z_{t,l}}{e}} \quad (2.38)$$

Quando a excentricidade é maior do que o braço de alavanca da força de compressão, não há força de tração nas linhas de parafusos, mas ambas as partes da ligação encontram-se em compressão. Neste caso, a equação anterior precisa ser reescrita.

$$M_{Rd} = \text{mínimo} \frac{F_{c,t} \cdot z}{\frac{z_{c,b}}{e} + 1}; \frac{F_{c,b} \cdot z}{\frac{z_{c,t}}{e} - 1} \quad (2.39)$$

A rigidez rotacional da ligação é baseada na deformação das componentes conforme discutido nas seções anteriores. A deformação elástica das componentes em tração e em compressão, ver Figura 2.29, pode ser expressa como,

$$\delta_{t,l} = \frac{\frac{M_{Sd}}{z} + \frac{N_{Sd} \cdot z_c}{z}}{E \cdot k_t} = \frac{M_{Sd} + N_{Sd} \cdot z_c}{E \cdot z \cdot k_t} \quad (2.40)$$

$$\delta_{c,r,l} = \frac{\frac{M_{Sd}}{z} - \frac{N_{Sd} \cdot z_t}{z}}{E \cdot k_{c,r}} = \frac{M_{Sd} - N_{Sd} \cdot z_t}{k_c} \quad (2.41)$$

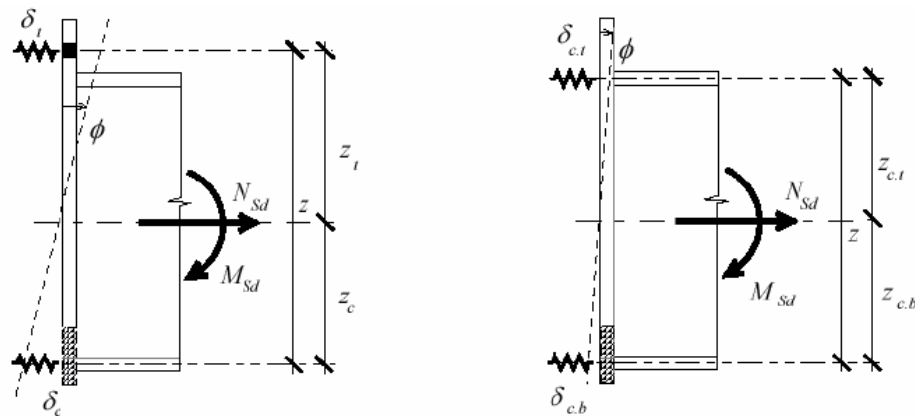


Figura 2.29 – Modelo mecânico da placa de extremidade (Wald et al, 2001)

E a rotação da ligação é calculada considerando-se a deformação das componentes, eq. (2.42),

$$\phi = \frac{\delta_t + \delta_c}{z} = \frac{1}{E \cdot z^2} \left(\frac{M_{Sd} + N_{Sd} \cdot z_c}{k_t} + \frac{M_{Sd} - N_{Sd} \cdot z_t}{k_c} \right) \quad (2.42)$$

E para a rigidez inicial da ligação, tem-se a eq. (2.43),

$$S_{j,ini} = \frac{M_{Sd}}{M_{Sd} + N_{Sd} \cdot e_0} \cdot \frac{E \cdot z^2}{\left(\frac{1}{k_c} + \frac{1}{k_t} \right)} = \frac{e}{e + e_0} \cdot \frac{E z^2}{\sum \frac{1}{k}} \quad (2.43)$$

Onde a excentricidade e_0 é dada pela eq. (2.44) a seguir.

$$e_0 = \frac{z_c \cdot k_c - z_t \cdot k_t}{k_c + k_t} \quad (2.44)$$

A parte não-linear da curva momento *versus* rotação pode ser modelada introduzindo-se um fator de forma μ , que depende da razão γ que relaciona a forças atuantes na ligação.

$$\mu = (1,5\gamma)^{2,7} \geq 1 \quad (2.45)$$

Assumindo-se que os braços de alavanca z_t e z_c das forças de tração e compressão, respectivamente, são iguais a $h/2$, ou seja, metade da altura da viga considerada na ligação, o fator γ pode ser definido como a eq. (2.46):

$$\gamma = \frac{M_{Sd} + 0,5 \cdot h \cdot N_{Sd}}{M_{Rd} + 0,5 \cdot h \cdot N_{Rd}} \quad (2.46)$$

Substituindo o valor da excentricidade e , pode-se simplificar a equação anterior, para a eq. (2.47).

$$\gamma = \frac{e + \frac{h}{2}}{\frac{M_{Rd}}{M_{Sd}} \cdot e + \frac{h}{2}} \quad (2.47)$$

Finalmente, usando-se o fator μ descrito anteriormente, pode-se obter a curva momento *versus* rotação da ligação submetida a carregamento proporcional através da eq. (2.48),

$$S_j = \frac{e}{e + e_0} \frac{Ez^2}{\mu \sum \frac{1}{k}} \quad (2.48)$$

A Figura 2.30 apresenta as curvas momento *versus* rotação para os dois ensaios de ligações viga-coluna com placa de extremidade. Nestes ensaios SN, o número caracteriza a excentricidade aplicada entre M e N. Não se apresenta aqui a comparação entre os resultados experimentais e o modelo proposto tendo em vista que as curvas apresentadas abaixo, obtidas no referido artigo (Wald *et al*, 2001) que serviu de referência para esta análise e as existentes na página do autor na internet (Wald, 2001), são diferentes das apresentadas.

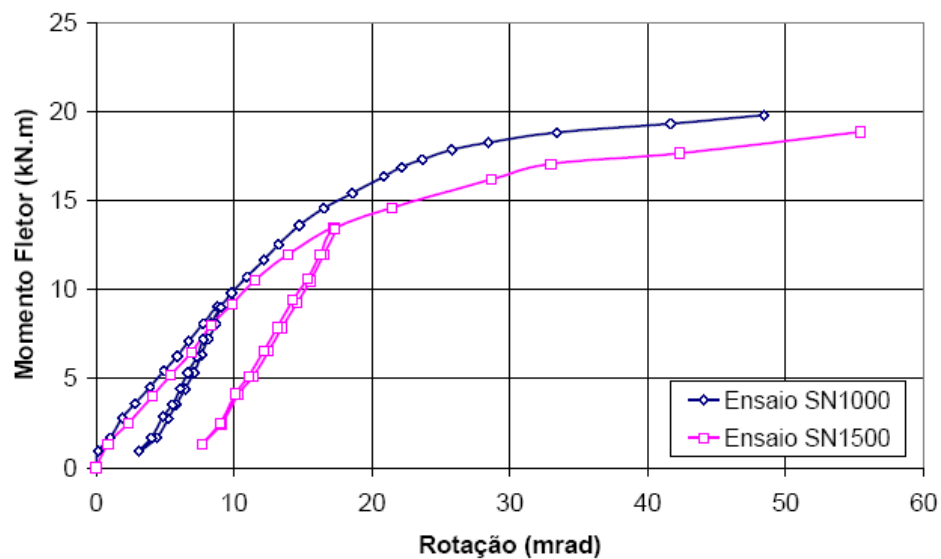


Figura 2.30 – Curvas momento *versus* rotação – ensaios SN (Wald *et al*, 2001)

2.6.6 Pesquisas de Daniūnas e Urbonas (Daniūnas *et al*, 2008)

Daniūnas e Urbonas propuseram um modelo para o estudo da influência de ligações semi-rígidas por placa de extremidade submetidas a esforço normal e momento fletor. A modelagem foi realizada considerando o método das componentes para sua caracterização.

Em seu estudo, aplicou-se o método dos componentes para avaliar as ligações semi-rígidas por placa de extremidade, para viga-viga e viga-coluna.

A Figura 2.31 apresenta as ligações avaliadas no trabalho e a Figura 2.32 apresenta o fluxograma utilizado para a seqüência aplicada de análise.

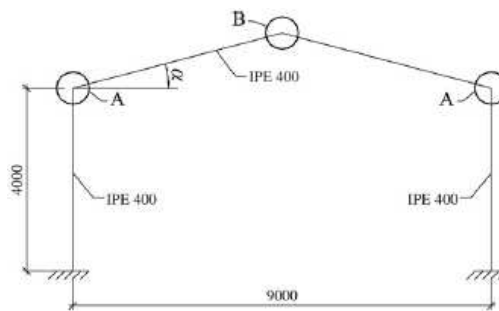


Figura 2.31 – Pórtico estudado – artigo Daniūnas e Urbonas (Daniūnas *et al*, 2008)

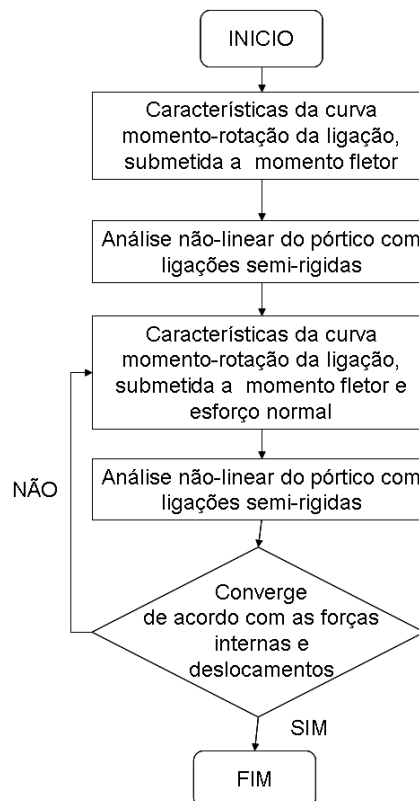


Figura 2.32 – Fluxograma de análise das ligações semi-rígidas

Verificou-se que a aplicação de esforço normal na ligação, apesar de geralmente não ser avaliada, modifica as características de rigidez inicial, distribuição de tensões e deslocamentos do pórtico em aço. A aplicação de esforço normal aumentou a rigidez inicial da ligação.

2.6.7 Pesquisas de Del Savio *et al.* (Del Sávio *et al.*, 2005), (Del Sávio *et al.*, 2009)

Del Sávio apresenta em suas pesquisas um método relativamente simples e consistente para determinar a curva de momento *versus* rotação para alguns níveis de força normal usando uma limitação dos experimentos incluindo a interação do esforço normal *versus* momento fletor. A aplicabilidade e validade da proposta é demonstrada através de comparação com ensaios experimentais realizados para ligações com placa de extremidade.

Neste capítulo foram apresentadas algumas considerações sobre ligações viga-coluna, além do Método das Componentes utilizado nos códigos europeus para dimensionamento de ligações em estruturas de aço. Uma descrição dos trabalhos existentes na área de ligações viga-coluna submetidas a momento fletor e esforço normal também foi efetuada.

O próximo capítulo apresenta os ensaios executados por Lima (Lima, 2003), em sua dissertação, e que serviram de base para a análise dos modelos numéricos que foram realizados.

3 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

3.1 Introdução

A realização de ensaios experimentais em laboratório permite obter, de forma confiável e precisa, o comportamento real das ligações. Com base nos resultados obtidos é possível calibrar os diversos modelos existentes para determinação do momento resistente, da rigidez inicial e de sua capacidade de rotação, a partir das propriedades mecânicas e geométricas destas ligações.

O planejamento bem criterioso dos ensaios é fundamental para que se consiga extrair as informações necessárias para a avaliação do fenômeno em estudo, tornando-se possível calibrar os diversos modelos existentes para caracterização do comportamento global de ligações viga-coluna.

Os ensaios experimentais que serão descritos nesta dissertação foram realizados por Lima (Lima, 2003), no âmbito de sua tese de doutorado, e servirão de base para a comparação com os resultados numéricos. Da série de ensaios realizada, serão utilizados os resultados para ligações viga-coluna com placa de extremidade ajustada à altura da viga. Em relação aos esforços aplicados, foram utilizados três tipos de carregamentos: primeiro, o ensaio foi realizado somente com a aplicação de momento fletor; segundo, foram feitos ensaios com aplicação de momento fletor e força normal de compressão; e o terceiro, ensaios com momento fletor e força normal de tração.

3.2 Justificativa dos Ensaio Experimentais

Lima (Lima, 2003) adotou que a viga deveria ser tal que a sua resistência plástica não fosse muito grande, tendo em vista que a força normal aplicada era caracterizada por um percentual deste valor e limitada pela capacidade dos equipamentos existentes no laboratório onde foram realizados os ensaios. Por outro lado, esta viga deveria ter altura suficiente para vencer um vão comumente utilizado em edifícios de aço, ou seja, na ordem de 6,0m (Simões, 2000). Após alguns

estudos preliminares, foi adotado um perfil do tipo **IPE240** para as vigas, fabricado a partir de um aço S275, ou seja, com tensão nominal de escoamento igual a 275MPa e tensão nominal de ruptura igual 430MPa.

Para a coluna, foi escolhido o perfil que tivesse suficiente resistência ao momento fletor provocado pela força normal imposta. Uma outra condicionante era que as componentes referentes a coluna, não atingissem o escoamento antes das demais. Considerando-se estas informações, após algumas análises iniciais, foi adotado um perfil do tipo **HEB240** para a coluna, fabricado a partir do mesmo aço da viga. Ambos os perfis são laminados e detalhados na Figura 3.1 onde se apresenta também um perfil do tipo **HEB200**, utilizado para travamento da sapata da reação, utilizado no ensaio.

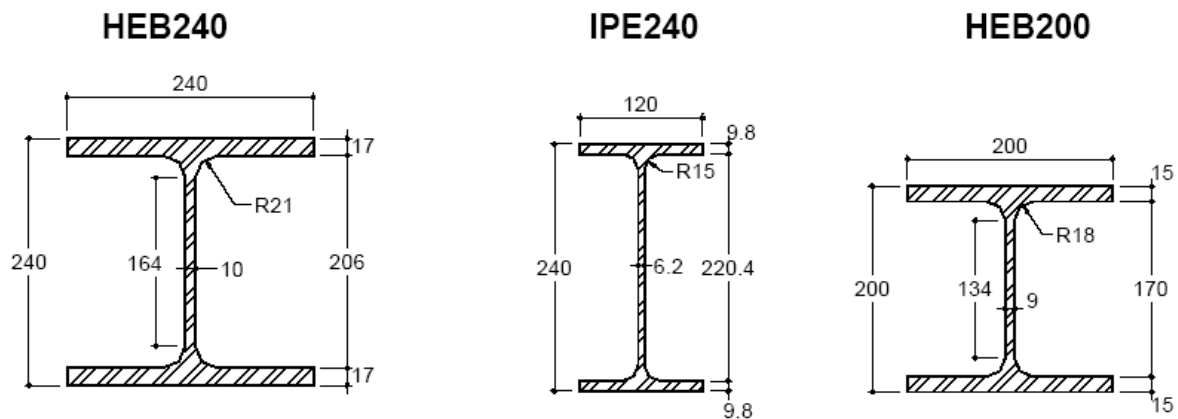


Figura 3.1 – Dimensões dos perfis laminados IPE240, HEB240 e HEB200

Nos ensaios realizados por Lima (Lima, 2003), foi utilizada uma placa de extremidade com espessura de 15mm produzida com o mesmo tipo de aço da viga e da coluna. A ligação da viga com a placa de extremidade foi efetuada com solda de entalhe com espessura de 8mm. Os parafusos eram do tipo M20 ($d = 19,05\text{mm}$), classe 10.9 ($f_v = 1000\text{MPa}$), com rosca completa cujas dimensões nominais são apresentadas na Figura 3.2.

Na Figura 3.3 apresenta-se a foto do arranjo do sistema dos ensaios realizados e na Figura 3.4 é possível verificar a ligação adotada na primeira série de ensaios, denominados FE (“*flush endplate*”).

A Figura 3.5 apresenta os ciclos de carregamento utilizados para a série de ensaios com placa de extremidade ajustada.

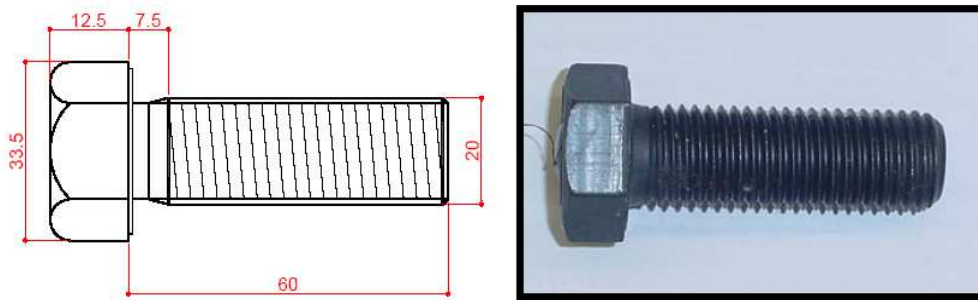


Figura 3.2 – Detalhe do parafuso M20 classe 20.9 (Lima, 2003)



Figura 3.3 – Ligações com placa de extremidade ajustada (Lima, 2003)

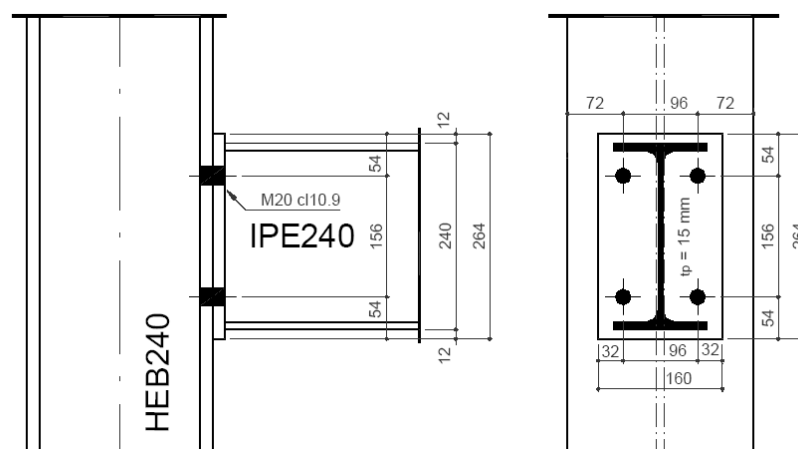


Figura 3.4 – Detalhe das ligações utilizadas nos ensaios com placa de extremidade ajustada (série FE)

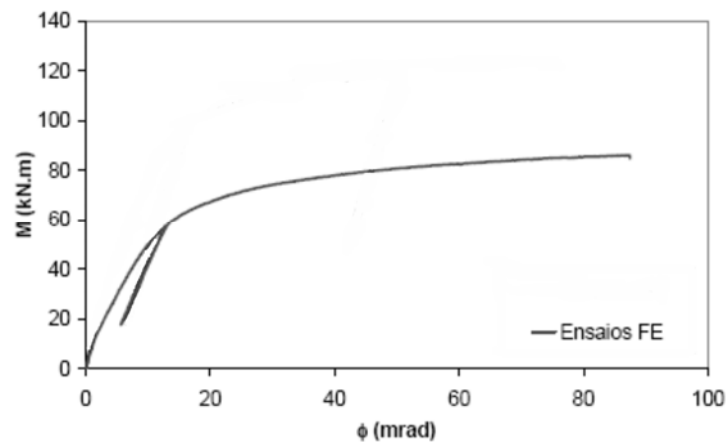


Figura 3.5 – Ciclos de carregamento utilizados nos ensaios (Lima, 2003)

3.3 Ensaios Experimentais – Série FE

Os ensaios realizados por Lima (Lima, 2003) foram feitos no Laboratório de Mecânica Estrutural da Universidade de Coimbra, e tinham o objetivo de tentar reproduzir ligações reais, conforme as características estudadas. Para estes ensaios, foi utilizada a premissa de que a coluna seria bi-rotulada e a viga, em balanço.

Para a realização dos ensaios experimentais, utilizou-se um pórtico de aplicação de carga cujas colunas e vigas eram constituídas por perfis **HEB300**. O perfil **HEB500** foi utilizado como viga de suporte do atuador hidráulico ligada à parede de reação através de uma ligação com placa de extremidade estendida, com 30cm de espessura e oito barras rosqueadas, tipo DYWIDAG.

Para a aplicação do momento fletor, utilizou-se um atuador hidráulico DARTEC com capacidade de 600kN e curso de 100mm.

A Figura 3.6 apresenta o desenho do pórtico adotado para a realização dos ensaios.



Figura 3.6 – Pórtico de aplicação da carga

3.4 Propriedade Mecânicas e Geométricas

Com a finalidade de se obter as propriedades mecânicas reais dos materiais utilizados, Lima (Lima, 2003), em seus ensaios, realizou testes de corpos-de-prova à tração, além de ensaios de parafusos à tração. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3.1 e na Tabela 3.2, respectivamente. Estes ensaios foram executados de acordo com as especificações existentes nos códigos europeus para controle de materiais (Lima, 2003).

Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas do material – viga e parafusos (Lima, 2003)

Corpo de Prova	fy (MPa)	fu (MPa)	E (MPa)
nominal	275	430	210000
VIGA – IPE240			
ALMA 1	366,45	460,36	201483
ALMA 2	358,93	454,70	202836
ALMA 3	371,86	449,32	211839
ALMA 4	380,25	455,99	201544
ALMA 5	375,79	459,49	211308
ALMA 6	379,12	461,98	210128
ALMA 7	342,72	453,40	190443
ALMA 8	332,32	438,76	200127
MÉDIA	363.43	454.25	203714
MESA 1	365,83	444,52	215739
MESA 2	331,62	448,30	213809
MESA 3	340,75	448,77	212497
MESA 4	346,42	450,50	216924
MESA 5	355,40	458,90	221813
MESA 6	349,22	455,88	213589
MESA 7	312,13	443,81	214147
MESA 8	319,73	435,20	213257
MÉDIA	340.14	448.24	215222
PARAFUSOS – M20			
nominal	900	1000	210000
parafuso 1	914,00	980,00	-
parafuso 2	931,00	1009,00	-
parafuso 3	974,00	1067,00	-
MÉDIA	939,67	1018,67	-

**Tabela 3.2 – Propriedades mecânicas do material – coluna e placa de extremidade
(Lima, 2003)**

Corpo de Prova	fy (MPa)	fu (MPa)	E (MPa)
nominal	275	430	210000
COLUNA – IPE240			
EE1_ALMA_1	392,63	491,82	205667
EE1_ALMA_2	399,38	495,29	204567
FE1_ALMA_1	340,16	454,39	218456
FE1_ALMA_2	355,92	467,69	199055
MÉDIA	372.02	477.30	206936
EE1_MESA_1	344,92	410,06	232937
EE1_MESA_2	350,09	472,93	210434
FE1_MESA_1	337,94	450,53	222665
FE1_MESA_2	338,84	461,63	217132
MÉDIA	342.95	448.79	220792
PLACA DE EXTREMIDADE – t = 15 mm			
placa 1 - FE1	365,39	504,45	198936
placa 2 - FE1	374,75	514,44	-
placa 1 - EE1	380,91	497,81	199648
placa 2 - EE1	356,71	497,08	202161
MÉDIA	369,44	503,45	200248

Dos dados encontrados é possível verificar que os valores de tensão de escoamento são superiores ao valor nominal, enquanto que a tensão de ruptura encontra-se dentro dos limites mais coerentes. Como justificativa para este evento, Lima (Lima, 2003) apresentou os seguintes relatos: primeiro, todos os corpos-de-prova foram extraídos de pedaços dos perfis já ensaiados, tendo em vista que a empresa que fabricou a estrutura a ser ensaiada não enviou sobras de material. Entretanto, a extração foi realizada em partes do perfil que não sofreram tantas solicitações; segundo, pode ser agregada a diferença entre as tensões de escoamento, a velocidade utilizada nos ensaios.

A média destas propriedades mecânicas dos materiais foram aplicadas no desenvolvimento do estudo computacional, que será apresentado em seguida. Na

Tabela 3.3 são apresentados os valores das propriedades mecânicas utilizadas no modelo computacional.

Tabela 3.3 – Tabela resumo dos dados experimentais das propriedades mecânicas dos materiais (Lima, 2003)

Corpo de prova	fy (MPa)	fu (MPa)	E (MPa)
nominal	275	430	210000
Alma da viga	363,43	454,25	203714
Mesa da Viga	340,14	448,24	215222
Alma da Coluna	372,02	477,30	206936
Mesa da Coluna	342,95	448,79	220792
Placa de Extremidade	369,44	503,45	200248
PARAFUSOS – M20			
Nominal	900	1000	210000
MÉDIA	939,67	1018,67	-

3.5 Cálculo das ligações

As ligações utilizadas nos ensaios foram dimensionadas previamente para momento fletor, segundo as recomendações de projeto do Eurocode 3 (Eurocode 3, 2003). Lima (Lima, 2003) realizou um dimensionamento (Eurocode 3, 2003), para a realização dos ensaios, utilizando-se valores nominais para as propriedades mecânicas e geométricas das ligações e coeficientes de resistência iguais a 1,0. Neste dimensionamento preliminar, verificou-se que a componente mais fraca da zona tracionada é a placa de extremidade à flexão (5) e na zona comprimida, a mesa da viga a compressão (7), conforme Tabela 3.5, respectivamente. O Anexo A apresenta detalhadamente o dimensionamento de uma placa ajustada, considerando-se os valores ensaiados para os aços usados na fabricação dos perfis.

Na Tabela 3.5 encontram-se os valores individuais das componentes da ligação com placa de extremidade ajustada obtidos neste dimensionamento. Da mesma forma, para esta ligação, as componentes críticas são a placa de extremidade à flexão (zona tracionada) e a mesa da viga em compressão (zona em

compressão). A Tabela 3.4 apresenta um sumário dos ensaios realizados com os respectivos carregamentos aplicados, onde o esforço normal representa uma percentagem da resistência plástica da viga à força normal (1084 kN).

Tabela 3.4 – Descrição dos carregamentos aplicados nos ensaios

Ensaio FE		
ID	Esforço Normal	
	(% $N_{pl,daviga}$)	(kN)
FE1	-	-
FE3	-4%	-52,7
FE4	-8%	-105,6
FE5	-20%	-265,0
FE6	-27%	-345,0
FE7	-20%	-265,0
FE8	+10%	+130,6
FE9	+20%	+264,9

Como foi dito na introdução, esta dissertação fará a comparação dos resultados experimentais com uma modelagem computacional baseada no método dos elementos finitos para as ligações com placa de extremidade ajustada a altura da viga.

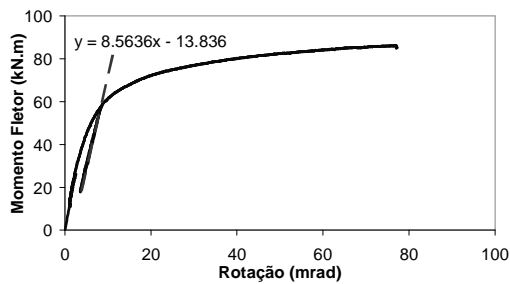
No próximo item serão apresentados os resultados experimentais encontrados. Nos próximos capítulos, 4 e 5, serão feitas as comparações dos resultados experimentais, modelagem computacional baseada no método dos elementos finitos e o modelo proposto de Cerfontaine. Os resultados dos ensaios experimentais apresentados abaixo, serão um resumo do trabalho desenvolvido por Lima, em sua dissertação (Lima, 2003).

Tabela 3.5 – Dimensionamento das componentes – Ensaios FE

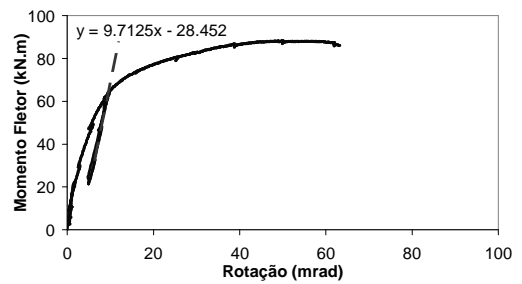
	Componente		$F_{Rd} (kN)$	$k/E (mm)$
Componentes na região em compressão	(1)	Alma da coluna ao corte	494,8	8,43
	(2)	Alma da coluna à compressão	690,7	10,40
	(7)	Mesa da viga à compressão	444,3	∞
Linha 1 (h=193,1mm)	(1)	Alma da coluna ao corte	642,6	8,43
	(2)	Alma da coluna à compressão	690,7	10,40
	(7)	Mesa da viga à compressão	542,3	∞
	(3)	Alma da coluna à tração	533,3	7,03
	(4)	Mesa da coluna à flexão	408,3	40,47
	(5)	Placa de extremidade à flexão	339,3	13,35
	(8)	Alma da viga à tração	483,0	∞
	(10)	Parafusos à tração	441,0	7,76
Linha 2 (h=37,1mm)	(1)	Alma da coluna ao corte	303,2	8,43
	(2)	Alma da coluna à compressão	351,4	10,40
	(7)	Mesa da viga à compressão	203,0	∞
	(3)	Alma da coluna à tração	533,3	7,03
	(4)	Mesa da coluna à flexão	408,3	40,47
	(5)	Placa de extremidade à flexão	339,3	13,35
	(8)	Alma da viga à tração	483,0	∞
	(10)	Parafusos à tração	441,0	7,76
$M_{j,Rd} = 339,3 \times 0,193 + 203 \times 0,037 = 73,05 \text{ kN.m}$ $S_{j,ini} = 11152,2 \text{ kN.m/rad}$ e $S_{j,ini}/\eta = 5576,1 \text{ kN.m/rad}$				

3.6 Resultados Encontrados

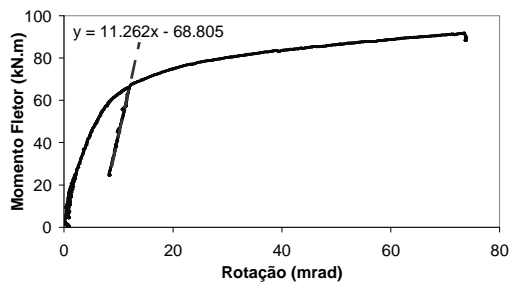
As curvas momento *versus* rotação dos oito ensaios com placa de extremidade ajustada são apresentadas na Figura 3.7.



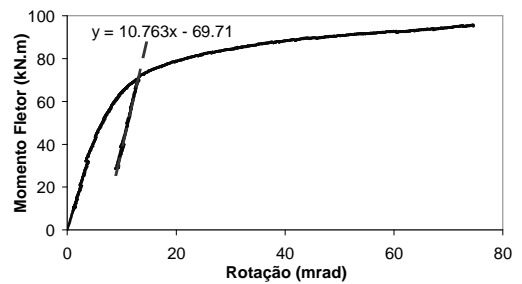
(a) FE1 (samente M)



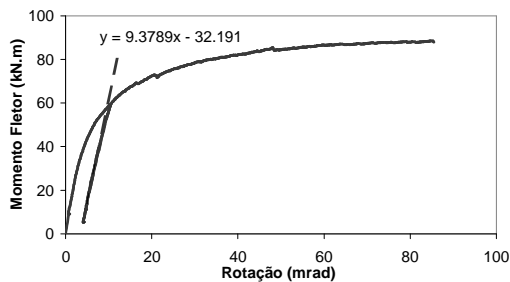
(b) FE3 (N= -4% Npl)



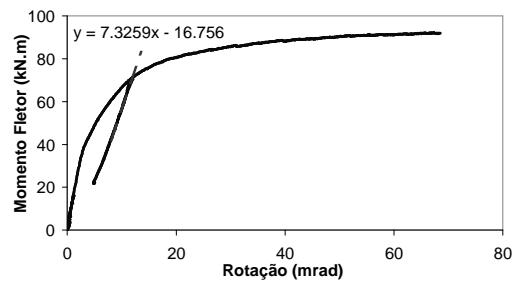
(c) FE4 (N= -8% Npl)



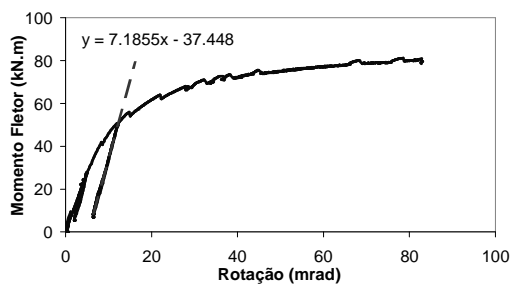
(d) FE5 (N= -20% Npl)



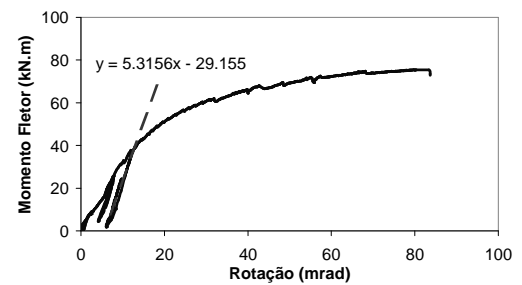
(e) FE6 (N= -27% Npl)



(f) FE7 (N= -20% Npl)



(g) FE8 (N= +10% Npl)

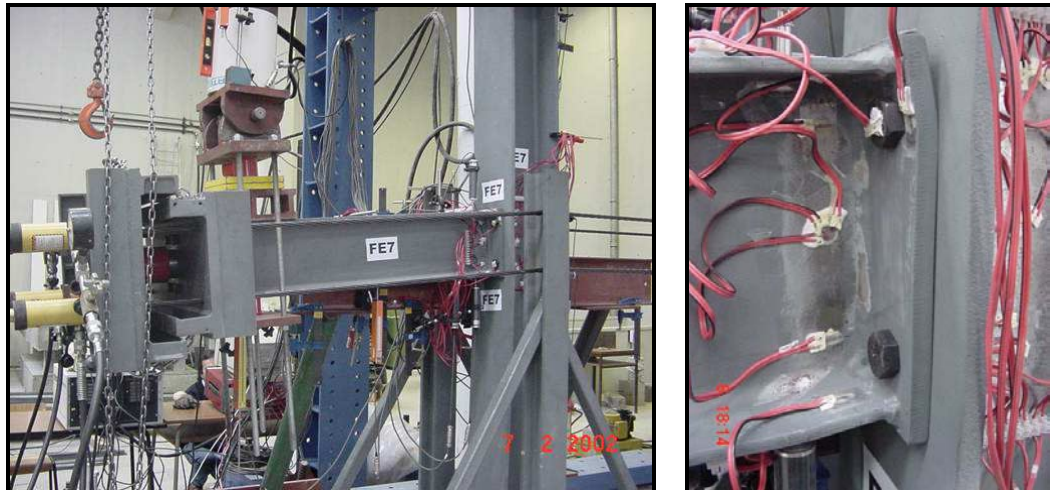


(h) FE9 (N= +20% Npl)

Figura 3.7 – Curvas momento *versus* rotação com respectivas descargas (Lima, 2003)

Apresenta-se na Figura 3.8(a) uma vista global da estrutura deformada para o ensaio FE7 (-20% N_{pl}) e na Figura 3.8(b), um detalhe da ligação propriamente dita, correspondente ao ensaio FE4 (-8% N_{pl}) onde pode-se notar claramente que, devido

ao nível de esforço normal baixo, a mesa inferior da viga não sofre deformações muito significativas. Por outro lado, a flexão da placa de extremidade pode ser observada, sendo esta, a componente que controla a ruína da ligação (Lima, 2003).



(a) vista geral da estrutura do ensaio deformada

(b) detalhe da ligação deformada

Figura 3.8 – Deformações ocorridas nos ensaios FE

A Tabela 3.6 apresenta os valores obtidos para a resistência ao momento fletor e rigidez inicial da ligação para todos os ensaios da série FE. A rigidez inicial foi obtida através da inclinação da curva momento *versus* rotação na segunda descarga, conforme verificado na Figura 3.7. Este procedimento é adotado tendo em vista que a parte inicial da curva pode sofrer ajustes na ligação e invalidar a obtenção da rigidez inicial corretamente.

Neste capítulo foram apresentadas algumas considerações sobre a realização dos ensaios experimentais, obtenção das características mecânicas e geométricas dos ensaios, de acordo com os resultados obtidos com Lima (Lima, 2003). No capítulo seguinte, será apresentada a calibração do modelo numérico realizado com o ensaio experimental, para o modelo FE1, com aplicação de momento fletor somente.

Tabela 3.6 – Valores experimentais para $M_{j,Rd}$ e $S_{j,ini}$

Ensaio	N (kN)	$M_{j,Rd}$ (kN.m)	$\frac{M_{j,Rd}}{M_{j,Rd,FE1}}$	$S_{j,ini}$ (kN.m/rad)
FE1 (somente M)	-	72,2	1,00	8564
FE3 (- 4% N_{pl})	-52,7	77,2	1,07	9713
FE4 (- 8% N_{pl})	-105,6	74,7	1,03	11262
FE5 (- 20% N_{pl})	-265,0	80,5	1,11	10763
FE6 (- 27% N_{pl})	-345,0	72,3	1,00	9379
FE7 (- 20% N_{pl})	-265,0	80,7	1,12	7326
FE8 (+ 10% N_{pl})	130,6	61,7	0,85	7185
FE9 (+ 20% N_{pl})	264,9	51,3	0,71	5315

4 CALIBRAÇÃO DO MODELO NÚMÉRICO PROPOSTO

4.1 Introdução

Neste capítulo será apresentada a calibração do modelo numérico, realizado através do programa de elementos finitos *Ansys* (Ansys, 2008) e os ensaios experimentais realizados por Lima (Lima, 2003), conforme descrito no capítulo anterior, para o modelo com aplicação de momento fletor apenas.

Os modelos mecânicos utilizados nos cálculos das ligações, geralmente conhecidos como modelos de molas, são baseados na simulação de uma ligação através da utilização de um conjunto de componentes rígidos e flexíveis, que procuram representar todos os elementos que compõem a ligação. A não-linearidade destes elementos é obtida através de leis constitutivas inelásticas adotadas para os elementos de mola. Estes modelos são apropriados para a caracterização da ligação, desde que se tenha um conhecimento prévio das leis constitutivas de cada uma das molas que serão transformadas. Estas leis podem ser obtidas por ensaios experimentais ou por meios analíticos.

4.2 Algoritmo Numérico e Estratégias de Análise Não-Linear

As condições em que se verifica a deformação plástica foram definidas através do critério de escoamento de *Von Mises*. Utilizou-se o método Newton-Raphson para a resolução do sistema de equações não-lineares; apesar de ser mais complicado em termos de cálculo, este método é o mais adequado devido a não-linearidade do problema. O algoritmo de integração utilizado é do tipo implícito (*implicit backward Euler*), que garante convergência quadrática do esquema de iteração associado ao método Newton-Raphson.

As descrições cinemáticas dos elementos de casca e barra são baseadas na formulação lagrangiana (*Total lagrangian formulation*) que considera grandes deslocamentos e rotações. Nesta formulação, as grandezas envolvidas (tensões, extensões, forças exteriores, ...) são definidas em relação à configuração deformada

da estrutura. Esta formulação, intuitivamente pouco clara, é mais utilizada porque independe da deformação e funciona para um número elevado de incrementos de carga. Para este caso, a lei constitutiva do material é definida pela curva tensão *versus* deformação utilizando uma definição logarítmica da deformação ($\sigma_n - \varepsilon_n$), em vez da lei constitutiva convencional comumente utilizada ($\sigma - \varepsilon$). Isto deve-se ao fato de que a curva real do material é obtida em um ensaio uniaxial considerando-se sempre a área inicial do corpo-de-prova, sem levar em conta a estrição sofrida pelo mesmo. Desta forma, deve-se efetuar esta modificação da lei constitutiva do material a ser utilizada. A relação entre estas duas grandezas é apresentada na eq. (4.1):

$$\sigma_n = \sigma(1 + \varepsilon) \text{ e } \varepsilon_n = \ln(1 + \varepsilon) \quad (4.1)$$

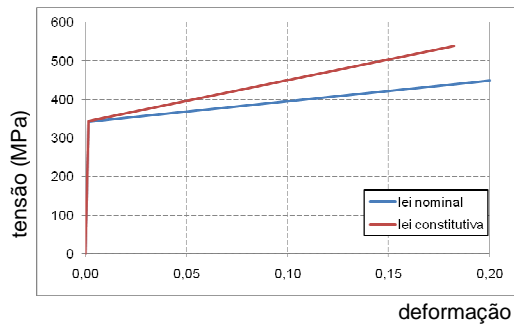
A Tabela 4.1 apresenta os valores reais das propriedades mecânicas dos materiais obtidos nos ensaios a tração dos corpos-de-prova.

Tabela 4.1 – Tabela resumo das tensões utilizadas após a correção da lei constitutiva do material

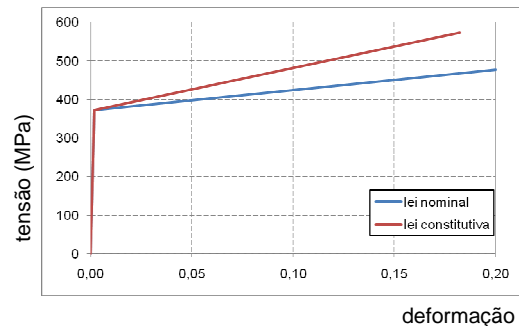
Corpo de prova	fy (MPa)	fu (MPa)	E (MPa)
nominal	275	430	210000
(a) . Alma da viga	364,08	545,10	203714
(b) Mesa da Viga	340,68	537,89	215222
(c) Alma da Coluna	372,69	572,76	206936
(d) Mesa da Coluna	343,48	538,55	220792
(e) Placa de Extremidade	370,12	604,14	200248
(f) Parafusos	943,88	1222,40	210000

Na Figura 4.1 são apresentadas as curvas das leis constitutivas dos materiais (Lima, 2003) e as correspondentes curvas nominais aplicáveis à análise física não-linear, que serão consideradas neste trabalho. Através desta análise é possível obter-se uma resposta global da ligação, efetuando uma comparação coerente entre os resultados obtidos através do Eurocode (Eurocode 3, 1998), (Eurocode 3, 2003),

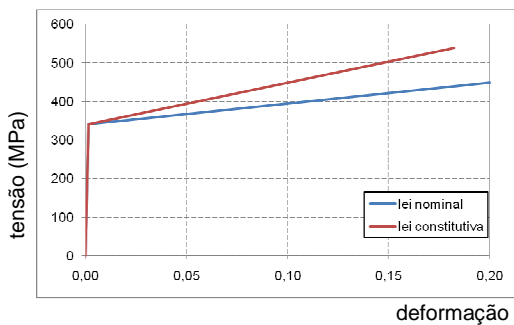
os ensaios experimentais e os modelos numéricos em termos de estados limites últimos da ligação.



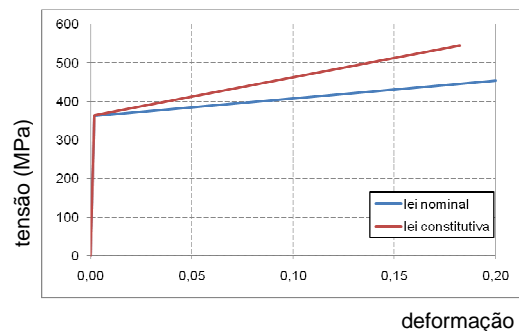
(a) mesa da coluna



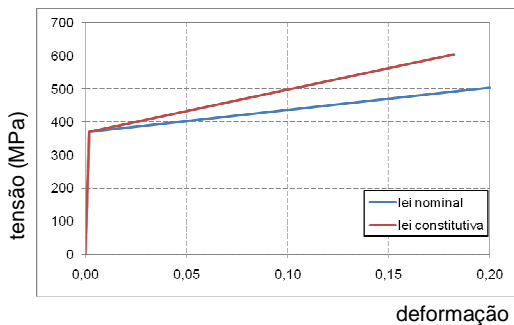
(b) alma da coluna



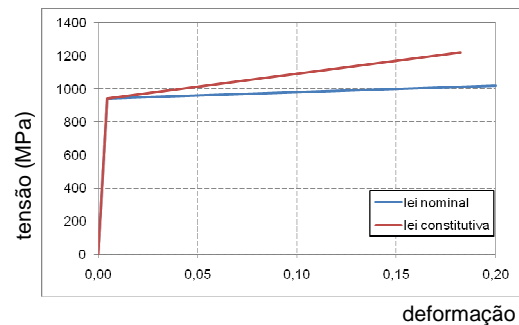
(c) mesa da viga



(d) alma da viga



(e) placa de extremidade



(f) parafusos

Figura 4.1 – Curvas tensão-deformação dos materiais

Ressalta-se que, para o enrijecedor não foi aplicada esta correção, considerando-se um módulo de elasticidade igual a 210000 MPa e a tensão de escoamento de 1000 MPa, ou seja, utilizou-se para a análise, um comportamento do material linear-elástico, diferente do aplicado nos demais elementos do modelo.

4.3 Cálculo para a rotação real da ligação

O momento fletor (M) agindo na ligação corresponde a carga aplicada ($Load$) multiplicada pela distância entre o ponto de aplicação da carga e a face final da placa de extremidade (L_{load}), conforme eq (4.2):

$$M = Load \times L_{load} \quad (4.2)$$

A deformação rotacional da ligação, Φ , é a soma da deformação da zona plana da alma da coluna por cisalhamento γ e a deformação rotacional da ligação θ . A rotação da ligação é definida como a mudança do ângulo entre as linhas médias da viga e da coluna, θ_b e θ_c , respectivamente, conforme eq. (4.3):

$$\theta = \theta_b - \theta_c \quad (4.3)$$

A rotação da coluna foi considerada nula (θ_c). Assim, a expressão pode ser reduzida a eq. (4.4):

$$\theta = \theta_b \quad (4.4)$$

A rotação da viga (θ_b) é aproximadamente dada por eq. (4.5). A Figura 4.2 apresenta o esquema da posição dos transdutores de deslocamento.

$$\theta_b = \arctan \frac{\delta_{DT39} - \delta_{b,el(L=500)}}{500} \quad (4.5)$$

Onde $L=500\text{mm}$ corresponde ao comprimento da viga utilizada para a modelagem computacional.

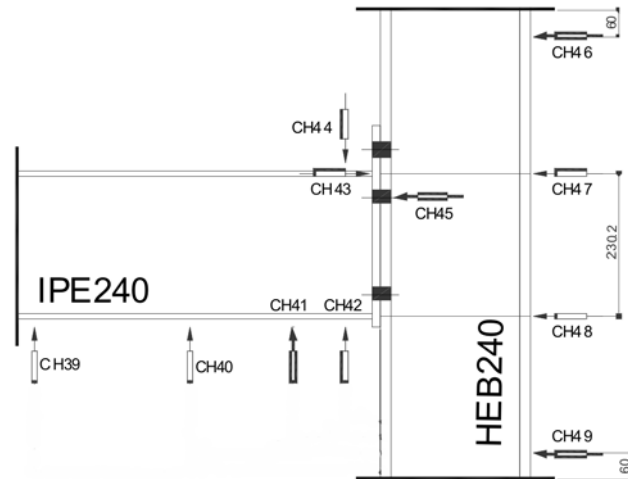


Figura 4.2 – Esquema da posição dos leitores de deslocamento

Onde δ_{DTi} são os deslocamentos verticais e $\delta_{b,el}$ é o deslocamento elástico da viga. A expressão acima desconsidera o efeito da deformação cortante na viga e assume que o deslocamento vertical da placa de extremidade é negligenciável. A rotação elástica da viga é dada pela eq. (4.6):

$$\delta_{b,el} = \frac{PL_b^3}{3EI_b} \quad (4.6)$$

Estas considerações foram utilizadas para o cálculo da rotação da ligação no modelo numérico proposto.

4.4 Modelo Numérico Proposto

4.4.1 Descrição do Modelo

A realização da modelagem numérica, para este tipo de problema é complexa, devido aos seus requisitos de geometria e suas necessidades de configuração da lei constitutiva do material, condições de contorno e carregamento.

O modelo estudado considerou o desenvolvimento de toda a extensão da ligação viga-coluna, sendo modelados todos os elementos de composição da estrutura: viga, coluna, parafusos com porca, placa de extremidade e enrijecedor na

região da viga, onde ocorreu a aplicação do deslocamento relativo ao momento fletor.

O modelo numérico foi desenvolvido no programa de elementos finitos *Ansys* 11 (Ansys, 2008). Para a constituição do modelo, foram utilizados diferentes tipos de elementos: para a confecção da viga, coluna, placa de extremidade e parafusos foi escolhido o elemento sólido **SOLID 185**, que tem oito nós com três graus de liberdade por nó e translações nas direções x, y e z. Este elemento foi escolhido por ter compatibilização com os elementos utilizados para representar os elementos de contato a serem descritos posteriormente. A Figura 4.3 apresenta a geometria deste elemento.

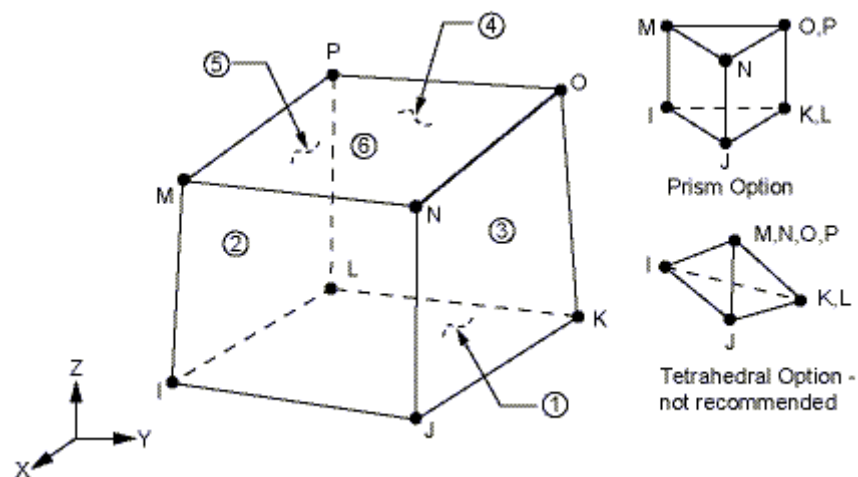


Figura 4.3 – Geometria do elemento SOLID 185 (Ansys, 2008)

Para o enrijecedor, foi utilizado o elemento de casca **SHELL 181**, que possui como característica quatro nós com seis graus de liberdade em cada nó, e translações nos eixos x, y e z. A Figura 4.4 apresenta a geometria para este elemento.

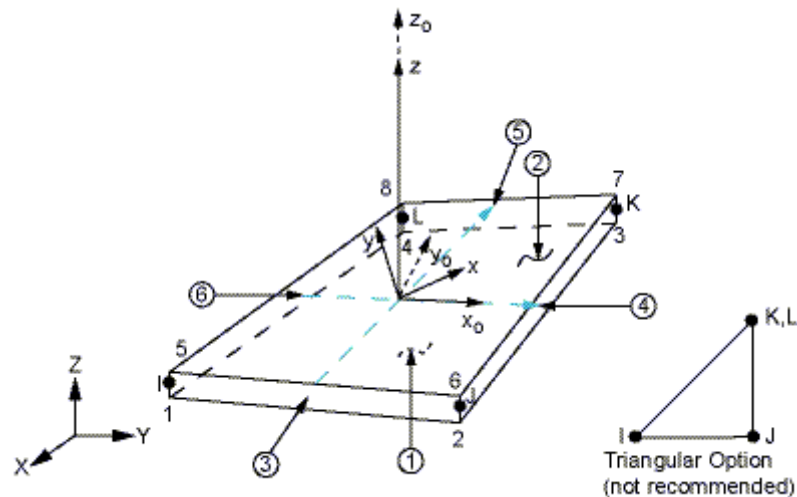


Figura 4.4 – Geometria do elemento SHELL 181 (Ansys, 2008)

Considerando-se a complexidade do modelo, foi utilizada a análise da não-linearidade geométrica completa, ou seja, geométrica e do material. A não-linearidade do material foi caracterizada pelo critério de plastificação de Von Mises.

Para as propriedades dos materiais utilizadas no modelo, foram utilizados os valores apresentados na Figura 4.1, sendo que, para cada elemento apresentado, há um valor para o módulo de elasticidade. O coeficiente de Poisson é de $\nu = 0,30$ para todos os tipos de materiais apresentados.

Foram utilizados parafusos M20, classe 10.9, constituídos de cabeça, porca e corpo (rosca completa). O corpo do parafuso foi definido através da área da seção transversal da zona roscada e o seu comprimento é igual às espessuras dos elementos que liga: placa de extremidade e mesa superior da coluna. O parafuso é representado na Figura 4.5 e na Figura 4.8, respectivamente.

O carregamento, para todos os casos estudados, é aplicado através de deslocamentos, que variavam de acordo com o nível de esforço desejado. Os deslocamentos aplicados, evidenciados na Figura 4.5, representam o esforço normal, $\Delta(N)$, e o momento fletor, $\Delta(M)$. A aplicação de deslocamento foi realizada através de dois passos de carga no *Ansys*. O primeiro fez a aplicação do esforço normal, mantido constante a partir de então, para depois aplicar-se o momento fletor.

A protensão dos parafusos foi incorporada ao modelo através da aplicação de deslocamento na cabeça e na porca do parafuso ($\Delta 1$ e $\Delta 2$). O valor do deslocamento aplicado foi de 0.03mm, em sentidos invertidos, de acordo com a

região de aplicação, antes dos passos de carga para a caracterização do esforço normal e momento fletor.

No que se refere às condições de contorno, a mesa e a alma da coluna foram restringidas nos eixos x e y . O deslocamento vertical (eixo y) foi impedido na placa de extremidade e o eixo superior da mesa da viga está restringido lateralmente (eixo x) - ver Figura 4.5.

Foram realizados diferentes modelos para caracterizar a aplicação dos diferentes níveis de esforço normal no modelo, conforme descrito anteriormente.

As dimensões utilizadas para o desenvolvimento da modelagem foram as mesmas que as utilizadas nos ensaios experimentais descritos no capítulo três.

4.4.2 Estudo da Malha

Para a modelagem foi realizado preliminarmente o estudo da malha a ser utilizada, a fim de se manter os valores mais coerentes nos testes, sem sobrecarregar o processamento a ser executado. A confiabilidade dos resultados depende da discretização da malha de elementos finitos, sendo necessário que esta malha seja apertada o suficiente, porém, ao mesmo tempo, deve ser limitada a valores aceitáveis. Com base num estudo em *T-Stub*, realizado por Wanzek e Gebbeken (Santiago *et al*, 2007), a discretização da malha deve ser feita em relação a dois parâmetros: número de elementos necessários na espessura, de modo a permitir a correta representação do desenvolvimento das rótulas plásticas; e o grau de discretização necessário de modo a representar os problemas de flexão.

A malha utilizada foi escolhida de modo que os elementos tivessem uma proporção e tamanho de forma a evitar problemas numéricos (Jaspart, 1991).

Levando-se em consideração os estudos preliminares realizados, a Figura 4.5 apresenta o modelo numérico escolhido e da Figura 4.6 a Figura 4.8, apresentam os detalhes das componentes do modelo desenvolvido (as letras apresentadas na figura representam o material utilizado para definir cada elemento, conforme Figura 4.1). Este modelo satisfaz o estudo de convergência de malha previamente efetuado.

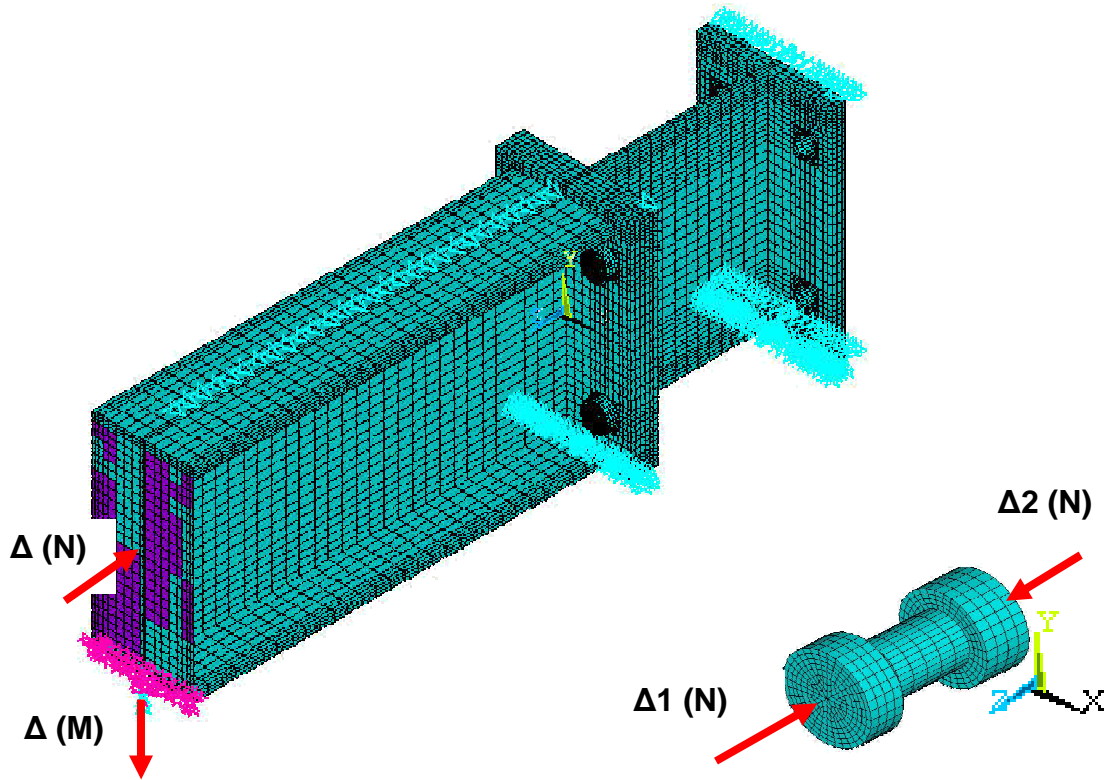


Figura 4.5 – Modelo numérico – ligação viga-coluna com placa de extremidade ajustada à altura da viga

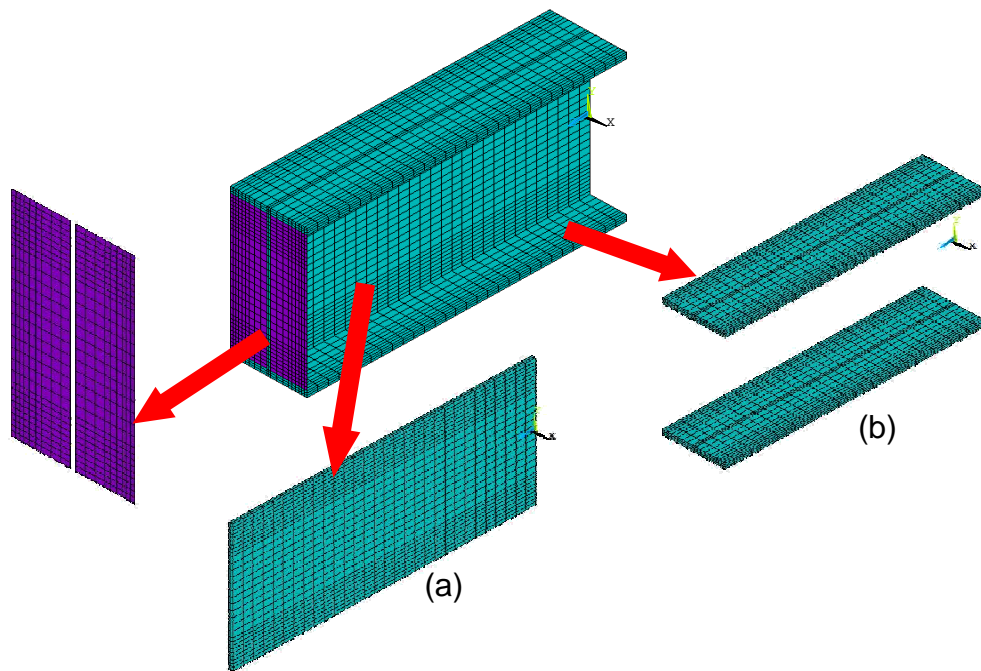


Figura 4.6 – Modelo Numérico – detalhes da viga

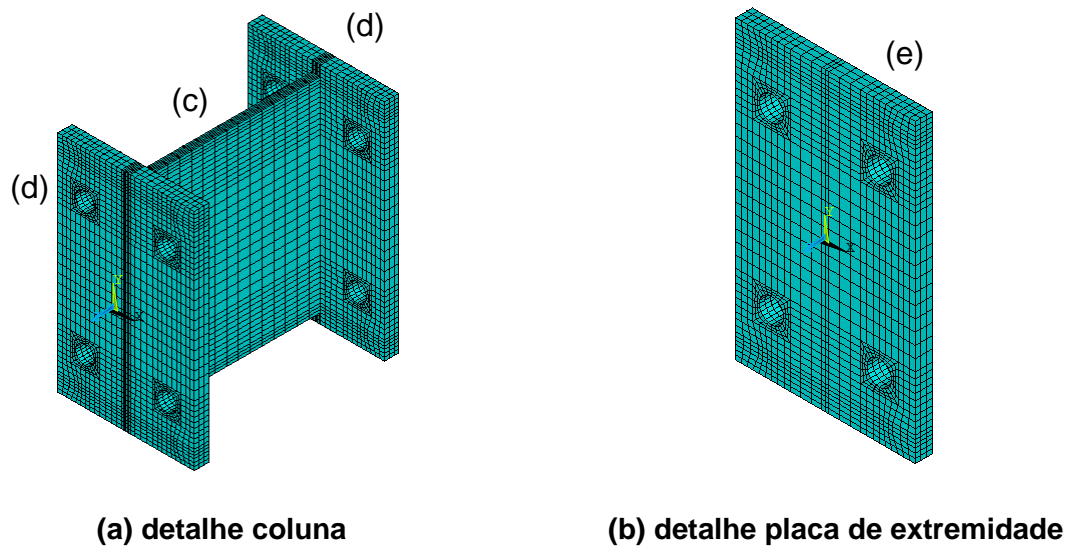


Figura 4.7 – Modelo Numérico – Coluna e Placa de Extremidade

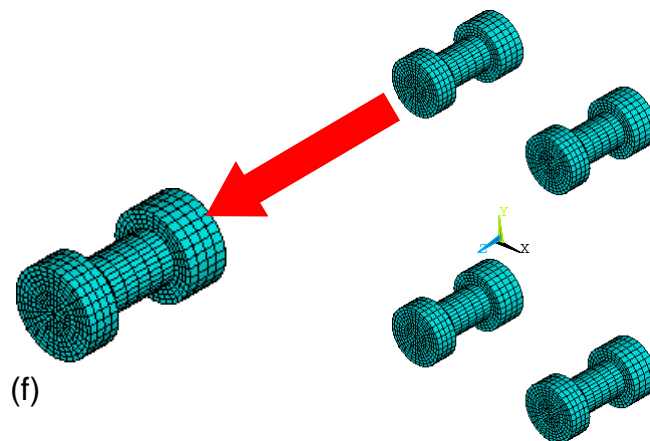


Figura 4.8 – Modelo Numérico – Parafusos

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.

Assim, com os parâmetros apresentados, a malha global do modelo é constituída por 36958 elementos e 41952 nós.

4.4.3 Elemento de Contato

O elemento de contato na simulação numérica é utilizado para representar o fenômeno de interface dos elementos em uma análise de elementos finitos. A adição deste elemento permite avaliar a penetração de um elemento sobre o outro em zonas de contato.

Com o objeto de se considerar as zonas de contato do modelo, foi utilizado o elemento de contato nestas regiões, através da interação entre as superfícies. A Figura 4.9 apresenta as regiões de aplicação dos elementos de contato. Os elementos de contato foram considerados nas seguintes regiões:

- Placa de extremidade e mesa da coluna - Figura 4.9(a);
- Cabeça do parafuso e placa de extremidade - Figura 4.9(b);
- Corpo do parafuso e placa de extremidade e mesa da coluna - Figura 4.9(c);
- Porca do parafuso e mesa da coluna - Figura 4.9(d).

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 e a área de contato, que provocará o atrito entre as superfícies. Para a caracterização do elemento de contato no modelo numérico foi utilizado o coeficiente de atrito de 0,25.

Os elementos de contato utilizados foram **TARGE 170** e **CONTA 173**, para as áreas de base e as áreas de contato, respectivamente. O elemento **TARGE 170** é usado para representar superfície de base associada a elementos de contato, como o utilizado **CONTA 173**. Esta superfície de contato é discretizada por um conjunto de elementos segmentados (**TARGE 170**) e é associada com seus pares através da superfície de contato partilhada através da constante real. Este elemento está representado na Figura 4.10.

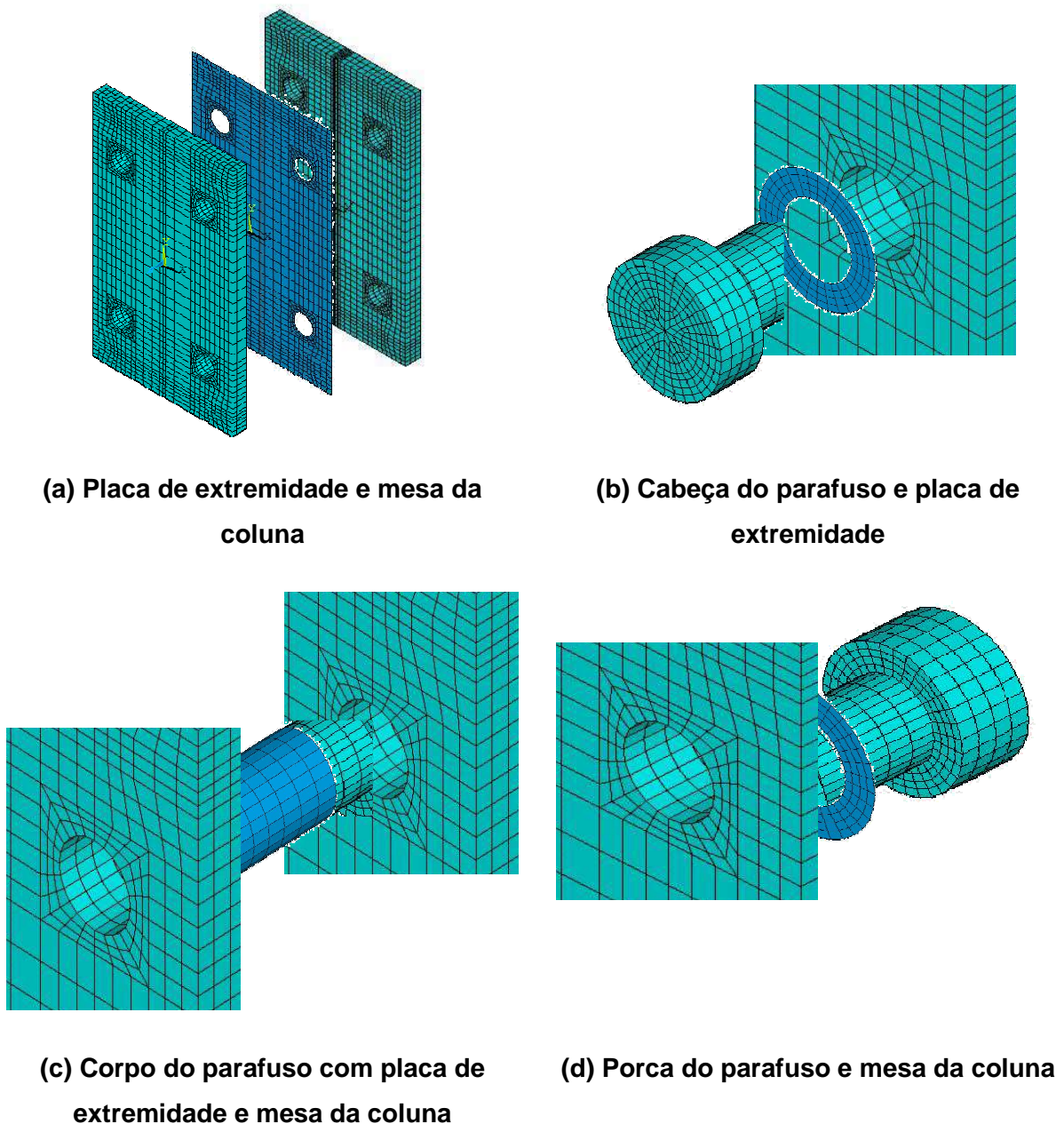


Figura 4.9 – Área de atuação do contato

O elemento **CONTA 173** é usado para representar a área de contato e a superfície de deformação, definida com o elemento **TARGE 170**. Este elemento é aplicado para estruturas representadas nas três dimensões. Terá a mesma característica do elemento da superfície que sofrerá o contato. O contato entre as superfícies ocorrerá quando a superfície da área de contato penetra na superfície base. Sua representação é apresentada na Figura 4.11.

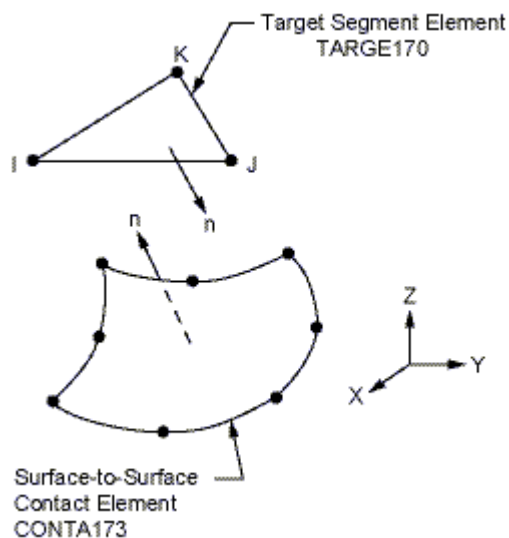
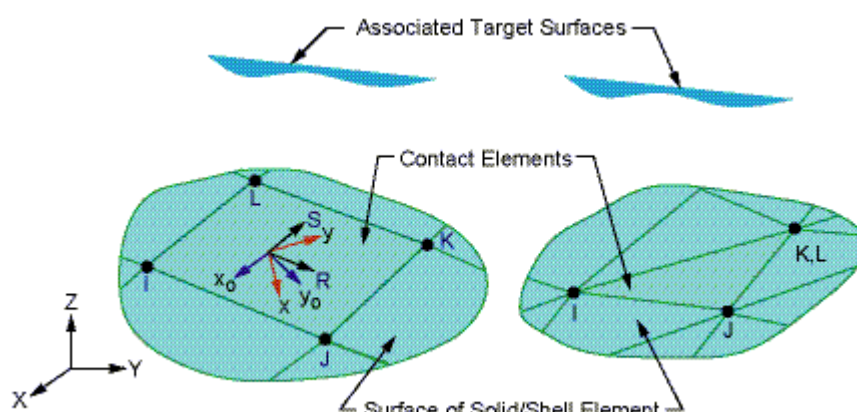


Figura 4.10 – Geometria do elemento TARGE 170 (Ansys, 2008)



R = Elemento no eixo x para fricção isotrópica

x_0 = Eixo do elemento para fricção ortotrópica, se paralelo ao eixo global x

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

Figura 4.11 – Geometria do elemento CONTA 173 (Ansys, 2008)

4.4.4 Calibração do Modelo Numérico

Para a calibração do modelo numérico foi utilizado o ensaio FE01, onde só é realizada a aplicação de momento fletor, comparando-se os resultados encontrados no ensaio experimental com os resultados numéricos obtidos. Com estes valores

comparados é possível verificar que a calibração foi efetuada satisfatoriamente e que se pode partir para as demais análises, considerando-se que o modelo pode ser utilizado como base comparativa.

A Figura 4.12 apresenta o gráfico comparativo, utilizado na calibração, ou seja, com a aplicação de momento fletor somente.

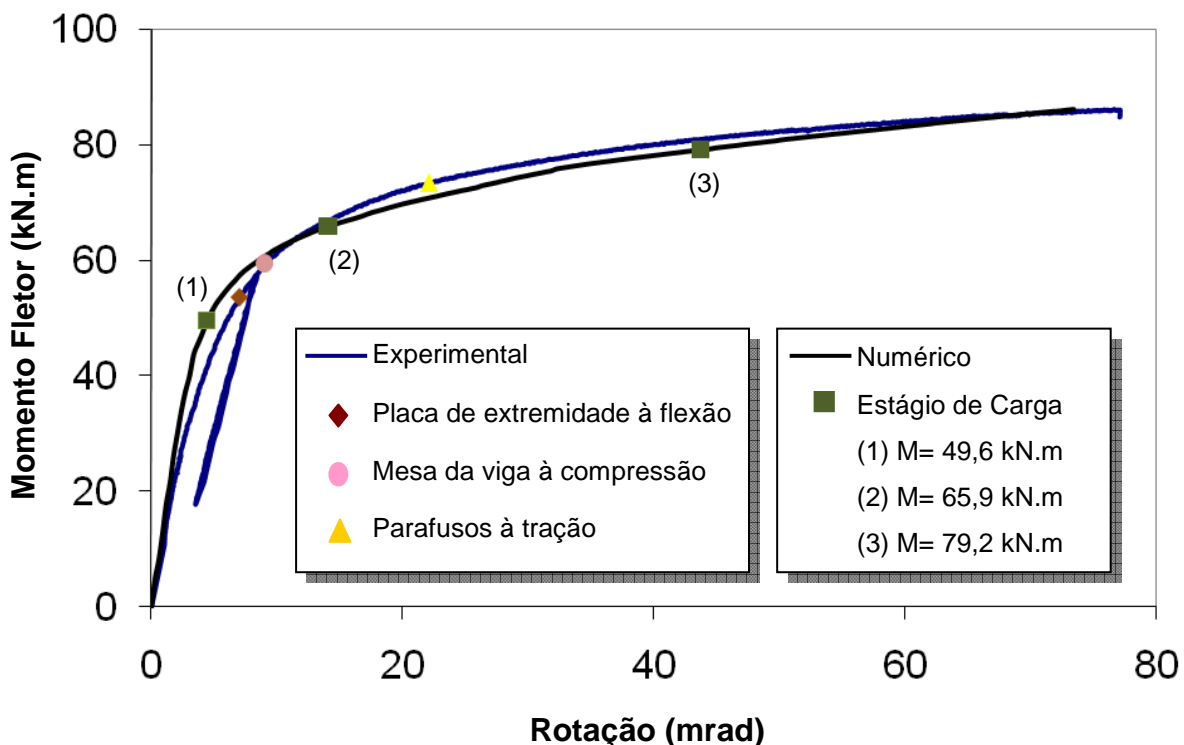


Figura 4.12 – Gráfico momento versus rotação - numérico e experimental – FE01

Através do gráfico é possível verificar que as duas curvas apresentam semelhança de forma. Os pontos em destaque na curva experimental referem-se a seqüência de escoamento obtida a partir da leitura dos extensômetros: placa de extremidade à flexão, mesa da viga à compressão e parafusos à tração, respectivamente. Os pontos marcados na curva numérica permitem verificar que a plastificação ocorreu na mesma seqüência da experimental. No ponto 01 ($M=49,6\text{kN.m}$) há o início da plastificação da placa de extremidade em flexão, verificada através da distribuição de tensões de Von Mises apresentada em uma seção posterior do presente capítulo (Figura 4.16). Para o ponto 02 ($M=65,9\text{kN.m}$), é possível verificar o início da plastificação da mesa da viga à compressão (Figura

4.17). Este valores encontrados são próximos aos valores experimentais, conforme os pontos marcados.

A Figura 4.13 apresenta as retas que definem a rigidez inicial de cada uma das curvas, experimental e numérica, obtidas pela inclinação inicial do gráfico momento *versus* rotação. A linha vermelha representa a reta utilizada para obtenção da rigidez inicial da curva experimental na fase de descarga sendo esta paralela ao trecho inicial, e a verde, da curva numérica. A consideração da rigidez inicial através da fase de descarga é feita tendo em vista que nesta fase não há mais folgas ou ajustes na ligação, representando assim, um valor obtido mais coerente com o tipo de análise efetuada. Conforme representado na Tabela 3.6, a rigidez inicial experimental obtida foi de 8564 kN.m/rad, enquanto que a curva numérica apresenta 9940 kN.m/rad, que significa uma diferença de 16%. Assim, pode-se verificar que para a rigidez inicial o resultado obtido encontra-se dentro de um limite aceitável.

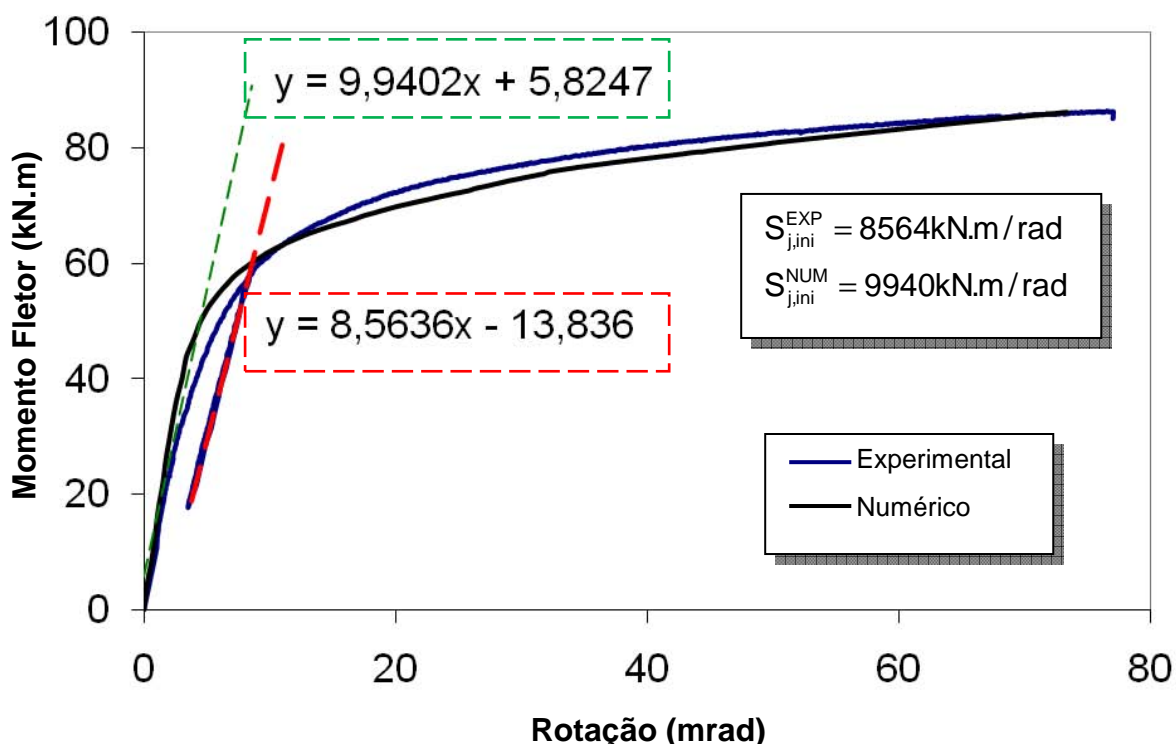


Figura 4.13 – Rigidez Inicial – numérico e experimental – FE01

O momento resistente $M_{j,Rd}$ foi obtido através do ponto de intersecção entre as duas retas do gráfico apresentado na Figura 4.14. A seguir, serão apresentados

os cálculos realizados para obtenção do momento resistente da ligação. Este procedimento será utilizado para todos os ensaios apresentados nesta dissertação e por isso, não será novamente detalhado.

Através da Figura 4.14, pode-se obter as duas retas, conforme eq. (4.7):

$$\begin{aligned} y_1 &= 9,9402x + 5,8247 \\ y_2 &= 0,2446x + 68,457 \end{aligned} \quad (4.7)$$

Com as eqs. (4.7), igualando-se ambas as equações, têm-se:

$$\begin{aligned} y_1 &= y_2 \\ 9,9402x + 5,8247 &= 0,2446x + 68,457 \\ 9,6956x &= 62,6323 \\ x &= 6,460\text{mrad} \end{aligned} \quad (4.8)$$

Com o valor da rotação encontrado pela eq. (4.8), é possível calcular o valor do momento fletor, que será identificado como momento resistente $M_{j,Rd}$:

$$\begin{aligned} y_1 &= 9,9402 \cdot 6,460 + 5,8247 = 70,04 \text{ kN.m} \\ M_{j,Rd} &= 70,04 \text{ kN.m} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Comparando o resultado de momento resistente obtidos na eq. (4.9), 70,04 kN.m, com o valor obtido no ensaio experimental, 72,2 kN.m, é possível verificar que o valor experimental é superior ao numérico aproximadamente em 3,00%.

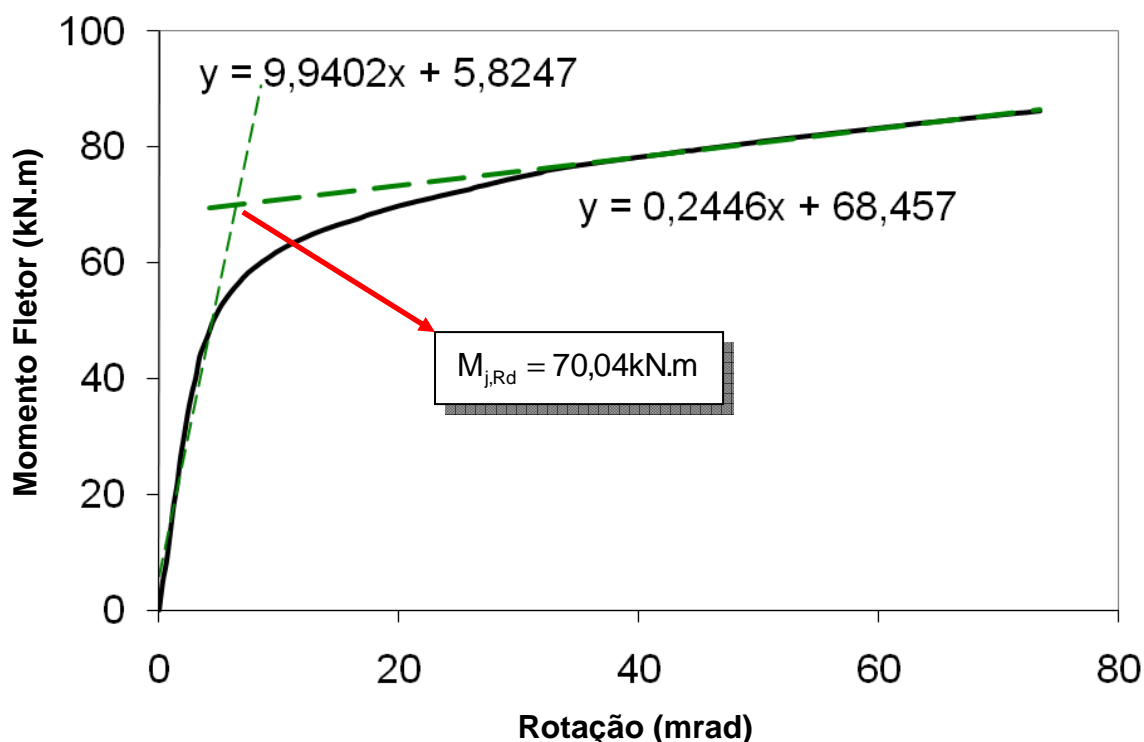


Figura 4.14 – Momento Resistente – numérico – FE01

A Figura 4.15 apresenta a comparação dos resultados encontrados através de três análises: ensaio experimental, modelo numérico e Eurocode 3 (Eurocode 3, 2003). O valor obtido através dos cálculos para o momento resistente foi de 73,05 kN.m, que é maior em relação ao encontrado tanto no ensaio ($M_{j,Rd}=72,2\text{kN.m}$) quanto no modelo numérico ($M_{j,Rd}=70,04\text{kN.m}$), porém, próximo a estes, mostrando que o modelo numérico fornece resultados satisfatórios. É possível se verificar também que a rigidez inicial calculada através do Eurocode 3 (Eurocode 3, 2003) foi de 11152,17 kN.m/rad, superior ao ensaio e o modelo numérico. Os cálculos para obtenção do valor encontrado pelo dimensionamento do Eurocode (Eurocode 3, 2003) estão detalhados no Anexo A.

Na Figura 4.16 a Figura 4.18 são apresentadas as distribuições das tensões de *Von Mises*, em MPa, observadas na ligação, em três pontos distintos da análise, representados na Figura 4.12. Na Figura 4.16 têm-se as componentes para o nível de momento de 49,6 kN.m, que corresponde ao ponto 01 da Figura 4.12, onde ocorre o início da plastificação da placa de extremidade. Na Figura 4.17, são obtidas as componentes para o início da plastificação da mesa da viga à compressão, para o momento de 65,9 kN.m, representado na Figura 4.12 pelo ponto 02. Por fim, a

Figura 4.18, é apresentada as componentes para um nível superior de momento fletor, de 79,2 kN.m, onde pode-se observar a plastificação das duas componentes, conforme ponto 03 da Figura 4.12. Com isto, é possível verificar que a modelagem manteve as características obtidas no ensaio experimental, e assim, considerar satisfatória a modelagem.

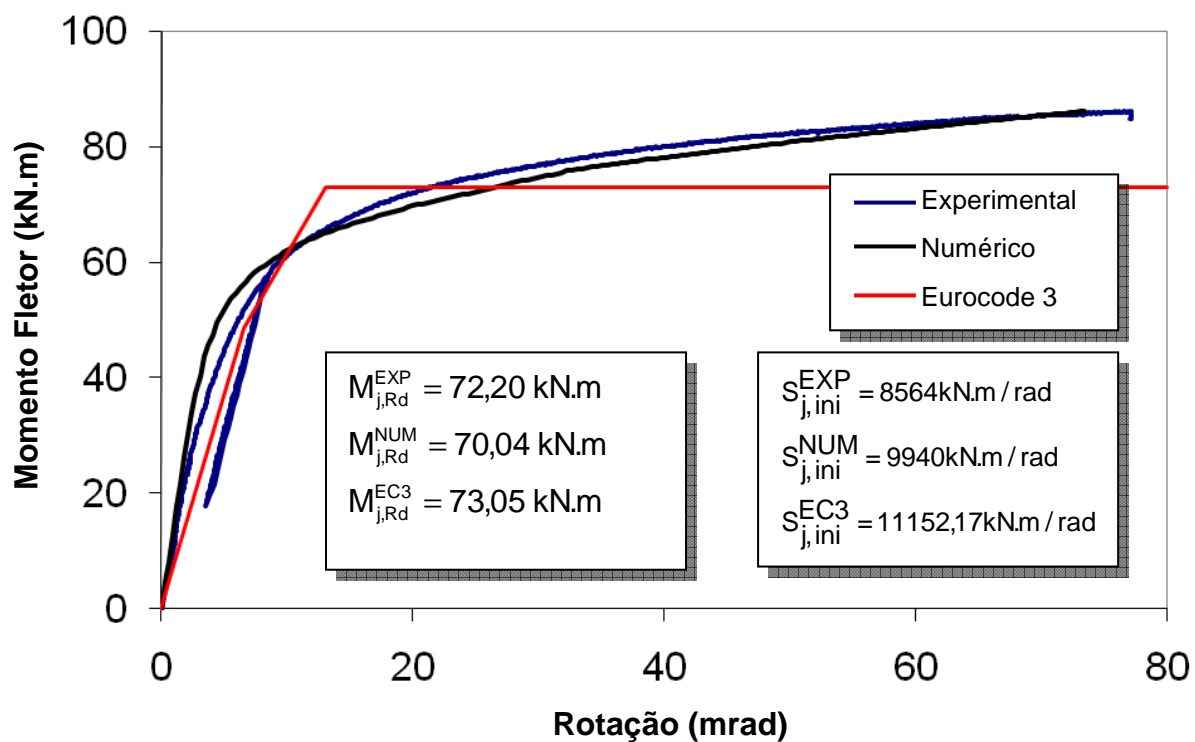


Figura 4.15 – Comparação dos resultados obtidos - FE01

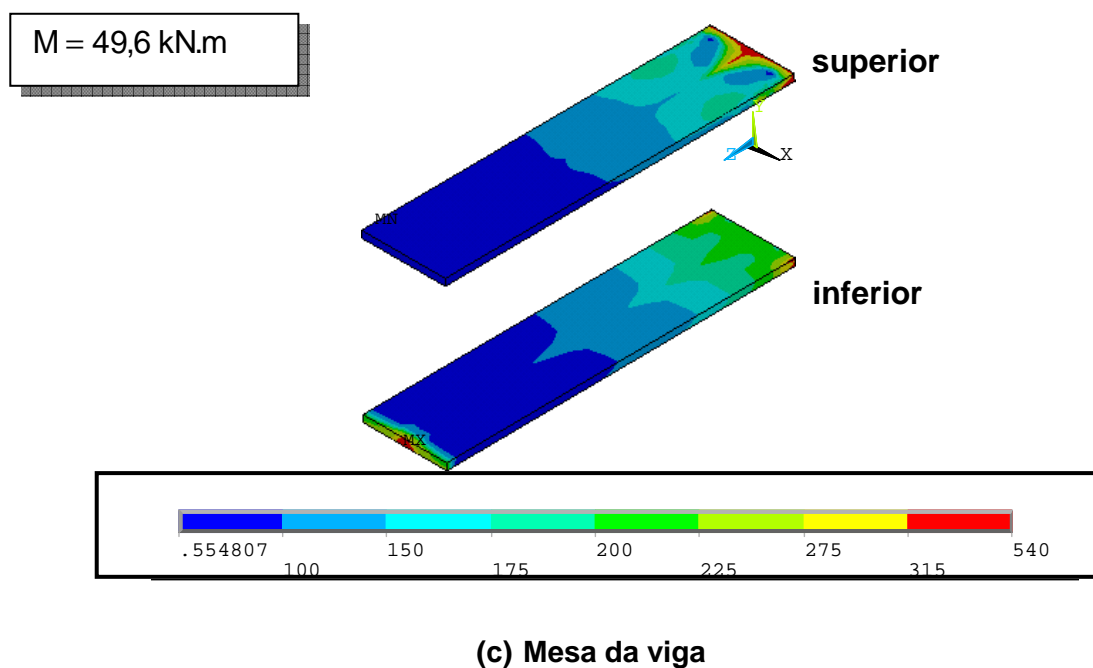
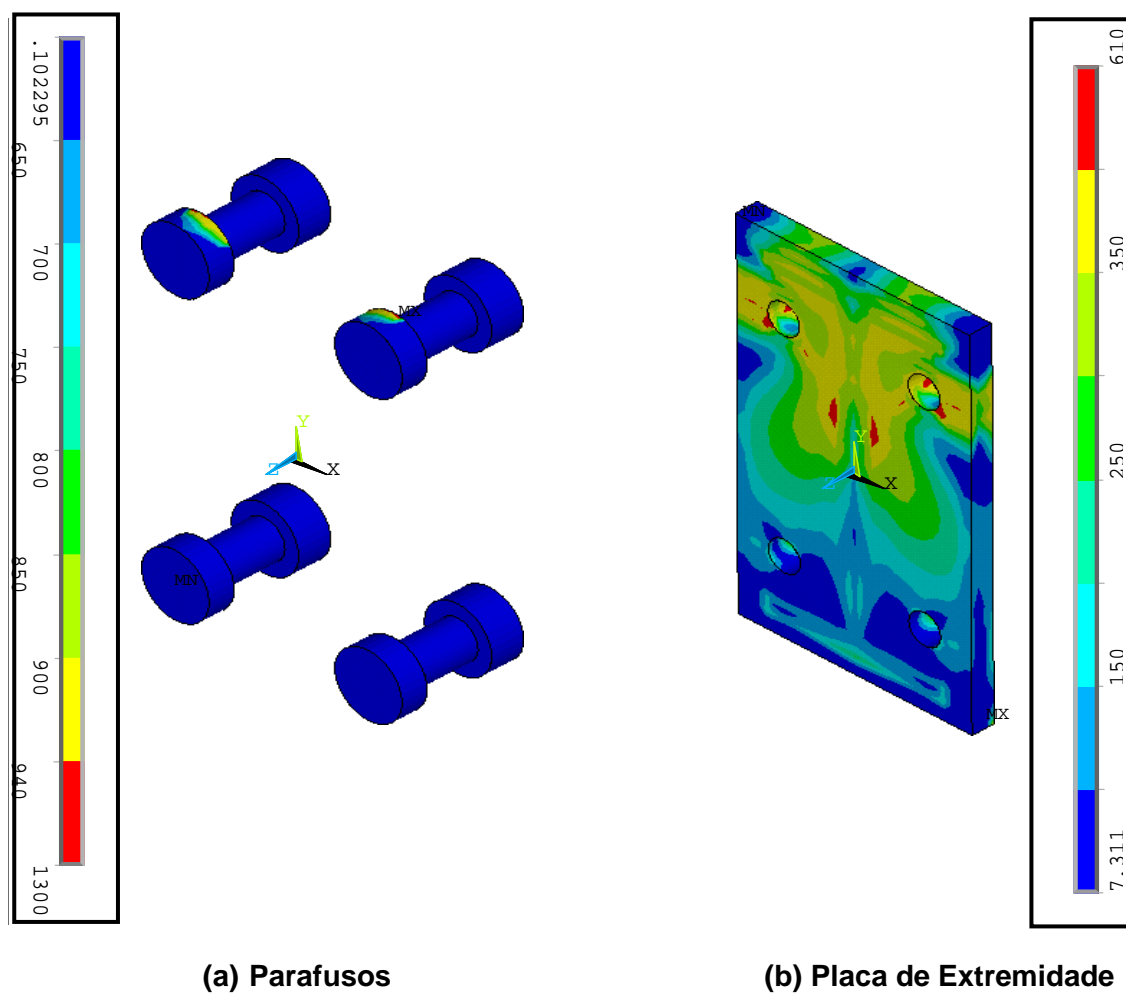


Figura 4.16 – Distribuição de tensões de *Von Mises*, em MPa – FE01 –

Estágio de Carga (1) – $M=49,6 \text{ kN.m}$

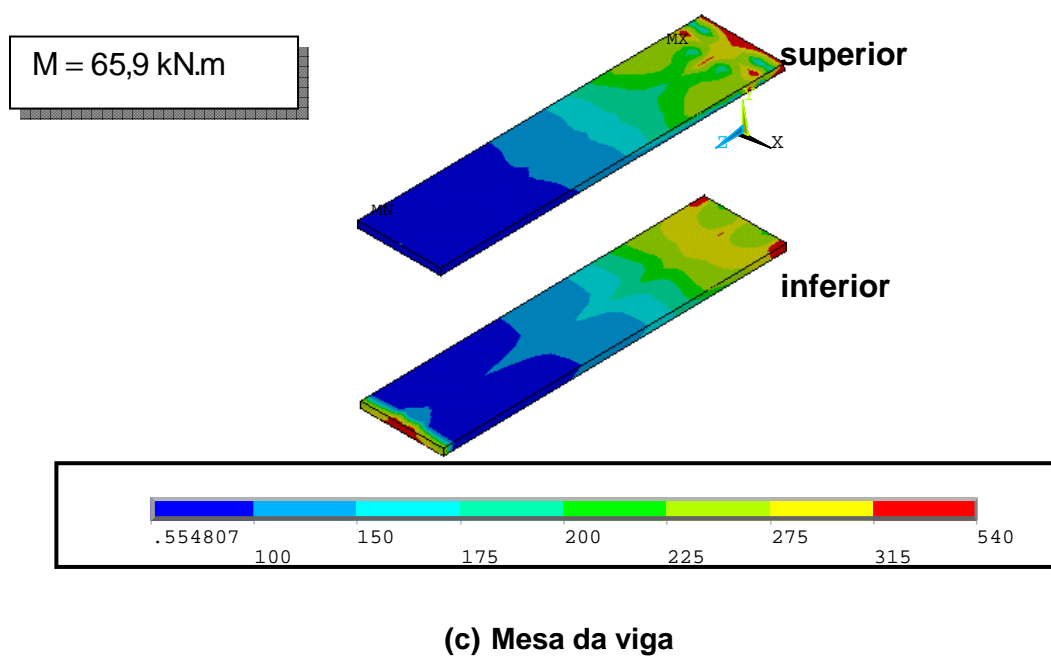
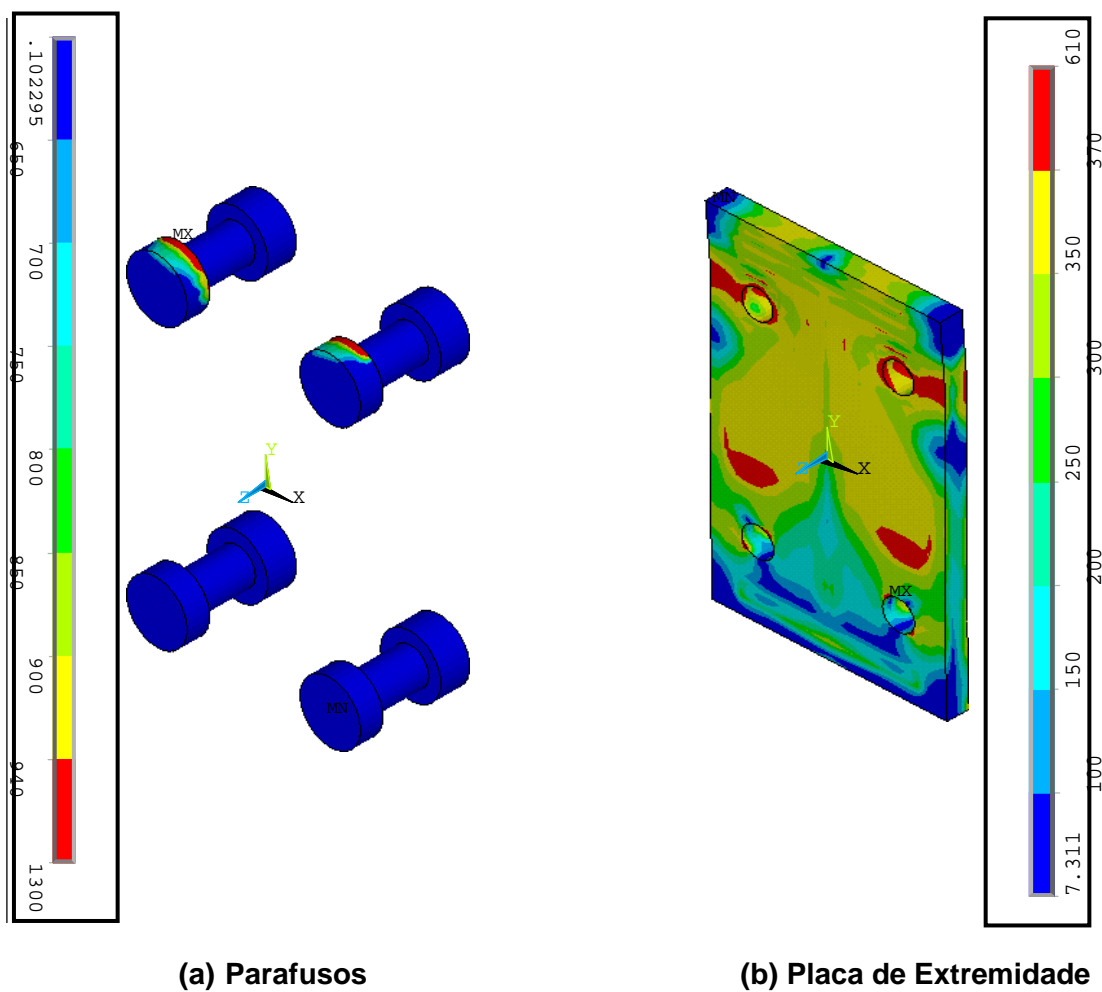
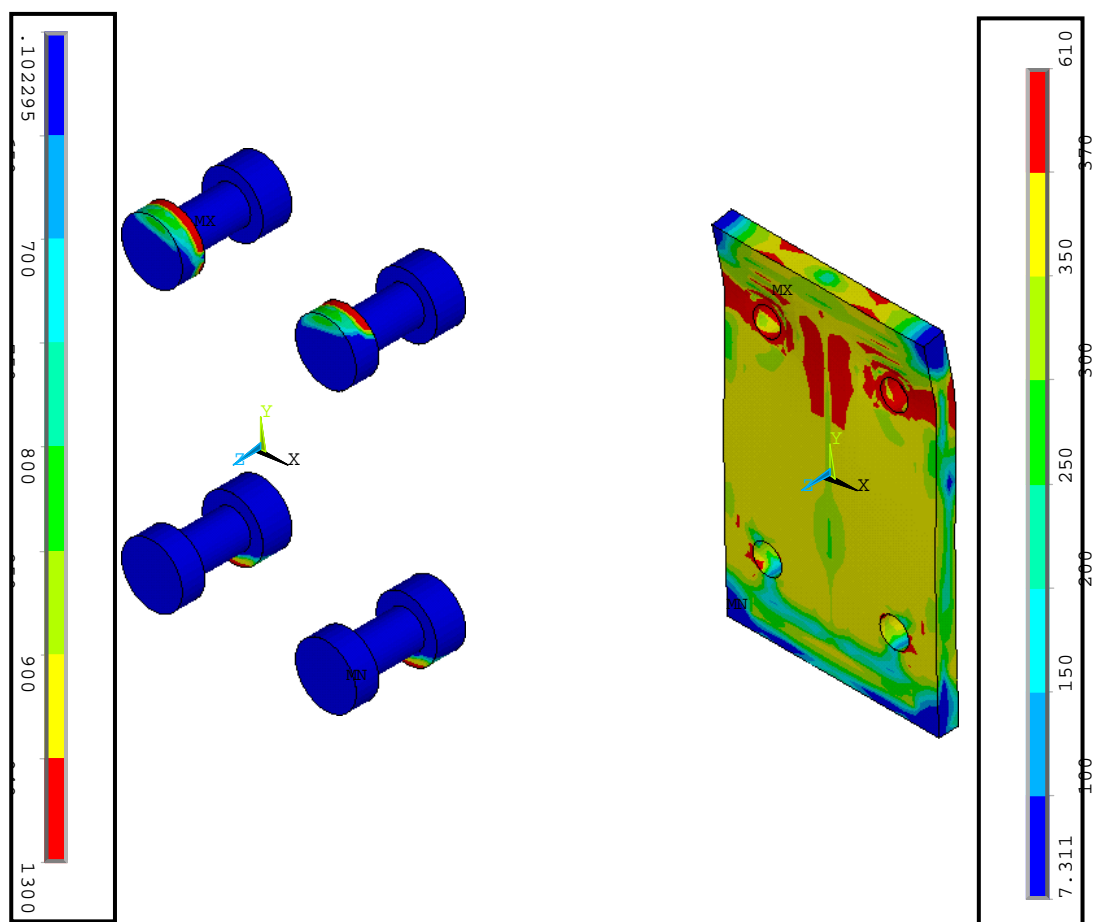


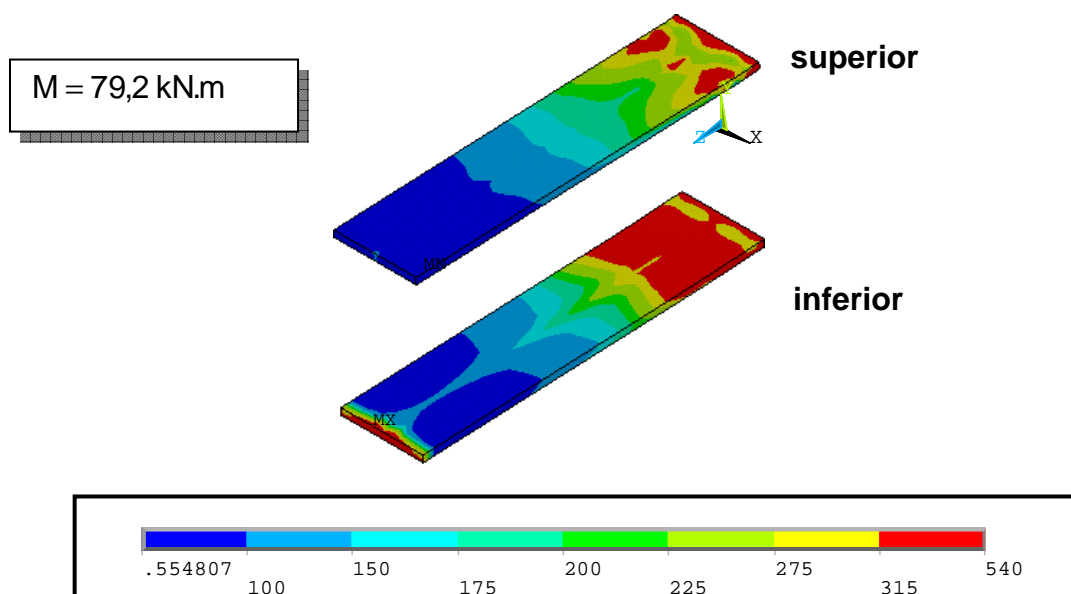
Figura 4.17 – Distribuição de tensões de Von Mises, em MPa - FE01 –

Estágio de Carga (2) – $M=65,9 \text{ kN.m}$



(a) Parafusos

(b) Placa de Extremidade



(c) Mesa da viga

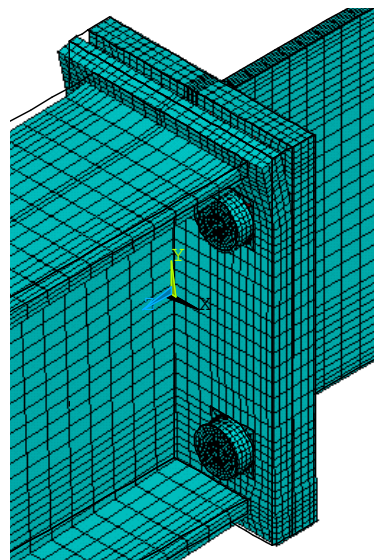
Figura 4.18 – Distribuição de tensões de Von Mises, em MPa – FE01 –

Estágio de Carga (3) – $M=79,2$ kN.m

A Figura 4.19 apresenta a comparação da deformação ocorrida para o ensaio experimental e o modelo numérico, verificando-se semelhança entre os deslocamentos observados.



(a) Experimental



(b) Numérico

Figura 4.19 – Comparação de deformação – experimental e numérico

4.5 Avaliação das curvas momento *versus* deformação

A seguir, serão comparados os resultados obtidos para o comportamento de algumas componentes dos ensaios das ligações com placa de extremidade ajustada através dos extensômetros utilizados na instrumentação dos mesmos.

4.5.1 Comportamento mesa da coluna à flexão (4)

O comportamento da componente mesa da coluna à flexão foi avaliado através do extensômetro 10, localizado logo abaixo da linha superior de parafusos – ver Figura 4.20(a) - não sendo suficiente para uma análise mais profunda desta componente, pois esta não era a mais relevante no dimensionamento das ligações estudadas (Lima, 2003).

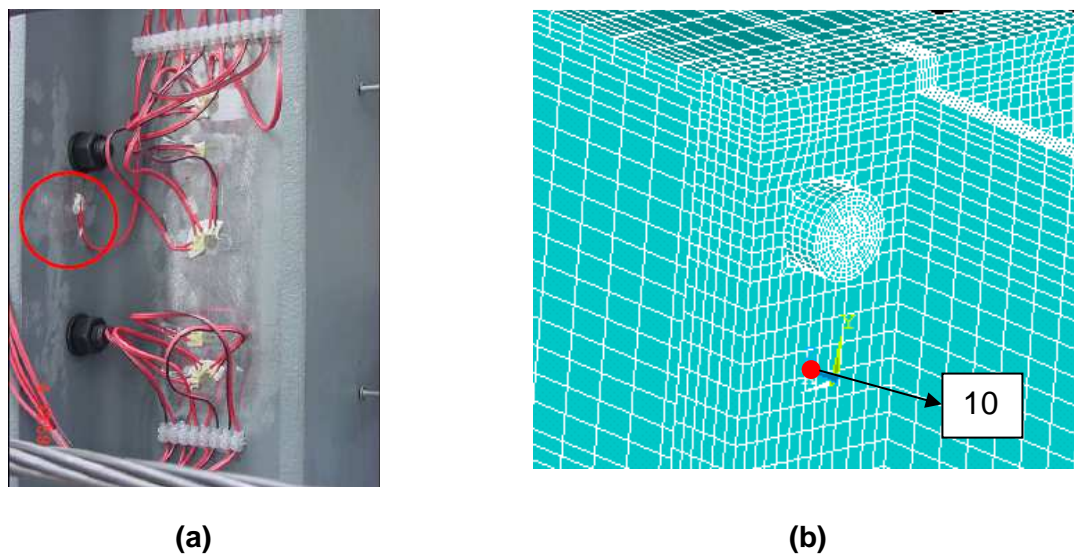


Figura 4.20 – Localização do extensômetro 10

A Figura 4.21 apresenta a curva momento *versus* deformação para esta componente. Pode-se observar um valor elevado de deformação para a componente mesa da coluna à flexão, ou seja, conforme mecanismo de ruptura tipo 1 de um T-Stub, um completo escoamento da mesa.

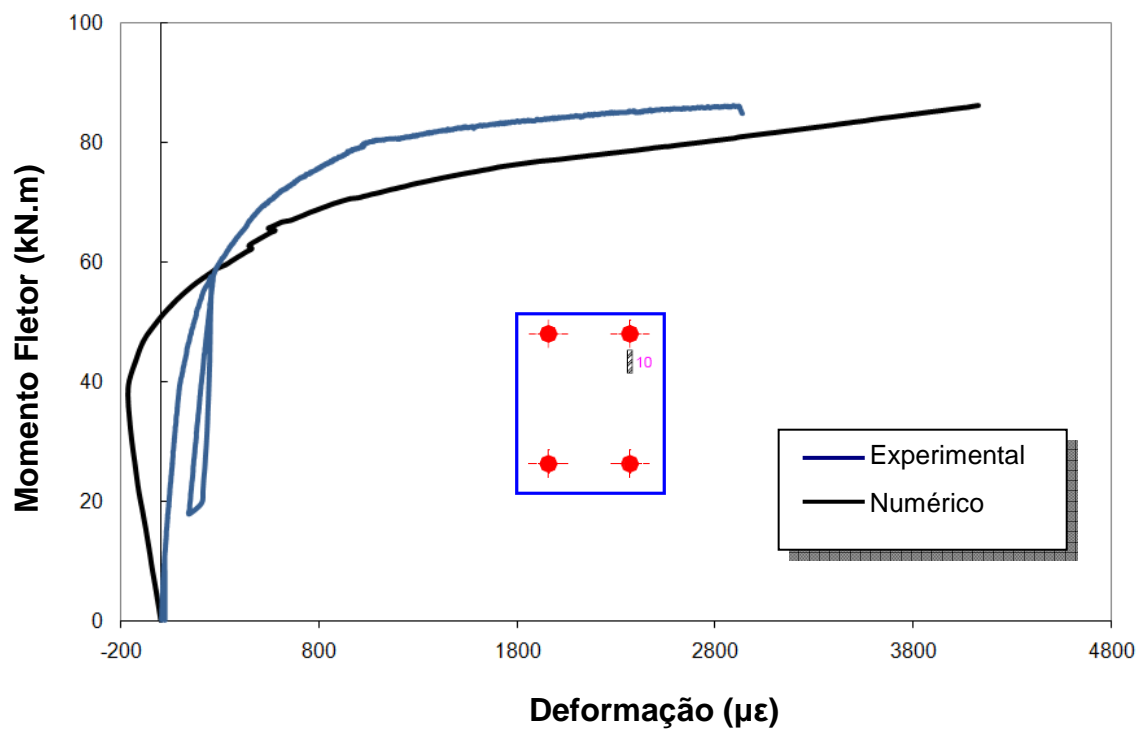


Figura 4.21 – Curva momento *versus* deformação (extensômetro 10)

Observa-se que os níveis de deformação para o experimento foram superiores ao numérico, apresentando assim um modelo numérico mais conservativo, além de existir uma parte com deformação negativa, que não acontece no modelo experimental. Esta parte de deformação negativa deve-se ao fato das condições de contorno impostas ao modelo.

4.5.2 Comportamento da placa de extremidade à flexão (5)

Para esta componente a deformação foi obtida através dos extensômetros 23 e 24, localizados na placa de extremidade na lateral do furo para o parafuso.

Esta componente varia de acordo com o valor de aplicação do esforço normal. Quanto maior o valor de aplicação de compressão, menor é a solicitação desta componente, passando a mesa da viga a compressão a ser a componente a controlar o dimensionamento. Para aplicação de esforço normal de tração, o caso é justamente o contrário.

Na Figura 4.22 e na Figura 4.23, são apresentadas as curvas momento *versus* deformação para os dois extensômetros estudados. Para o caso de aplicação de esforço normal (tração/compressão), que será estudado no próximo capítulo, há mudança do comportamento desta componente. Nos ensaios com esforço normal de compressão, o escoamento somente é atingido em níveis mais elevados de carregamento. Por outro lado, nos ensaios onde se aplicou esforço normal de tração, este escoamento foi atingido em níveis inferiores de carregamento.

De acordo com as recomendações de projeto do Eurocode 3, a resistência da componente placa de extremidade à flexão é igual a 339,3 kN.m (valor obtido com a resistência à tração real do material). Nos gráficos apresentados na Figura 4.22 e na Figura 4.23, esta componente atinge o valor relativo ao escoamento no ensaio FE1, para um nível de momento de aproximadamente 60kN.m.

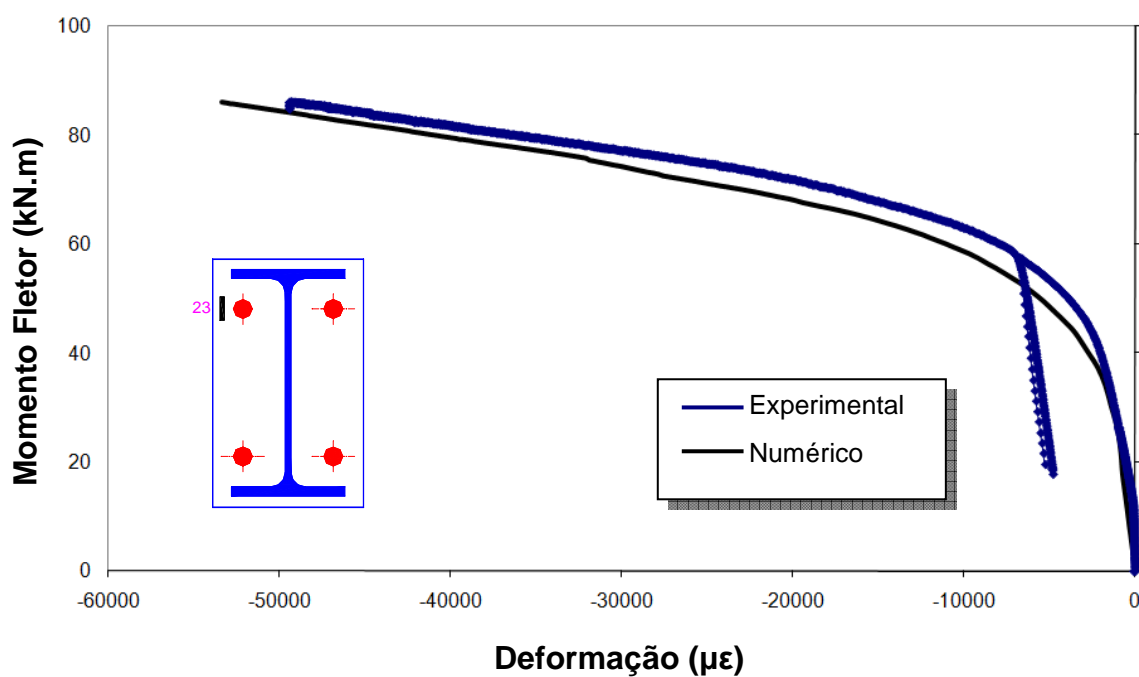


Figura 4.22 – Curva momento *versus* deformação (extensômetro 23)

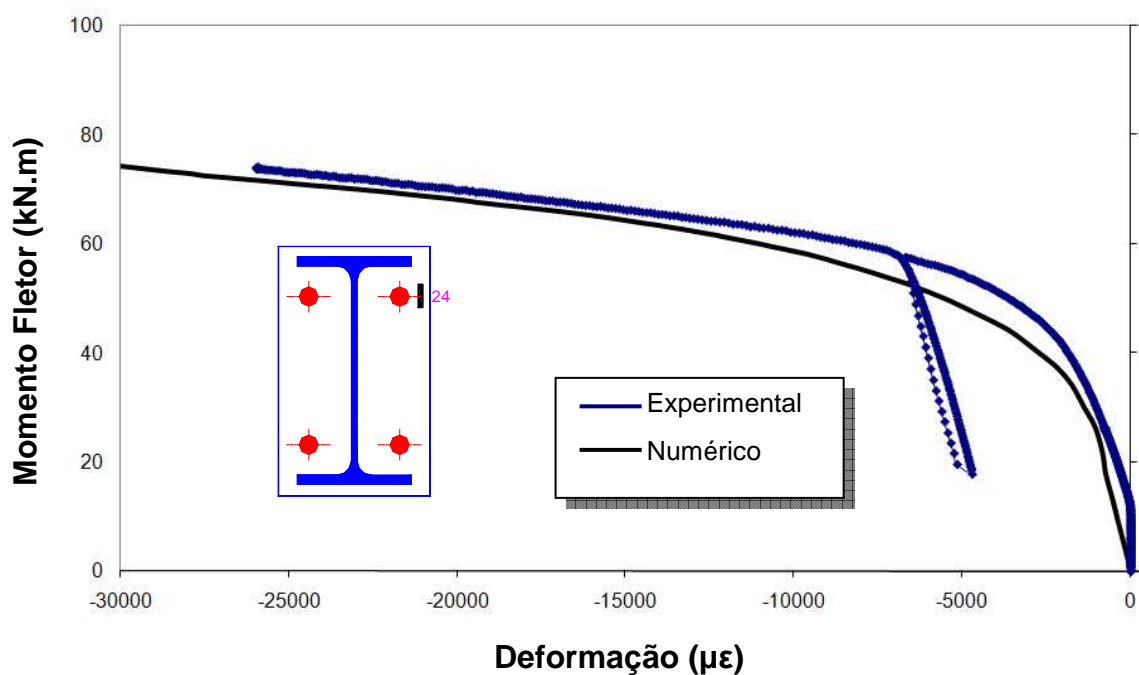


Figura 4.23 – Curva momento *versus* deformação (extensômetro 24)

4.5.3 Comportamento da alma da viga à tração (8)

A avaliação da componente alma da viga à tração será efetuada através dos extensômetros lineares 22 e 28.

Entretanto os valores obtidos para o extensômetro 22 mostram que ocorreu algum problema devido aos baixos valores encontrados na medição e, principalmente, na fase de descarga efetuada no ensaio experimental.

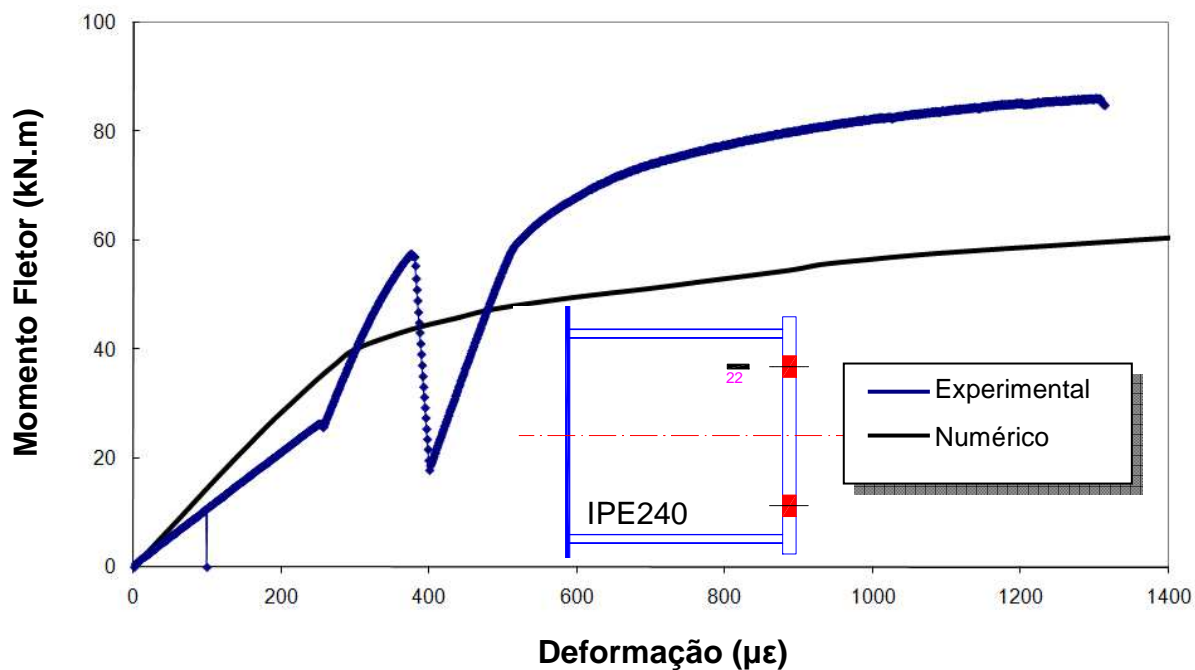


Figura 4.24 – Curva momento *versus* deformação (extensômetro 22)

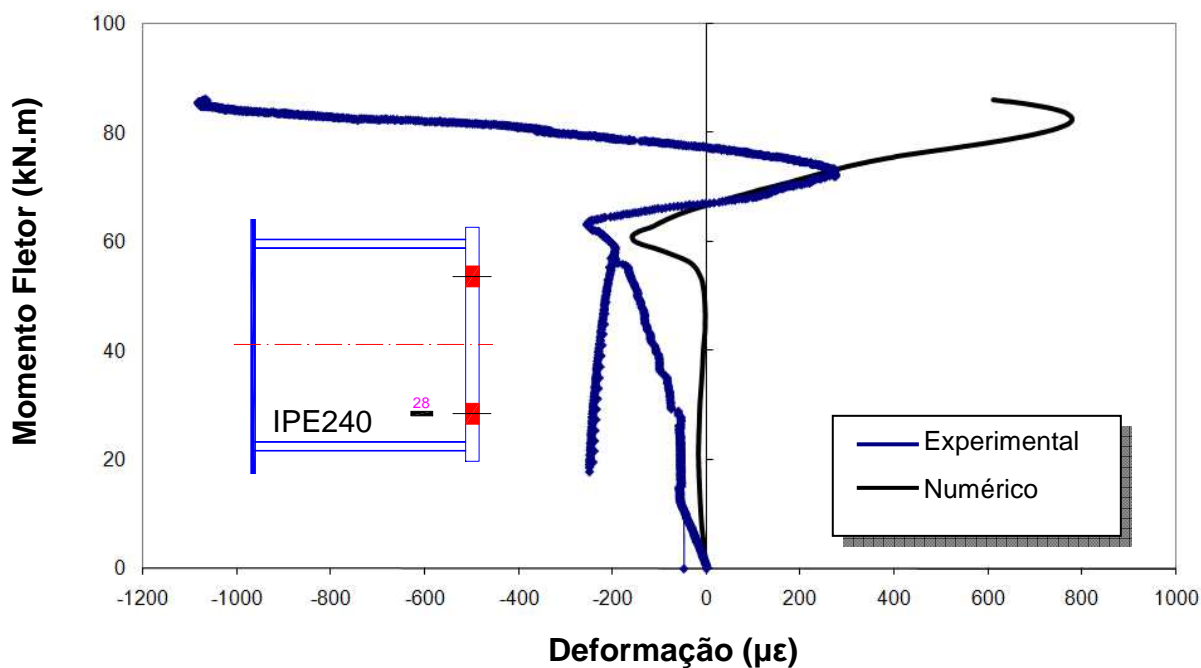


Figura 4.25 – Curva momento *versus* deformação (extensômetro 28)

Este capítulo apresentou a calibração do modelo numérico, através da comparação com os resultados obtidos no ensaio FE1, com aplicação de momento fletor somente. Foram apresentadas também as curvas momento *versus* deformação para algumas componentes. O próximo capítulo demonstrará o estudo comparativo entre os ensaios experimentais e os modelos numéricos para os demais ensaios, bem como os resultados desenvolvidos através do modelo de Cerfontaine (Cerfontaine, 2001), calculados por Nunes (Nunes, 2006), (Nunes *et al*, 2007), (Nunes *et al*, 2006), (Nunes *et al*, 2005).

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados os resultados comparativos entre os ensaios experimentais e os resultados numéricos obtidos através do modelo desenvolvido no programa *Ansys* (Ansys, 2008). Adicionalmente, será apresentada a comparação com o valor obtido através dos cálculos realizados pelo modelo de Cerfontaine (Cerfontaine, 2001), elaborados por Nunes (Nunes, 2006), (Nunes *et al*, 2007), (Nunes *et al*, 2006), (Nunes *et al*, 2005), em sua dissertação de mestrado.

Os ensaios experimentais foram apresentados no capítulo três e a calibração do modelo foi desenvolvida no capítulo quatro. Com estes resultados será possível fazer a avaliação do modelo proposto, para os casos onde se aplica esforço normal na ligação.

A comparação entre os resultados numéricos e experimentais será feita em termos curvas momento *versus* rotação, seqüência de escoamento das componentes e avaliação individual de componentes críticas no dimensionamento de ligações com placa de extremidade ajustada à altura da viga.

5.2 Discussão dos resultados

Nesta seção apresentam-se as curvas momento *versus* rotação comparativas entre os ensaios experimentais e o modelo proposto para cada um dos níveis de esforço normal aplicado, conforme Tabela 5.1, a fim de se realizar a análise dos resultados. São apresentadas também, as diversas distribuições de tensões de Von Mises para efeito de análise da seqüência de escoamento das componentes individualmente.

Na Tabela 5.2 são listados os valores de momento resistente encontrados nos ensaios e nos modelos numéricos. Finalmente, na Tabela 5.3 são descritos os valores da rigidez inicial experimentais e numéricos.

A fim de que se possa realizar comparativamente os resultados obtidos, serão apresentadas as distribuições de tensões para os ensaios para o mesmo nível de

momento fletor atuante, em cada um dos ensaios estudados, para que se obtenha a viabilidade da comparação esperada. Este nível foi escolhido, levando-se em consideração os pontos obtidos comparativamente ao experimental para o modelo FE1, representando os pontos de plastificação das componentes. Assim, pode-se ocorrer de não ser o ponto onde ocorra o escoamento para o modelo proposto, porém, para estudo comparativo dos casos, torna-se viável para a análise.

Os resultados para a aplicação do momento fletor somente, ou seja, FE1, já foram apresentados no capítulo anterior. Assim, não serão novamente apresentados, contudo os resultados obtidos serão melhor discutidos no decorrer deste capítulo. Não foram realizados modelos numéricos para as aplicações de esforço normal correspondentes aos ensaios FE4 e FE9. Isto porque o ensaio FE4 apresenta valor de esforço normal aplicado pouco superior ao limite estipulado pelo Eurocode 3 de 5%. A análise da estrutura para valores superiores a este limite pode ser observada nos demais ensaios realizados com esforço normal de compressão. Já para o ensaio FE9, o valor de esforço normal aplicado foi bastante elevado (20% $N_{pl,viga}$) e como para o ensaio FE8 (10% $N_{pl,viga}$) a redução de resistência à flexão já foi verificada, optou-se por não efetuar a análise numérica do referido ensaio.

Tabela 5.1 – Valores de N

Ensaio	N_{EXP} (kN)
FE1 (somente M)	-
FE3 (- 4% N_{pl})	-52,7
FE4 (- 8% N_{pl})	-105,6
FE5 (- 20% N_{pl})	-265,0
FE6 (- 27% N_{pl})	-345,0
FE7 (- 20% N_{pl})	-265,0
FE8 (+ 10% N_{pl})	130,6
FE9 (+ 20% N_{pl})	264,9

Tabela 5.2 – Valores de $M_{j,Rd}$

Ensaio	$M_{j,Rd,exp}$ (kN.m)	$\frac{M_{j,Rd,exp}}{M_{j,Rd,FE1exp}}$	$M_{j,Rd,num}$ (kN.m)	$\frac{M_{j,Rd,num}}{M_{j,Rd,FE1num}}$	$\frac{M_{j,Rd,num}}{M_{j,Rd,exp}}$
FE1 (apenas M)	72,2	1,00	70,04	1,00	0,97
FE3 (- 4% N_{pl})	77,2	1,07	70,20	1,00	0,91
FE5 (- 20% N_{pl})	80,5	1,11	75,2	1,07	0,93
FE6 (- 27% N_{pl})	72,3	1,00	69,1	0,99	0,96
FE7 (- 20% N_{pl})	80,7	1,12	75,2	1,07	0,93
FE8 (+ 10% N_{pl})	61,7	0,85	57,50	0,82	0,93

Tabela 5.3 – Valores de $S_{j,ini}$

Ensaio	$S_{j,ini,exp}$ (kN.m/rad)	$S_{j,ini,num}$ (kN.m/rad)	$\frac{S_{j,ini,num}}{S_{j,ini,exp}}$
FE1 (apenas M)	8564	9940	1,16
FE3 (- 4% N_{pl})	9713	11128	1,14
FE5 (- 20% N_{pl})	10763	11351	1,05
FE6 (- 27% N_{pl})	9379	10800	1,15
FE7 (- 20% N_{pl})	7326	11351	1,55
FE8 (+ 10% N_{pl})	7185	8474	1,18

5.2.1 FE03 ($N=-4\%N_{pl}$)

A

Figura 5.1 apresenta a comparação dos gráficos de momento *versus* rotação, obtidos do ensaio experimental e da modelagem numérica proposta. É possível verificar que a curva se assemelha a curva experimental, porém o modelo apresentou rigidez inicial superior ao ensaio, sendo 14% maior. São representados os pontos correspondentes ao escoamento das componentes para o ensaio experimental, que ocorreu na seguinte ordem: placa de extremidade à flexão, mesa inferior à compressão e parafusos à tração. Os pontos numerados correspondem aos pontos que serão verificados para o modelo numérico.

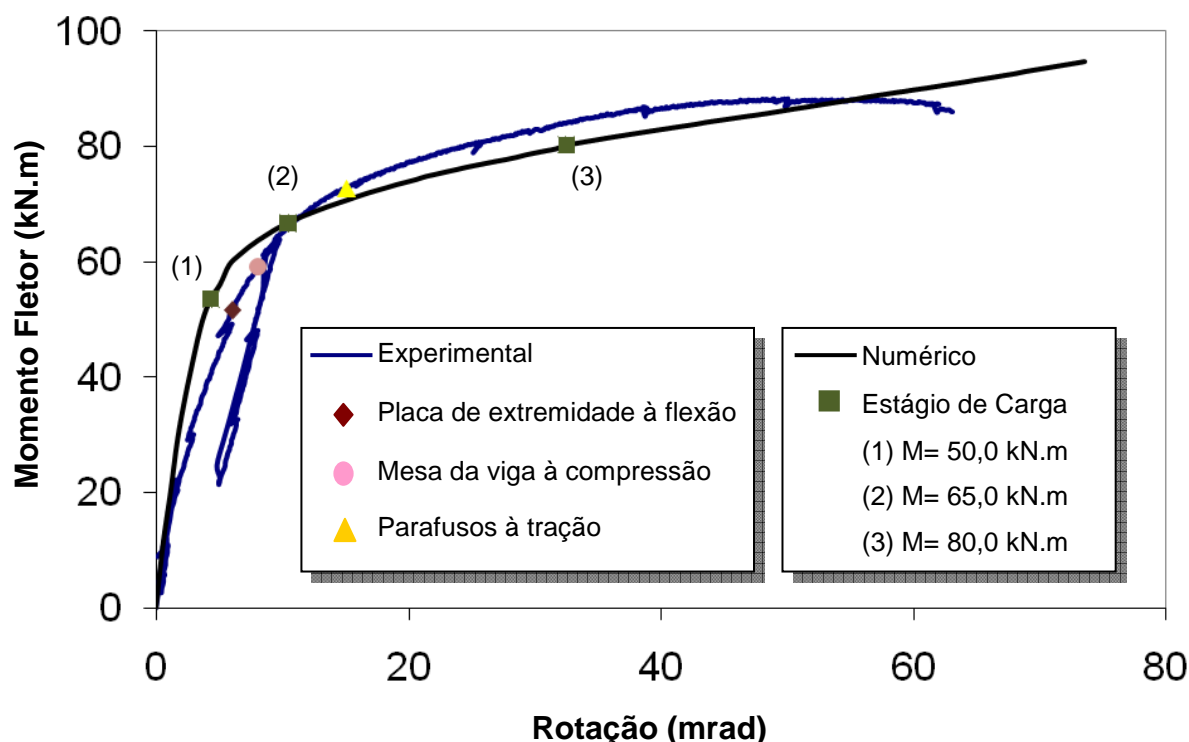


Figura 5.1 – Gráfico momento *versus* rotação - numérico e experimental – FE03

A Figura 5.2 apresenta a comparação da rigidez inicial para as duas curvas, realizada através da inclinação das retas apresentadas, sendo a vermelha representando a curva experimental e a verde, a teórica.

A Figura 5.3 apresenta as retas realizadas para a obtenção do momento resistente da ligação.

Nas Figura 5.4 a Figura 5.6 apresentam-se a evolução das tensões de *Von Mises*, em MPa, para três níveis de carregamento distintos indicados na

Figura 5.1. A discussão comparativa aos demais ensaios será apresentado em §5.3.

Na Figura 5.4, é apresentada a distribuição de tensões de *Von Mises* das três componentes preponderantes no dimensionamento deste tipo de ligação para o ponto 01, ou seja, momento fletor de 50 kN.m, onde é possível verificar-se o início da plastificação da placa de extremidade. Observa-se a formação da rótula plástica na placa de extremidade, na região dos furos superiores. Já na Figura 5.5 onde são apresentadas as componentes para o ponto 02, com momento fletor de 65 kN.m, pode-se notar o início da formação de regiões plastificadas para a mesa inferior da

viga. Finalmente, na Figura 5.6 estão as componentes para um nível superior de momento fletor, 80 kN.m, onde a placa de extremidade e a mesa já se encontram plastificadas.

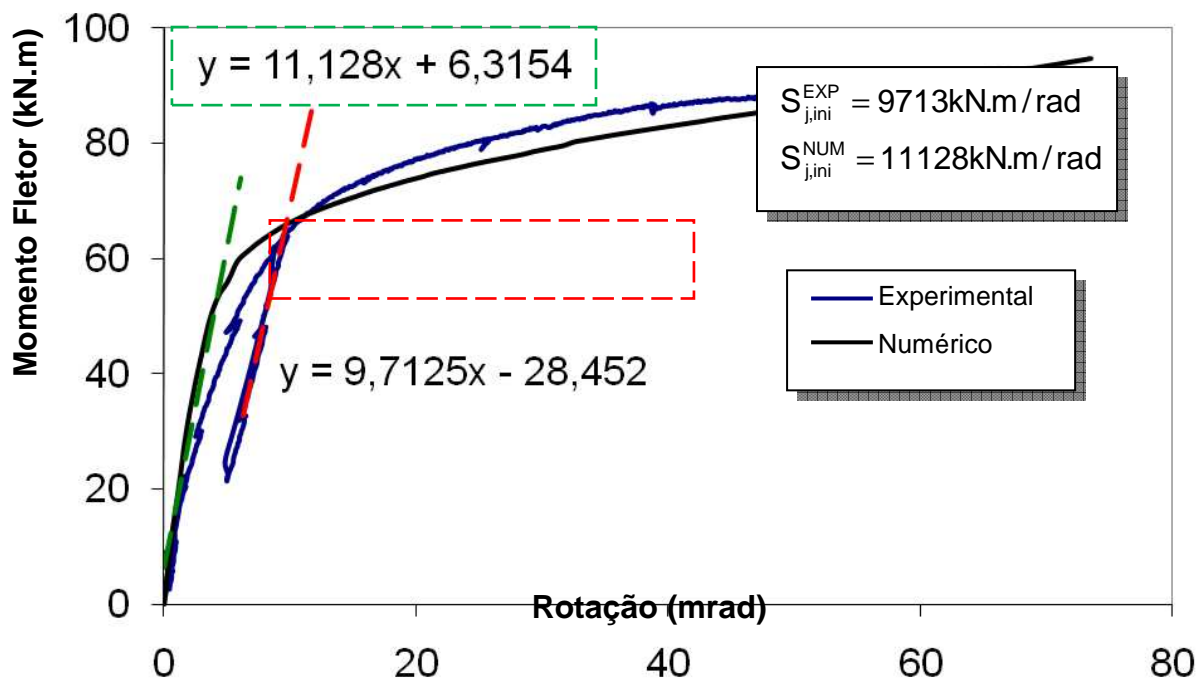


Figura 5.2 – Rigidez Inicial – numérico e experimental – FE03

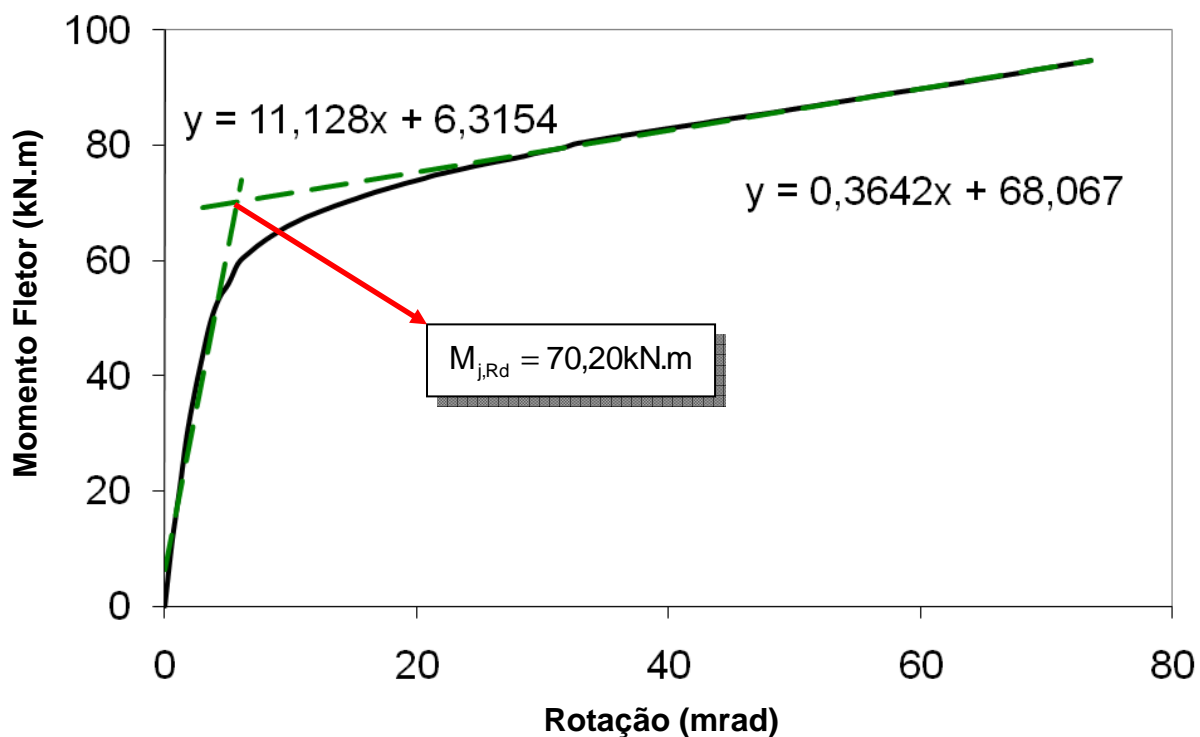
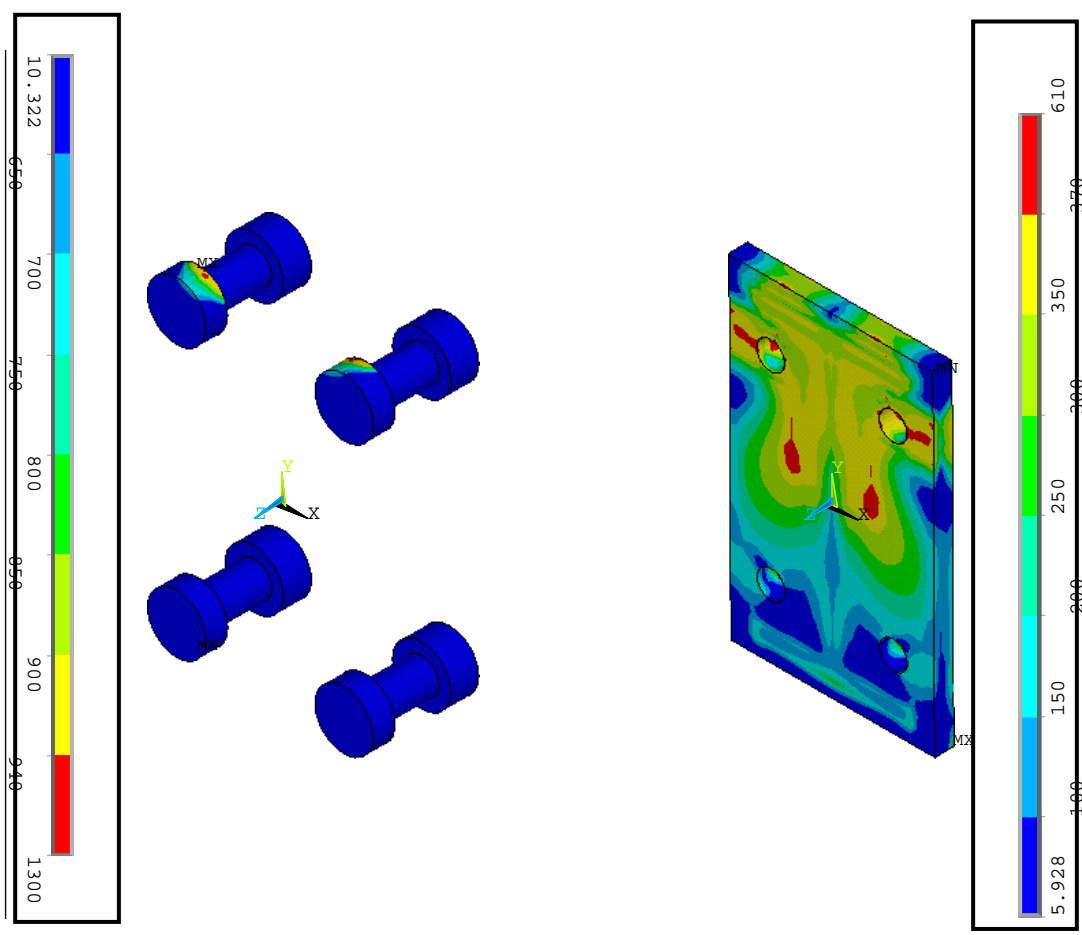
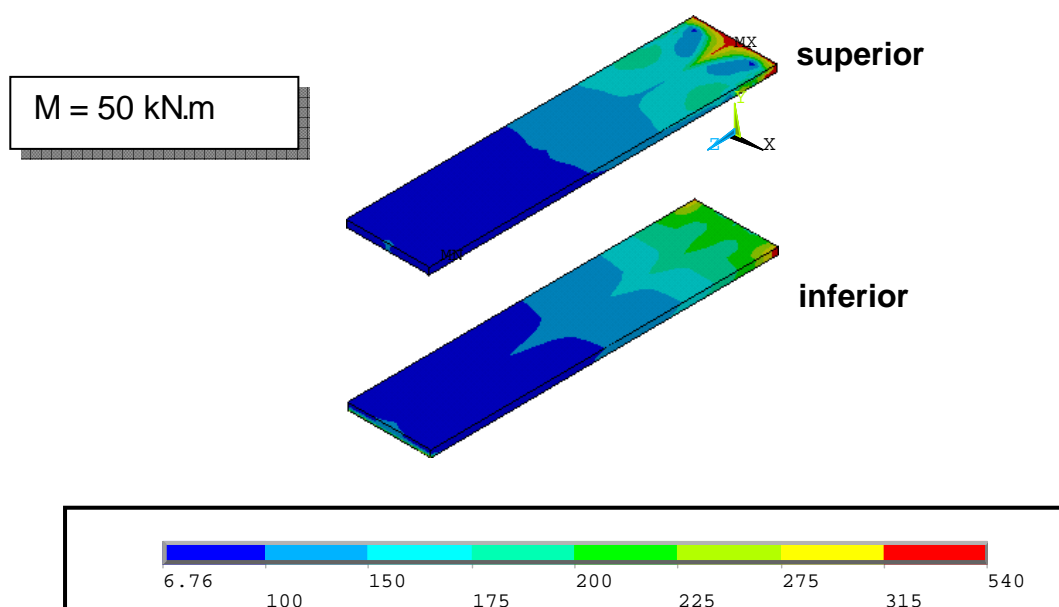


Figura 5.3 – Momento Resistente – numérico – FE03



(a) Parafusos

(b) Placa de Extremidade



(c) Mesa da viga

Figura 5.4 – Distribuição de tensões de Von Mises, em MPa – FE03 -

Estágio de Carga (1) – $M=50,0 \text{ kN.m}$

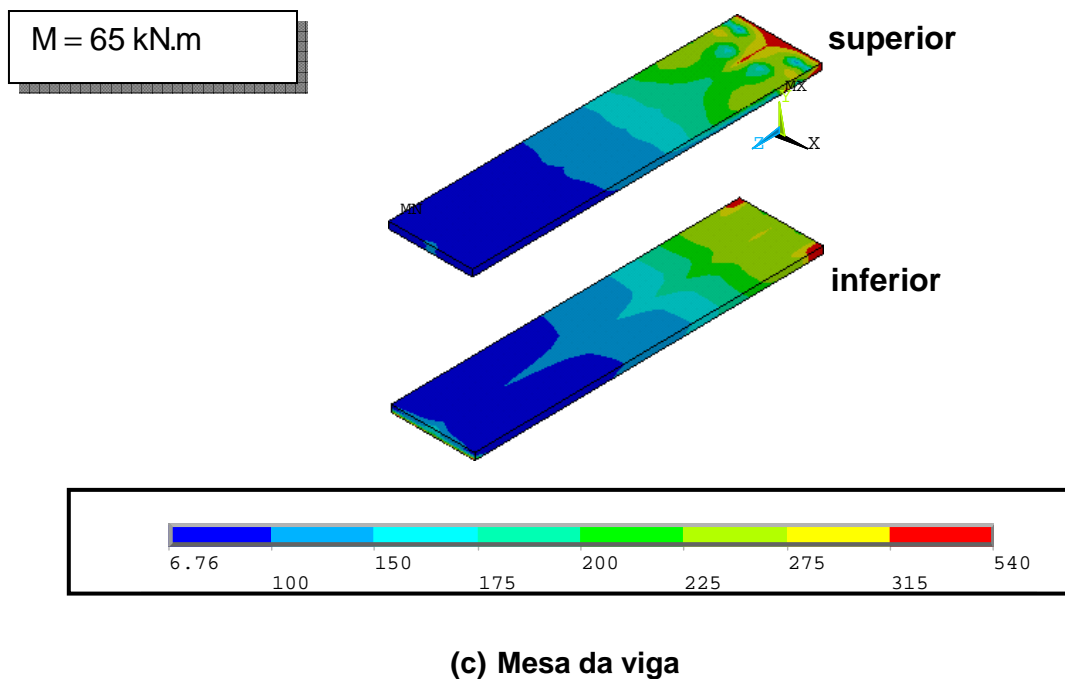
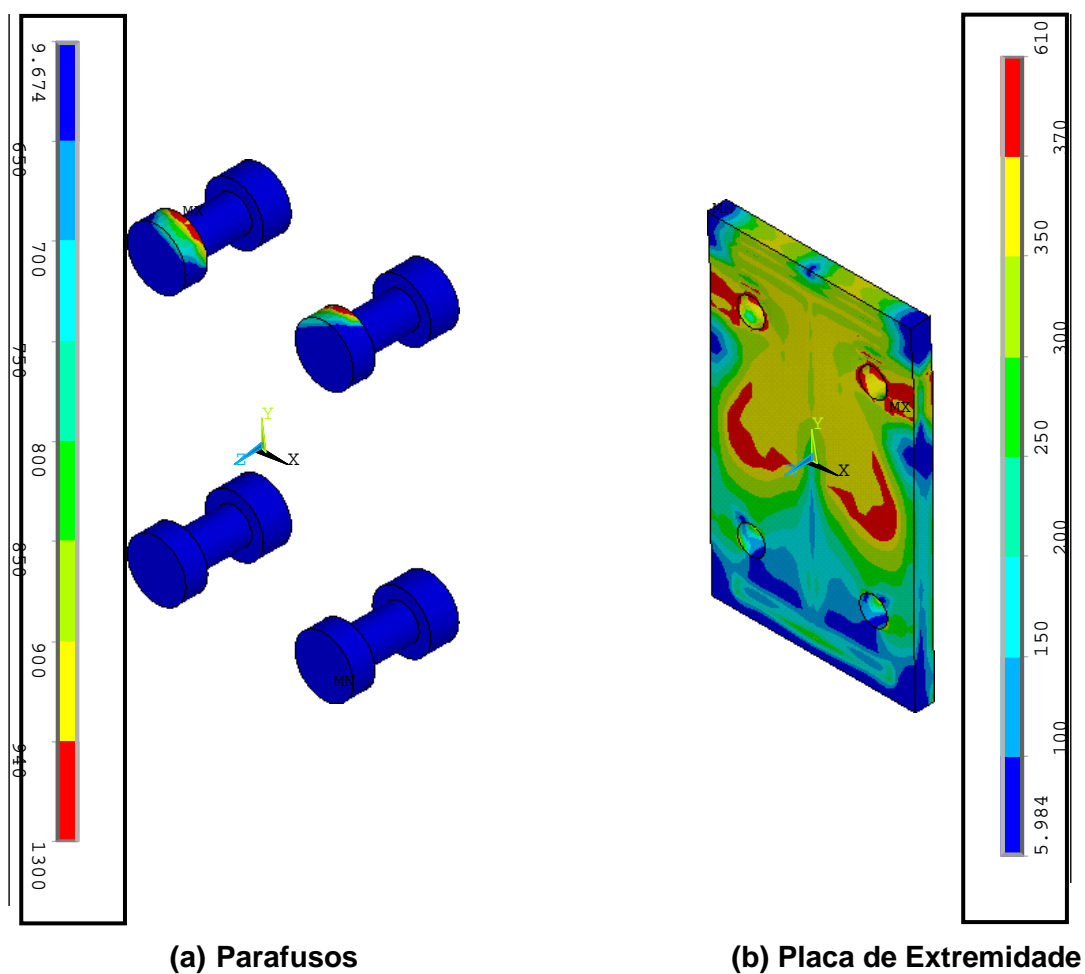


Figura 5.5 – Distribuição de tensões de Von Mises, em MPa – FE03 –

Estágio de Carga (2) – M=65,0 kN.m

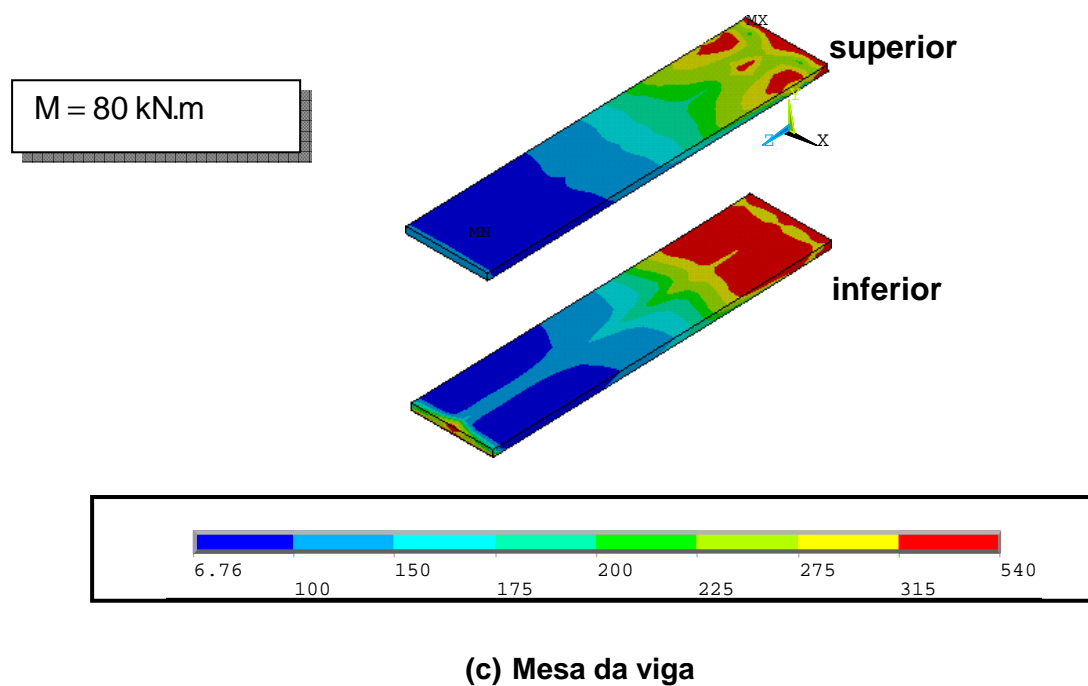
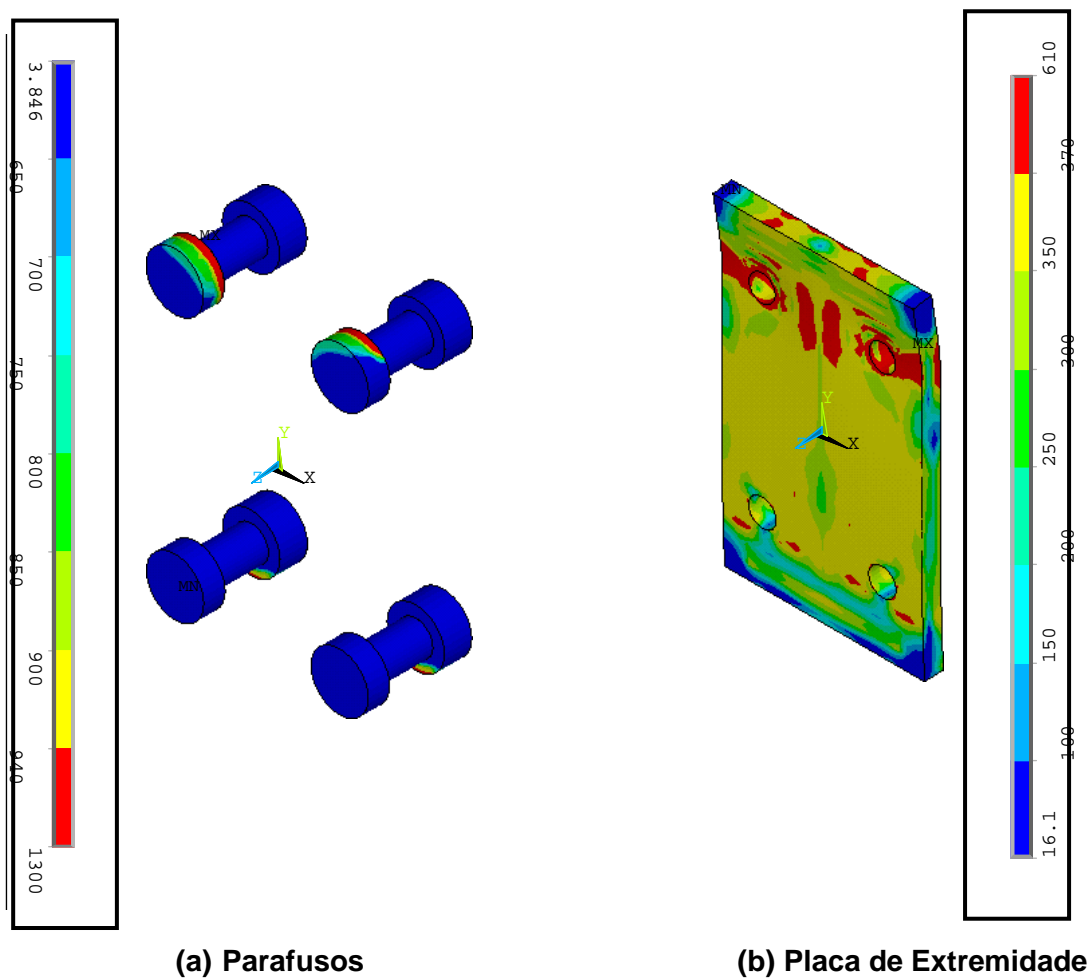


Figura 5.6 – Distribuição de tensões de Von Mises, em MPa – FE03 -

Estágio de Carga (3) – $M=80,0 \text{ kN.m}$

5.2.2 FE05 ($N=-20\%N_{pl}$)

A Figura 5.7 apresenta a comparação dos gráficos de momento versus rotação, obtidos do ensaio experimental e da modelagem proposta. É possível verificar que, para os valores de momento último a curva numérica assemelha-se a curva experimental, com rigidez inicial superior em 5% em relação ao ensaio. São representados os pontos correspondentes ao escoamento das componentes para o experimental, que ocorreu na seguinte ordem: mesa inferior da viga à compressão, placa de extremidade à flexão e parafusos à tração. Os pontos numerados correspondem aos pontos que serão estudados para o modelo numérico.

A Figura 5.8 apresenta a comparação da rigidez inicial para as duas curvas, realizada através da inclinação das retas apresentadas, sendo a vermelha representando a curva experimental e a verde, a teórica. A Figura 5.9 apresenta as retas realizadas para a obtenção do momento resistente do gráfico.

Da Figura 5.10 até Figura 5.12 apresenta-se a evolução das tensões de *Von Mises*, em MPa, para três níveis de momento fletor aplicado. A Figura 5.7 indica onde estes pontos foram retirados. A discussão comparativa aos demais ensaios será apresentado em §5.3.

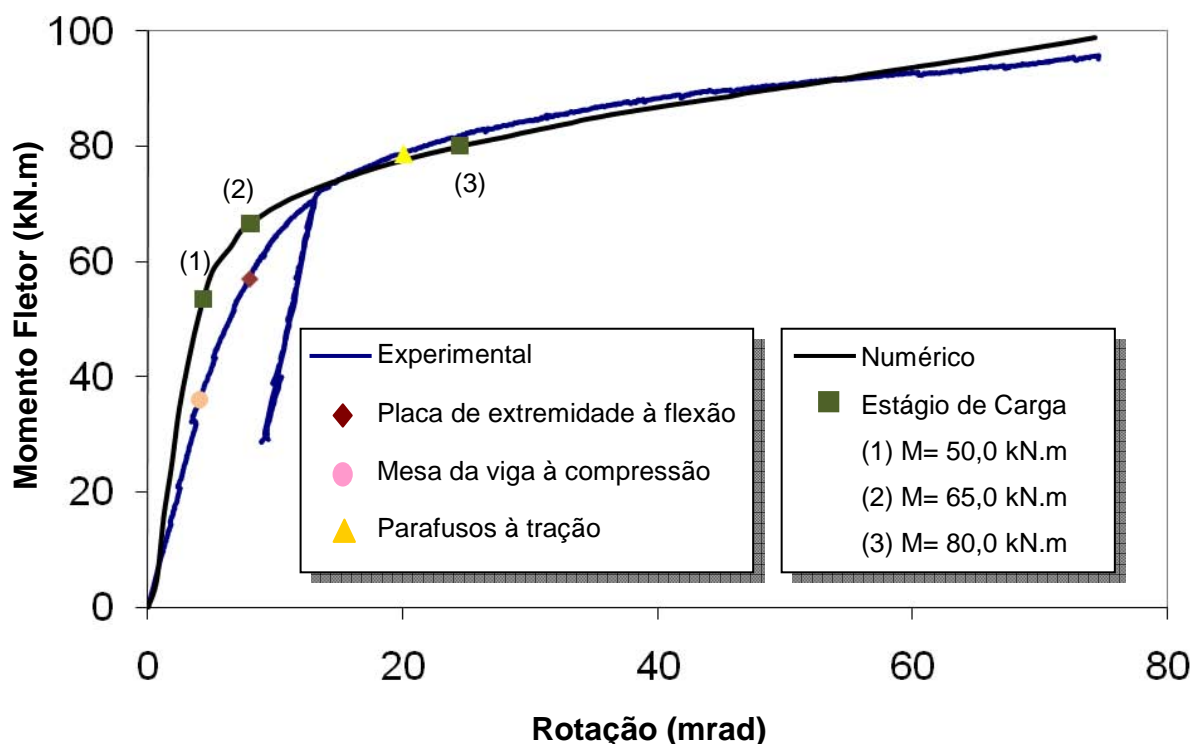


Figura 5.7 – Gráfico momento *versus* rotação - numérico e experimental – FE05

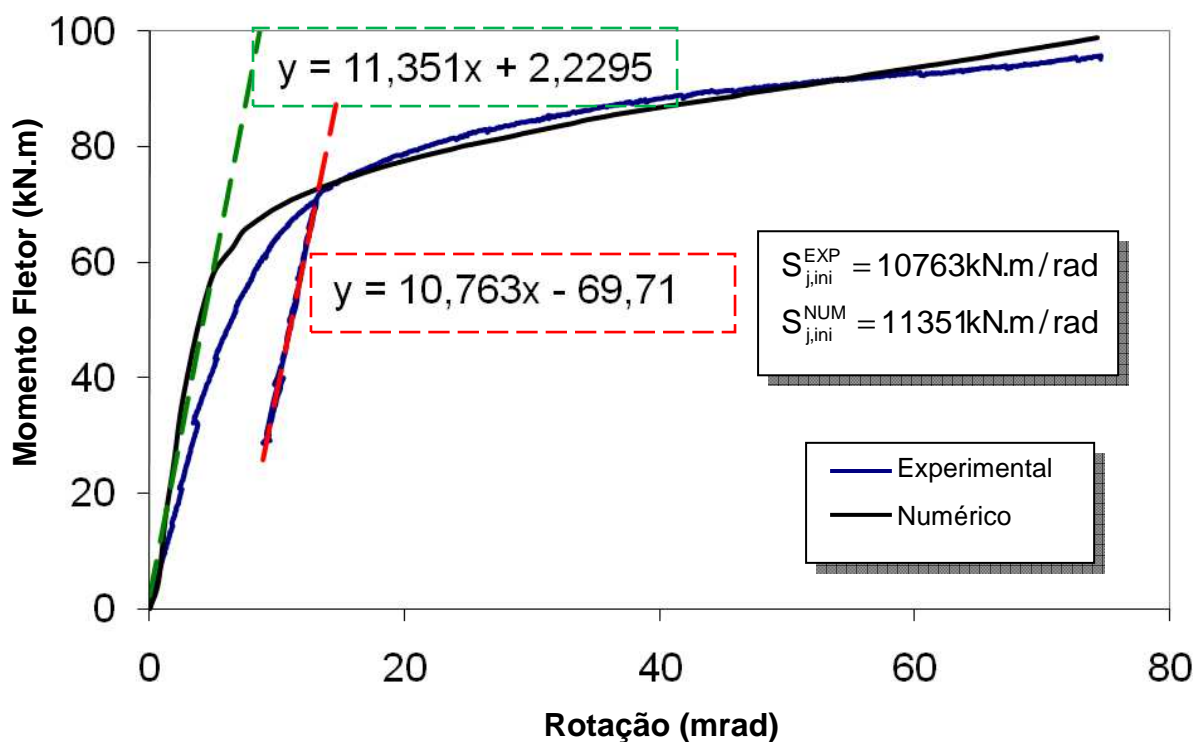


Figura 5.8 – Rigidez Inicial – numérico e experimental – FE05

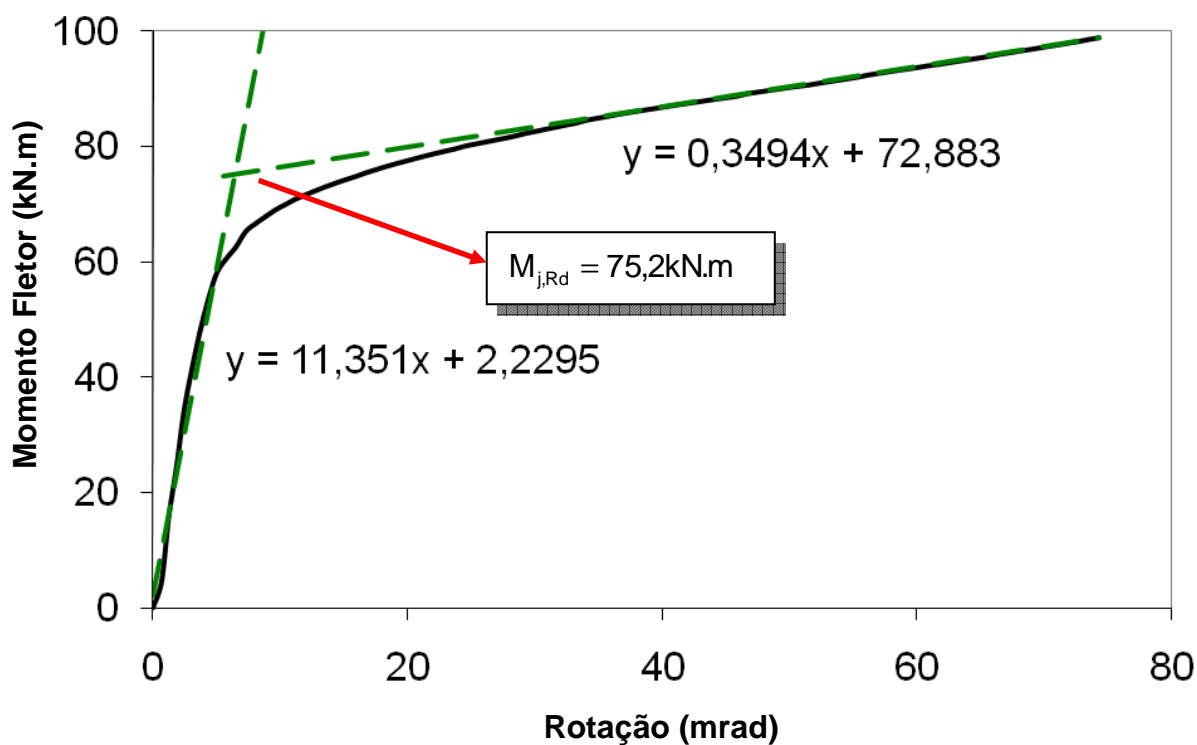


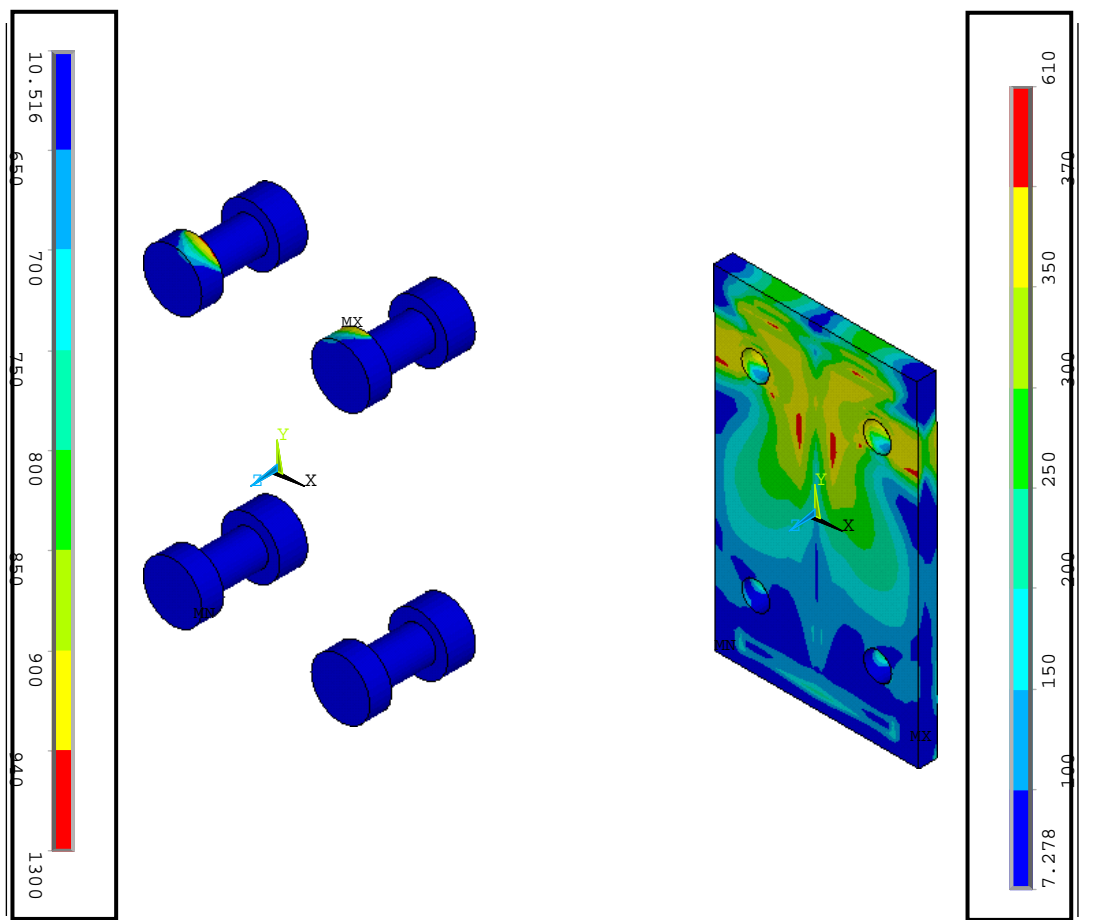
Figura 5.9 – Momento Resistente – numérico – FE05

Na Figura 5.10 são apresentadas as componentes para o ponto 01, ou seja, momento fletor de 50 kN.m, onde é possível verificar-se o início da plastificação da

mesa inferior da viga e da placa de extremidade. Já na Figura 5.11 onde são apresentadas as componentes para o ponto 02, com momento fletor de 62 kN.m, pode-se notar o escoamento das componentes. Finalmente, na Figura 5.12 estão as componentes para um nível superior de momento fletor, 74 kN.m, onde a placa de extremidade e a mesa já se encontram plastificadas.

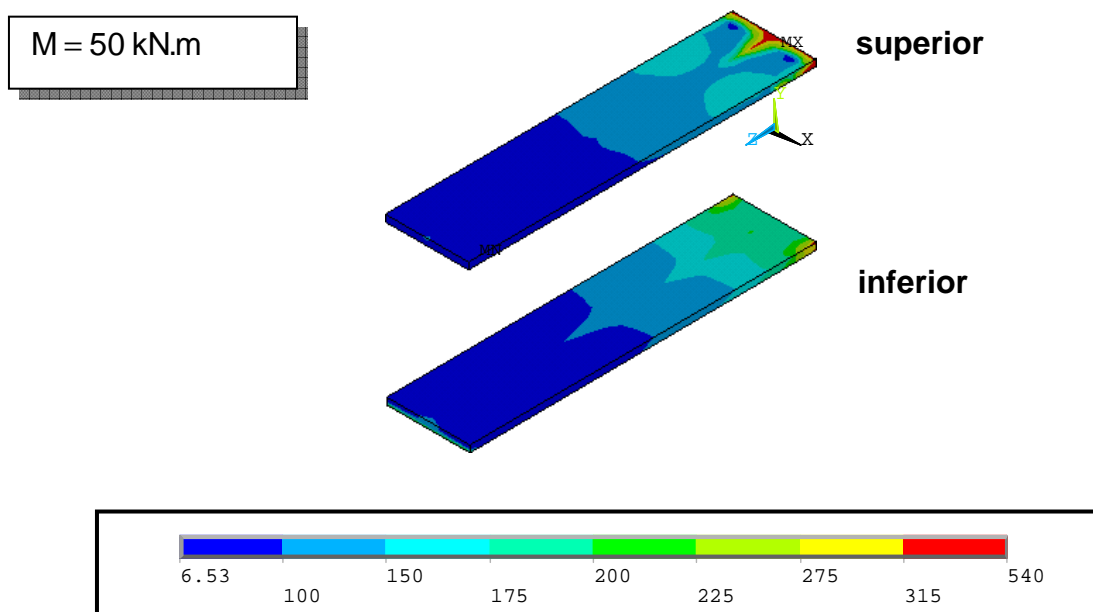
Através destes pontos de estudo não é possível verificar exatamente os pontos de início de escoamento de cada uma das componentes. Porém, pela seqüência de escoamento apresentada, pode-se analisar que, apesar do aumento do nível de tensão verificada para a mesa inferior da viga, no modelo numérico, ainda é a placa de extremidade que escoou primeiro, devido às condições de contorno do modelo.

A partir deste nível de aplicação de esforço normal, já é possível verificar que a mesa da viga à compressão é o componente que passa a controlar o dimensionamento da ligação, e não mais a placa de extremidade à flexão, como foi verificado anteriormente.



(a) Parafusos

(b) Placa de Extremidade



(c) Mesa da viga

Figura 5.10 – Distribuição de tensões de Von Mises, em MPa – FE05 –

Estágio de Carga (1) – $M=50,0 \text{ kN.m}$

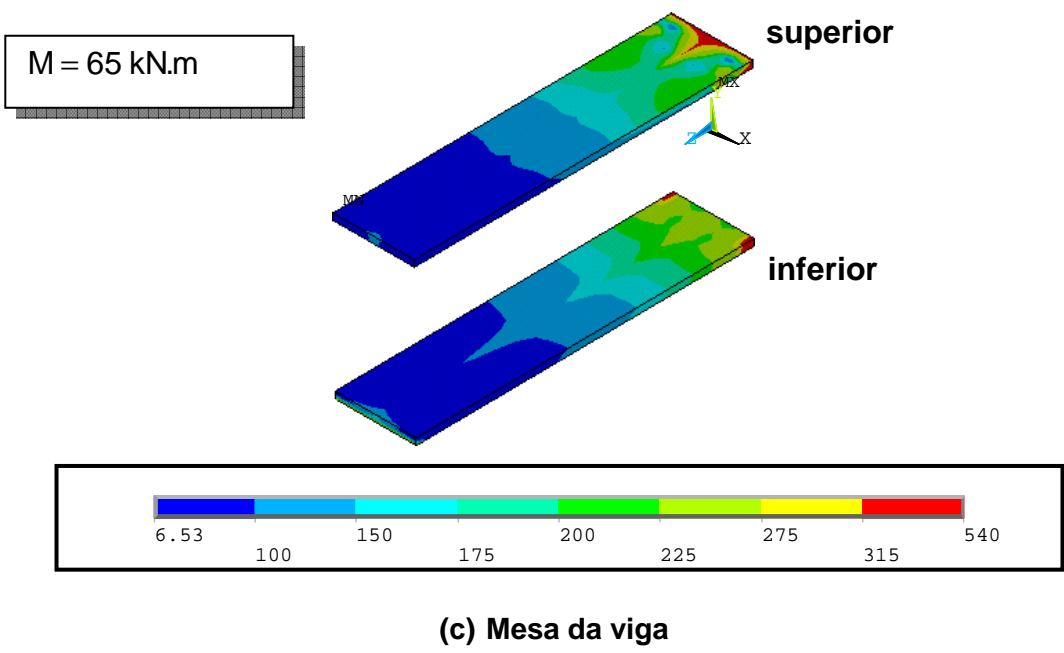
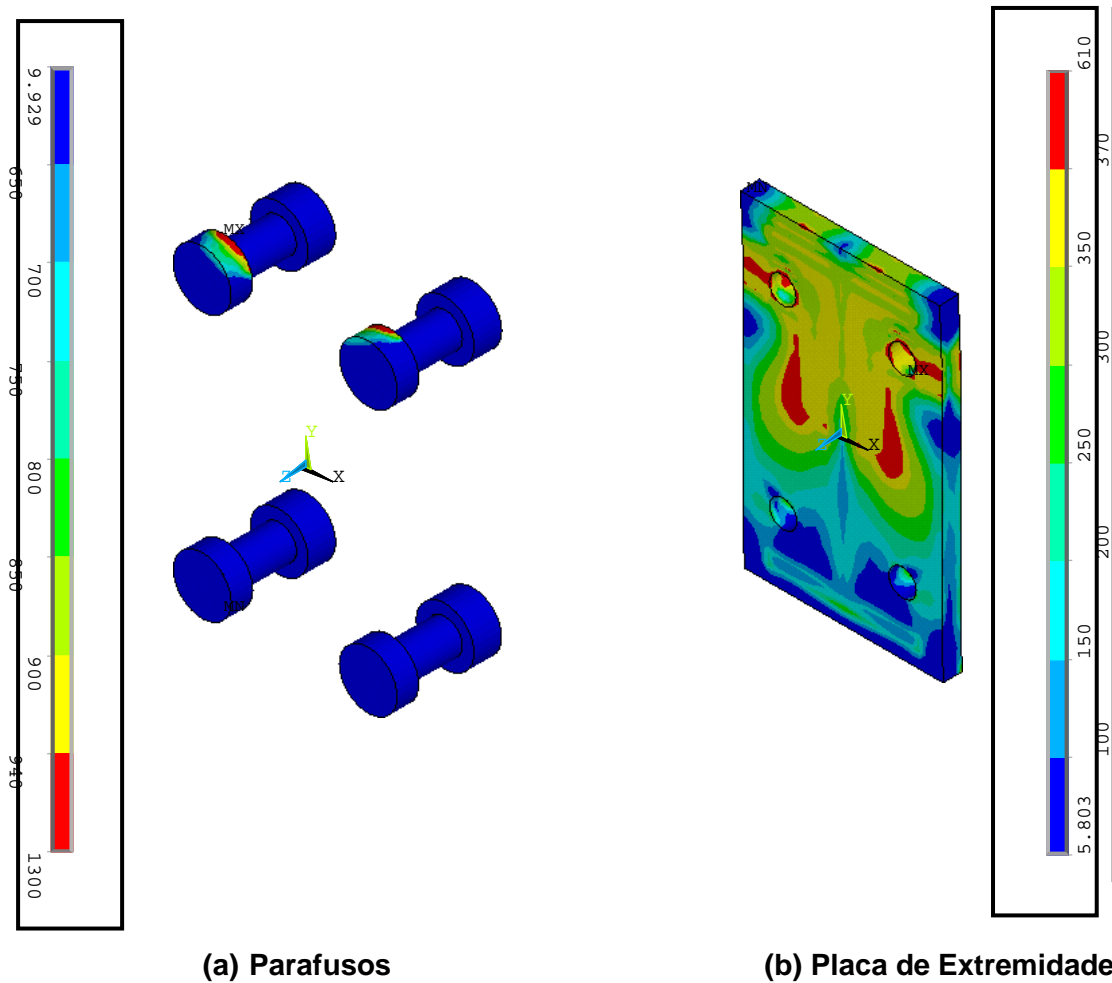
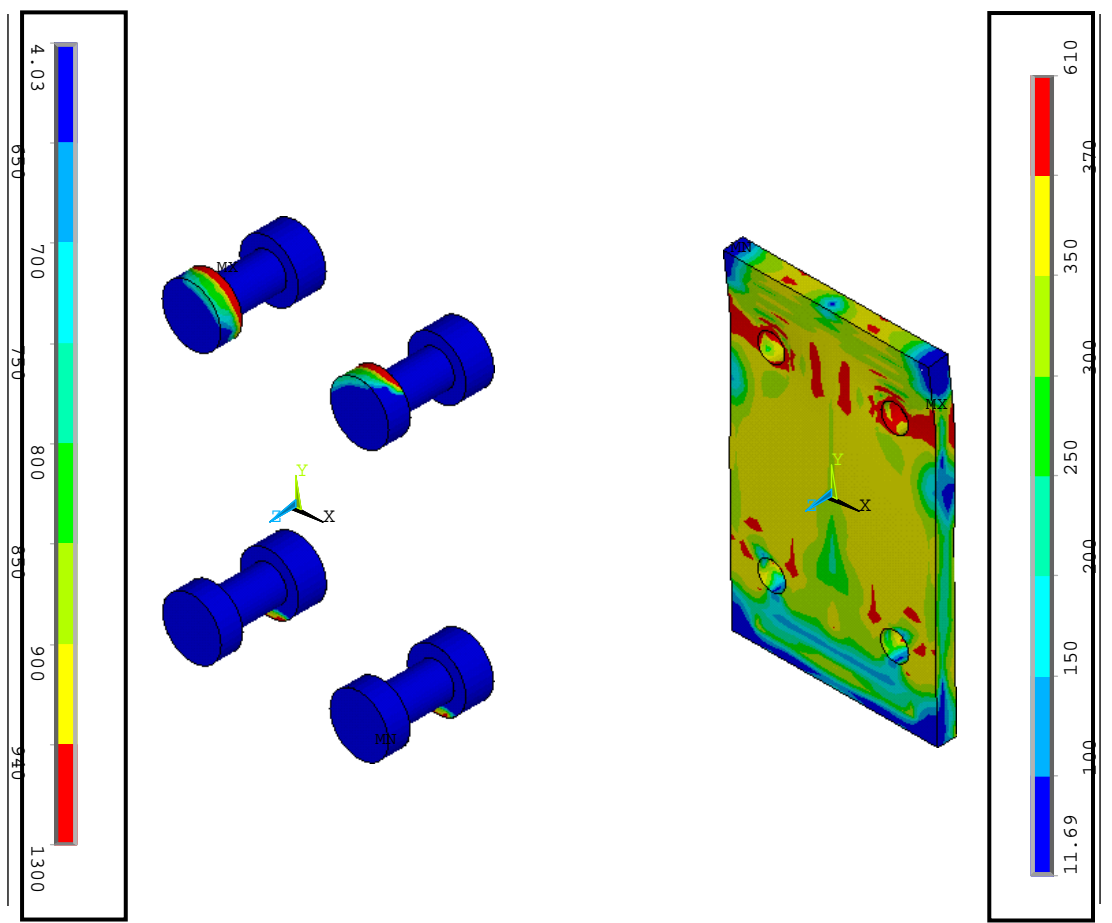
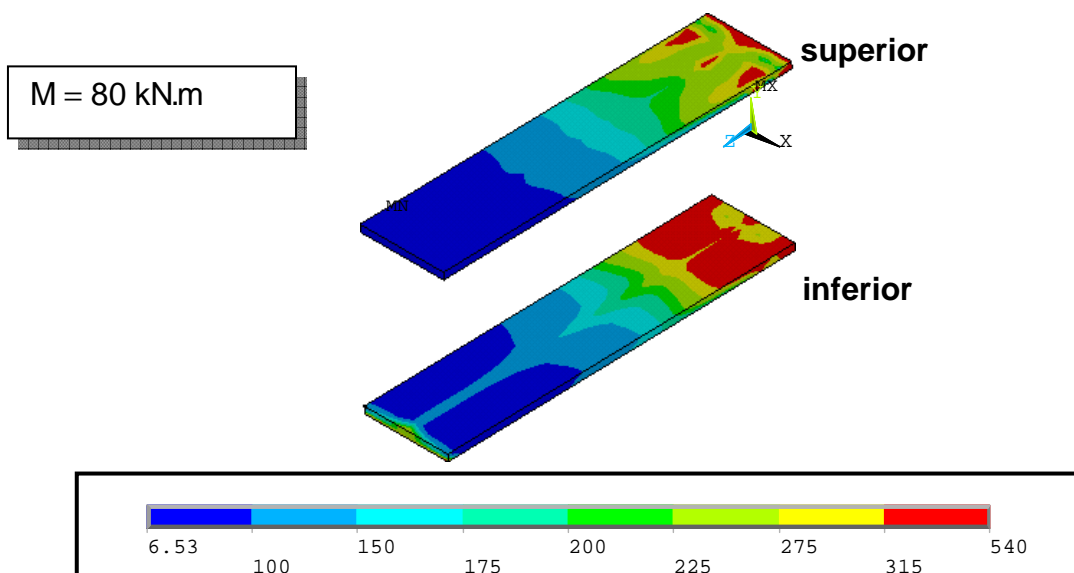


Figura 5.11 – Distribuição de tensões de Von Mises, em MPa – FE05 –
 Estágio de Carga (2) – M=65,0 kN.m



(a) Parafusos

(b) Placa de Extremidade



(c) Mesa da viga

Figura 5.12 – Distribuição de tensões de Von Mises, em MPa – FE05 –

Estágio de Carga (3) – $M=80,0 \text{ kN.m}$

5.2.3 FE06 ($N=-27\%N_{pl}$)

A Figura 5.13 apresenta a comparação dos gráficos de momento versus rotação, obtidos do ensaio experimental e da modelagem proposta. São representados os pontos correspondentes ao escoamento das componentes para o experimental, que ocorreu na seguinte ordem: mesa inferior à compressão, placa de extremidade à flexão e parafuso à tração. Os pontos numerados correspondem aos pontos que serão verificados para o modelo numérico.

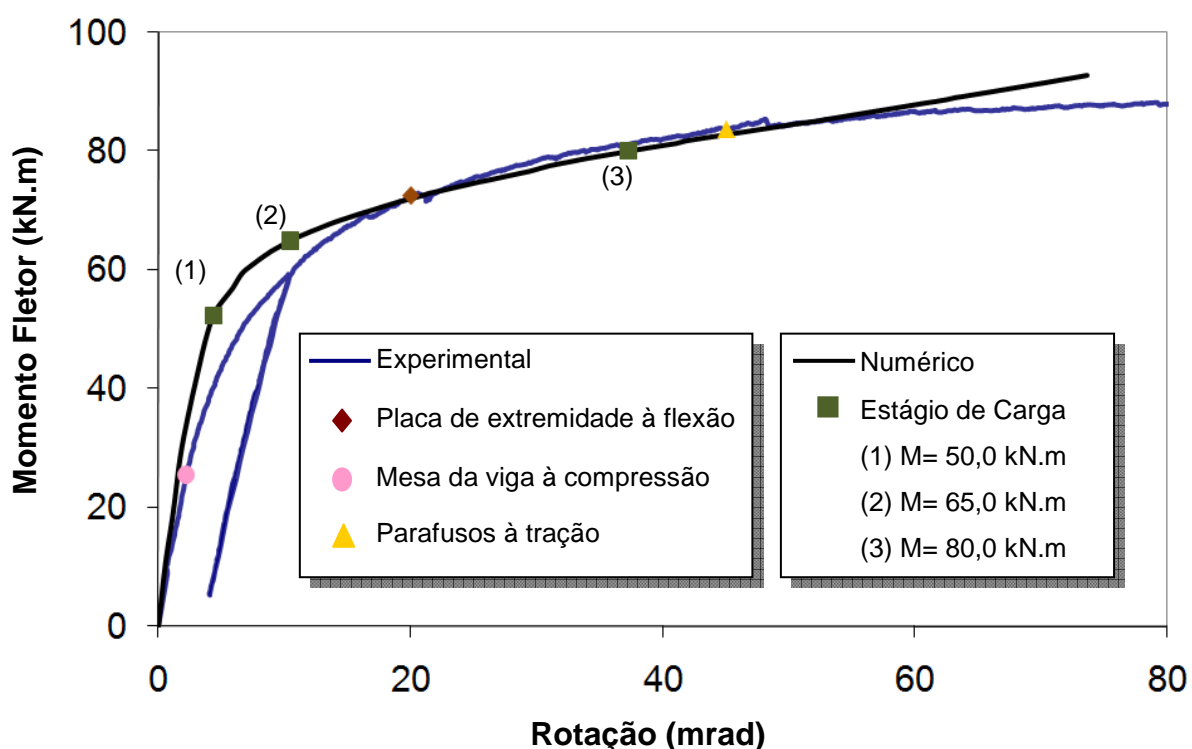


Figura 5.13 – Gráfico momento *versus* rotação - numérico e experimental – FE06

A Figura 5.14 apresenta a comparação da rigidez inicial para as duas curvas, realizada através da inclinação das retas apresentadas, sendo a vermelha representando a curva experimental e a verde, a teórica.

A Figura 5.15 apresenta as retas realizadas para a obtenção do momento resistente do gráfico. As Figura 5.16 a Figura 5.18 apresentam a evolução das tensões de *Von Mises*, em MPa, para três níveis de momento distintos. A Figura 5.13 indica onde estes pontos foram retirados. A discussão comparativa aos demais ensaios será apresentada em §5.3.

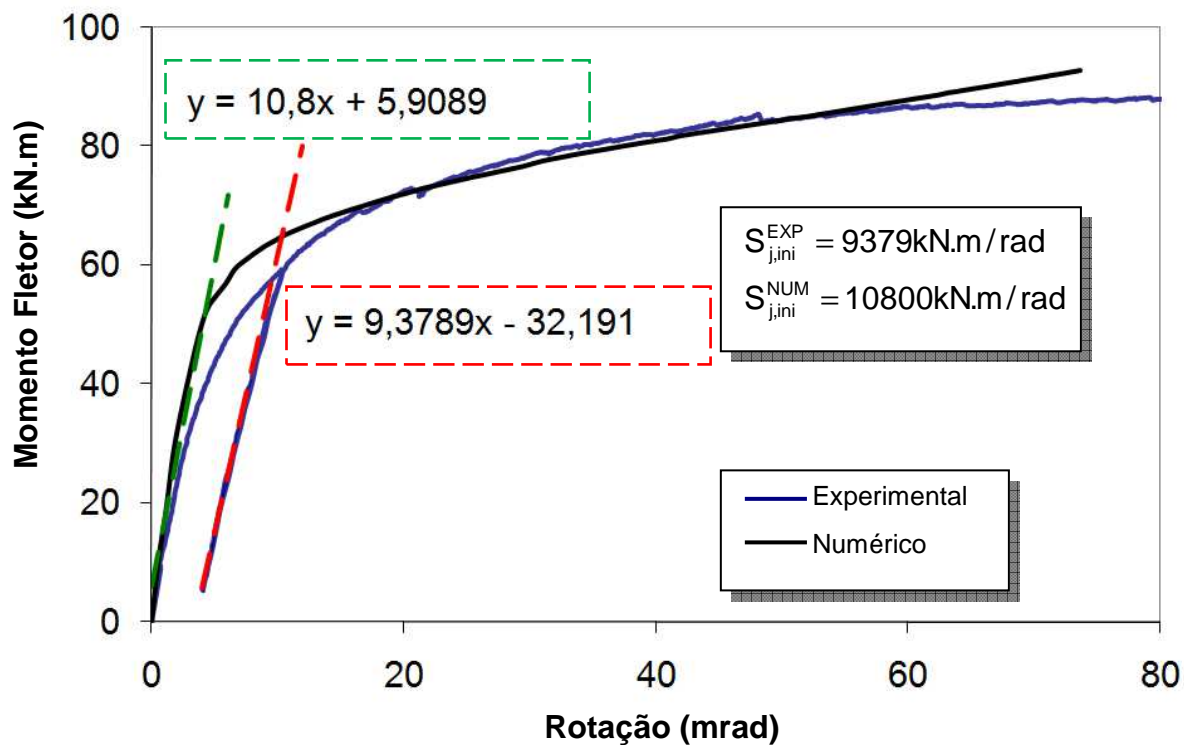


Figura 5.14 – Rigidez Inicial – numérico e experimental – FE06

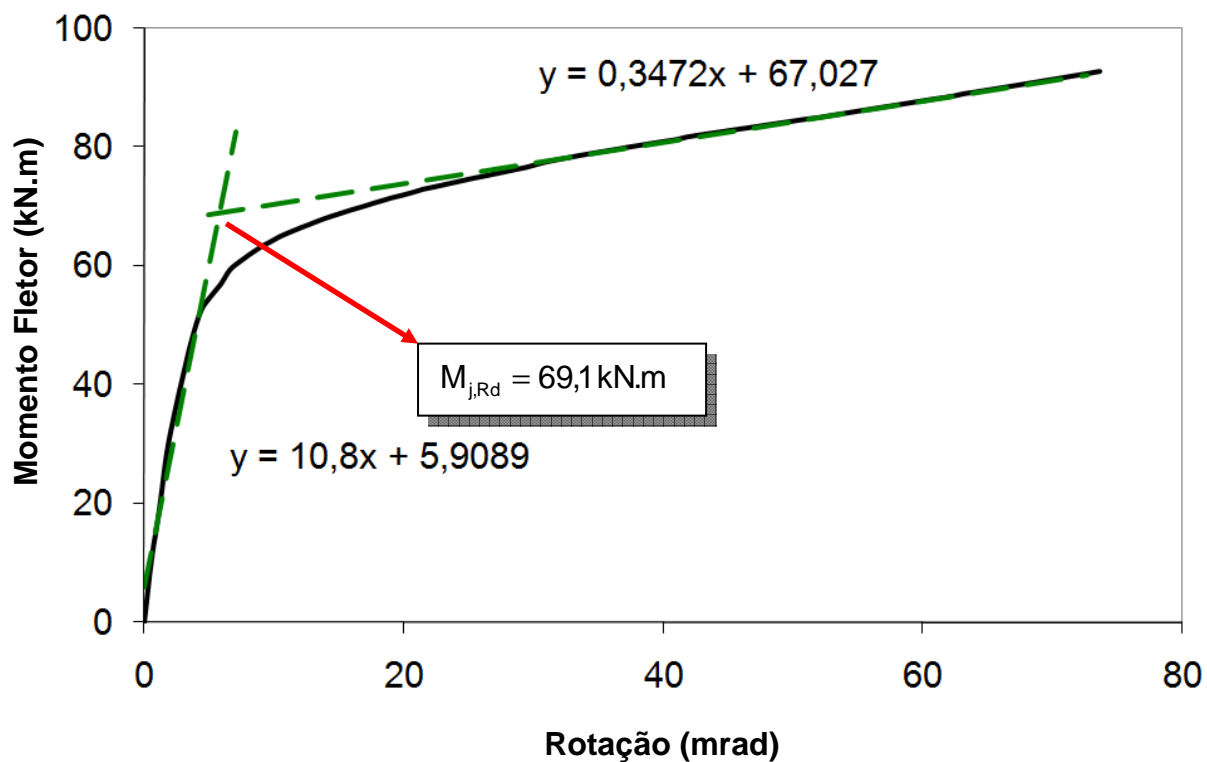


Figura 5.15 – Momento Resistente – numérico – FE06

Na Figura 5.16 são apresentadas as componentes para o ponto 01, ou seja, momento fletor de 50 kN.m, onde é possível se verificar que para este nível de momento, a placa de extremidade e a mesa da viga não apresentam escoamento. Na Figura 5.17 onde são apresentadas as componentes para o ponto 02, com momento fletor de 65 kN.m, pode-se notar o escoamento da placa de extremidade, e aumento das tensões na componente da mesa da viga. Finalmente, na Figura 5.18 estão as componentes para um nível superior de momento fletor, 80 kN.m, onde a placa de extremidade e a mesa já se encontram plastificadas. Nota-se assim que o modelo numérico apresentou diferença de ordem de escoamento em relação ao ensaio experimental.

Através destes pontos de estudo não é possível verificar-se exatamente os pontos de início de escoamento de cada uma das componentes. Porém, pela seqüência de escoamento apresentada, pode-se analisar que, apesar do aumento do nível de tensão verificada para a mesa inferior da viga, no modelo numérico, ainda é a placa de extremidade que escoou primeiro, devido às condições de contorno do modelo.

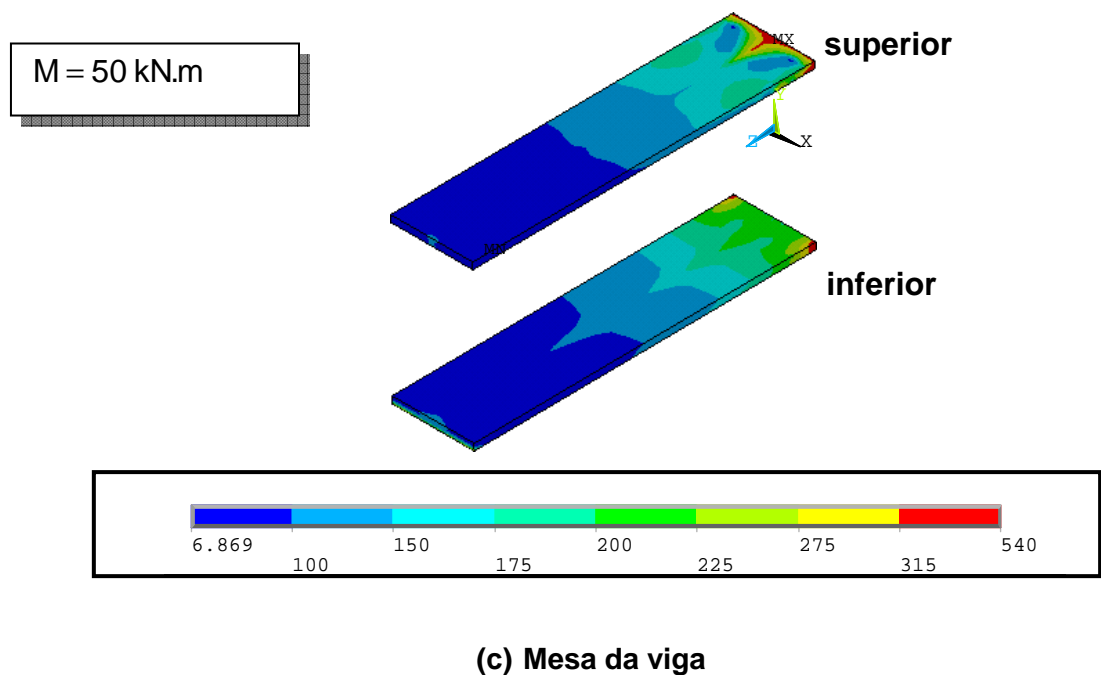
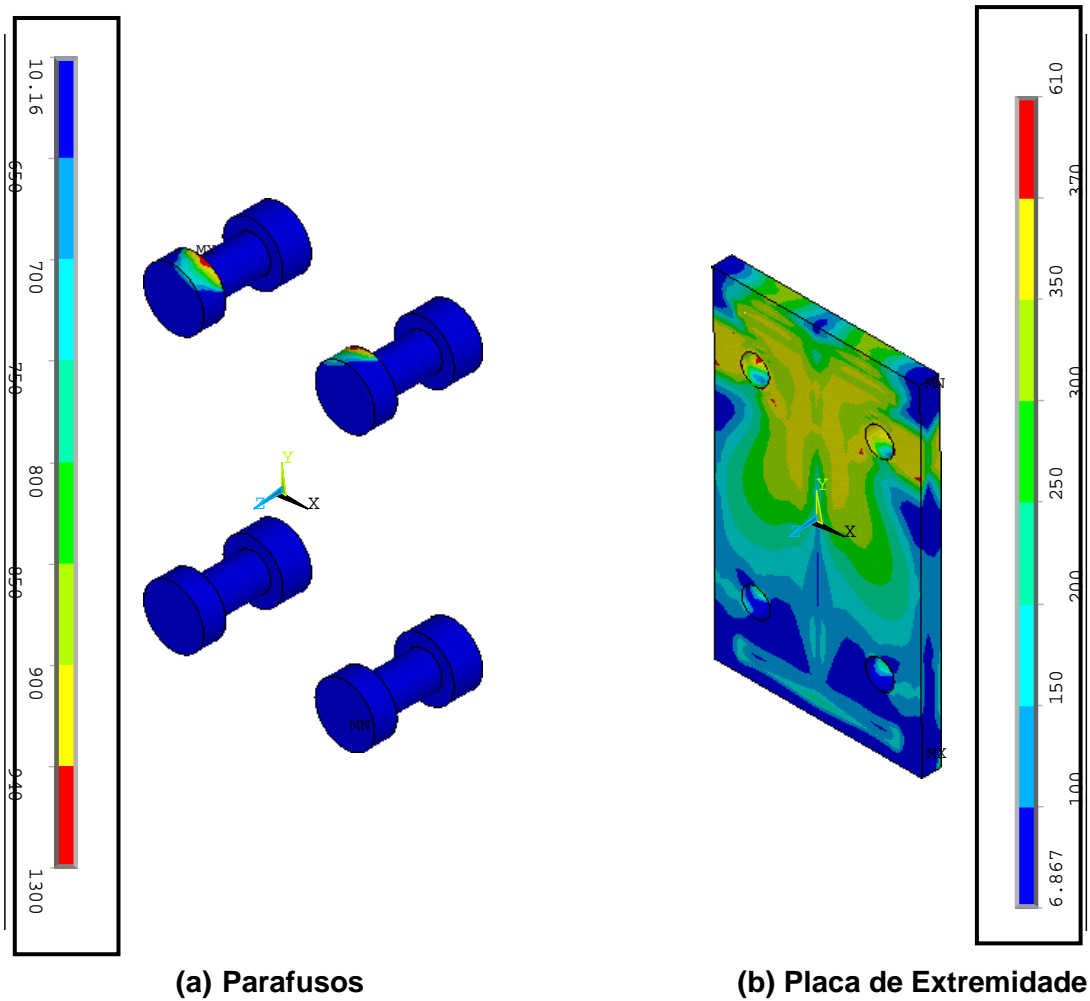


Figura 5.16 – Distribuição de tensões de Von Mises, em MPa – FE06 –
Estágio de Carga (1) – $M=50,0 \text{ kN.m}$

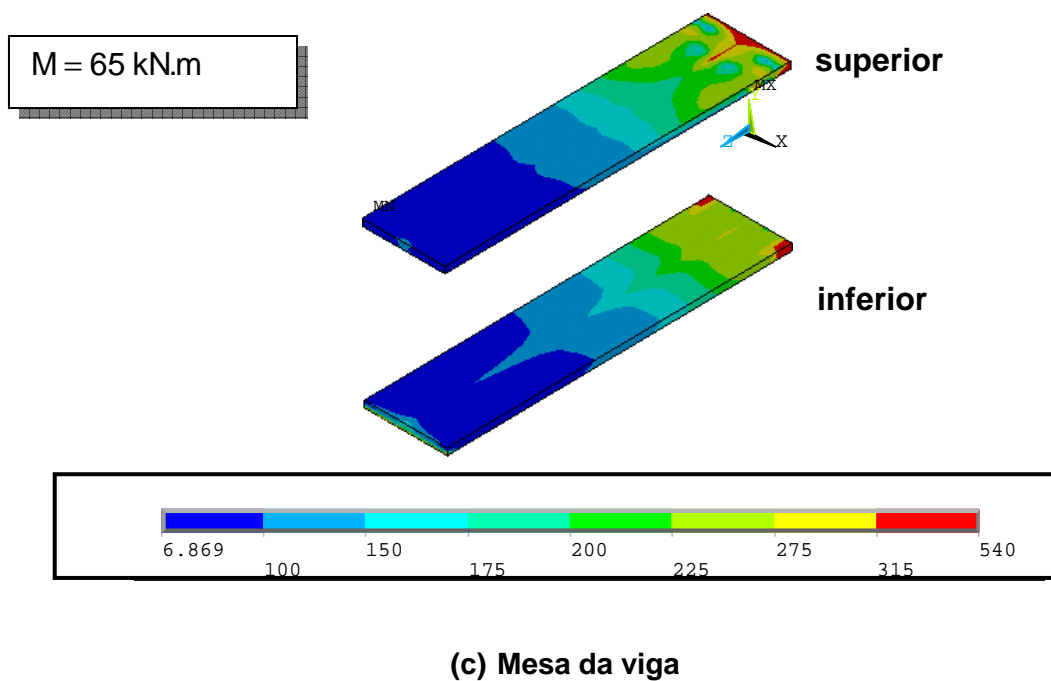
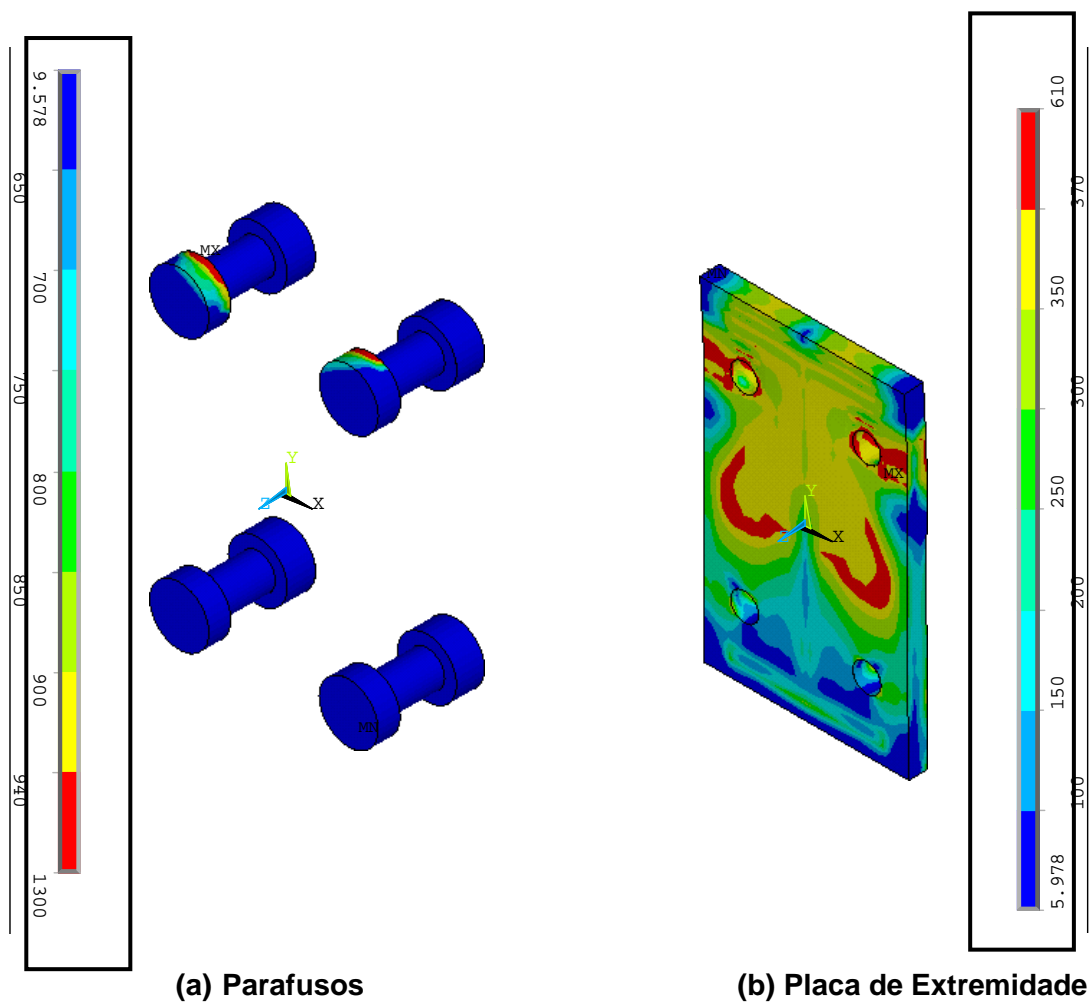


Figura 5.17 – Distribuição de tensões de Von Mises, em MPa – FE06 –

Estágio de Carga (2) – M=65,0 kN.m

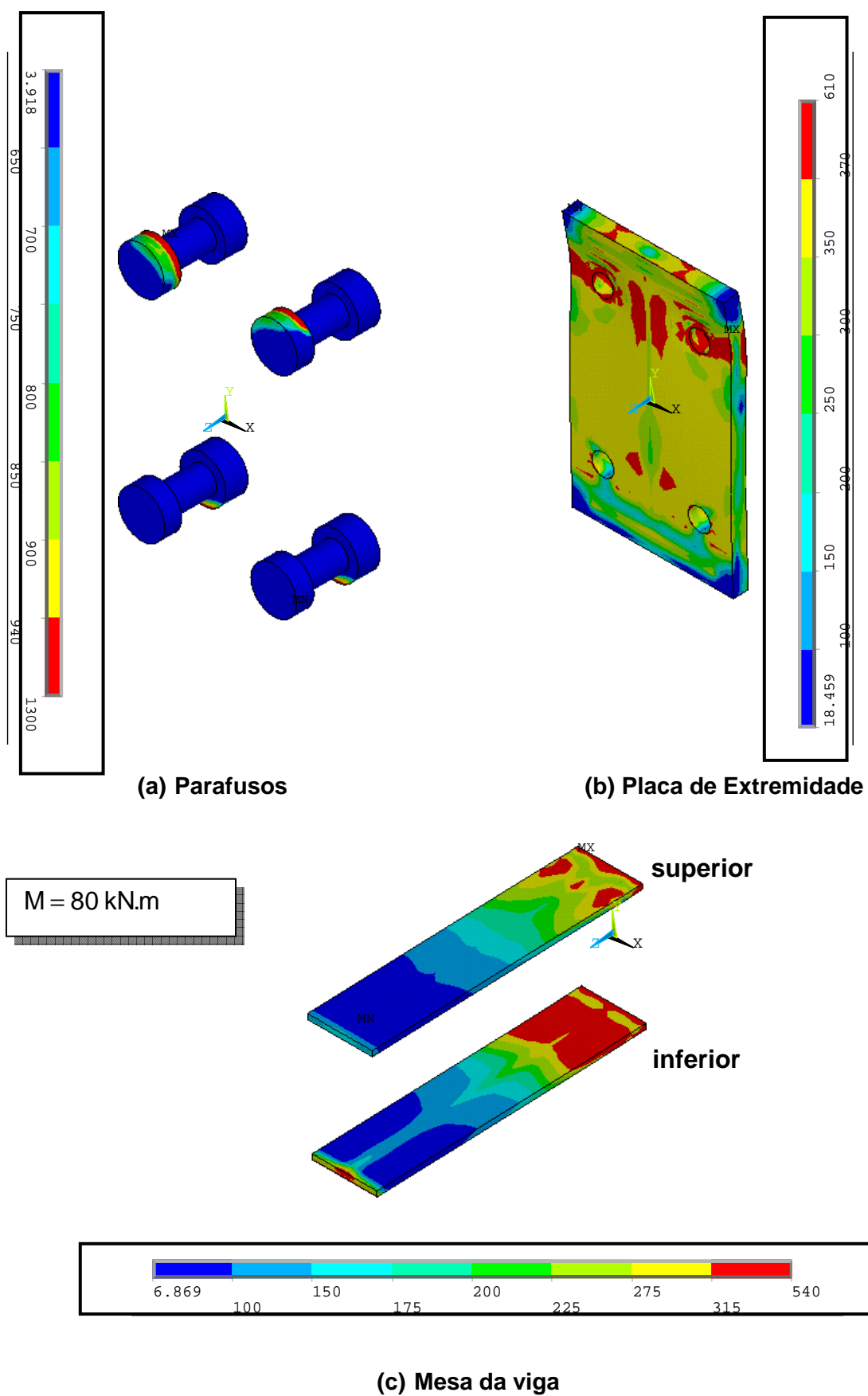


Figura 5.18 – Distribuição de tensões de Von Mises, em MPa – FE06 –

Estágio de Carga (3) – $M=80,0 \text{ kN.m}$

5.2.4 FE08 ($N=+10\%N_{pl}$)

A Figura 5.19 apresenta a comparação dos gráficos de momento versus rotação, obtidos do ensaio experimental e da modelagem proposta. São representados os pontos correspondentes ao escoamento das componentes para o experimental, que ocorreu na seguinte ordem: placa de extremidade à flexão, parafuso à tração e a mesa inferior à compressão. Os pontos numerados correspondem aos pontos que serão verificados para o modelo numérico.

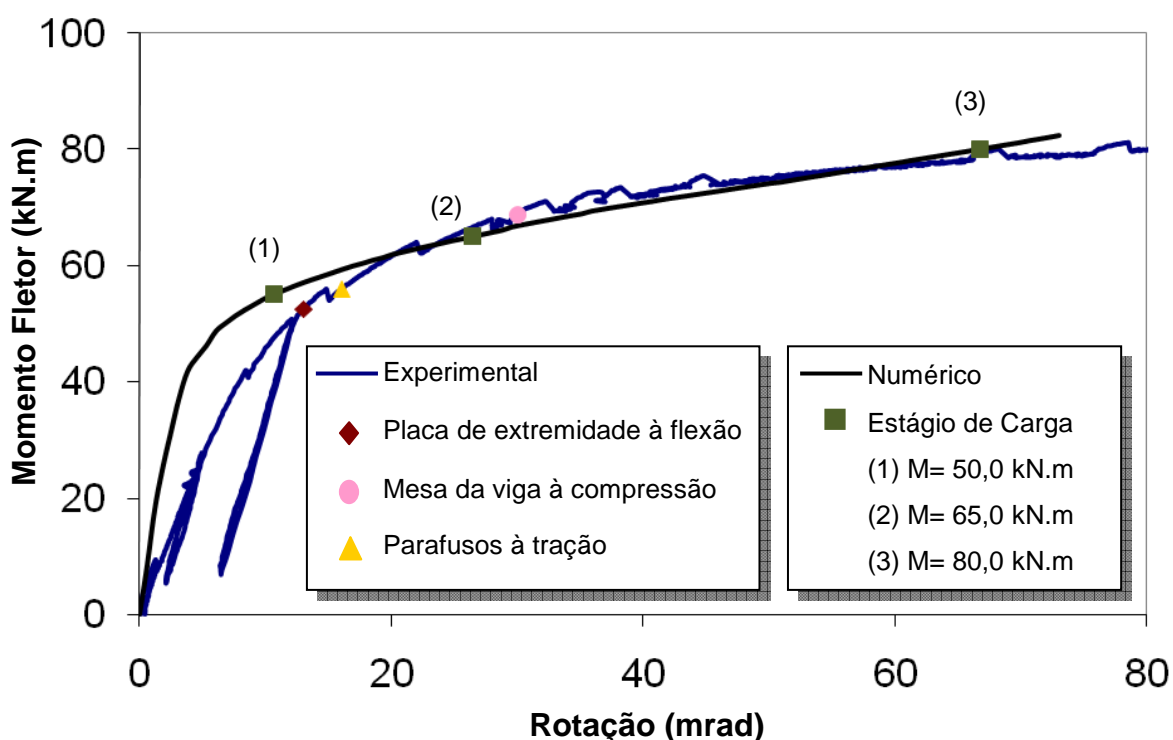


Figura 5.19 – Gráfico momento *versus* rotação - numérico e experimental – FE08

A Figura 5.20 apresenta a comparação da rigidez inicial para as duas curvas, realizada através da inclinação das retas apresentadas, sendo a vermelha representando a curva experimental e a verde, a teórica.

A Figura 5.21 apresenta as retas realizadas para a obtenção do momento resistente do gráfico.

Da Figura 5.22 até a Figura 5.24 são apresentadas as distribuições de tensões de Von Mises, em MPa, para três níveis de momento distintos. A Figura 5.19 indica onde estes pontos foram retirados. A discussão comparativa aos demais ensaios será apresentada em §5.3.

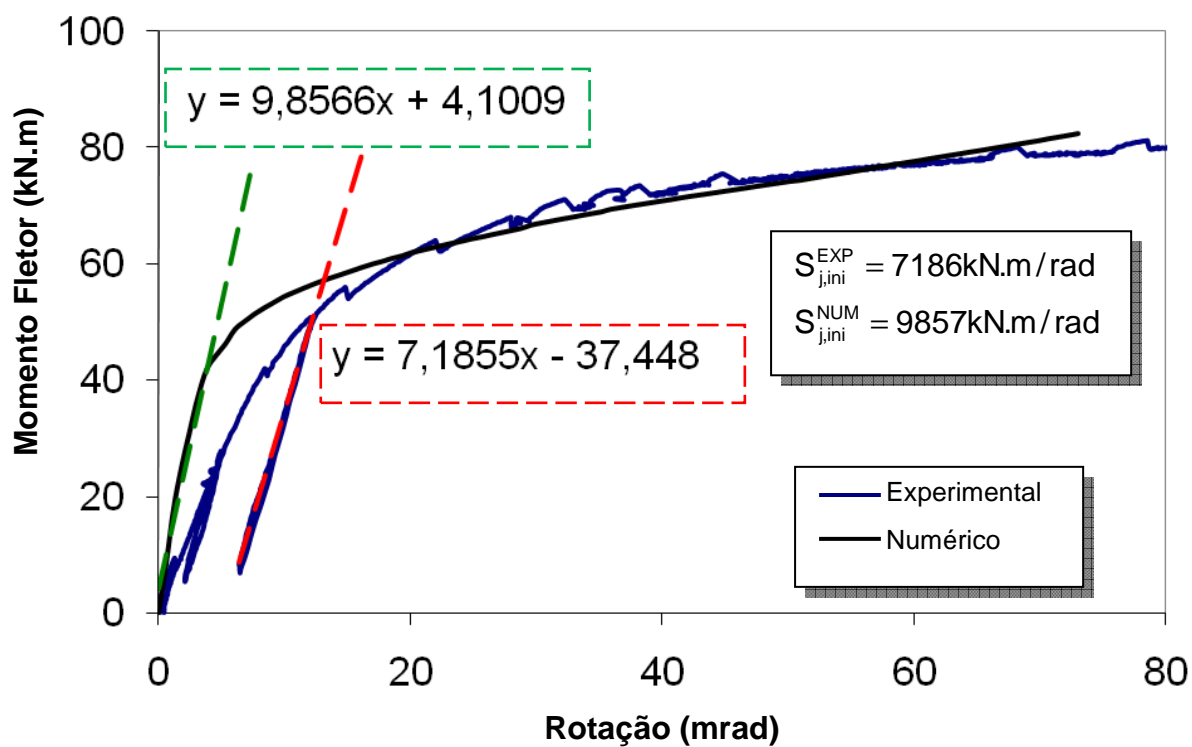


Figura 5.20 – Rigidez Inicial – numérico e experimental – FE08

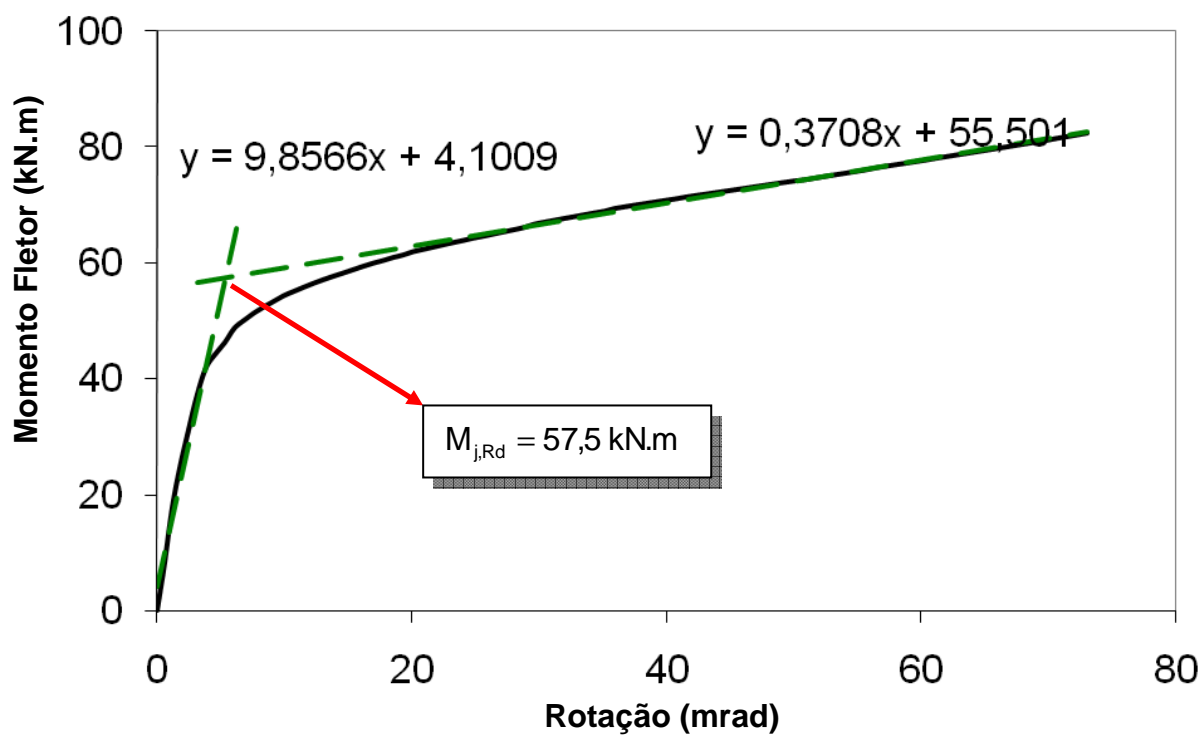


Figura 5.21 – Momento Resistente – numérico – FE08

Na Figura 5.22 são apresentadas as componentes para o ponto 01, ou seja, momento fletor de 50 kN.m, onde é possível verificar-se que a plastificação da placa de extremidade já teve início. Já na Figura 5.23 onde são apresentadas as componentes para o ponto 02, com momento fletor de 65 kN.m, pode-se notar o escoamento inicial da mesa inferior da viga. Finalmente, na Figura 5.24 estão os componentes para um nível superior de momento fletor, 80 kN.m, onde a placa de extremidade e a mesa já se encontram plastificadas.

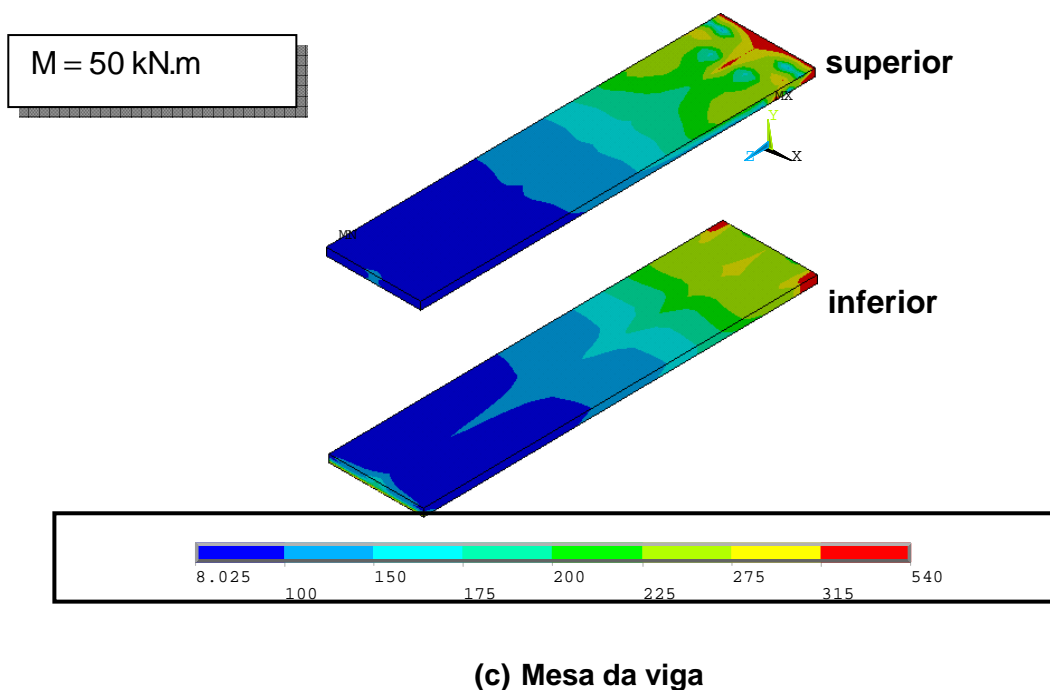
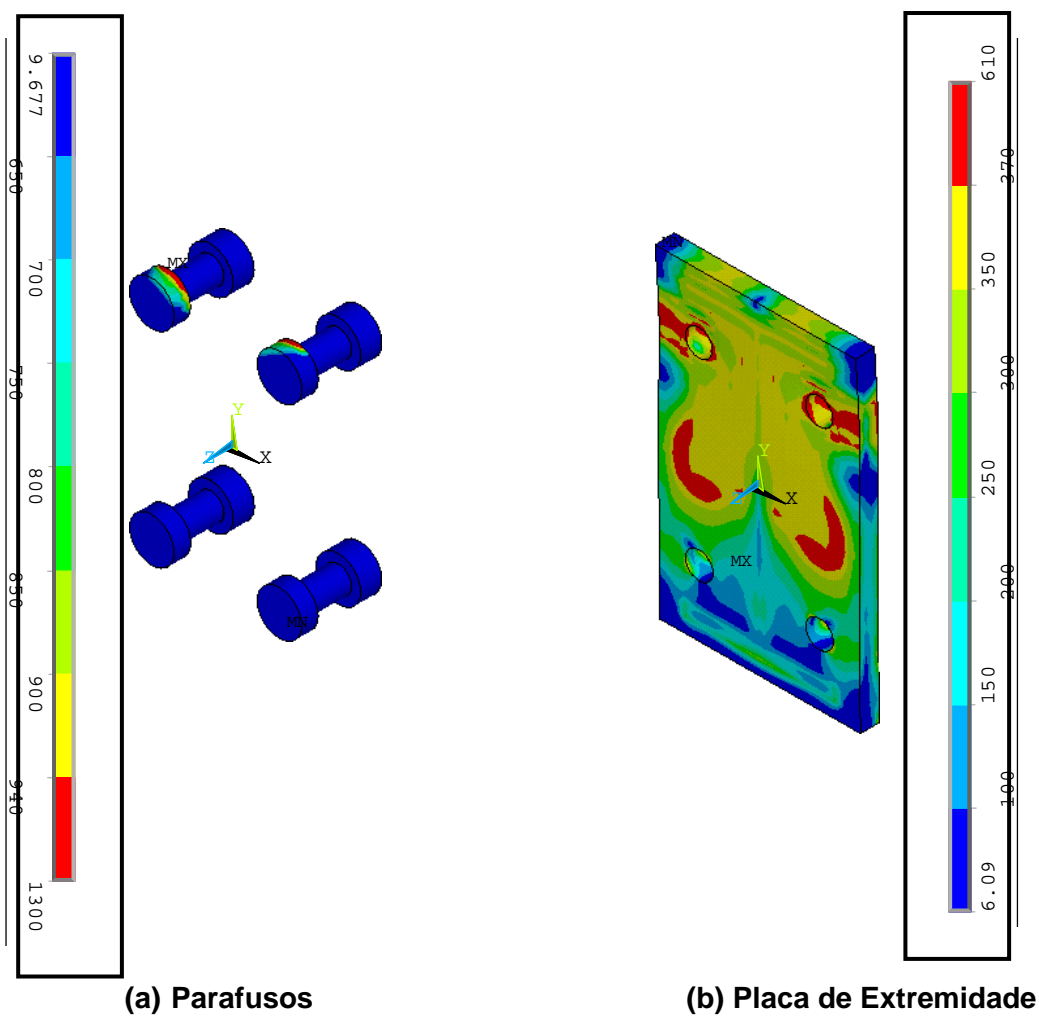


Figura 5.22 – Distribuição de tensões de Von Mises, em MPa – FE08 –

Estágio de Carga (1) – M=50,0 kN.m

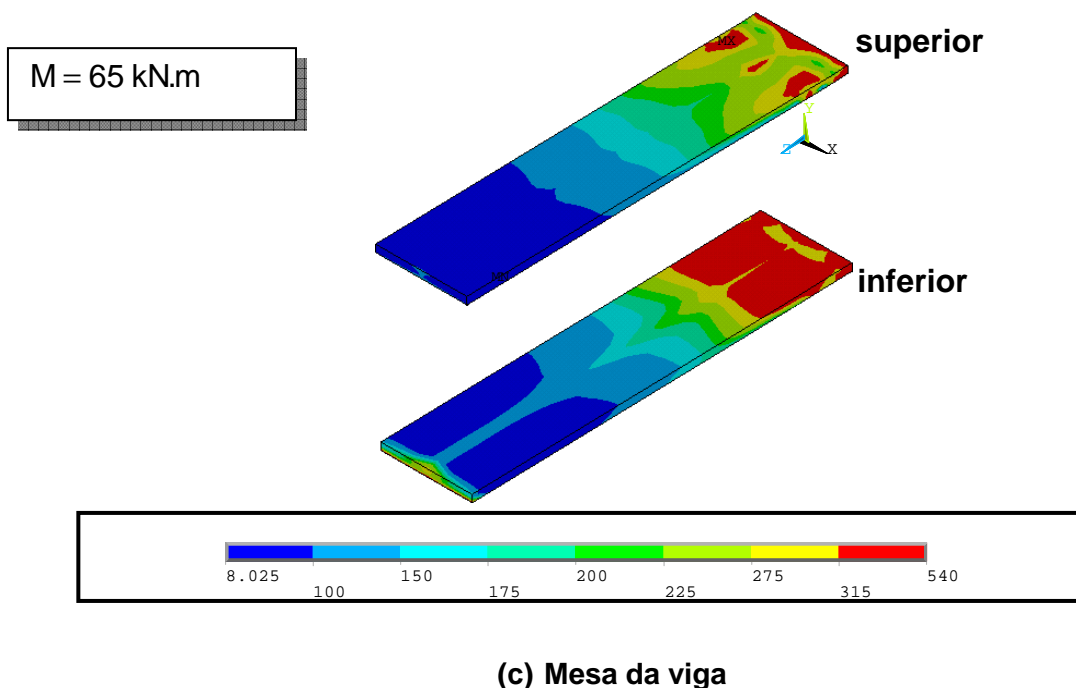
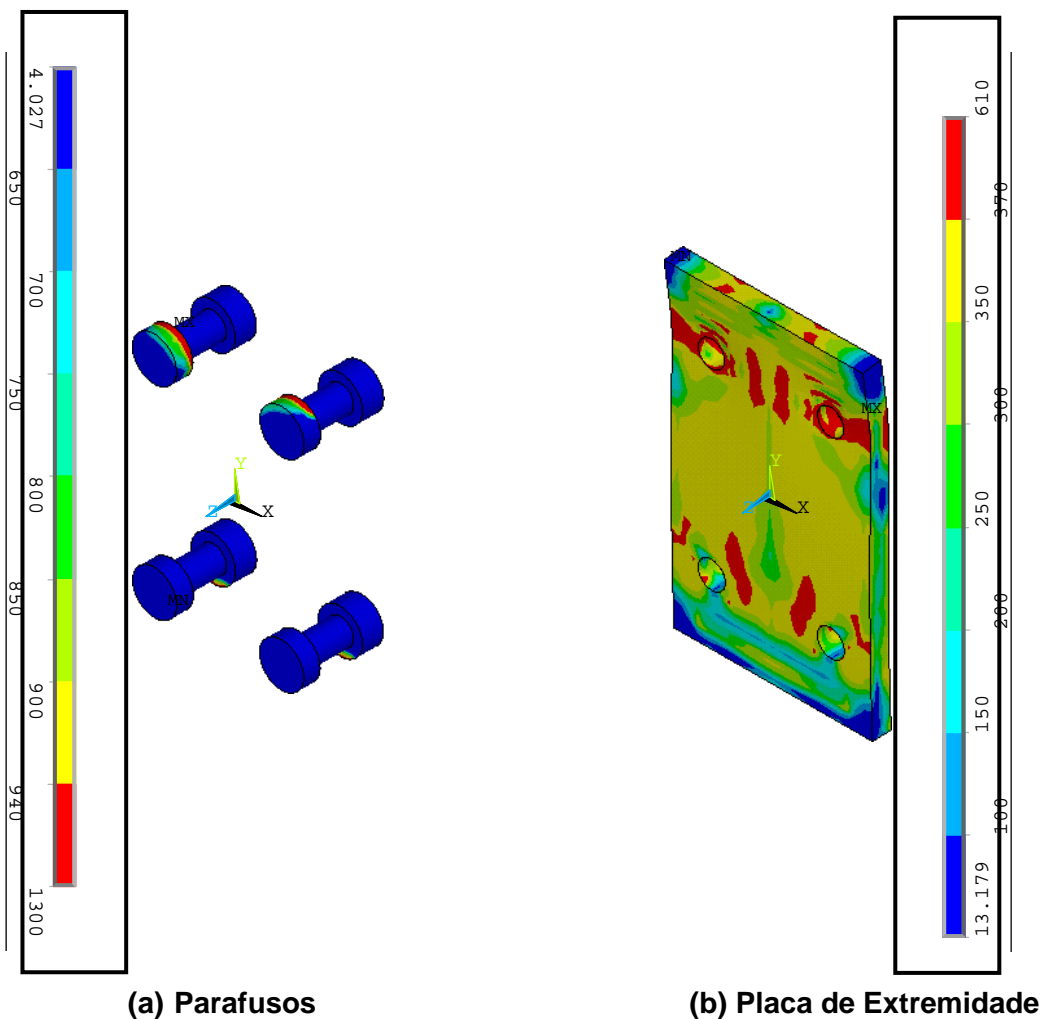


Figura 5.23 – Distribuição de tensões de Von Mises, em MPa – FE08 –
 Estágio de Carga (2) – M=65,0 kN.m

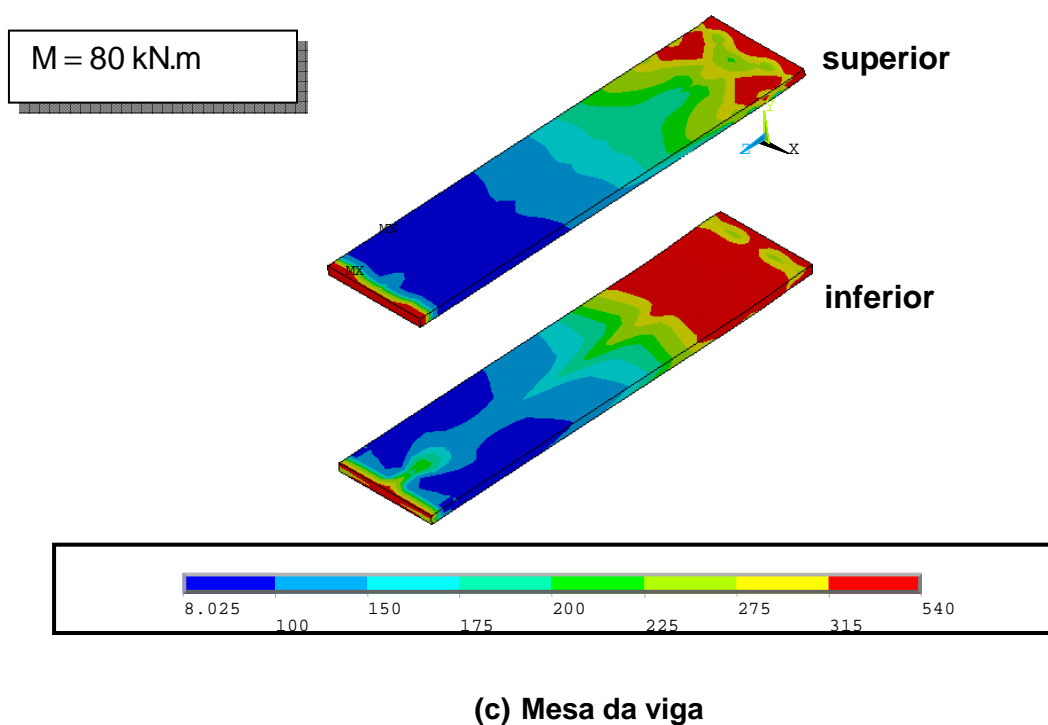
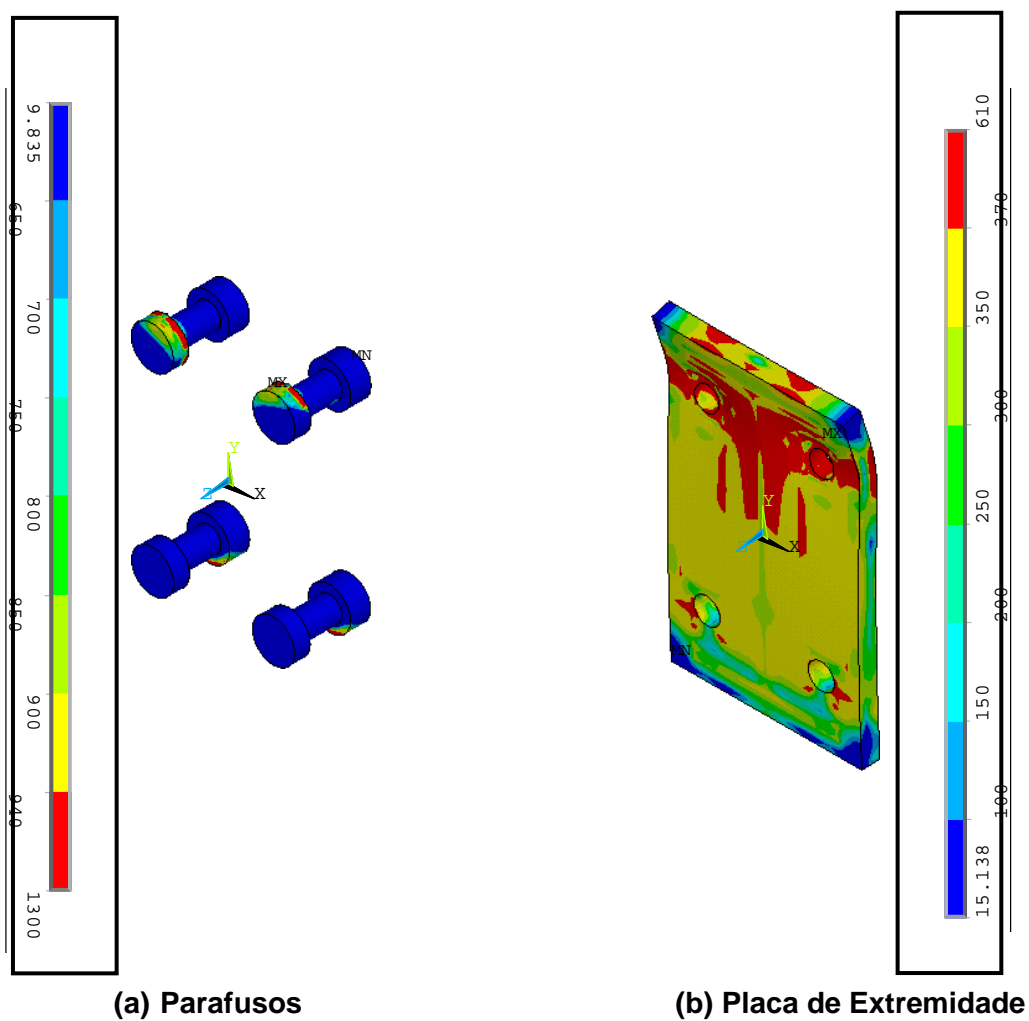


Figura 5.24 – Distribuição de tensões de Von Mises, em MPa – FE08 –
Estágio de Carga (3) – M=80,0 kN.m

5.3 Comparação Global da Ligação

Na Figura 5.25 apresentam-se todas as curvas obtidas nos ensaios experimentais e na Figura 5.26 as obtidas no modelo numérico. É possível verificar-se que mesmo para um nível de esforço normal de compressão equivalente a 20% da resistência plástica da viga, o momento resistente ainda é superior ao obtido para o ensaio sem aplicação de esforço normal (FE01), acontecendo tanto para o numérico quanto para o experimental. Isto deve-se ao fato de que as componentes da zona comprimida, mesmo tendo um acréscimo de força aplicada, não atingem seus valores limites de resistência e, conseqüentemente, as componentes em tração são aliviadas pelo esforço normal de compressão. Vale ressaltar que a rotação medida foi a rotação da ligação, obtida pelos transdutores de deslocamento localizados na viga, conforme apresentado por Lima (Lima, 2003).

Pode-se verificar também que, com o aumento do esforço normal de compressão aplicado à ligação, obtém-se um aumento na resistência à flexão da mesma, mesmo fato que acontece nos ensaios experimentais, conforme Figura 5.25.

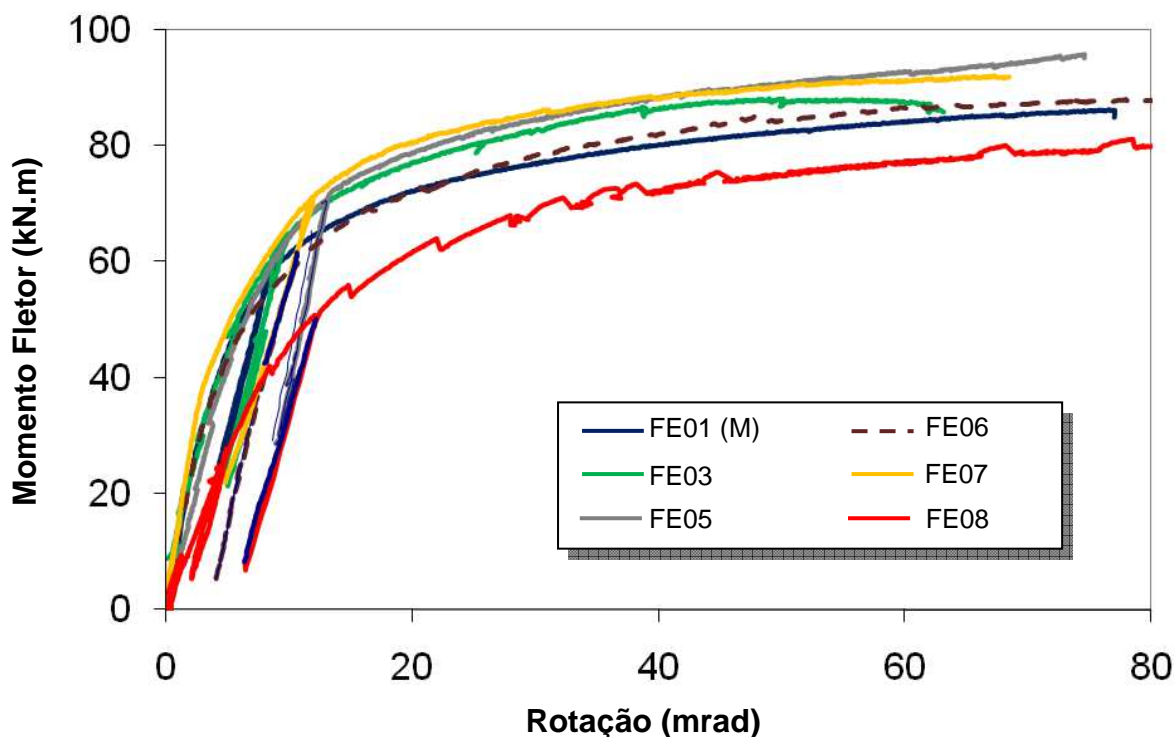


Figura 5.25 – Curvas momento versus rotação – experimental (Lima, 2003)

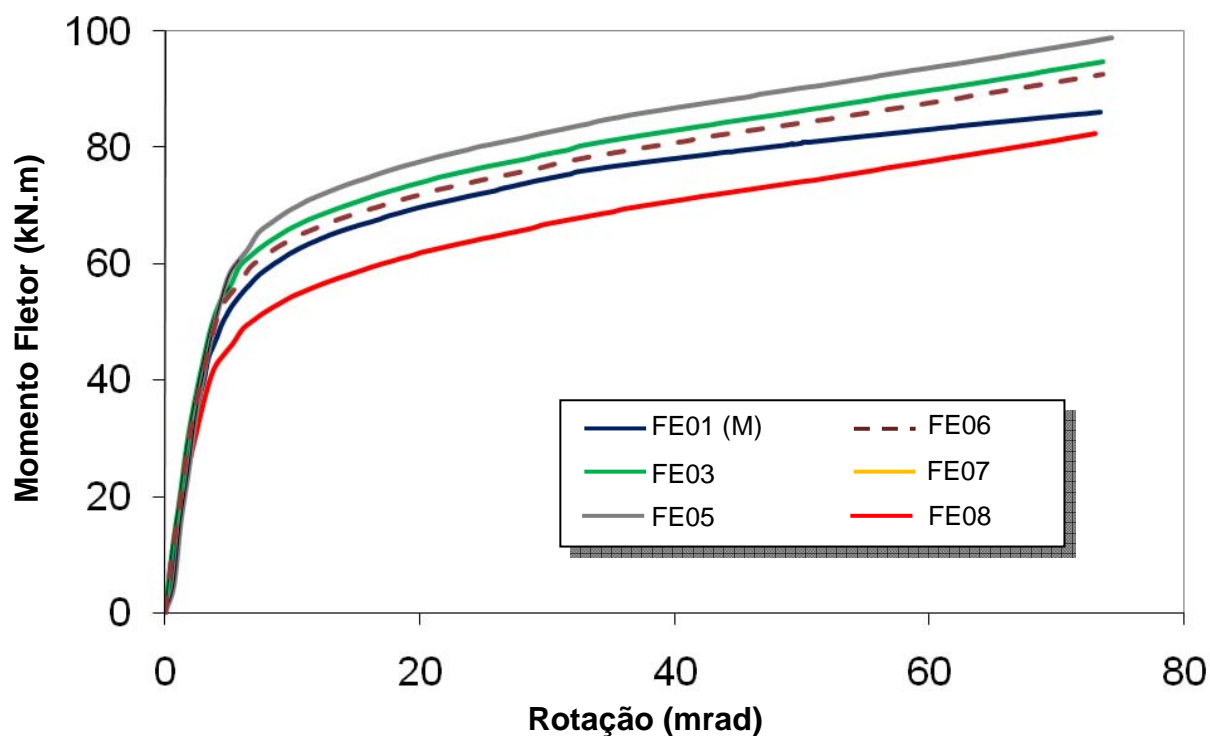


Figura 5.26 – Curvas momento *versus* rotação – numérico

Para o ensaio realizado com esforço normal à tração é possível verificar-se o efeito contrário. Há um decréscimo de nível para o momento obtido, diminuindo assim a resistência à flexão da ligação.

Observa-se que, para o ensaio FE1, utilizado como calibração, a curva momento *versus* rotação apresenta boa concordância entre o resultado numérico e o experimental. Observando-se da Figura 4.16 a Figura 4.18, é possível verificar o que ocorre com a mesa inferior da viga, sujeita à compressão e a placa de extremidade submetida à flexão. Na curva numérica, observa-se que a partir do momento fletor igual a 49,60 kN.m, a curva deixa de ser linear; pois formam-se zonas plastificadas na placa de extremidade, apresentadas pelo acréscimo das tensões aplicadas na componente, ao nível da primeira linha de parafusos. A mesa da viga em compressão começa a plastificar para um nível de momento fletor de 65,90 kN.m. Observa-se que a partir de 79,20 kN.m, os parafusos apresentam tensões superiores à sua tensão nominal de ruptura, em alguns pontos de sua extensão.

Em relação ao cálculo com o Eurocode 3 (Eurocode 3, 2003), pode-se verificar que a Norma apresenta resultados superiores se comparado com o ensaio e

modelo numérico, apesar dos valores obtidos serem próximos para os três estudos verificados.

Em relação ao ensaio com aplicação de esforço normal, pode-se verificar que o modelo numérico apresentou rigidez superior ao ensaio experimental, porém para a resistência à flexão, foram obtidos resultados bem próximos do experimental. Pode-se verificar que, com o aumento do esforço normal aplicado na ligação a componente placa de extremidade à flexão deixa de ser mais a solicitada, passando a controlar o dimensionamento, a mesa inferior da viga à compressão. Estes resultados foram bem observados experimentalmente, porém, devido as condições de contorno impostas ao modelo, não foram possíveis de ser reproduzidos no modelo numérico.

A seguir serão apresentadas as curvas momento *versus* deformação para comparação e análise dos resultados encontrados para os modelos estudados. Serão apresentados os resultados das componentes placa de extremidade à flexão e mesa inferior da viga à compressão, por serem as componentes mais significativas para o estudo.

5.4 Avaliação das Componentes Individuais

5.4.1 Placa de extremidade à flexão (5)

Para o ensaio FE3 é possível verificar que a placa de extremidade plastifica no primeiro ponto escolhido, a mesa inferior da viga, por sua vez, sofre o escoamento no segundo momento fletor apresentado.

Observa-se que o escoamento da componente placa de extremidade à flexão, que é a componente crítica no dimensionamento da região tracionada da ligação, ocorre para níveis superiores de momento fletor conforme se aumenta o nível de esforço normal de compressão aplicado. Por exemplo, para o primeiro momento fletor estudado nota-se que no modelo FE5, ainda não ocorreu o início de plastificação nesta componente, fato já verificado nos modelos FE3. Para o segundo nível de momento fletor, verifica-se que as linhas de charneiras plásticas já se encontram bem definidas enquanto que no modelo FE5, observa-se sua formação ainda em estado inicial. E, para o último nível de momento fletor estudado, verifica-se diversos pontos onde o valor da tensão de *Von Mises* já representa a

plastificação da componente para os modelos enquanto que em FE5, existe pouca plastificação.

Comparando os resultados encontrados, verifica-se que com o aumento do esforço normal aplicado há o retarda do aumento da plastificação da placa de extremidade à flexão. Com isso e se fosse possível aumentar a aplicação do esforço normal, a placa de extremidade deixaria de ser a componente mais solicitada. A componente que controlaria o dimensionamento passaria a ser a mesa inferior da viga à compressão.

A Figura 5.27 apresenta a curva momento versus deformação para os modelos numéricos, considerando-se a mesma posição utilizada anteriormente, ou seja, referente ao extensômetro 23, verificando-se que existe um aumento de deformação na ligação com o aumento de esforço de compressão aplicado, em relação ao FE1. Quando o ensaio é realizado com aplicação de esforço à tração, os valores de deformação aumentam para um mesmo nível de momento fletor aplicado. A Figura 5.28 representa a curva para o ponto referente ao extensômetro 24 do ensaio experimental, onde pode-se verificar as mesmas características apontadas anteriormente.

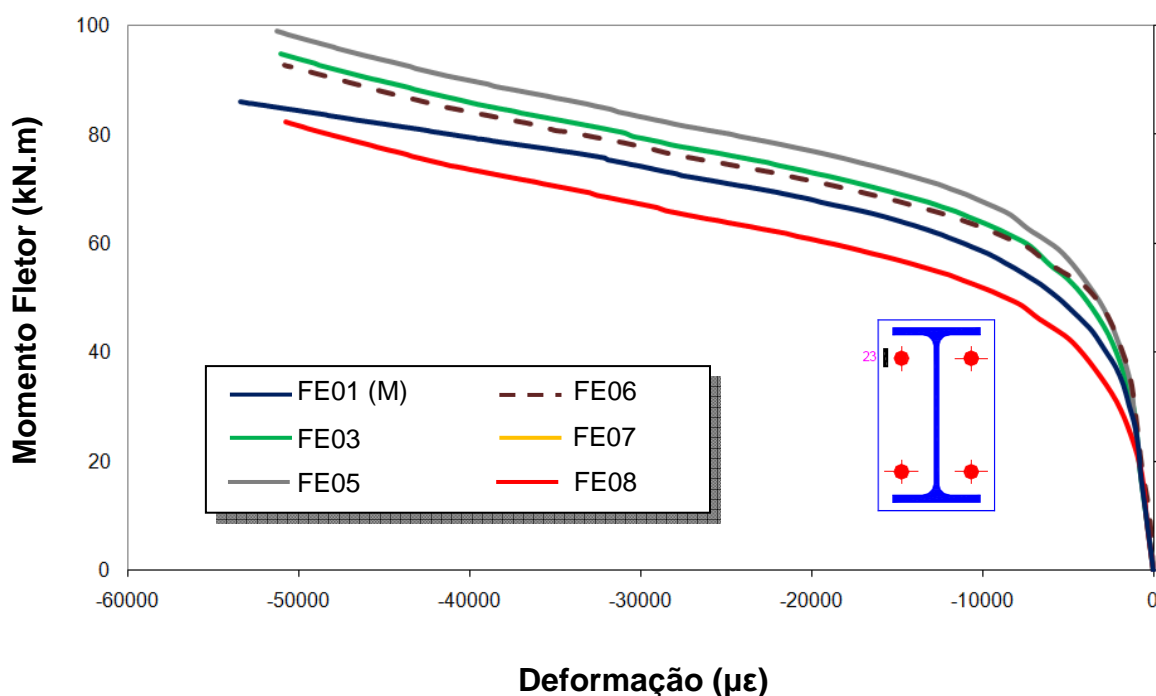


Figura 5.27 – Curvas momento *versus* deformação – componente 5 – extensômetro 23

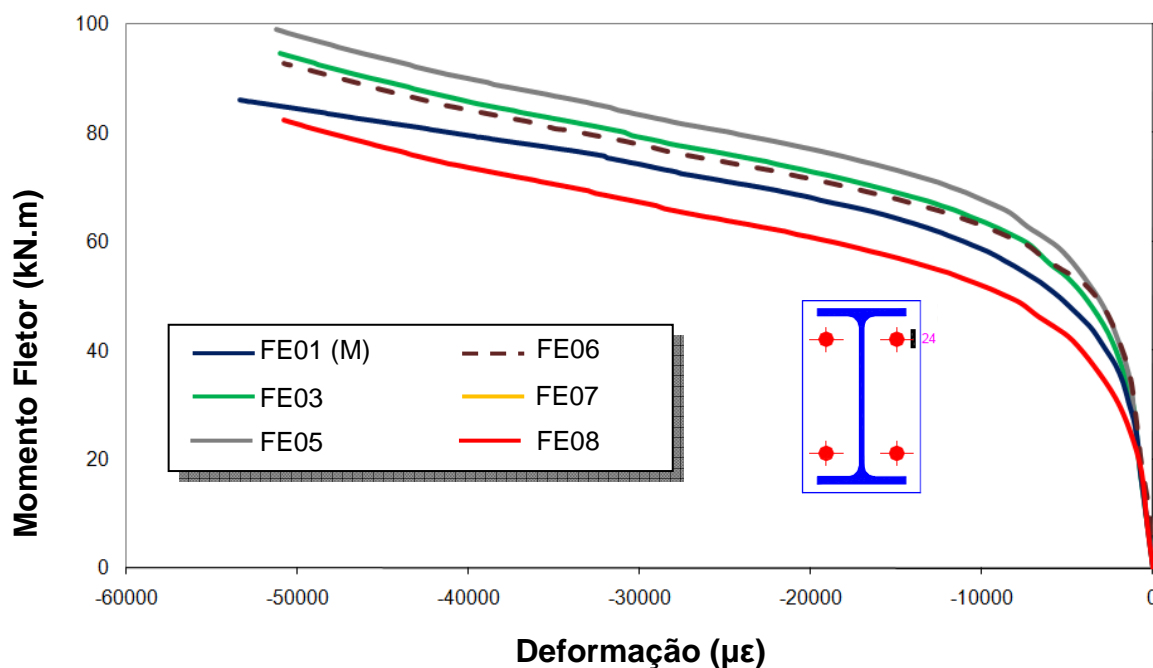


Figura 5.28 – Curvas momento *versus* deformação – componente 5 – extensômetro 24

Para o ensaio FE6, cuja aplicação do máximo esforço normal ($N = -27\%N_{pl}$), pode-se verificar que a curva, representada pela linha tracejada, sofre um decréscimo em relação aos outros níveis de compressão aplicada. Desta forma, constata-se que a mudança de componente que controla o dimensionamento da placa de extremidade à flexão para a mesa da viga a compressão ocorre antes deste esforço aplicado. O valor limiar desta mudança está compreendido entre a aplicação do ensaio FE5 e FE6, de acordo com o modelo numérico proposto.

5.4.2 Mesa Inferior da viga à compressão (7)

Pode-se verificar que há alteração de comportamento da componente da viga à compressão devido à presença do esforço normal na ligação. Como esta componente é a crítica no dimensionamento da ligação na região em compressão, o esforço normal atua de forma a antecipar o escoamento da mesma. Por exemplo, experimentalmente, verifica-se que no ensaio FE6 atinge-se antecipadamente maiores valores de deformações. Este comportamento era esperado dado que no modelo FE6, o nível de esforço normal de compressão aplicada à ligação foi igual a 27% da resistência plástica da viga.

Como há o aumento da área plastificada na mesa inferior da viga e diminuição da plastificação da placa de extremidade com o aumento do esforço normal aplicado, certamente, com o aumento deste esforço aplicado, a componente da mesa inferior da viga em compressão passaria a controlar o dimensionamento da ligação, conduzindo a diminuição da resistência à flexão da ligação, mas ainda assim este valor seria superior à situação de aplicação de apenas o momento fletor.

A Figura 5.29 apresenta as curvas momento versus deformação para os ensaios, para a localização equivalente ao extensômetro 29 do ensaio experimental, verificando-se que existe um aumento de deformação na estrutura com o aumento de esforço normal aplicado, para compressão, e diminuição, quando para esforço normal de tração. Isto também pode ser verificado para os demais pontos localizados, respectivamente, nas faces superior e inferior da mesa inferior da viga.

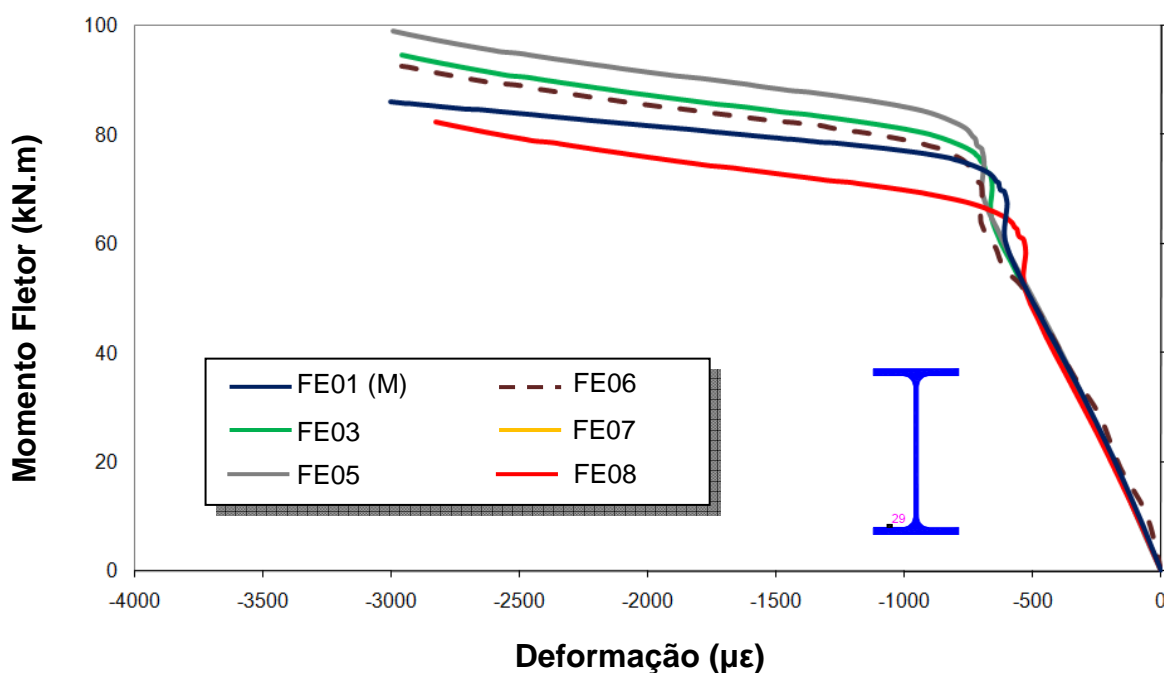


Figura 5.29 – Curvas momento versus deformação – componente 7 – extensômetro 29

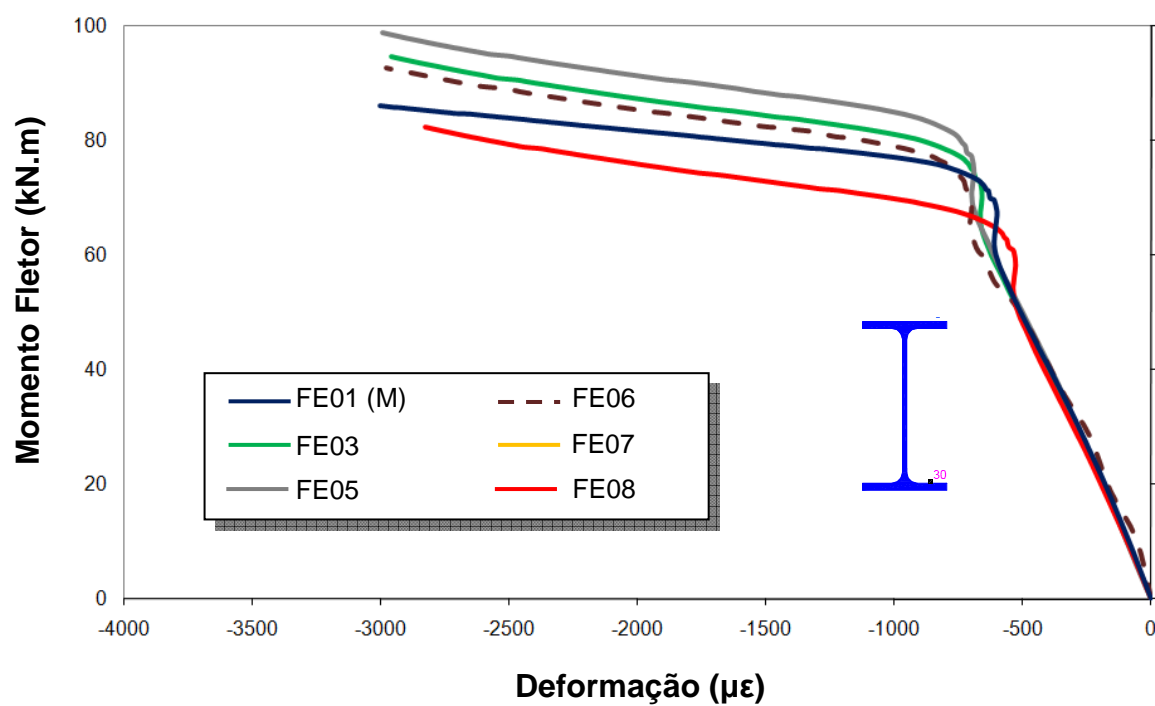


Figura 5.30 – Curvas momento *versus* deformação – Componente 7 – extensômetro 30

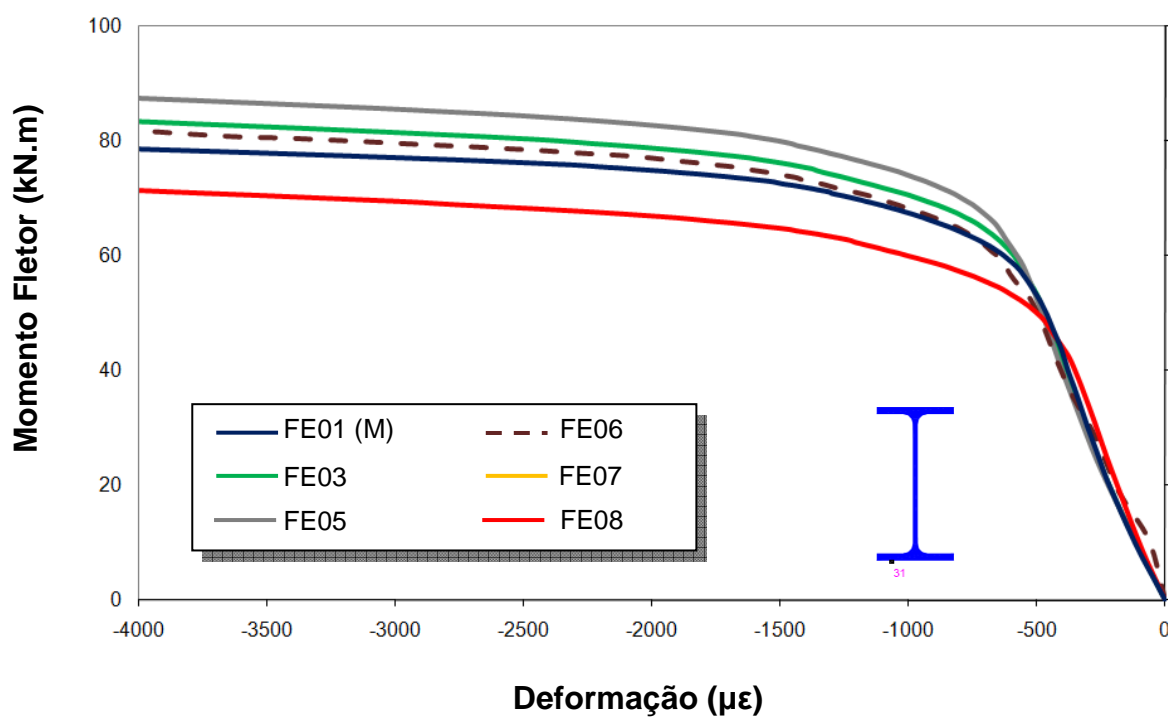


Figura 5.31 – Curvas momento *versus* deformação – Componente 7 – extensômetro 31

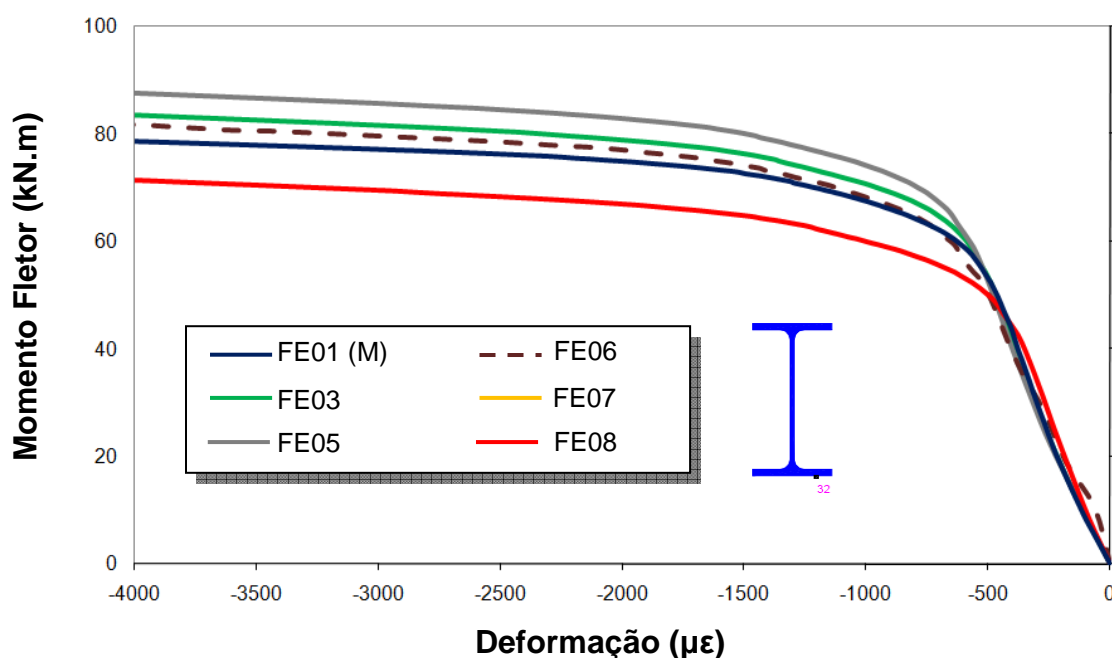


Figura 5.32 – Curvas momento versus deformação – Componente 7 – extensômetro 32

Para o ensaio FE6, cuja aplicação do máximo esforço normal ($N = -27\%N_{pl}$), pode-se verificar que a curva, representada pela linha tracejada, sofre um decréscimo em relação aos outros níveis de compressão aplicados. Desta forma, constata-se que a mudança de componente que controla o dimensionamento para a mesa da viga à compressão ocorre antes deste esforço aplicado. O valor limiar desta mudança está compreendido entre a aplicação do ensaio FE5 e FE6, para o modelo numérico proposto.

5.5 Comparação Modelo Numérico *versus* Modelo de Cerfontaine

O cálculo realizado pelo Eurocode (Eurocode 3, 2003) pode ser utilizado para ligações sem aplicação de esforço normal ou limitado a 5% da resistência plástica da viga. Assim, para se comparar os resultados obtidos para os ensaios com aplicação de esforço normal é utilizado o Modelo Proposto por Cerfontaine (Cerfontaine, 2001), cujos cálculos foram obtidos na dissertação de Nunes (Nunes, 2006), (Nunes *et al*, 2007), (Nunes *et al*, 2006), (Nunes *et al*, 2005).

5.5.1 FE03 ($N=-4\%N_{pl}$)

A Figura 5.33 apresenta a curva momento versus rotação para o ensaio experimental, o modelo numérico e o modelo proposto por Cerfontaine, obtido através da dissertação de Nunes (Nunes, 2006), (Nunes et al, 2007), (Nunes et al, 2006), (Nunes et al, 2005). Observa-se que os valores encontrados para o modelo proposto no que tange à rigidez inicial da ligação são próximos ao modelo numérico. A curva do ensaio apresenta valores superiores para resistência à flexão comparado a curva numérica, que por sua vez apresenta valores superiores ao calculado pelo modelo de Cerfontaine.

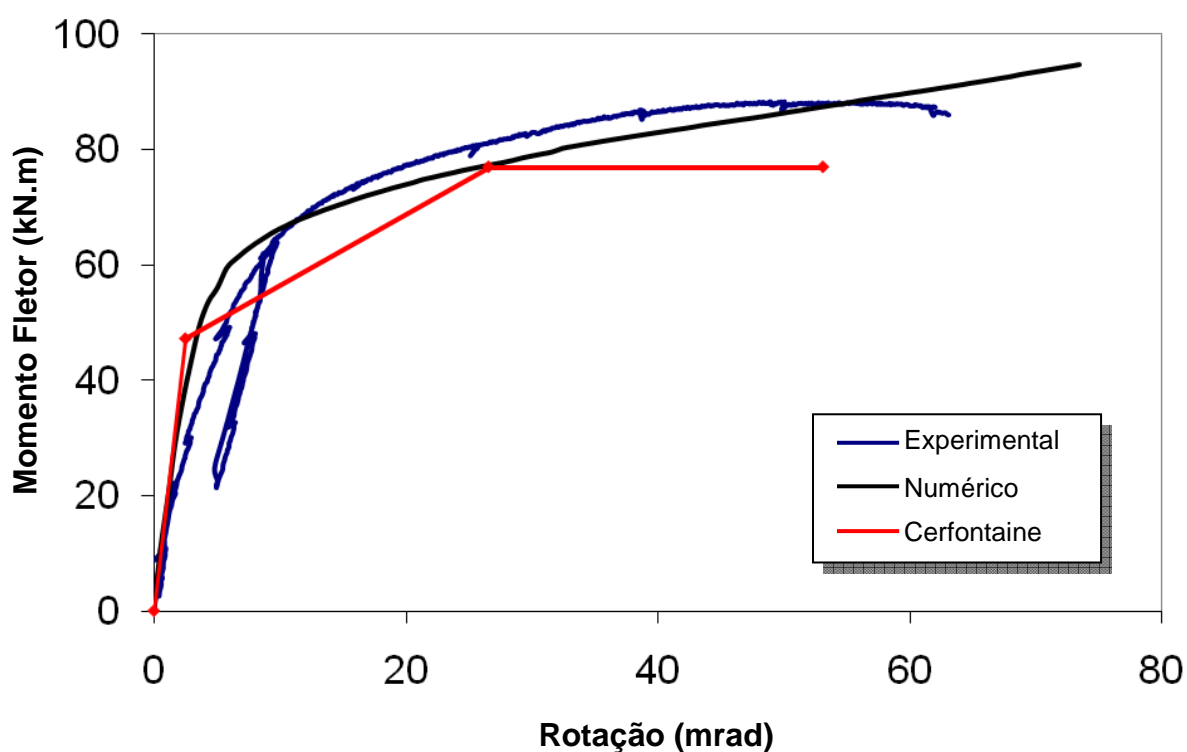


Figura 5.33 – Curvas momento versus rotação – FE3

5.5.2 FE05 ($N=-20\%N_{pl}$)

A Figura 5.34 apresenta a curva momento versus rotação para o ensaio experimental, o modelo numérico e o modelo proposto por Cerfontaine, obtido através da dissertação de Nunes (Nunes, 2006), (Nunes et al, 2007), (Nunes et al, 2006), (Nunes et al, 2005), para o ensaio FE5. Observa-se que os valores

encontrados para o modelo proposto apresentam rigidez inicial similar ao modelo experimental, e que existe um trecho da curva que apresenta valores numéricos e experimentais inferiores ao calculado pelo modelo, o que pode gerar um ponto de fragilidade para o dimensionamento da ligação.

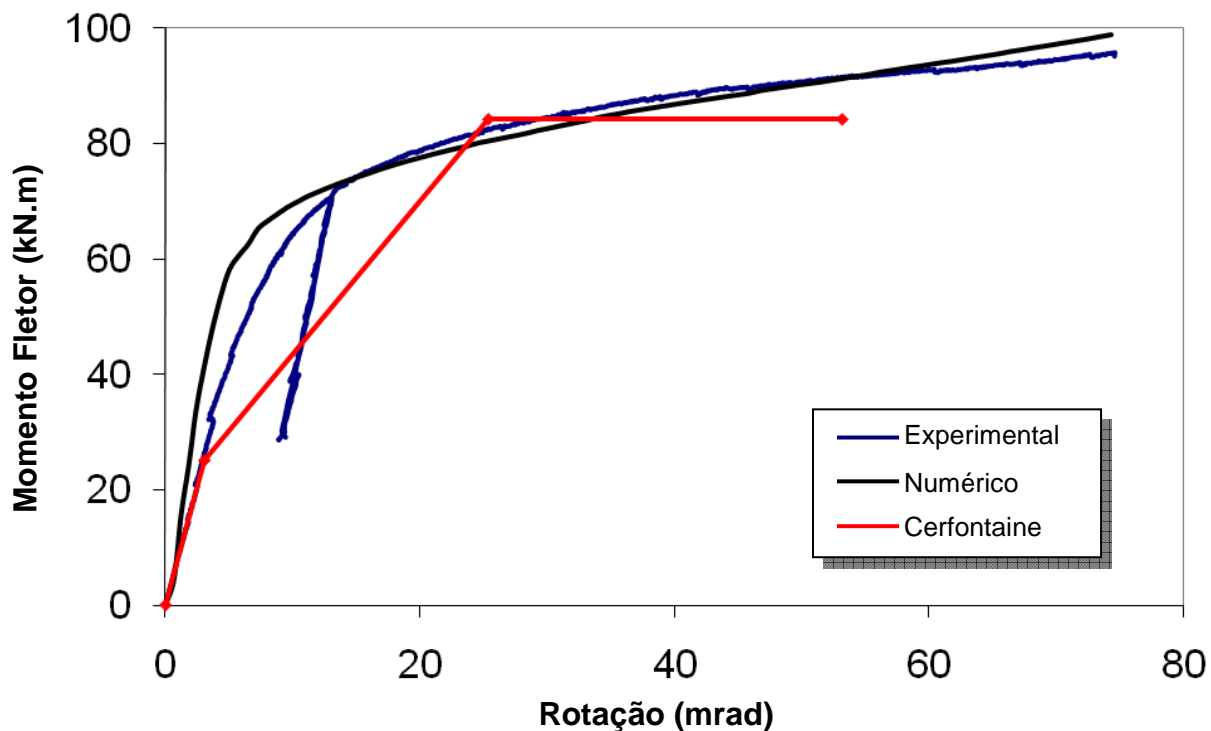


Figura 5.34 – Curvas momento versus rotação – FE5

5.5.3 FE06 ($N=-27\%N_{pl}$)

A Figura 5.35 apresenta a curva momento versus rotação para o ensaio experimental, o modelo numérico e o modelo proposto por Cerfontaine, obtido através da dissertação de Nunes (Nunes, 2006), (Nunes et al, 2007), (Nunes et al, 2006), (Nunes et al, 2005), para o ensaio FE6. Observa-se que as curvas representativas do ensaio experimental e o numérico apresentam valores abaixo do valor calculado pelo modelo proposto, na maioria da extensão do gráfico. Assim, os valores calculados pelo modelo de Cerfontaine apresentaram valores superiores no dimensionamento, considerando o mesmo nível de esforço normal aplicado.

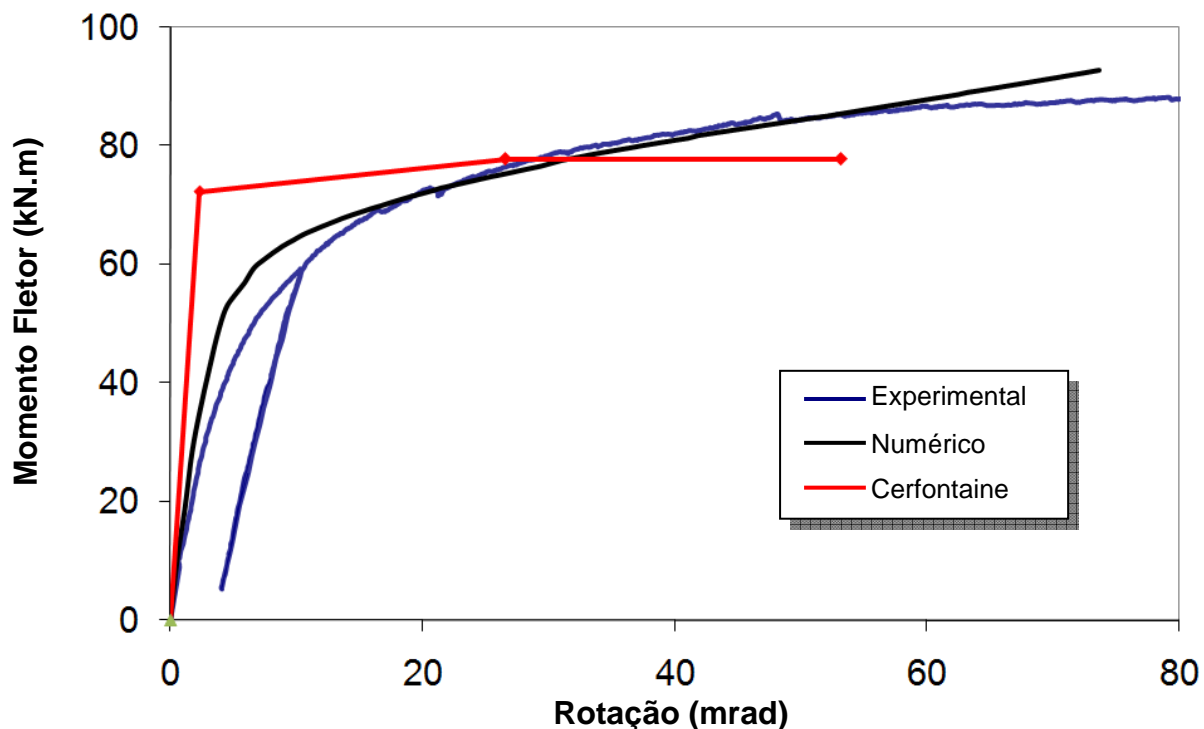


Figura 5.35 – Curvas momento *versus* rotação – FE6

5.5.4 FE08 ($N=+10\%N_{pl}$)

A Figura 5.36 apresenta a curva momento versus rotação para o ensaio experimental, o modelo numérico e o modelo proposto por Cerfontaine, obtido através da dissertação de Nunes (Nunes, 2006), (Nunes et al, 2007), (Nunes et al, 2006), (Nunes et al, 2005), para o ensaio FE8. Observa-se que as inclinações iniciais referentes à rigidez inicial da ligação são praticamente iguais para o modelo de Cerfontaine e o modelo numérico, ambas com valores superiores ao do ensaio experimental. Já para em relação ao momento fletor são obtidos valores superiores para o modelo numérico e em seguida com o modelo experimental e com valores inferiores para o modelo de Cerfontaine.

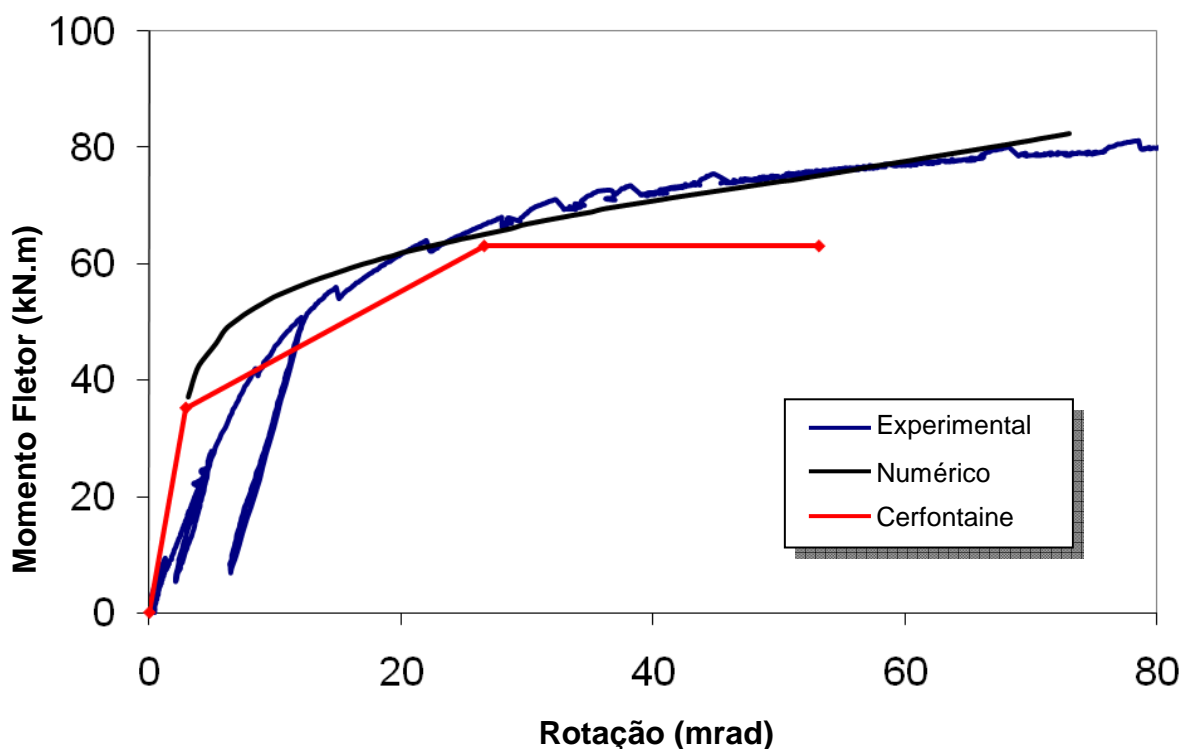


Figura 5.36 – Curvas momento *versus* rotação – FE8

Portanto, este capítulo apresentou a análise dos resultados obtidos, levando-se em consideração os ensaios com aplicação de esforço normal, comparando-se primeiramente os resultados numéricos aos experimentais, através da curva momento *versus* rotação e momento *versus* deformação, e posteriormente ambos os resultados com o modelo proposto por Cerfontaine (Cerfontaine, 2001). O capítulo seguinte apresenta as principais conclusões obtidas nesta dissertação, bem como algumas propostas para trabalhos futuros.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Introdução

O emprego das ligações semi-rígidas no projeto de estruturas de aço tem sido de grande valia no que diz respeito a obras civis, pois possibilitam a redução nos custos de fabricação e montagem das estruturas.

Pensando nesta utilização, muitos trabalhos vem sendo desenvolvidos nesta área de pesquisa, com a realização de ensaios em laboratório, que permitem a calibração dos modelos numéricos, na tentativa de uma melhor avaliação do comportamento real destas ligações.

O objetivo deste trabalho foi caracterizar as ligações semi-rígidas de viga-coluna com placa de extremidade ajustada, a fim de apresentar os resultados numéricos calibrados com resultados experimentais, aumentando o estudo deste tipo de ligação, comparando seus resultados aos cálculos apresentados no Eurocode 3 (Eurocode 3, 2003), que trata sobre o dimensionamento de ligações semi-rígidas em seu conteúdo e ao modelo proposto por Cerfontaine (Cerfontaine, 2001), cujos cálculos foram obtidos na dissertação de Nunes (Nunes, 2006), (Nunes *et al*, 2007), (Nunes *et al*, 2006), (Nunes *et al*, 2005).

O estudo foi baseado no Método das Componentes preconizado pelo Eurocode 3 (Eurocode 3, 2003), por se tratar, até o presente momento, da norma que considera o comportamento semi-rígido das ligações em estruturas de aço. A metodologia de dimensionamento foi estudada onde as ligações são avaliadas através de modelos mecânicos, através do processo do modelo de molas, baseados na simulação das ligações através de um conjunto de componentes rígidos e flexíveis.

Esta metodologia de cálculo das ligações não considera a presença de esforço normal (tração/ compressão) nas mesmas, impondo apenas uma limitação empírica de 5% da resistência plástica da viga como esforço normal máximo para o qual os procedimentos podem ser considerados aplicáveis. Como existem estruturas onde o esforço proveniente das vigas supera esta limitação, este procedimento não

seria aplicável, não havendo nenhuma recomendação de como deve ser feito seu dimensionamento.

Este estudo foi possível levando-se em consideração a realização de um programa de ensaios realizados por Lima (Lima, 2003) para sua tese de doutorado, em um total de oito ensaios realizados para as ligações com placa de extremidade ajustada a viga. Baseando-se na limitação do Eurocode 3 (Eurocode 3, 2003), pode-se avaliar, através destes ensaios, o comportamento das ligações semi-rígidas fora deste limite empírico de 5%.

Estes ensaios experimentais foram comparados a modelos numéricos desenvolvidos com base no método dos elementos finitos para estudo do comportamento de ligações viga-coluna com placa de extremidade ajustada à altura da viga submetidas a momento fletor e força normal.

Pode-se citar como contribuições existentes neste trabalho:

- Apresentação detalhada do estudo realizado nas disposições do Eurocode 3 (Eurocode 3, 2003), onde considera-se o dimensionamento de ligações semi-rígidas através do método dos componentes, com a caracterização da curva momento *versus* rotação e rigidez inicial da ligação;
- Desenvolvimento de modelo computacional tridimensional com base no método dos elementos finitos que engloba a não-linearidade geométrica e do material, elementos de contato, através da aplicação de coeficiente de atrito, para o estudo comparativo aos modelos experimentais realizados por Lima (Lima, 2003) e apresentados resumidamente neste trabalho;
- Estudo da lei constitutiva do material, sendo desenvolvido o modelo numérico levando-se em consideração ao ajuste da composição dos elementos utilizados, podendo-se assim, ter resultados mais aproximados com a realidade dos ensaios realizados;
- Comparação dos resultados obtidos entre os ensaios experimentais, desenvolvidos por Lima (Lima, 2003), modelo numérico, modelo proposto por Cerfontaine (Cerfontaine, 2001), realizado por Nunes (Nunes, 2006), (Nunes *et al*, 2007), (Nunes *et al*, 2006), (Nunes *et al*, 2005), e dimensionamento pelo Eurocode 3 (Eurocode 3, 2003), apresentando os principais pontos de discussão sobre os métodos;

- Apresentação das curvas momento *versus* deformação das componentes da placa de extremidade à flexão e mesa inferior da viga à compressão, para avaliação de quando ocorre a mudança de componente que controla o dimensionamento.

6.2 Conclusões

Para os modelos desenvolvidos com a presença de esforço normal na ligação, relativamente à rigidez inicial da ligação, os resultados numéricos mostraram-se mais rígidos que os obtidos experimentalmente; no entanto, as diferenças encontradas (na ordem de 15%) não invalidam os resultados obtidos.

Os resultados numéricos e experimentais, evidenciaram que, quando as ligações estão sujeitas a momento fletor e esforço normal, este último pode ser favorável ao aumento da resistência à flexão da ligação e conseqüentemente, permitir a utilização de configurações de ligações mais econômicas. Pode-se verificar também que, com o aumento da aplicação do esforço normal de compressão, a tendência é a componente da mesa inferior da viga passar a controlar o dimensionamento da mesma.

Os valores encontrados de momento fletor, tanto numéricos quanto experimentais, foram superiores aos obtidos através dos cálculos realizados pelo Eurocode 3, mostrando que a Norma são superiores aos obtidos nos ensaios realizados e nos modelos desenvolvidos.

Comparando os resultados obtidos ao modelo proposto por Cerfontaine, é possível verificar que o dimensionamento pelo método apresenta valores superiores aos obtidos pelo modelo numérico e o ensaio experimental, para os ensaios FE5 e FE6.

Para as curvas momento *versus* deformação avaliadas, é possível verificar claramente o decréscimo ocorrido para a curva FE6 para a componente placa de extremidade em relação aos demais ensaios realizados com esforço de compressão, significando que a mesa inferior da viga passa a controlar o dimensionamento.

6.3 Trabalhos futuros

O desenvolvimento de trabalhos futuros deve levar em consideração o melhor detalhamento do modelo numérico estudado, a fim de diminuir a rigidez inicial apresentada nos modelos e apresentar o aumento do momento resistente para a ligação.

Uma melhor avaliação da formulação utilizada na caracterização das diversas componentes faz-se necessária, uma vez que foram realizadas simplificações no dimensionamento, principalmente para a placa de extremidade a flexão. Alguns autores, como Faella e Piluso (Faella *et al*, 2000) propõem modificações na avaliação desta componente, principalmente no cálculo da rigidez inicial das linhas de parafusos situadas abaixo da mesa superior da viga, além de considerações sobre aplicação ou não da protensão nos parafusos.

A formulação proposta por Cerfontaine (Cerfontaine, 2001) em seu modelo, também pode ser melhor explorada, principalmente para os casos de aplicação de esforço normal à tração, a fim de que o dimensionamento seja realizado de forma correta, diminuindo gastos desnecessários devido ao dimensionamento exagerado.

Um estudo mais aprofundado sobre a protensão nos parafusos deve ser realizado, a fim de melhorar o refinamento do estudo e assim, aproximar-se do real comportamento da ligação, principalmente para a componente do parafuso à tração.

Deve-se considerar também que a simplificação feita para a coluna utilizada na ligação precisa ser revisada, ou seja, utilizando-se o comprimento total da mesma de forma que a componente alma da coluna em cisalhamento possa ser melhor avaliada.

Ainda como sugestões para trabalhos futuros, pode-se citar as relacionados ao estudo de outras variáveis que influenciam no dimensionamento das ligações, como a inclusão da influência das tensões residuais, o estudo paramétrico relativo a variação da espessura da placa e a influência no cálculo da ligação e a utilização de parafusos A325, tipo de parafuso mais utilizado nas ligações brasileiras.

REFERÊNCIAS

LIMA, L. R. O. *Comportamento de Ligações com Placa de Extremidade em Estruturas de Aço Submetidas a Momento Fletor e Força Axial*. 2003. 267f. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2003.

NUNES, P. C. da L. *Análise Paramétrica de Ligações com Placa de Extremidade em Estruturas de Aço Submetidas a Momento Fletor e Força Axial*. 2006, 136f. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, UERJ, Rio de Janeiro, 2006.

SILVA, L. S.; LIMA, L. R. O.; VELLASCO, P. C. G. da S. and ANDRADE, S. A. L. *Experimental Behavior of Endplate Beam-to-Column Joints under Bending and Axial Force*. 2003. Department of Civil Engineering, University of Coimbra, 2003.

SIMÕES, R. D. *Comportamento de Ligações Mistas Viga-Coluna Sob Acções Estáticas e Cíclicas*, 2000. 256f. Tese de Doutorado - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Portugal, 2000.

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

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

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.

EUROCODE 3, *prEN 1993-1-8, Design of steel structures – Part 1.8: Design of joints (“stage 49 draft”)*, 2005.

LAURENT, F. *Influence de L’effort Normal sur le Calcul des Assemblages Semi-Rigides*. 1994. 114 f. CUST – Mémoire présentée en vue de l’obtention du diplôme d’ingénieur, Université Blaise Pascal – Clermont - Ferrand, Liège, Belgique, 1994.

CERFONTAINE, F. *Etude analytique de l’interaction entre moment de flexion et effort normal dans les assemblages boulonnés*. In: *Construction Métallique*, 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.

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.

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.

WALD F. *Databank of M-N test Praha 2000*. 2000. Disponível em: <http://www.fsv.cvut.cz/%7Ewald/COST-Praha-C12/INDEX.HTM> (acesso em: 25 jun. 2001).

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.

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

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.

RATHBUN, J. C. *Elastic Properties of Riveted Connections*. In: Transactions of ASCE, v. 101, p. 524-563. 1936.

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.

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.

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

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

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

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, n° 10, p. 446-458. 1977.

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.

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.

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.

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 Research*. Londres: Elsevier, v.46, n° 1-3, p. 1-20. 1998.

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.

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.

CHMIELOWIEC, M. and RICHARD, R. M. *Moment Rotation Curves for Partially Restrained Steel Connections*. In: *Report to AISC*, University of Arizona, 127. 1987.

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.

TSCHEMMERNEGG, F. and HUMER, C. *A Non-Linear Joint Model for the Design of Structural Steel Frames*. In: *Costruzioni Metalliche*, no 1. 1988.

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.

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.

JASPART, J. P. *General Report: Session on Connections*. In: *Journal of Constructional Steel Research*, v. 55, p. 69-89. 2000.

Ansys, Reference Manual. 2008.

SANTIAGO, Aldina; LIMA, L. R. O.; SILVA, L. S.; JORDÃO, Sandra. *Análise Numérica de Ligações Viga-Coluna Submetidas a Momento Flector e Esforço Axial*. In: *CILAMCE 2007, Porto, Portugal*. 2007.

DEL SÁVIO, A. A., MARTHA, L. F., ANDRADE, S. A. L., VELLASCO, P. C. G. S. and LIMA, L. R. O. *Modelagem do comportamento de vigas tipo vierendeel com ligações semi-rígidas*. XXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering – CILAMCE 2005, Espirito Santo, Brasil, 2005.p 1-10. 2005.

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

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

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

DANIŪNAS, Alfonsas, and URBONAS, Kęstutis. *Analysis of the steel frames with the semi-rigid beam-to-beam and beam-to-column knee joints under bending and axial forces*. In: Engineering Structures, v. 30, p. 3114-3118. 2008.

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

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

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

NUNES, P. C. da L. ; LIMA, Luciano Rodrigues Ornelas de ; SILVA, J. G. S. da ; VELLASCO, P. C. G. da S. ; ANDRADE, S. A. L. de . *Parametrical Analysis of Extended Endplate Semi-Rigid Joints Subjected to Bending Moment and Axial Force*. Latin American Journal of Solids and Structures, v. 4, p. 39-59, 2007.

NUNES, P. C. da L. ; LIMA, Luciano Rodrigues Ornelas de ; SILVA, J. G. S. da ; VELLASCO, P. C. G. da S. ; ANDRADE, S. A. L. de . *Análise Paramétrica de Ligações Semi-Rígidas Submetidas a Momento Fletor e Força Normal*. In: XXVII CILAMCE - Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, 2006, Belém. Proceedings of the XXVII CILAMCE - Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering. Belém : Editora da Universidade Federal do Pará, 2006. v. 1. p. 1-14.

NUNES, P. C. da L. ; LIMA, Luciano Rodrigues Ornelas de ; VELLASCO, P. C. G. da S. ; ANDRADE, S. A. L. de ; SILVA, J. G. S. da . *Modelagem de Ligações Semi-Rígidas com Placa de Extremidade Estendida Submetidas a Momento Fletor e Esforço Normal*. In: XXVI CILAMCE - Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, 2005, Guarapari. Proceedings of The Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, 2005. v. 1. p. 1-13.

COELHO, A. M. G. *Characterization of the Ductility of Bolted End Plate Beam-to-Column Steel Connections*. 2004. 370f. Doctor's Thesis, University of Coimbra, Coimbra, 2004.

JASPART, J. P., and BRUSI, 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 – FE01

Serão apresentados os cálculos realizados para o modelo estudado com aplicação de momento fletor, para comparação com os resultados experimentais e numéricos desenvolvidos no presente trabalho.

A.1. Informações Gerais

A.1.1. Características Mecânicas

	tensão de escoamento N/mm ² ou MPa	tensão de ruptura N/mm ² ou MPa
Alma da viga.....:	363,43	454,25
Mesa da Viga.....:	340,14	448,24
Alma da Coluna.....:	372,02	477,30
Mesa do Coluna.....:	342,95	448,79
Placa de Extremidade...:	369,44	503,45
Parafusos à tração.....:	900,00	1000,00
Solda.....:		576,00
Módulo de elasticidade.:	210000,00	N/mm ² ou MPa

A.1.2. Características Geométricas

Viga: IPE 240

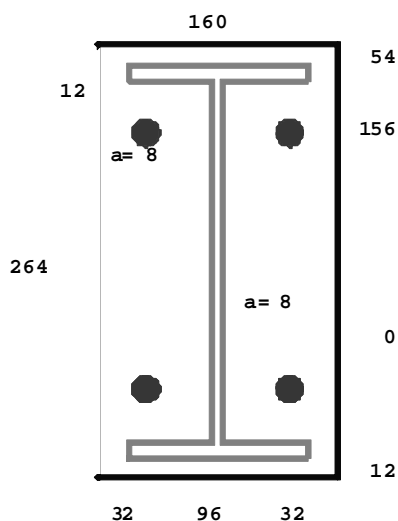
Altura (hb).....:	240,00 mm
Largura (bfb).....:	120,00 mm
Espessura da mesa (tfb).....:	9,80 mm
Espessura da alma (twb).....:	6,20 mm
Raio de curvatura (rb).....:	15,00 mm
Inércia (Ib).....:	3890,00 cm ⁴
Área (Ab).....:	39,10 cm ²
(Wpl).....:	367,00 cm ³
Comprimento da viga ligada ao pilar (Lb)..:	6000,00 mm
Inclinação da viga.....:	0 °

Coluna: HE 240 B

Altura (hc).....:	240 mm
Largura (bfc).....:	240 mm
Espessura da mesa (tfc).....:	17 mm
Espessura da alma (twc).....:	10 mm
Raio de curvatura (rc).....:	21 mm
Inércia (Ic).....:	11260 cm ⁴
Área (Ac).....:	106 cm ²

Placa de extremidade:

	(mm)
Largura da placa.....:	160,00
Altura da placa.....:	264,00
Espessura da placa.....:	15,00
Distância vertical entre a mesa da viga e a extremidade da placa de extremidade...:	12,00
Distância vertical entre a 1ª linha de parafusos e a extremidade da placa de extremidade.....:	54,00
Distância vertical entre linhas de parafusos 1 e 2.....:	156,00
Distância vertical entre linhas de parafusos 2 e 3.....:	0,00
Distância horizontal entre parafusos.....:	96,00
Distância horizontal entre parafusos e a extremidade da placa de extremidade...:	32,00
Distância vertical entre banço inferior da viga e a extremidade da placa.....:	12,00

**Figura A. 1 – Esquema da Placa de Extremidade****Parafusos:**

Diâmetro do parafuso.....:	20,00 mm
Área do parafuso ($A_s = 0,8 * A_b$).....:	245,00 mm ²
Diâmetro da arruela do parafuso.....:	35,03 mm
Diâmetro da porca.....:	20,00 mm
Diâmetro dos furos.....:	22,00 mm
Espessura da cabeça do parafuso.....:	13,00 mm
Espessura da porca.....:	16,00 mm
Espessura total de arruelas por parafusos.:	4,00 mm
Comprimento do parafuso.....:	50,50 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.1.3. Coeficientes de Segurança

	reais:	
Gama M_0 .(resistência da seção classe 1, 2 ou 3 - página 53)...	(1.00)	1,00
Gama M_1 .(resistência do membro a flambagem - página 53).....	(1.10)	1,00
Gama M_b .(resistência de ligações aparafusadas - página 137)...	(1.25)	1,00
Gama M_w .(resistência de ligações soldadas - página 137).....	(1.25)	1,00

A.2. Cálculo das Componentes**A.2.1. Alma da coluna ao corte (6.2.6.1)**

Área de corte da coluna (página 67 - ENV1.1 - item 6.2.6)		
$A_{vc} = A_c - 2*bc*t_{fc} + (t_{wc} + 2*rc)*t_{fc}$	$A_{vc} =$	3324,00 mm ²
Coeficiente Beta.....(tab. 5.4):	BETA =	1,00
Resistência plástica do painel de alma do pilar (J.3.5.1) $(0,90*f_{ywc}*A_{vc}) / (\text{raiz}(3)*Gama M_0)$	$V_{wpRd} =$	642,55 kN
Resistência $(V_{wpRd} / BETA)$	$F_{wpRd} =$	642,55 kN
Coeficiente de Rigidez (tab. 6.11)		
$z =$ distância entre o centro de tração e a linha média da mesa da viga em compressão (fig. 6.15).....	$z =$	193,10 mm
$k_1 = (0,38*A_{vc}) / (BETA*z)$	$k_1 =$	6,54 mm

Neste primeiro momento , se calcula um z provisório. O z definitivo será calculado após o cálculo da rigidez efetiva de cada linha de parafusos.

A.2.2. Alma da coluna à compressão (6.2.6.2)

Largura efetiva (eq. 6.11, página 69)

$$\begin{aligned} \text{beff}_{c,wc} &= t_{fb} + 2 \cdot \text{raiz}(2) \cdot a_p + 5(t_{fc} + s) + s_p \dots \text{beff} = 243,64 \text{ mm} \\ t_{fb} &= 9,80 \text{ mm} \\ a_p &= 8,00 \text{ mm} \quad \text{beff1} = 264,85 \text{ mm} \\ t_{fc} &= 17,00 \text{ mm} \quad \text{beff2} = 243,64 \text{ mm} \\ s = r_c &= 21,00 \text{ mm} \\ s_p &= 21,21 \text{ mm} \end{aligned}$$

Esbeltez da placa de extremidade

$$\begin{aligned} \lambda_p &= 0,932 \cdot (\text{RAIZ}((\text{beff} \cdot d_{wc} \cdot f_{ywc}) / (E \cdot t_{wc}^2))) \dots \lambda_p = 0,78 \\ d_{wc} &= h_c - 2(t_{fc} + r_c) = 164,00 \text{ mm} \\ f_{ywc} &= 369,44 \text{ N/mm}^2 \text{ ou MPa} \\ E &= 210000,00 \text{ N/mm}^2 \text{ ou MPa} \\ t_{wc} &= 10,00 \text{ mm} \end{aligned}$$

Coefficiente de redução para flambagem da placa.....: $\rho = 0,95$

se $\lambda_p \leq 0,72$: $\rho = 1,0$

se $\lambda_p > 0,72$: $\rho = (\lambda_p - 0,20) / \lambda_p^2$

Coefficiente de interação de esforços.....: $\omega = \omega_1 = 0,77$

$\omega_1 = 1 / (\text{RAIZ}(1 + 1,3 \cdot (\text{beff} \cdot t_{wc} / A_{vc})^2))$

Resistência.....: $F_{cwcRd} = 690,67 \text{ kN}$

$F_{cwcRd} = (\omega \cdot \text{beff} \cdot t_{wc} \cdot f_{ywc}) / \text{Gama } M_0 \leq$

$$(\omega \cdot \rho \cdot \text{beff} \cdot t_{wc} \cdot f_{ywc}) / \text{Gama} = 657,65 \text{ kN}$$

Coefficiente de Rigidez

$d_{wc} =$ altura da coluna sem as mesas.....: $d_{wc} = 164,00 \text{ mm}$ (**OK!!!**)

$k_2 = (0,7 \cdot \text{beff} \cdot t_{wc}) / (d_{wc})$: $k_2 = 10,40$

A.2.3. Mesa da coluna à flexão (6.2.4.4)

Parâmetros geométricos:

$$\begin{aligned} e &= \text{distância horizontal entre o parafuso e a borda da coluna} = 72,00 \text{ mm} \\ e_{min} &= \text{distância horizontal entre o parafuso e a borda da placa} = 32,00 \text{ mm} \\ m &= \text{distância entre o parafuso e o início do raio de curvatura} = 26,20 \text{ mm} \\ n &= \min(e_{min}; 1,25m) = 32,00 \text{ mm} \\ e_w &= d_w / 4 = 8,76 \text{ mm} \\ p &= 156,00 \text{ mm} \end{aligned}$$

Comprimento efetivo do T-stub equivalente (Tabela 6.4 - página 70):

- Parafusos tomados individualmente

(inner bolt row pq não é lig. no fim da coluna)

Formas circulares:

$$2 \text{ Pi m} \dots \text{leff}_{,1} = 164,62 \text{ mm}$$

Formas não-circulares:

$$4 \text{ m} + 1,25 \text{ e} \dots \text{leff}_{,2} = 194,80 \text{ mm}$$

Primeira linha de parafusos

Formas circulares.....:	leffcp=	164,62 mm
Formas não-circulares.....:	leffnc=	194,80 mm
	1 =	164,62 mm

Segunda linha de parafusos

Formas circulares.....:	leffcp=	164,62 mm
Formas não-circulares.....:	leffnc=	194,80 mm
	1 =	164,62 mm

- Parafusos tomados como grupo

Para a caracterização do grupo de parafusos como interno, para o cálculo de I para as formas circulares, é necessário que todas as linhas de parafusos que irão compô-lo estejam contidas entre as mesas da viga.

O comprimento efetivo calculado para as formas circulares ($leffcp$) refere-se ao $leff$ devido a apenas um parafuso.

Grupo entre as linhas de parafusos número.....:	1 e 2	
(end <i>bolt row</i>)		
Formas circulares:		
$P_i m + p$:	1 =	238,31 mm
	leffcp=	476,62 mm
Formas não-circulares:		
$2m + 0,625e + 0,5p$:	1 =	175,40 mm
	leffnc=	350,80 mm
	leff,1=	350,80 mm

Resistência:

Este valor é cálculo para apenas um parafuso e permanece inalterado para os demais componentes que utilizam este variável.

Resistência de dimensionamento de 1 parafuso.....:	BtRd =	220,50 kN
$BtRd = (0,9 * f_{ub} * A_s) / \text{Gama } M_b$		

- 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)

$$M_{pl1Rd} = 0,25 \Sigma leff,1 t f^2 fy / Gama M_0 \dots \dots \dots : M_{pl1Rd} = 4078,96 \text{ N.m}$$

Para ruptura dos paraf. c/ escoamento da mesa (formas não circulares)

$$M_{pl2Rd} = 0,25 \Sigma leff,2 t f^2 fy / Gama M_0 \dots \dots \dots : M_{pl2Rd} = 4826,78 \text{ N.m}$$

$$\text{Modo 1 (escoamento completo da mesa)} \dots \dots \dots : F_{1Rd} = 622,74 \text{ kN}$$

$$F_{1Rd} = 4 * M_{pl1Rd} / m$$

$$\text{Modo 2 (ruptura dos paraf. c/ esc. da mesa)} \dots \dots \dots : F_{2Rd} = 408,34 \text{ kN}$$

$$F_{2Rd} = (2M_{pl2Rd} + n \Sigma B t R_d) / (m + n)$$

$$\text{Modo 3 (ruptura dos parafusos)} \dots \dots \dots : F_{3Rd} = 441,00 \text{ kN}$$

$$F_{3Rd} = \Sigma B t R_d$$

$$\text{Resistência} \dots \dots \dots : F_{tRd(1)} = 408,34 \text{ kN}$$

- 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)

$$M_{pl1Rd} = 0,25 \Sigma leff,1 t f^2 fy / Gama M_0 \dots \dots \dots : M_{pl1Rd} = 4078,96 \text{ N.m}$$

Para ruptura dos paraf. c/ escoamento da mesa (formas não circulares)

$$M_{pl2Rd} = 0,25 \Sigma leff,2 t f^2 fy / Gama M_0 \dots \dots \dots : M_{pl2Rd} = 4826,78 \text{ N.m}$$

$$\text{Modo 1 (escoamento completo da mesa)} \dots \dots \dots : F_{1Rd} = 622,74 \text{ kN}$$

$$F_{1Rd} = 4 * M_{pl1Rd} / m$$

$$\text{Modo 2 (ruptura dos paraf. c/ esc. da mesa)} \dots \dots \dots : F_{2Rd} = 408,34 \text{ kN}$$

$$F_{2Rd} = (2M_{pl2Rd} + n \Sigma B t R_d) / (m + n)$$

$$\text{Modo 3 (ruptura dos parafusos)} \dots \dots \dots : F_{3Rd} = 441,00 \text{ kN}$$

$$F_{3Rd} = \Sigma B t R_d$$

$$\text{Resistência} \dots \dots \dots : F_{tRd(2)} = 408,34 \text{ kN}$$

- 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)

$$M_{pl1Rd} = 0,25 \Sigma leff,1 t f^2 fy / Gama M_0 \dots \dots \dots : M_{pl1Rd} = 8692,17 \text{ N.m}$$

Para ruptura dos paraf. c/ escoamento da mesa (formas não circulares)

$$M_{pl2Rd} = 0,25 \Sigma leff,2 t f^2 fy / Gama M_0 \dots \dots \dots : M_{pl2Rd} = 8692,17 \text{ N.m}$$

Modo 1 (escoamento completo da mesa).....:	$F1Rd =$	1327,05 kN
$F1Rd = 4 * Mp11Rd / m$		
Modo 2 (ruptura dos paraf. c/ esc. da mesa).....:	$F2Rd =$	783,65 kN
$F2Rd = (2Mp12Rd + n\Sigma BtRd) / (m + n)$		
Modo 3 (ruptura dos parafusos).....:	$F3Rd =$	882,00 kN
$F3Rd = \Sigma BtRd$		
Resistência.....:	$FtRd(1,2)=$	783,65 kN

Considera-se o l_{eff} como sendo a soma dos menores l_{eff} 's das linhas de parafusos que formam o grupo avaliado, assim, adotando-se a situação mais desfavorável.

A resistência $F_{t,Rd}$ corresponde a menor força capaz de levar o parafuso a ruína.

Rigidez:

- Comprimento efetivo do T-stub equivalente

Linhas de parafusos tomadas individualmente ou como parte de um grupo:

	Linha de parafusos número 1 ("End bolt row").....:	$l_{eff} =$	164,62 mm
(1)	$2P_i m =$	164,62 mm	
	$4 m + 1,25 e =$	194,80 mm	
(1 - 2)	$P_i * m + p =$	238,31 mm	$c / p = 156,00$ mm
	$2m+0,625e+0,5p=$	175,40 mm	
(1 - 3)	$P_i * m + p =$	160,31 mm	$c / p = 78,00$ mm
	$2m+0,625e+0,5p=$	136,40 mm	

O critério de formação dos grupos para avaliação de sua parcela de rigidez, leva em consideração o sentido do momento fletor atuante na viga, pois supondo um momento fletor positivo, a falha iniciada pela linha de parafusos 1 (linha referencial) tende a se propagar para as demais linhas situadas abaixo dela. Por isso, são avaliados os possíveis grupos que possam ser formados a partir da ruína da linha 1 (1-2,1-3,...,1-n). No caso do referencial não estar situado na linha de parafusos mais externa, também será computada como parte dos demais grupos porque não há meio da falha se propagar para a linha imediatamente inferior à linha referencial sem que a linha imediatamente acima não seja afetada através de esforços de tração e cisalhamento.

$$\begin{aligned}
 & \text{Linha de parafusos número 2 ("Inner bolt row")..: } l_{eff} = 164,62 \text{ mm} \\
 (2) \quad & 2P_i m = 164,62 \text{ mm} \\
 & 4 m + 1,25 e = 194,80 \text{ mm} \\
 (2-3-1) \quad & 2 p = 156,00 \text{ mm} \quad c/p = 78,00 \text{ mm} \\
 & p = 78,00
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{Linha de parafusos número 3 ("End bolt row")....: } l_{eff} = 164,62 \text{ mm} \\
 & 2P_i m = 164,62 \text{ mm} \\
 & 4 m + 1,25 e = 194,80 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

(l_{eff} é o menor comprimento efetivo para parafusos tomados individualmente ou em grupo)

- Coeficiente de Rigidez (tab. 6.11)

$$\begin{aligned}
 & \text{Linha de parafusos número 1.....: } k_4(1) = 40,47 \text{ mm} \\
 & \text{Linha de parafusos número 2.....: } k_4(2) = 40,47 \text{ mm} \\
 & \text{Linha de parafusos número 3.....: } k_4(3) = 40,47 \text{ mm} \\
 & (k_4 = 0,90 \cdot b_{eff} \cdot t_{fc}^3 / m^3)
 \end{aligned}$$

A.2.4. Alma da coluna à tração (6.2.6.3)

Resistência:

$$\begin{aligned}
 & \text{Linha de parafusos número.....: } 1 \\
 & \text{Coeficiente de interação de esforço (Tabela 6.3): } \omega_1 = 0,87 \\
 & \omega_1 = 1 / (\text{RAIZ}(1 + 1,3 \cdot (b_{eff} \cdot t_{wc} / A_{vc})^2)) \\
 & \text{Resistência.....: } F_{t,wc,Rd} = 533,27 \text{ kN} \\
 & F_{t,wc,Rd} = (w \cdot b_{eff,t,wc} \cdot t_{wc} \cdot f_{y,wc}) / \text{Gama } M_0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{Linha de parafusos número.....: } 2 \\
 & \text{Coeficiente de interação de esforço (Tabela 6.3): } \omega_1 = 0,87 \\
 & \omega_1 = 1 / (\text{RAIZ}(1 + 1,3 \cdot (b_{eff} \cdot t_{wc} / A_{vc})^2)) \\
 & \text{Resistência.....: } F_{t,wc,Rd} = 533,27 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{Grupo entre linhas de parafusos número.....: } 1 \text{ e } 2 \\
 & \text{Coeficiente de interação de esforço (Tabela J.5): } \omega_1 = 0,64 \\
 & \omega_1 = 1 / (\text{RAIZ}(1 + 1,3 \cdot (b_{eff} \cdot t_{wc} / A_{vc})^2)) \\
 & \text{Resistência.....: } F_{t,wc,Rd} = 834,12 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Rigidez:

$$\begin{aligned}
 & \text{Linha de parafusos número 1.....: } k_3(1) = 7,03 \text{ mm} \\
 & (k_3 = 0,7 \cdot b_{eff,t,wc} \cdot t_{wc} / d_{wc}) \\
 & \text{Linha de parafusos número 2.....: } k_3(2) = 7,03 \text{ mm} \\
 & \text{Linha de parafusos número 3.....: } k_3(3) = 7,03 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

A.2.5. Flexão da placa de extremidade (6.2.6.5)

Parâmetros Geométricos (Figura J.28):

e = distância horizontal entre o parafuso e a borda da placa	=	32,00 mm
m = distância entre o parafuso e o início do raio de curvatura	=	35,85 mm
ex = distância vertical entre o parafuso e a extremidade da placa	=	54,00 mm
mx = distância vertical entre o parafuso e a mesa da viga	=	32,95 mm
w = distância horizontal entre parafusos	=	96,00 mm

Linha de parafusos 2 (abaixo da mesa sup. da viga).....:	m1 =	35,85 mm
	m2 =	23,15 mm

Determinação do coeficiente alpha (Fig J.27).....:	λ_1 =	0,53
$\lambda_1 = m1 / (m1 + e)$	λ_2 =	0,34
$\lambda_2 = m2 / (m2 + e)$	alpha =	5,98

Linha de parafusos 3 (acima da mesa inf. da viga).....:	m1 =	35,85 mm
	m2 =	23,15 mm

Determinação do coeficiente alpha (Fig J.27).....:	λ_1 =	0,53
	λ_2 =	0,34
	alpha =	5,98

Comprimento efetivo do T-stub equivalente (Tabela 6.6):

- Parafusos tomados individualmente

Linha de parafusos número 1 (influência da mesa superior da viga):		
Formas circulares:		
2 Pi mx.....:	leff =	225,25 mm
Formas não-circulares:		
Alpha m1.....:	leff =	214,38 mm

Comprimento efetivo		
Formas circulares	leff =	225,25 mm
Formas não-circulares	leff =	214,38 mm

Linha de parafusos número 2 (influência da mesa superior da viga):		
Formas circulares:		
2 Pi m1.....:	leff =	225,25 mm
Formas não-circulares:		
Alpha m1.....:	leff =	214,38 mm

Linha de parafusos número 3 (influência da mesa inferior da viga):		
Formas circulares:		
2 Pi m1.....:	leff =	225,25 mm
Formas não-circulares:		
Alpha m1.....:	leff =	214,38 mm

- Parafusos tomados em grupo

Grupo entre linhas n.º	Formas Circulares (mm)	Outras formas (mm)
2 e 3	537,25	401,36

Resistência:

- Parafusos tomados individualmente

a) Linha de parafusos número 1

Modo de ruptura no T-stub equivalente (tab. 6.2 - página 64)

Resistência plástica de dimensionamento do T-stub

Para escoamento completo da mesa

$$M_{pl1Rd} = 0,25 \Sigma leff,1 t f^2 fy / \text{Gama } M_0 \dots \dots \dots : M_{pl1Rd} = 4454,97 \text{ N.m}$$

Para ruptura dos paraf. C/ escoamento da mesa

$$M_{pl2Rd} = 0,25 \Sigma leff,2 t f^2 fy / \text{Gama } M_0 \dots \dots \dots : M_{pl2Rd} = 4454,97 \text{ N.m}$$

$$\text{Modo 1 (escoamento completo da mesa)} \dots \dots \dots : F_{1Rd} = 497,08 \text{ kN}$$

$$F_{1Rd} = 4 * M_{pl1Rd} / m_x$$

$$\text{Modo 2 (ruptura dos paraf. c/ esc. da mesa)} \dots \dots \dots : F_{2Rd} = 339,31 \text{ kN}$$

$$F_{2Rd} = (2M_{pl2Rd} + n \Sigma B t R_d) / (m + n)$$

$$\text{Modo 3 (ruptura dos parafusos)} \dots \dots \dots : F_{3Rd} = 441,00 \text{ kN}$$

$$F_{3Rd} = \Sigma B t R_d$$

$$\text{Resistência} \dots \dots \dots : F_{tepRd(1)} = 339,31 \text{ kN}$$

b) Linha de parafusos número 2

Modo de ruptura no T-stub equivalente (tab. 6.2 - página 64)

Resistência plástica de dimensionamento do T-stub

Para escoamento completo da mesa

$$M_{pl1Rd} = 0,25 \Sigma leff,1 t f^2 fy / \text{Gama } M_0 \dots \dots \dots : M_{pl1Rd} = 4454,97 \text{ N.m}$$

Para ruptura dos paraf. C/ escoamento da mesa

$$M_{pl2Rd} = 0,25 \Sigma leff,2 t f^2 fy / \text{Gama } M_0 \dots \dots \dots : M_{pl2Rd} = 4454,97 \text{ N.m}$$

$$\text{Modo 1 (escoamento completo da mesa)} \dots \dots \dots : F_{1Rd} = 497,08 \text{ kN}$$

$$F_{1Rd} = 4 * M_{pl1Rd} / m$$

$$\text{Modo 2 (ruptura dos paraf. c/ esc. da mesa)} \dots \dots \dots : F_{2Rd} = 339,31 \text{ kN}$$

$$F_{2Rd} = (2M_{pl2Rd} + n \Sigma B t R_d) / (m)$$

$$\text{Modo 3 (ruptura dos parafusos)} \dots \dots \dots : F_{3Rd} = 441,00 \text{ kN}$$

$$F_{3Rd} = \Sigma B t R_d$$

$$\text{Resistência} \dots \dots \dots : F_{tepRd(2)} = 339,31 \text{ kN}$$

Rigidez:

- Comprimento efetivo do T-stub equivalente

Linhas de parafusos tomadas individualmente ou como parte de um grupo:

(1)	Linha de parafusos número 1 ("End bolt row")....:	leff =	214,38 mm
	Linha de parafusos número 2	leff =	214,38 mm
(3)	Linha de parafusos número 3 ("End bolt row")....:	leff =	214,38 mm

(leff é o menor comprimento efetivo para parafusos tomados individualmente ou em grupo)

- Coeficiente de Rigidez:

Linha de parafusos número 1.....:	k5(1) =	13,35 mm
Linha de parafusos número 2.....:	k5(2) =	13,35 mm
Linha de parafusos número 3.....:	k5(3) =	13,35 mm

($k_5 = 0,90 \cdot leff \cdot t_p^3 / m^3$)

A.2.6. Parafusos à tração (6.2.6.12)

Comprimento do parafuso.....(J.4.4.10):	Lb =	50,50 mm
Resistência.....(Tabela 6.5.3):	BtRd =	220,50 kN
Coeficiente de rigidez.....(J.42):	k10 =	7,76 mm

($k_{10} = 1,6 \cdot A_s / L_b$)

A.2.7. Mesa da viga à compressão (6.2.6.7)

Para esta componente o Eurocode 3 adota o valor de sua rigidez como sendo igual a infinito, considerando um comportamento rígido-plástico. Em função disso, a rigidez desta componente não é considerada no cálculo da rigidez da linhas de parafusos nas quais atua já que a rigidez equivalente é o inverso do somatório dos inversos das rigidezes de cada componente ativa naquela linha.

Resist. à flexão da seção transversal da viga...:	McRd =	124,83 kN.m
($McRd = W_{pl} \cdot f_y / \text{Gama } M_0$)		
Resistência.....(J.30):	FcfbRd =	542,27 kN
FcfbRd = McRd / (h - tfb)		

A.2.8. Alma da viga à tração (6.2.6.3)

Assim como para componente mesa da viga à compressão, toma-se o valor de sua rigidez igual a infinito, considerando que ambas têm comportamento rígido-plástico.

Linha de parafusos n.º	$F_{twbRd(i)} = b_{eff,twb} \cdot t_{wb} \cdot f_{ywb} / \gamma_{M_0}$
2	483,05 kN

A.3. Associação das componentes (molas) em série e em paralelo

A.3.1. Resistência

Linha de parafusos número 1

Alma da coluna ao corte.....	642,6 kN
Alma da coluna à compressão.....	690,7 kN
Mesa da coluna à flexão.....	408,3 kN
Tração da alma da coluna.....	533,3 kN
Flexão da placa de extremidade.....	339,3 kN
Parafusos à tração.....	441,0 kN
Mesa da viga à compressão.....	542,3 kN
Resistência da linha de parafusos número 1..... $F_{rd(1)}$:	339,3 kN

Linha de parafusos número 2

a) parafusos tomados individualmente

Alma da coluna ao corte.....	303,2 kN
Alma da coluna à compressão.....	351,4 kN
Mesa da coluna à flexão.....	408,3 kN
Tração da alma da coluna.....	533,3 kN
Flexão da placa de extremidade.....	339,3 kN
Parafusos à tração.....	441,0 kN
Mesa da viga à compressão.....	203,0 kN
Alma da viga à tração.....	483,0 kN

b) parafusos tomados como grupo

Mesa da coluna à flexão.....	444,3 kN
Tração da alma da coluna.....	494,8 kN
Resistência da linha de parafusos número 2..... $F_{rd(2)}$:	203,0 kN

Sumário

Resistência da linha de parafusos número 1.....Frd(1):	339,3 kN
Resistência da linha de parafusos número 2.....Frd(2):	203,0 kN
Resistência da linha de parafusos número 3.....Frd(3):	203,0 kN
Braço de alavanca 1.....z1:	193,10 mm
Braço de alavanca 2.....z2:	37,10 mm
Braço de alavanca 3.....z3:	37,10 mm
Resistência à flexão (J.3.6).....MRd: ($MRd = Frd(1)*z1+Frd(2)*z2$)	73,05 kN.m
Resistência à flexão elástica (J.2.1.2).....Me: ($Me = (2/3)*MRd$)	48,70 kN.m

A.3.2. Rigidez Inicial

Determinação do coeficiente de rigidez equivalente

Alma do pilar ao corte.....(k1):	8,43 mm
Alma do pilar à compressão.....(k2):	10,40 mm
Alma do pilar à tração.....(k3,1):	7,03 mm
(k3,2):	7,03 mm
(k3,3):	7,03 mm
Banzo do pilar em flexão.....(k4,1):	40,47 mm
(k4,2):	40,47 mm
(k4,3):	40,47 mm
Placa de extremidade à flexão...(k5,1):	13,35 mm
(k5,2):	13,35 mm
(k5,3):	13,35 mm
Parafusos à tração.....(k10):	7,76 mm
Rigidez efetiva - linha de parafusos 1:	2,70 mm
Rigidez efetiva - linha de parafusos 2:	2,70 mm
Rigidez efetiva - linha de parafusos 3:	2,70 mm
zeqq.....:	149,80 mm
keq (duas linhas em tração).....:	4,81 mm
Sj,ini.....:	11152,2 kN.m/rad
	5576,1 kN.m/rad

A.3.3. Curva momento versus rotação

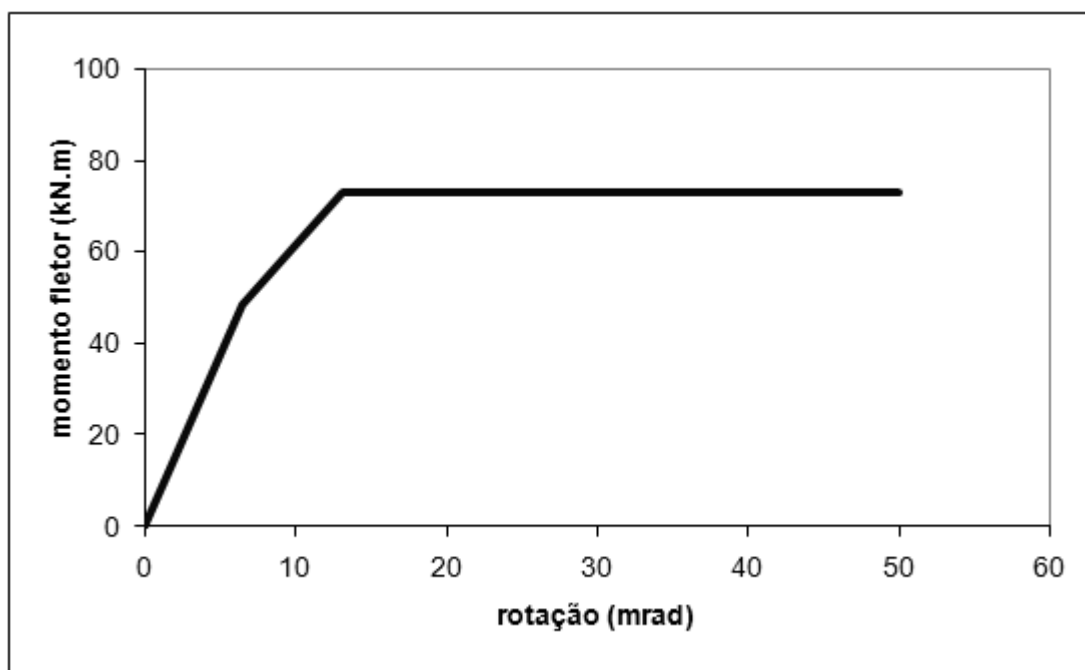


Figura A. 2 – Gráfico Momento versus rotação

A.3.4. Verificação da resistência ao corte

Resistência ao corte de um parafuso (corte na rosca)

$$F_v R_d = 0,6 f_{ub} A_s / \text{Gama } M_b \dots \dots \dots : F_v R_d = 122,50 \text{ kN}$$

$$\text{Dois parafusos} \dots \dots \dots : F_v R_d = 245,00 \text{ kN}$$

Esmagamento do banzo da viga:

$$308,94 \text{ kN}$$

$$e_1 = 54,00 \quad p_1/3d_0 - 0.25 = 2,11$$

$$d_0 = 22,00 \quad f_{ub}/f_u = 2,23$$

$$p_1 = 156,00 \quad \text{ALFA} = 1,00$$

$$F_b R_d = 2,5 \alpha f_u d t / \text{Gama } M_b \dots \dots \dots : F_b R_d = 762,94 \text{ kN}$$

Esmagamento da placa de extremidade:

(1ª linha de parafusos)

$$e_1 = 54,00 \quad e_1/3d_0 = 0,82$$

$$d_0 = 22,00 \quad p_1/3d_0 - 0.25 = 2,11$$

$$p_1 = 156,00 \quad f_{ub}/f_u = 1,99$$

$$\text{ALFA} = 0,82$$

$$F_b R_d = 2,5 \alpha f_u d t / \text{Gama } M_b \dots \dots \dots : F_b R_d = 617,87 \text{ kN}$$

(outra linha de parafusos)

d0	=	22,00	p1/3d0-0.25	=	-0,25
p1	=	0,00	fub/fu	=	1,99
			ALFA	=	-0,25

$$FbRd = 2,5 \alpha fu d t / \text{Gama } M_b \dots\dots\dots: FbRd = -188,79 \text{ kN}$$

A resistência ao corte de uma linha de parafusos não deve exceder (0,4/1,4) vezes a resistência ao corte dos parafusos que também estão resistindo à tração (J.3.1.2.2b)

Resistência ao corte da linha de parafuso 1.....:	VRd	=	70,00 kN
Resistência ao corte da linha de parafuso 2.....:	VRd	=	70,00
Resistência ao corte da linha de parafuso 3.....:	VRd	=	0,00 kN

Resistência ao corte da soldadura:

$$\text{fator de correlação} \dots\dots\dots: \beta_w = 0,91$$

$$\beta_w = 0,8 \text{ (p/ aço S275)}$$

$$\beta_w = 0,9 \text{ (p/ aço S355)}$$

(obs.: para valores intermediários, interpola-se)

$$\text{comprimento da soldadura} \dots\dots\dots: d = 190,40 \text{ mm}$$

$$Fw.Rd = (fu / \text{RAIZ}(3)) * d / (\beta_w * \text{Gama } M_w) \dots\dots\dots: Fw.Rd = 695,39 \text{ kN}$$

$$\text{Resistência ao corte da Ligação} \dots\dots\dots: VRd = 140,00 \text{ kN}$$

A.3.5. Resultados

Momento resistente da Ligação.....:	Mj.Rd	=	73,05 kN.m
Rigidez inicial da ligação.....:	Sji	=	11152,17 kN.m/rad
Rigidez idealizada da ligação.....:	Sjn	=	5576,09 kN.m/rad
Resistência ao corte da ligação.....:	VRd	=	140,00 kN