



Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Escola de Minas - EM
Departamento de Engenharia Civil - DECIV
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil



ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE LIGAÇÕES SOLDADAS NA DIREÇÃO DE MENOR INÉRCIA DO PILAR

ROBERTA MARIA MACHADO
ORIENTADOR: PROF. DR. LUIZ FERNANDO LOUREIRO RIBEIRO
CO ORIENTADORA: PROF^a DR^a ARLENE SARMANHO FREITAS

Ouro Preto, fevereiro de 2013.

M149a Machado, Roberta Maria.
Análise numérica e experimental de ligações soldadas na direção de menor inércia do pilar [manuscrito] / Roberta Maria Machado. - 2013. xxviii, 211f.: il.; grafs.; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Loureiro Ribeiro.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil.
Área de concentração: Construção Metálica.

1. Estruturas metálicas - Teses. 2. Ligações metálicas - Teses. 3. Ligações soldadas - Teses. 4. Análise numérica - Teses. 5. Método dos elementos finitos - Teses. I. Ribeiro, Luiz Fernando Loureiro. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

Catlogação: sisbin@sisbin.ufop.br

Dedico este trabalho ao meu
companheiro Neymar e minhas filhas
Fernanda e Renata.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Luiz Fernando Loureiro Ribeiro pelos ensinamentos, assistência, pela sempre agradável convivência, pela compreensão dos momentos difíceis atravessados, e pelo apoio recebido por ele durante todos esses anos trabalhando juntos, contribuindo assim com o meu amadurecimento pessoal e profissional, como engenheira e pesquisadora.

À minha Co-orientadora Profa Arlene Maria Sarmanho Freitas, pela contribuição e pela orientação com relação aos trabalhos desenvolvidos no laboratório de estruturas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Aos meus sempre queridos pais, que mesmo ausentes continuam em meus mais lindos pensamentos de amor, me incentivando e mostrando que sempre devemos seguir em frente, batalhando pelo que se acha certo, mas sempre com muita ética e respeito ao próximo.

Ao meu grande amor, Neymar que me dedica um apoio sem limites, sempre ao meu lado, me incentivando a procurar um crescimento.

Às minhas filhas Fernanda e Renata, por esse amor tão grande e incondicional, que me motiva a cada instante de minha vida.

À todos de minha família que sempre estão ao meu lado, me apoiando sempre, seja qual for a empreitada. Mas em especial à minha irmã Raquel, que mesmo atravessando por fases difíceis em sua vida, nunca deixou de me ouvir e participar de todo o processo do meu doutorado.

À minha amiga Profa Andrea Regina Dias da Silva, pela amizade, constante apoio e disponibilidade durante todas as etapas da realização deste trabalho.

Ao Prof Walter Dornelas, mesmo ausente, pela constante orientação e apoio no início da jornada deste trabalho.

Aos meus amigos de laboratório Sylvia Letícia, Ana Amélia, Gabriel, Juliano e Flávio, pelos diversos cafezinhos, pela amizade e apoio durante a realização de meus ensaios e modelagens.

Aos funcionários do Laboratório de estruturas da Universidade Federal de Ouro Preto, João, Dequinha e Sr. Oswaldo, pelo empenho na montagem dos ensaios e pela amizade sempre presente durante nosso tempo de convívio.

Ao meu companheiro de pesquisa Michael, pelos ensinamentos e apoio no início de meus trabalhos de doutorado.

A todos os professores do PROPEC, pelos ensinamentos e disponibilidade durante o processo do doutorado.

À Róvia, pela disponibilidade e atenção com relação aos serviços de secretaria e também pelo carinho e amizade.

À SEPRES engenharia, em especial ao engenheiro Cláudio, pela ajuda na adequação dos protótipos ensaiados.

À Prefeitura do Campus da UFOP, por ter disponibilizado pessoal para montagem das barras estabilizadoras dos pórticos no laboratório, em especial ao Peninha.

Ao Professor Ricardo Azoubel, pelo apoio e ajuda na ativação da licença do programa TrueGrid.

À empresa FRAME engenharia, em especial ao engenheiro Alessandro pela ajuda prestada durante a execução dos ensaios.

Ao programa REUNI e CAPES pela ajuda financeira.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento da análise numérico-experimental relativa ao comportamento estrutural de ligações soldadas viga-pilar na direção do eixo de menor inércia do pilar. O modelo estudado consiste de uma viga (perfil laminado W360x44) soldada em balanço à alma do pilar, cujas dimensões dos perfis variam de acordo com o índice de esbeltez da alma do mesmo. A análise numérica foi executada via método dos Elementos Finitos. Visando obter resultados mais próximos do comportamento real da ligação, foram utilizados modelos tridimensionais. Todos os modelos numéricos foram analisados com o software *Ansys 11.0* utilizando-se ainda o software *TrueGrid*, específico para pré-processamento. A análise experimental foi desenvolvida por meio de ensaios de 7 (sete) protótipos, com configurações idênticas às de alguns modelos selecionados entre os estudados numericamente. Os resultados obtidos nos dois tipos de análise foram comparados e também confrontados com os previstos por modelos analíticos referentes à capacidade resistente da alma do pilar e à rigidez inicial da ligação. Tais comparações permitiram avaliar a influência de alguns fatores tais como a esbeltez da alma do pilar e outras propriedades geométricas da seção transversal do pilar, limitando-se as conclusões obtidas à configuração adotada (viga em balanço e sem variação da seção transversal).

Palavras chaves: Ligações soldadas, ligações no eixo de menor inércia do pilar, Análise numérica, Análise experimental

ABSTRACT

This work presents the development of a numerical and experimental analysis on the structural behavior of minor axis beam to column welded connections. The model studied consists of a hot rolled (W360x44) welded to the column web, whose profile was varied according to the slenderness ratio of the web column. The 3-D numerical analysis was performed by finite element method, in order to obtain results closer to the actual connection behavior. All numerical models were analyzed using the Ansys 11.0 software and the pre-processor TrueGrid. It was used the "Solid-45" element, with 8 nodes, each one with free translation in the X, Y and Z axis, also presenting plasticity characteristics and allowing the of a multilinear stress-strain diagram of the material. The experimental analysis was performed by test of 7 (seven) prototypes with identical geometric configurations of some of the numerical models studied. The results obtained in both analysis was compared, inclusive with results obtained by analytical models for web column resistant capacity and initial stiffness connection. This comparisons allowed the evaluation of some factors influence, as web column slenderness and others cross section column properties, with conclusions limited to the type of configuration adopted for the studied model with no beam cross section variation.

Keywords: Welded connections, minor axis beam to column welded connections, numerical analysis, experimental analysis

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	XIII
LISTA DE TABELAS	XXVII
LISTA DE SÍMBOLOS	XXIX
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - Introdução	1
1.2 - Objetivos	3
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
2.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	6
2.2 – Modelo de GOMES (1990)	9
2.2.1 - Colapso Local.....	12
2.2.1.1 - Mecanismo de flexão	12
2.2.1.2 - Mecanismo de Puncionamento.....	13
2.2.1.3 - Mecanismo de Flexão e Puncionamento Combinados:.....	13
2.2.2 - Colapso Global.....	15
2.3 - Modelo de Blodgett (1982)/Lima (1999).....	16
2.3 – Modelo de Neves (1996, 2004)	19
2.3.1 - Rigidez Inicial do Componente.....	19
2.3.2 - Dedução da rigidez inicial do nó para o caso de uma linha de parafusos tracionados.....	21
2.4 - Verificação da capacidade resistente da viga e da solda.....	24
CAPÍTULO 3 - ANÁLISE NUMÉRICA	
3.1 – Introdução.....	25
3.2 – Critérios utilizados na análise numérica.....	26
3.3 – Não Linearidade Física.....	26
3.4 - Perfis Utilizados	28
3.5 – Preparação dos Modelos Numéricos	28
3.6 - Ferramentas auxiliares para a modelagem	29

3.7 – Montagem da geometria dos modelos	29
3.7.1 - Escolha dos Modelos.....	29
3.7.2 - Características Geométricas dos Modelos	30
3.7.3 - Escolha dos tipos de elementos finitos a serem utilizados.....	31
3.7.3.1 - Elemento volumétrico	31
3.7.3.2 - Elemento de Barra.....	32
3.7.4- Definição das características dos materiais envolvidos	33
3.7.5 - Preparação da malha de elementos finitos na geometria.....	33
3.7.6 - Definição das condições de contorno do modelo.....	35
3.7.7 - Aplicação do carregamento	36
3.8 - Apresentação dos Resultados Numéricos	37
3.8.1 - Aspectos Gerais.....	37
3.8.2 - Modelo BIE2.....	37
3.8.2.1 - Curva Momento x Rotação	38
3.8.2.2 – Tensões de Von Mises.....	40
3.8.2.3 - Deslocamentos da alma do pilar.....	42
3.8.3 - Modelo MIE2	44
3.8.3.1- Curva Momento x Rotação	45
3.8.3.2– Tensões de Von Mises.....	46
3.8.3.3 - Deslocamentos da alma do pilar.....	48
3.8.4- Modelo AIE5.....	49
3.8.4.1- Curva Momento x Rotação	50
3.8.4.2– Tensões de Von Mises.....	50
3.8.4.3- Deslocamentos da alma do pilar.....	52
3.9 - Discussões dos Resultados Numéricos	54
3.9.1 - Modelos com Pilares de Baixa Esbeltez da Alma (Classe 1).....	57
3.9.2 - Modelos com Pilares de Média Esbeltez da Alma (Classe 2).....	60
3.9.3 - Modelos com Pilares de Alta Esbeltez da Alma (Classe 3).....	64
3.10 - Outras Considerações sobre os Resultados da Análise Numérica	69
CAPÍTULO 4 - ANÁLISE EXPERIMENTAL	
4.1 - Introdução	71
4.2 - Montagem dos Ensaios	73
4.3 - Sistema de Aplicação do Carregamento.....	74

4.4 - Instrumentação	76
4.4.1 - Medição de deslocamentos	76
4.4.2 - Medição de deformações específicas	80
4.4.3 - Aquisição de dados	81
4.4.4 - Montagem da barra de estabilização do pórtico PR1	82
4.5 - Apresentação dos Resultados Experimentais	82
4.5.1 – Considerações iniciais	82
4.5.2 - Protótipos AIE5	83
4.5.2.1 - Deslocamentos da Viga e da Alma do Pilar	85
4.5.2.2 – Momento x Rotação	91
4.5.2.3 – Solicitações nas mesas da viga	93
4.5.2.4 – Tensões na alma da viga	96
4.5.2.5 – Tensões na Alma do Pilar	97
4.5.3 - Protótipo MIE6	101
4.5.3.1 - Deslocamentos da Viga e da Alma do Pilar	103
4.5.3.2 – Momento x Rotação	108
4.5.3.3 – Solicitações nas mesas da viga	109
4.5.3.4 - Tensões na alma da viga	111
4.5.3.5 – Tensões na Alma do Pilar	112
4.5.4 - Protótipo MIE2	115
4.5.4.1 - Deslocamentos da Viga e da Alma do Pilar	117
4.5.4.2 – Momento x Rotação	121
4.5.4.3 – Solicitações nas mesas da viga	124
4.5.4.4 - Tensões na alma da viga	126
4.5.4.5 – Tensões na Alma do Pilar	127
4.5.5 - Protótipo BIE2	130
4.5.5.1 - Deslocamentos da Viga e da Alma do Pilar dos Protótipos AIE5	132
4.5.5.2 – Momento x Rotação	134
4.5.5.3 – Solicitações nas mesas da viga	136
4.5.5.4 – Tensões na alma da viga	137
4.5.5.5 – Tensões na Alma do Pilar	138

**CAPÍTULO 5 - VALORES TEÓRICOS E RESULTADOS NUMÉRICOS:
COMPARAÇÕES**

5.1 - Apresentação e Análise dos Valores Teóricos da Carga Crítica e da Rigidez Inicial	141
5.2 - Comparações entre Valores Teóricos e Resultados da Análise Numérica.....	154
5.2.1 – Considerações Iniciais	154
5.2.2 - Capacidade Resistente da Alma do Pilar.....	157
5.2.3 – Rigidez Inicial e Comportamento Momento - Rotação.....	163

CAPÍTULO 6 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS NUMÉRICOS: COMPARAÇÕES

6.1 – Considerações Iniciais	169
6.2 – Modelo AIE5	169
6.2.1 - Deslocamentos da Viga.....	169
6.2.2 – Deslocamentos da Alma do Pilar.....	170
6.2.3 – Momento x Rotação.....	171
6.2.4 – Solicitações nas mesas da viga	172
6.2.5.– Tensões na alma da viga.....	173
6.2.6.– Tensões na Alma do Pilar	174
6.3 – Modelo MIE2	176
6.3.1 - Deslocamentos da Viga e da Alma do Pilar	176
6.3.2 - Deslocamentos da Alma do Pilar	177
6.3.3 - Momento x Rotação	178
6.3.4 - Solicitações nas mesas da viga.....	179
6.3.5 – Tensões na alma da viga.....	180
6.3.6 – Tensões na Alma do Pilar.....	182
6.4 – Modelo MIE6	183
6.4.1 - Deslocamentos da Viga e da Alma do Pilar	183
6.4.2– Deslocamentos da Alma do Pilar.....	184
6.4.3 – Momento x Rotação.....	185
6.4.4 – Solicitações nas mesas da viga	186
6.4.5.– Tensões na alma da viga.....	187
6.4.6 – Tensões na Alma do Pilar.....	188
6.5 – Modelo BIE2	189
6.5.1 - Deslocamentos da Viga e da Alma do Pilar	189
6.5.2 – Deslocamentos da Alma do Pilar.....	190

6.5.3 – Momento x Rotação.....	191
6.5.4 – Solicitações nas mesas da viga	192
6.5.5.– Tensões na alma da viga.....	192
6.5.6 – Tensões na Alma do Pilar.....	193
6.6 - Considerações Adicionais	195
CAPÍTULO 7 - VALORES TEÓRICOS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS:	
COMPARAÇÕES	
7.1 – Rigidez Inicial	196
7.2 - Deslocamentos da extremidade das vigas	199
7.3 – Tensões na alma do pilar	200
CONCLUSÕES	204
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	207

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Figura 2.1 - Ligação completamente soldada.....	7
Figura 2.2 – Detalhe da ligação de GOMES(1990) para o eixo de menor inércia.....	10
Figura 2.3 – Mecanismos na alma da coluna segundo GOMES(1990)	10
Figura 2.4- Mecanismo Local.....	11
Figura 2.5 – Mecanismo local com indicação de charneira plástica	11
Figura 2.6: Zonas de tração e compressão de uma ligação parafusada.	12
Figura 2.7: Cabeça do parafuso ou da porca.	12
Figura 2.8 – Ruptura por flexão e puncionamento combinados.....	14
Figura 2.9 - Modelo de deformação da alma da coluna	16
Figura 2.10 - Projeção da deformada da alma da coluna - Fonte: Lima (1999).....	17
Figura 2.11 - Modelo de deformação da alma da coluna para duas linhas de parafusos	18
Figura 2.12- Características geométricas na direção do eixo de menor inércia do pilar	20
Figura 2.13 - Componente carregada por uma zona rígida de dimensões $b \times c$, e faixa equivalente de largura I_{eff}	20
Figura 2.14 - Modelo para obtenção das curvas $M - \phi$ para a ligação com uma linha de parafusos tracionados, a partir das leis $F - \delta$	22

CAPÍTULO 3 - ANÁLISE NUMÉRICA

Figura 3.1 – Representação dos diagramas tensão - deformação utilizados	27
Figura 3.2 – Propriedades geométricas da seção transversal escolhida para a viga dos modelos numéricos (perfil W360x44).....	30
Figura 3.3 - Geometria esquemática do pilar	30
Figura 3.4 - Elemento SOLID45 - Fonte: ANSYS Help System Release 11.0.....	32
Figura 3.5 - Elemento BEAM3 - Fonte: ANSYS Help System Release 11.0.....	33
Figura 3.6 - Malha de elementos finitos	35
Figura 3.7 – Acoplamento dos nós na seção de interseção Beam-Solid	35
Figura 3.8 - Vinculação das extremidades do pilar nas três direções.....	36
Figura 3.9 - Carregamento aplicado na extremidade livre do elemento Beam	36

Figura 3.10 – Visão geral do modelo BIE2	38
Figura 3.11: Determinação das rotações: alma e ligação.	39
Figura 3.12 – Curva momentox rotação do modelo BIE2.....	39
Figura 3.13 – Distribuição de Tensões de Von Mises (kN/cm^2) na alma do pilar (Modelo BIE2).....	40
Figura 3.14 – Tensões de Von Mises (kN/cm^2) na mesa superior da viga (Modelo BIE2)	41
Figura 3.15 – Tensões de Von Mises (kN/cm^2) na mesa inferior da viga (Modelo BIE2)	41
Figura 3.16 – Representação qualitativa dos deslocamentos da alma do pilar, na direção X, nas linhas correspondentes aos planos médios das mesas da viga (Modelo BIE2 - Carga = 175,63kN)	42
Figura 3.17 – Deslocamentos da alma do pilar, na direção X, nas linhas correspondentes aos planos médios das mesas da viga (Modelo BIE2 - Carga = 175,63kN)	43
Figura 3.18 – Representação qualitativa dos deslocamentos da alma do pilar, na direção X, ao longo de linhas paralelas ao eixo do pilar (Modelo BIE2 - Carga = 175,63kN). .	43
Figura 3.19 – Deslocamentos da alma do pilar, na direção X, ao longo de linhas paralelas ao eixo do pilar (Modelo BIE2 - Carga = 175,63kN)	44
Figura 3.20 – Visão geral do modelo MIE2	45
Figura 3.21– Curva momentox rotação do modelo MIE2.....	45
Figura 3.22– Distribuição de Tensões de Von Mises (kN/cm^2) na alma do pilar (Modelo MIE2)	46
Figura 3.23 – Tensões de Von Mises (kN/cm^2) na mesa superior da viga (Modelo MIE2)	47
Figura 3.24 – Tensões de Von Mises (kN/cm^2) na mesa inferior da viga (Modelo MIE2)	47
Figura 3.25 – Deslocamentos da alma do pilar, na direção X, nas linhas correspondentes aos planos médios das mesas da viga (Modelo MIE2 - Carga = 178,09kN).....	48
Figura 3.26 – Deslocamentos da alma do pilar, na direção X, ao longo de linhas paralelas ao eixo do pilar (Modelo MIE2 - Carga = 178,09kN)	49
Figura 3.27 – Visão geral do modelo AIE5.....	50
Figura 3.28 – Curva momentox rotação do modelo AIE5	50
Figura 3.29– Distribuição de Tensões de Von Mises (kN/cm^2) na alma do pilar (Modelo AIE5)	51

Figura 3.30 – Tensões de Von Mises (kN/cm^2) na mesa superior da viga (Modelo AIE5)	51
Figura 3.31 – Tensões de Von Mises (kN/cm^2) na mesa inferior da viga (Modelo AIE5)	52
Figura 3.32 – Deslocamentos da alma do pilar, na direção X, nas linhas correspondentes aos planos médios das mesas da viga (Modelo AIE5 - Carga = 89,03kN)	53
Figura 3.33 – Deslocamentos da alma do pilar, na direção X, ao longo de paralelas ao eixo do pilar (Modelo AIE5 - Carga = 89,03kN)	53
Figura 3.34 - Variação da força última da análise numérica em função da esbeltez.....	56
Figura 3.35- Variação da força última da análise numérica em função da esbeltez_(Sem modelos MIE6, AIE7 e AIE8 - Correlação linear).....	57
Figura 3.36 - Variação da força última da análise numérica em função da esbeltez (Sem modelos MIE6, AIE7 e AIE8 - Correlação polinomial de 4ª ordem).....	57
Figura 3.37 - Curvas momento-rotação dos modelos da Classe 1.....	59
Figura 3.38 - Momento na Ligação x Esbeltez da Alma do Pilar (Modelos da classe 1)	59
Figura 3.39 - Rigidez Inicial x Esbeltez da Alma do Pilar (Modelos da classe 1).....	59
Figura 3.40 - Rigidez Inicial x Menor Inércia/Esbeltez (Modelos da classe 1).....	60
Figura 3.41- Rigidez Inicial x Largura da Mesa do Pilar/Esbeltez (Modelos da classe 1)	60
Figura 3.42 - Momento na Ligação x Esbeltez da Alma do Pilar (Modelos da classe 2)	62
Figura 3.43 - Rigidez Inicial x Esbeltez da Alma do Pilar (Modelos da classe 2).....	62
Figura 3.44 - Rigidez Inicial x Menor Inércia/Esbeltez (Modelos da classe 2).....	62
Figura 3.45- Rigidez Inicial x Largura da Mesa do Pilar/Esbeltez (Modelos da classe 2)	63
Figura 3.46 - Correlação de 3ª Ordem entre Rigidez Inicial x Menor Inércia/Esbeltez (Modelos da classe 2, exceto MIE2).....	63
Figura 3.47 - Correlação de 3ª Ordem entre Rigidez Inicial x Largura da Mesa/Esbeltez (Modelos da classe 2, exceto MIE2).....	64
Figura 3.48 - Rigidez Inicial x Esbeltez da Alma do Pilar (Modelos da classe 3).....	65
Figura 3.49 - Momento na Ligação x Esbeltez da Alma do Pilar (Modelos da classe 3)	66
Figura 3.50 - Rigidez Inicial x Menor Inércia/Esbeltez (Modelos da classe 3).....	66

Figura 3.51 - Rigidez Inicial x Largura da Mesa do Pilar/Esbeltez (Modelos da classe 3)	66
Figura 3.52 - Correlação de 2ª Ordem entre Rigidez Inicial x Menor Inércia/Esbeltez (Modelos da classe 3, exceto AIE7)	67
Figura 3.53 - Correlação de 2ª Ordem entre Rigidez Inicial x Largura da Mesa/Esbeltez (Modelos da classe 3, exceto AIE7)	67
Figura 3.54 - Variação da Rigidez Inicial x Variação de Iz/Esbeltez (Comparações: AIE4 - AIE5, AIE3 - AIE4 e AIE3 - AIE5)	68
Figura 3.55- Rigidez Inicial x Esbeltez (Modelos das Classes 1, 2 e 3)	69
Figura 3.56 - Correlação de 2ª Ordem entre Rigidez Inicial x Menor Inércia/Esbeltez (Modelos das classes 1, 2 e 3, exceto MIE6)	70
Figura 3.57 - Correlação de 3ª Ordem entre Rigidez Inicial x largura da mesa/Esbeltez (Modelos das classes 1, 2 e 3, exceto MIE6)	70

CAPÍTULO 4 - ANÁLISE EXPERIMENTAL

Figura 4.1 – Seções transversais dos pilares e da viga dos protótipos ensaiados	72
Figura 4.2 – Configuração Geral dos Protótipos	73
Figura 4.4 – Aparelho de apoio superior	74
Figura 4.5 – Aparelho de apoio inferior	74
Figura 4.6 – Sistema de Aplicação de Carga	75
Figura 4.7 – Representação esquemática geral da montagem dos ensaios	76
Figura 4.8 - Esquema Geral do Ensaio	76
Figura 4.9 – Defletômetro 1	77
Figura 4.10 - Defletômetros 2 e 3	77
Figura 4.11 - Defletômetro 4	78
Figura 4.12 – Posição dos LVDT's 5, 6, 7 e 8 na parte posterior da alma do pilar	78
Figura 4.13 - Posição dos LVDT's 1, 2, 3 na parte inferior da viga	79
Figura 4.14 – Posição do LVDT 4, na mesa superior da viga	79
Figura 4.15 - Posição dos LVDT's e defletômetros utilizados nos ensaios	80
Figura 4.16 – Extensômetro e Roseta	80
Figura 4.17 – Posicionamento dos extensômetros e rosetas	81
Figura 4.18 – Sistema automático de aquisição de dados “Spider 8”	81
Figura 4.19 – Sistema de estabilização do pórtico PR1	82

Figura 4.20 – Deformação das mesas do pilar – Protótipo AIE5a	84
Figura 4.21 – Barras estabilizadoras do pórtico PR2	84
Figura 4.22 – Deformação das mesas do pilar do protótipo AIE5b	85
Figura 4.23 - Deslocamento finais das vigas dos protótipos AIE5a (i) e AIE5b (ii).....	85
Figura 4.24 – Deslocamentos verticais das vigas dos protótipos AIE5 (cargas de 9,67kN e 9,64kN)	86
Figura 4.25 – Comportamento das vigas dos protótipos AIE5 (cargas de 13,70kN e 13,62kN).....	86
Figura 4.26 – Comportamento das vigas dos protótipos AIE5 (cargas de 21,41kN e 21,45kN).....	87
Figura 4.27 – Comportamento das vigas dos protótipos AIE5 (cargas de 28,33kN e 28,55kN).....	87
Figura 4.28 – Comportamento das vigas do protótipo AIE5b (cargas de 37,68 E 46,38kN).....	88
Figura 4.29 – Deslocamentos da alma do pilar dos protótipos AIE5a (i) e AIE5b (ii) ..	88
Figura 4.30 – Deslocamentos das almas dos pilares (cargas de 9,67kN e 9,64kN)	89
Figura 4.31– Deslocamentos das almas dos pilares (cargas de 13,70kN e 13,62kN)	89
Figura 4.32 – Deslocamentos das almas dos pilares (cargas de 21,41kN e 21,45kN) ...	89
Figura 4.33 – Deslocamentos das almas dos pilares (cargas de 28,33kN e 28,55kN) ...	90
Figura 4.34 – Deslocamento da alma do pilar do protótipo AIE5b (carga de 37,68kN e 46,38kN).....	90
Figura 4.35 – Momento x Rotação – Alma do Pilar e Viga – Protótipos AIE5a	91
Figura 4.36 – Momento x Rotação – Alma do Pilar e Viga – Protótipos AIE5b	92
Figura 4.37 – Comportamento Momento x Rotação da Alma do Pilar dos protótipos AIE5a e AIE5b	92
Figura 4.38 – Comportamento Momento x Rotação da Alma do Pilar dos protótipos AIE5a e AIE5b	93
Figura 4.39 –Variação das forças de tração e compressão transmitidas pelas mesas da viga em função do momento na ligação (Protótipos AIE5a).....	94
Figura 4.40 –Variação das forças de tração e compressão transmitidas pelas mesas da viga em função do momento na ligação (Protótipos AIE5b)	94
Figura 4.41 – Variação da relação entre os valores experimentais e teóricos das forças transmitidas pelas mesas da viga (Protótipos AIE5ab)	95

Figura 4.42 –Variação da relação entre os valores experimentais e teóricos das forças transmitidas pelas mesas da viga (Protótipos AIE5b)	95
Figura 4.43 – Extensômetros posicionados na alma da viga dos protótipos ensaiados	
Figura 4.44 – Variação das tensões na alma da viga (Protótipo AIE5a).....	97
Figura 4.45– Variação das tensões na alma da viga (Protótipo AIE5b).....	97
Figura 4.46 – Rosetas 1 e 2 instaladas na alma do pilar, acima da mesa tracionada da viga	98
Figura 4.47 – Roseta 3 posicionada na alma do pilar, abaixo da mesa comprimida da viga	98
Figura 4.48 – Distribuições de tensões verticais na alma do pilar dos protótipos AIE5a e AIE5b (Rosetas 1 e 2)	99
Figura 4.49 – Distribuições de tensões horizontais na alma do pilar dos protótipos AIE5a e AIE5b (Rosetas 1 e 2)	99
Figura 4.50 – Distribuições de tensões de Von Mises na alma do pilar dos protótipos AIE5a e AIE5b (Rosetas 1 e 2)	100
Figura 4.51 – Distribuições de tensões verticais na alma do pilar dos protótipos AIE5a e AIE5b (Roseta 3)	100
Figura 4.52– Distribuições de tensões horizontais na alma do pilar dos protótipos AIE5a e AIE5b (Roseta 3)	101
Figura 4.53 – Distribuições de tensões de Von Mises na alma do pilar dos protótipos AIE5a e AIE5b (Roseta 3).....	101
Figura 4.54 – Rompimento da solda no protótipo MIE6a.....	102
Figura 4.55 – Deformação das mesas do protótipo MIE6a	103
Figura 4.56 – Deformação das mesas do protótipo MIE6b	103
Figura 4.57 – Deformação final da viga do protótipo MIE6a	104
Figura 4.58– Deformação final da viga do protótipo MIE6b	104
Figura 4.59 – Comportamento das vigas dos protótipos MIE6 (Cargas: 9,02kN e 9,20kN).....	104
Figura 4.60– Comportamento das vigas dos protótipos MIE6 (Cargas: 18,04kN e 18,01kN).....	105
Figura 4.61 – Comportamento das vigas dos protótipos MIE6 (Cargas: 30,11kN e 30,18kN).....	105
Figura 4.62 – Comportamento das vigas dos protótipos MIE6a (carga de 59,53kN) e MIE6b (Cargas: 59,93kN e 63,88kN)	105

Figura 4.63– Deslocamentos das almas dos pilares para cargas de 9,86kN (MIE6a) e 10,07kN (MIE6b)	106
Figura 4.64 – Deslocamentos das almas dos pilares para cargas de 25,80kN (MIE6a) e 25,98kN (MIE6b)	106
Figura 4.65– Deslocamentos das almas dos pilares para cargas de 41,74kN (MIE6a) e 41,96kN (MIE6b)	106
Figura 4.66 – Deslocamentos das almas dos pilares para cargas de 59,53kN (MIE6a), 59,93kN e 63,88kN (MIE6b).....	107
Figura 4.67 – Momento x Rotação – Alma do Pilar e Viga – Protótipo MIE6a.....	108
Figura 4.68 – Momento x Rotação – Alma do Pilar e Viga – Protótipo MIE6b.....	108
Figura 4.69 – Momento x Rotação – Alma do Pilar - Protótipos MIE6a e MIE6b.....	109
Figura 4.70 – Momento x Rotação – Viga – Protótipos MIE6a e MIE6b.....	109
Figura 4.71 –Variação das forças de tração e compressão transmitidas pelas mesas da viga em função do momento na ligação (Protótipo MIE6a)	110
Figura 4.72 –Variação das forças de tração e compressão transmitidas pelas mesas da viga em função do momento na ligação (Protótipo MIE6b)	110
Figura 4.73 –Variação das forças de tração e compressão transmitidas pelas mesas da viga em função do momento na ligação (Protótipos MIE6a e MIE6b).....	111
Figura 4.74 – Distribuições de tensões na alma da viga do protótipo MIE6a.....	111
Figura 4.75 – Distribuições de tensões na alma da viga do protótipo MIE6b.....	112
Figura 4.76 – Distribuições de tensões verticais na alma da viga dos protótipos MIE6a e MIE6b (Rosetas 1 e 2)	112
Figura 4.77 – Distribuições de tensões horizontais na alma da viga dos protótipos MIE6a e MIE6b (Rosetas 1 e 2)	113
Figura 4.78 – Distribuições de tensões de Von Mises na alma da viga dos protótipos MIE6a e MIE6b (Rosetas 1 e 2)	114
Figura 4.79 – Distribuições de tensões verticais na alma da viga dos protótipos MIE6a e MIE6b (Roseta 3)	114
Figura 4.81 – Distribuições de tensões de Von Mises na alma da viga dos protótipos MIE6a e MIE6b (Roseta 3)	115
Figura 4.82– Rompimento da solda no protótipo MIE2a.....	116
Figura 4.83 – Deslocamento da base do pórtico de reação principal no ensaio MIE2b	116
Figura 4.84 – Deformação final da viga do protótipo MIE2a	117

Figura 4.85 – Detalhe do deslocamento vertical final de extremidade da viga do protótipo MIE2b	117
Figura 4.86 – Comportamento das vigas dos protótipos MIE2 (cargas de 8,99kN e 9,02kN).....	118
Figura 4.87 – Comportamento das vigas dos protótipos MIE2 (cargas de 35,98kN e 35,94,01kN).....	118
Figura 4.88 – Comportamento das vigas dos protótipos MIE2 (cargas de 47,97kN e 47,86kN).....	118
Figura 4.89 – Comportamento das vigas dos protótipos MIE2a (cargas de 64,02kN, 76,10kN e 87,87kN) e MIE2b (carga de 63,99kN)	119
Figura 4.90– Deslocamentos das almas dos pilares para cargas de 8,99kN (MIE2a) e 9,02kN (MIE2b)	119
Figura 4.91– Deslocamentos das almas dos pilares para cargas de 35,98kN (MIE2a) e 35,94kN (MIE2b)	120
Figura 4.92 – Deslocamentos das almas dos pilares para cargas de 47,97kN (MIE2a) e 47,86kN (MIE2b)	120
Figura 4.93 – Comportamento das vigas dos protótipos MIE2a (cargas de 64,02kN, 76,10kN e 87,87kN) e MIE2b (carga de 63,99kN)	120
Figura 4.94 – Momento x Rotação – Alma do Pilar e Viga – Protótipo MIE2a.....	122
Figura 4.95– Momento x Rotação – Alma do Pilar e Viga – Protótipo MIE2b.....	123
Figura 4.96 – Momento x Rotação – Alma do Pilar - Protótipos MIE2a e MIE2b.....	123
Figura 4.97– Momento x Rotação – Viga - Protótipos MIE2a e MIE2b	123
Figura 4.98 –Variação das forças de tração e compressão transmitidas pelas mesas da viga em função do momento na ligação (Protótipo MIE2a)	125
Figura 4.99 –Variação das forças de tração e compressão transmitidas pelas mesas da viga em função do momento na ligação (Protótipo MIE2b)	125
Figura 4.100 – Variação das forças de tração e compressão transmitidas pelas mesas da viga em função do momento na ligação (Protótipos MIE2a e MIE2b).....	126
Figura 4.101 – Distribuições de tensões na alma da viga do protótipo MIE2a.....	126
Figura 4.102– Distribuições de tensões na alma da viga do protótipo MIE2b.....	127
Figura 4.103– Tensões verticais na alma da viga dos protótipos MIE2a e MIE2b (Rosetas 1 e 2)	127
Figura 4.104 – Tensões horizontais na alma da viga dos protótipos MIE2a e MIE2b (Rosetas 1 e 2)	128

Figura 4.105 – Distribuições de tensões de Von Mises na alma da viga dos protótipos MIE2a e MIE2b (Rosetas 1 e 2)	129
Figura 4.106 – Distribuições de tensões verticais na alma da viga dos protótipos MIE2a e MIE2b (Roseta 3)	129
Figura 4.107 – Distribuições de tensões horizontais na alma da viga dos protótipos MIE2a e MIE2b (Roseta 3)	130
Figura 4.108 – Distribuições de tensões de Von Mises na alma da viga dos protótipos MIE2a e MIE2b (Roseta 3)	130
Figura 4.109 – Defletômetro posicionado na base do Pórtico PR2 (Protótipo BIE2)..	131
Figura 4.110 – Rotação da seção transversal da extremidade da viga (Protótipo BIE2)	131
Figura 4.111- Deslocamento final da extremidade da viga do protótipo BIE2.....	132
Figura 4.112– Comportamento das vigas dos protótipos BIE2 (Cargas: 8,99kN, 36,01kN e 47,93kN)	132
Figura 4.113 – Comportamento das vigas dos protótipos BIE2 (Cargas: 63,95kN, 75,84kN e 87,95kN)	133
Figura 4.114 – Deslocamentos da alma do pilar do protótipo BIE2 (Cargas: 8,99kN, 36,10kN e 47,93kN)	133
Figura 4.115 – Deslocamentos da alma do pilar do protótipo BIE2 (Cargas: 63,95kN, 75,84kN e 87,95kN)	134
Figura 4.116 – Momento x Rotação – Alma do Pilar e Viga – Protótipo BIE2.....	135
Figura 4.117– Ampliação da curva momento x rotação (Momento fletor $\leq 3.000\text{kN.cm}$ - Protótipo BIE2)	135
Figura 4.118 – Valores da rigidez da ligação (Alma do protótipo BIE2)	136
Figura 4.119– Valores da rigidez da ligação (Viga do protótipo BIE2)	136
Figura 4.120– Variação das forças de tração e compressão transmitidas pelas mesas da viga em função do momento na ligação (Protótipo BIE2)	137
Figura 4.121– Distribuições de tensões na alma da viga do protótipo BIE2.....	137
Figura 4.122– Tensões verticais na alma do pilar do protótipo BIE2 (Rosetas 1 e 2) .	138
Figura 4.123 – Tensões horizontais na alma do pilar do protótipo BIE2 (Rosetas 1 e 2)	138
Figura 4.124– Tensões de Von Mises na alma do pilar do protótipo BIE2 (Rosetas 1 e 2)	139
Figura 4.125 – Tensões na alma da viga do protótipo BIE2 (Roseta 3).....	139

CAPÍTULO 5 - VALORES TEÓRICOS E RESULTADOS NUMÉRICOS:
COMPARAÇÕES

Figura 5.1 - Mecanismo global de colapso para ligações soldadas	142
Figura 5.2 - Variação da carga crítica em função da esbeltez da alma do pilar	143
Figura 5.3 - Variação da carga crítica em função da espessura da alma do pilar.....	143
Figura 5.4 - Variação da carga crítica em função da variação da esbeltez (Comparação de modelos com valores próximos de esbeltez da alma do pilar).....	145
Figura 5.5 - Variação da carga crítica em função da variação do parâmetro ($L = d - 1,5r$) (Comparação de modelos com valores próximos de esbeltez da alma do pilar).....	145
Figura 5.6 - Variação da carga crítica em função da variação do parâmetro " $L = d - 1,5r$ " (Comparação dos modelos MIE2/MIE3, MIE4/MIE5 e AIE7/AIE8)	145
Figura 5.7 - Variação da carga crítica em função da variação da esbeltez ($L = 25,3$) .	147
Figura 5.8 - Variação da carga crítica em função da variação da esbeltez ($L = 29,6$) .	147
Figura 5.10 - Variação da carga crítica em função da variação da esbeltez ($L = 25,3$; 29,6 e 31,4)	148
Figura 5.11 - Comparação da variação da carga crítica em função da variação da esbeltez (Blodgett/Lima e Mecanismo Global)	148
Figura 5.12 - Variação da rigidez inicial em função da esbeltez da alma do pilar	149
Figura 5.13 - Variação da rigidez inicial em função da espessura da alma do pilar	149
Figura 5.14 - Variação da rigidez inicial em função da variação da esbeltez(Comparação de modelos com valores próximos de esbeltez da alma do pilar)	150
Figura 5.15 - Variação da rigidez inicial em função de " $L = d - 1,5r$ "	151
(Comparação de modelos com valores próximos de esbeltez da alma do pilar).....	151
Figura 5.16 - Variação da carga crítica em função da variação do parâmetro " $L = d -$ $1,5r$ "(Comparação dos modelos MIE2/MIE3, MIE4/MIE5 e AIE7/AIE8)	151
Figura 5.17 - Variação da rigidez inicial em função da variação da esbeltez ($L = 25,3$)	152
Figura 5.18 - Variação da rigidez inicial em função da variação da esbeltez ($L = 29,6$)	153
Figura 5.19 - Variação da rigidez inicial em função da variação da esbeltez ($L = 31,4$)	153
Figura 5.20 - Variação da carga crítica em função da variação da esbeltez ($L = 25,3$ e 31,4).....	153

Figura 5.21 – Tensões de Von Mises (kN/cm ²) na alma do pilar dos modelos numéricos de alto índice de esbeltez (AIE1 a AIE5) e correspondentes solicitações nas mesas da viga para carga última da análise numérica.....	154
Figura 5.22 – Tensões de Von Mises (kN/cm ²) na alma do pilar dos modelos numéricos de alto índice de esbeltez (AIE6 a AIE9) e correspondentes solicitações nas mesas da viga para carga última da análise numérica.....	155
Figura 5.23 – Tensões de Von Mises (kN/cm ²) na alma do pilar dos modelos numéricos de médio índice de esbeltez e correspondentes solicitações nas mesas da viga para carga última da análise numérica	156
Figura 5.24 – Tensões de Von Mises (kN/cm ²) na alma do pilar dos modelos numéricos de baixo índice de esbeltez e correspondentes solicitações nas mesas da viga para carga última da análise numérica	156
Figura 5.25 – Tensões de Von Mises (kN/cm ²) na alma do pilar dos modelos numéricos de alto índice de esbeltez para solicitações nas mesas da viga correspondentes às cargas últimas previstas por GOMES(1990)	158
Figura 5.26 – Tensões de Von Mises (kN/cm ²) na alma do pilar dos modelos numéricos de médio índice de esbeltez para solicitações nas mesas da viga correspondentes às cargas últimas previstas por GOMES(1990).....	159
Figura 5.27 – Tensões de Von Mises (kN/cm ²) na alma do pilar dos modelos numéricos de baixo índice de esbeltez para solicitações nas mesas da viga correspondentes às cargas últimas previstas por GOMES(1990).....	159
Figura 5.28 – Charneiras plásticas (Distribuição das tensões de Von Mises) - Modelos BIE.....	160
Figura 5.29 – Charneiras plásticas (Distribuição das tensões de Von Mises) - Modelos MIE.....	161
Figura 5.30 – Charneiras plásticas (Distribuição das tensões de Von Mises) - Modelos AIE1 a AIE5.....	161
Figura 5.31 – Charneiras plásticas (Distribuição das tensões de Von Mises) - Modelos AIE6 a AIE9.....	162
Figura 5.32 - Correlação linear entre os valores de F _{pl} teóricos e numéricos para consideração de formação de charneiras plásticas	163
Figura 5.33 - Rigidez inicial teórica x numérica (Ajuste linear para todos os modelos)	164

Figura 5.34 - Rigidez inicial teórica x numérica_(Ajustes lineares por classe de esbelteza da alma do pilar).....	165
Figura 5.35 - Rigidez inicial teórica x numérica_(Modelos com $L - b = 8,20$ e $5,4$) ...	165
Figura 5.36 - Rigidez inicial teórica x numérica_(Modelos com $L - b = 12,5$; $14,3$ e $19,2$)	166
Figura 5.37 - Momento na Ligação x Esbelteza (Modelos das classes 2 e 3) para deslocamentos da extremidade da viga igual a $0,857\text{cm}$	168

CAPÍTULO 6 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS NUMÉRICOS: COMPARAÇÕES

Figura 6.1 – Deslocamentos verticais das vigas dos protótipos AIE5 e do modelo numérico AIE5.	170
Figura 6.2 – AIE5: Deslocamentos das almas dos pilares para as cargas finais de ensaio e de plastificação do modelo numérico.	170
Figura 6.3 – AIE5: Curvas Momento x Rotação da alma do pilar	171
Figura 6.4 – AIE5: Curvas Momento x Rotação da viga	171
Figura 6.6 –Variação das forças de tração e compressão transmitidas pelas mesas da viga em função do momento na ligação (Protótipos AIE5b e Modelo numérico AIE5)	173
Figura 6.7 – Variação das tensões longitudinais na alma da viga (Protótipo AIE5a)..	173
Figura 6.8 – Variação das tensões longitudinais na alma da viga (Protótipo AIE5b)..	174
Figura 6.9 – Variação das tensões longitudinais na alma da viga (Modelo numérico AIE5).....	174
Figura 6.10 – Tensões de Von Mises na alma do pilar dos protótipos AIE5a e AIE5b_e do modelo numérico AIE5 (Rosetas 1 e 2).....	175
Figura 6.11 – Tensões de Von Mises na alma do pilar dos protótipos AIE5a e AIE5b e do modelo numérico AIE5 (Roseta 3).	176
Figura 6.12 – Deslocamentos verticais das vigas dos protótipos MIE2 e do modelo numérico MIE2.....	177
Figura 6.13 – MIE2: Deslocamentos das almas dos pilares para as cargas finais de ensaio e de plastificação do modelo numérico.	178
Figura 6.14 – MIE2: Curvas Momento x Rotação da alma do pilar	178
Figura 6.15 – MIE2: Curvas Momento x Rotação da viga.....	179

Figura 6.16 –Variação das forças de tração e compressão transmitidas pelas mesas da viga em função do momento na ligação (Protótipos MIE2a e Modelo numérico MIE2)	180
Figura 6.17 –Variação das forças de tração e compressão transmitidas pelas mesas da viga em função do momento na ligação (Protótipos MIE2b e Modelo numérico MIE2)	180
Figura 6.18 – Variação das tensões na alma da viga (Protótipo MIE2a)	181
Figura 6.19 – Variação das tensões na alma da viga (Protótipo MIE2b)	181
Figura 6.20 – Variação das tensões na alma da viga (Modelo numérico MIE2)	181
Figura 6.21 – Tensões de Von Mises na alma do pilar dos protótipos MIE2a e MIE2b e do modelo numérico MIE2 (Rosetas 1 e 2)	182
Figura 6.22 – Tensões de Von Mises na alma do pilar dos protótipos MIE2a e MIE2b e do modelo numérico MIE2 (Roseta 3)	183
Figura 6.23 – Deslocamentos verticais das vigas dos protótipos MIE6 e do modelo numérico MIE6.	184
Figura 6.24 – Deslocamentos das almas dos pilares para as cargas finais de ensaio e de plastificação do modelo numérico.	184
Figura 6.25 - Comportamento Momento x Rotação da alma do pilar dos protótipos MIE6a e MIE6b e do modelo numérico MIE6.	185
Figura 6.26 - Comportamento Momento x Rotação da viga dos protótipos MIE6a e MIE6b e do modelo numérico MIE6.	185
Figura 6.27 –Variação das forças de tração e compressão transmitidas pelas mesas da viga em função do momento na ligação (Protótipos MIE6a e Modelo numérico MIE6)	186
Figura 6.28 –Variação das forças de tração e compressão transmitidas pelas mesas da viga em função do momento na ligação (Protótipos MIE6b e Modelo numérico MIE6)	187
Figura 6.29 – Variação das tensões na alma da viga (Protótipo MIE6a)	187
Figura 6.30 – Variação das tensões na alma da viga (Protótipo MIE6b)	187
Figura 6.31 – Variação das tensões na alma da viga (Modelo numérico MIE6)	188
Figura 6.33 – Tensões de Von Mises na alma do pilar dos protótipos MIE6a e MIE6b e do modelo numérico MIE6 (Roseta 3)	189
Figura 6.34 – Deslocamentos verticais das vigas dos protótipos BIE2 e do modelo numérico BIE2.	190

Figura 6.35 – Deslocamentos da alma do pilar para a carga final de ensaio e de plastificação do modelo numérico	191
Figura 6.37 – Comportamento Momento x Rotação da viga do protótipo e do modelo numérico BIE2.....	192
Figura 6.38 –Variação das forças de tração e compressão transmitidas pelas mesas da viga em função do momento na ligação (Protótipos BIE2 e Modelo numérico BIE2)	192
Figura 6.39 – Variação das tensões na alma da viga (Protótipo BIE2).....	193
Figura 6.40 – Variação das tensões na alma da viga (Modelo numérico BIE2)	193
Figura 6.41 – Tensões de Von Mises na alma da viga do protótipo e do modelo numérico BIE2 (Rosetas 1 e 2).....	194
Figura 6.42 – Tensões de Von Mises na alma da viga do protótipo e do modelo numérico BIE2 (Roseta 3)	194

CAPÍTULO 7 - VALORES TEÓRICOS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS: COMPARAÇÕES

Figura 7.1 – Tensões de Von Mises na alma do pilar (Protótipo BIE2 - Rosetas 1 e 2)	201
Figura 7.2 – Tensões de Von Mises na alma do pilar (Protótipos MIE2a e MIE2b - Rosetas 1 e 2).....	201
Figura 7.3 – Tensões de Von Mises na alma do pilar (Protótipos MIE6a e MIE6b - Rosetas 1 e 2).....	202
Figura 7.4 – Tensões de Von Mises na alma do pilar (Protótipos AIE5a e AIE5b - Rosetas 1 e 2).....	202

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 3 - ANÁLISE NUMÉRICA

Tabela 3.1: Dimensões da seção dos perfis utilizados no pilar	31
Tabela 3.2 – Propriedades Geométricas dos perfis que compõem o modelo BIE2.....	37
Tabela 3.3 – Propriedades geométricas dos perfis que compõem o modelo MIE2.....	44
Tabela 3.4 – Propriedades Geométricas do perfil utilizado no modelo AIE5	49
Tabela 3.5: Valores últimos da análise numérica	55
Tabela 3.6: Características geométricas dos modelos da classe 1	57
Tabela 3.7: Valores finais do momento na ligação, das forças transmitidas pelas mesas da viga e da rigidez inicial (Modelos da classe 1).....	58
Tabela 3.8: Características geométricas dos modelos da classe 2.....	61
Tabela 3.9: Valores finais do momento na ligação, das forças transmitidas pelas mesas da viga e da rigidez inicial (Modelos da classe 2).....	61
Tabela 3.10: Características geométricas dos modelos da classe 3.....	64
Tabela 3.11: Valores finais do momento na ligação, das forças transmitidas pelas mesas da viga e da rigidez inicial (Modelos da classe 3).....	65
Tabela 3.12 - Variações da Esbeltez e da Rigidez Inicial (Modelos AIE1, AIE2, AIE3, AIE4 e AIE5).....	68

CAPÍTULO 4 - ANÁLISE EXPERIMENTAL

Tabela 4.1 - Propriedades geométricas dos perfis utilizados nos protótipos AIE5	83
Tabela 4.2 - Rigidez inicial dos protótipos AIE5a e AIE5b (kN.cm/rad)	93
Tabela 4.5 - Propriedades geométricas dos perfis utilizados nos protótipos MIE6.	102
Tabela 4.6 - Rigidez inicial dos protótipos MIE6a e MIE6b (kN.cm/rad).....	109
Tabela 4.3 - Propriedades geométricas dos perfis utilizados nos protótipos MIE2	116
Tabela 4.4 - Rigidez inicial dos protótipos MIE2a e MIE2b (kN.cm/rad).....	124
Tabela 4.7 - Propriedades geométricas dos perfis utilizados nos protótipos BIE2	130

CAPÍTULO 5 - VALORES TEÓRICOS E RESULTADOS NUMÉRICOS: COMPARAÇÕES

Tabela 5.1 - Valores teóricos da carga crítica	141
--	-----

Tabela 5.2 - Variação da esbelteza e da carga crítica em função de $L = d - 1,5r$	146
Tabela 5.3 - Variações da rigidez inicial, da esbelteza e de " $L = d - 1,5r$ " (Comparação de modelos com valores próximos de esbelteza da alma do pilar)	150
Tabela 5.4 - Variação da esbelteza e da rigidez inicial em função de $L = d - 1,5r$	152
Tabela 5.5 – Cargas últimas de plastificação da alma do pilar (GOMES(1990))	157
Tabela 5.6 – Valores das forças aplicadas na alma dos pilares através das mesas que gerou a formação das charneiras de plastificação	162
Tabela 5.7 – Rigidez inicial (kN.cm/rad): Valores teóricos e obtidos na análise numérica	164
Tabela 5.8 – Deslocamentos verticais (cm) da extremidade das vigas obtidos na análise numérica	167
Tabela 5.9 – Forças atuantes nas mesas da viga e momentos na ligação para deslocamento vertical de $L/350$ (NBR8800) da extremidade das vigas.....	167

CAPÍTULO 6 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS NUMÉRICOS: COMPARAÇÕES

Tabela 6.1 - AIE5: Rigidez inicial (kN.cm/rad)	172
Tabela 6.2 - MIE2: Rigidez inicial (kN.cm/rad)	179
Tabela 6.3 - MIE6: Rigidez inicial (kN.cm/rad)	186
Tabela 6.4 - BIE2: Rigidez inicial (kN.cm/rad)	192

CAPÍTULO 7 - VALORES TEÓRICOS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS: COMPARAÇÕES

Tabela 7.1 – Rigidez inicial (kN.cm/rad): Valores teóricos e obtidos experimentalmente	196
Tabela 7.2 – Parâmetros α , β e μ dos protótipos analisados experimentalmente ...	197
Tabela 7.3 – Carregamentos finais e correspondentes deslocamentos da extremidade da viga dos protótipos	199
Tabela 7.4 – Carga aplicada e momento fletor para deslocamentos de extremidade imediatamente superiores a $L/350$	200
Tabela 7.5 - Valores da carga transmitida pelas mesas nos protótipos ensaiados.....	200

LISTA DE SÍMBOLOS

b - largura da zona de tração

c - espessura da zona de tração

d_m - diâmetro da porca do parafuso

m_{pl} - momento plástico

t_w - espessura da alma da coluna

f_y - tensão de escoamento

L - altura do perfil do pilar menos 1,5 vezes o raio da laminação

r - raio da laminação

F_{local} - carga local

F_{global} - carga global

F_{Q2} - carga crítica do mecanismo de flexão

F_{punc} - carga de puncionamento

h - distância entre os pontos de aplicação das cargas no binário

P_u - carga última

W_i - trabalho externo realizado por P_u

$(P_u)_{min}$ - carga última mínima

l_{eff} - largura equivalente

t_w - espessura da alma do perfil

t_f - espessura da alma do perfil

b_f - largura da mesa do perfil

F_{ult} - carga última

δ_1, δ_2 – deslocamentos

ϕ – rotação

β, α, μ – parâmetros adimensionais – relação entre a dimensão característica e a espessura

λ_w - esbeltez

INTRODUÇÃO

1.1 - Introdução

O tipo de ligação entre os elementos das estruturas metálicas, de um modo geral, influencia fortemente o seu comportamento. Essa influência é ainda mais relevante devido à grande variedade de configurações e dispositivos que podem ser utilizados para conectar vigas e pilares, introduzindo, dessa forma, descontinuidades geométricas que, associadas à não linearidade física dos materiais, levam a um comportamento não linear da estrutura como um todo. Como uma tentativa de entender melhor o comportamento real de uma ligação, muitos ensaios experimentais têm sido desenvolvidos para que se possa avaliar corretamente a influência dos parâmetros físicos e geométricos que possuem participação significativa no comportamento destas ligações.

Geralmente, na análise de uma estrutura, pressupõe-se um conjunto de barras unidimensionais interligadas e, durante muito tempo, as ligações foram consideradas como pontos nodais, idealizando-se o seu comportamento como nós rígidos ou rotulados, em termos de rotação relativa e da transmissão do momento fletor entre as barras. Sendo assim, são chamados de rígidos aqueles nós que mantêm a continuidade entre os elementos depois de impostas as deformações decorrentes da atuação do carregamento, verificando-se a integral transmissão do momento fletor entre as barras conectadas, e são chamados de rotulados os nós onde não ocorre nenhuma transmissão de momento fletor entre as barras conectadas.

Esta consideração, no entanto, é incompatível com a realidade, em decorrência dos efeitos locais que as ligações podem introduzir nas estruturas, sendo necessária a consideração do conceito de comportamento semirrígido para melhor representar o comportamento global das estruturas. No cálculo estrutural tradicional, a hipótese da ligação ser rígida ou flexível torna-se conveniente devido a sua simplicidade. Porém, esta hipótese não é adequada para a maioria das estruturas de aço que possuem ligações com um comportamento intermediário. Isto ocorre porque as ligações denominadas rígidas transmitem uma parcela de momento da viga ao pilar inferior ao momento de engastamento perfeito e as flexíveis absorvem parte deste momento. Sendo assim, uma

ligação será denominada semirrígida quando transmitir parcialmente o momento de engastamento perfeito à coluna.

Muitas pesquisas foram desenvolvidas durante as últimas décadas com o objetivo de se estudar o comportamento estrutural de diversos tipos de ligações, entender a sua influência sobre o comportamento global das estruturas e o mecanismo de representação do comportamento momento-rotação das ligações, de modo a possibilitar a introdução deste parâmetro, ainda nas primeiras fases da análise estrutural. A partir da década de 70, o comportamento semirrígido das ligações viga-pilar em estruturas metálicas foi introduzido nos procedimentos de cálculo da norma do American Institute of Steel Construction (AISC-1980) - e mais tarde pela norma europeia, EUROCODE 3 (2005). Este comportamento tornou-se um tópico essencial nas discussões sobre análise estrutural e desempenho global das estruturas. A aplicação deste conceito de rigidez parcial colocou em evidência uma contribuição potencial para o dimensionamento de estruturas mais econômicas.

A economia pode ser obtida por meio da diminuição do peso da estrutura (por exemplo, com a eliminação de sistemas de contraventamento) ou pela redução da parcela referente à mão-de-obra (simplificação do trabalho de fabricação e montagem das ligações). Com relação à segurança, os valores da capacidade resistente e da rigidez da ligação são mais próximos dos reais com a consideração da semirrigidez, possibilitando aos projetistas obter um dimensionamento menos conservador; por exemplo, o dimensionamento deixa de ser conservador na medida em que uma ligação considerada pelo projetista como rotulada, onde não há transmissão de momento fletor, é considerada semirrígida.

Uma grande evolução tem sido notada no estudo do comportamento estrutural das ligações viga-pilar em estruturas metálicas, observando-se a utilização de novos procedimentos de dimensionamento em manuais e normas técnicas. É o caso do modelo de dimensionamento apresentado no EUROCODE 3(2005), denominado “Método dos Componentes” (Component Method), que se aplica à determinação da rigidez rotacional e do momento resistente das ligações viga-pilar.

Alguns trabalhos de investigação do tema têm sido desenvolvidos no Brasil, analisando-se o comportamento das ligações semirrígidas por intermédio de formulações numéricas e estudos experimentais, porém quase exclusivamente dedicados às ligações segundo a direção do eixo de maior inércia dos pilares, dentre os quais destacam-se: Ribeiro (1998), Maggi (2000), Romano (2001) e Maggi (2004). Além

destes alguns trabalhos direcionados ao estudo das ligações segundo o eixo de menor inércia foram bastante expressivos como os de Neves (1996), Lima (1999), Bessa (2004) e Neves (2004), Hotes (2006) e Silva (2007).

1.2 - Objetivos

O objetivo geral deste trabalho consiste na contribuição para os estudos de ligações viga-pilar soldadas na direção do eixo de menor inércia do pilar, via Método dos Elementos Finitos e através de análise experimental. O trabalho visa verificar a influência do índice de esbeltez da alma dos pilares na ligação soldada em questão e ainda comparar os resultados numéricos com os resultados obtidos através de ensaios experimentais, com o intuito de que futuramente possam ser adequadamente utilizados e incorporados à prática de projeto e dimensionamento.

Com este trabalho pretende-se fazer um estudo do comportamento estrutural desse tipo de ligação avaliando-se a curva momento x rotação, as deformações, os possíveis modos de ruína e as condições de plastificação dos elementos da ligação.

A análise numérica do modelo proposto visa auxiliar a etapa experimental, principalmente aos estudos dos comportamentos detectados ao longo da análise numérica, de modo a se conseguir resultados que possam validar e/ou introduzir ajustes nos modelos analíticos desenvolvidos a partir dos resultados fornecidos pela análise numérica.

1.3 – Justificativa

O comportamento das ligações soldadas no eixo de menor inércia do pilar ainda não se encontra satisfatoriamente estudado, levando os projetistas a empregar procedimentos simplificados quanto à capacidade resistente ao momento fletor e à capacidade rotacional. Muitas vezes as ligações no eixo de menor inércia da coluna de pórticos contraventados são dimensionadas como flexíveis. Maiores problemas ocorrem quando este contraventamento não é possível e as ligações rígidas são utilizadas. Todavia, garantir que esta ligação tenha um comportamento rígido, principalmente no eixo de menor inércia, é algo um tanto quanto discutível. Sendo assim, a utilização de ligações semirrígidas tornou-se viável porque apresentam um comportamento estrutural

que melhor se aproxima da realidade e ainda possibilita uma diminuição do preço final da estrutura.

Algumas hipóteses, como a consideração equivocada da rigidez da ligação, em alguns casos, podem mostrar-se contrárias à segurança, impelindo os calculistas a adotarem procedimentos conservadores e antieconômicos.

Dessa forma, justifica-se a proposta do trabalho apresentado, como forma de simular a ligação de maneira mais realista e analisar o comportamento deste tipo de ligação soldada.

1.4 - Escopo do trabalho

Os capítulos deste trabalho são dedicados à apresentação das metodologias utilizadas para as análises numérica e experimental; das comparações pertinentes aos resultados obtidos nas análises, de maneira a esclarecer aspectos relativos ao comportamento das ligações soldadas segundo o eixo de menor inércia do pilar e das conclusões obtidas, fornecendo um panorama geral a respeito dos conceitos relevantes ao estudo das ligações viga-pilar soldadas segundo o eixo de menor inércia do pilar.

No Capítulo 2 apresenta-se a revisão bibliográfica analisando-se a formulação do modelo de GOMES(1990) para a determinação da capacidade resistente da alma do pilar e apresentando-se as convenientes adequações ao caso das ligações soldadas. É também analisada a formulação do modelo de Neves (2004) que visa à determinação da rigidez inicial de ligações segundo o eixo de menor inércia do pilar.

No Capítulo 3 descreve-se o processo de preparação dos modelos destinados à análise numérica, via Método dos Elementos. Apresenta-se a descrição dos critérios de pré-dimensionamento, das características e dimensões geométricas dos modelos, dos tipos de elementos finitos utilizados, assim como da constituição da malha de elementos finitos, condições de contorno e etapas de carregamento. Ao final são apresentados os resultados obtidos, juntamente com discussões a respeito do comportamento momento – rotação, da rigidez inicial e demais aspectos julgados relevantes em função das diferentes configurações geométricas, em especial quanto ao índice de esbeltez da alma dos pilares.

O Capítulo 4 é dedicado à análise experimental, apresentando-se as características geométricas dos modelos analisados, a instrumentação e medições

efetuadas, bem como os procedimentos adotados, acompanhados de discussões e análises preliminares dos resultados obtidos.

Em seguida, são apresentadas comparações entre os diferentes tipos de análise, sendo o Capítulo 5 dedicado às comparações entre os valores previstos pelos modelos teóricos e os obtidos na análise numérica. O Capítulo 6 é dedicado às comparações entre os resultados numéricos e experimentais, enquanto no Capítulo 7 as comparações são feitas entre os valores teóricos e os resultados obtidos experimentalmente.

Finalmente, no Capítulo 8, são relacionadas as principais conclusões do trabalho e tecidas considerações relativas às comparações de resultados apresentadas nos três capítulos anteriores, apresentando-se, ao final, sugestões para o prosseguimento dos estudos.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A melhor forma de se avaliar o comportamento das ligações em estruturas de aço é por meio de ensaios experimentais, obtendo assim uma visão geral do real comportamento estrutural dos componentes envolvidos na ligação estudada.

Impulsionando o interesse no estudo do comportamento semirrígido das ligações Wilson e Moore (1917) desenvolveram o primeiro ensaio experimental em ligações no intuito de avaliar a rigidez de uma ligação. O trabalho foi realizado através de ensaios com diversos tipos de ligações rebitadas. Batho e Batheman (1934) sugeriram a substituição, nas ligações, dos rebites por parafusos de alta resistência.

Com a popularização do uso dos parafusos de alta resistência e das soldas, a partir da década de 40, diversos estudos têm abordado o comportamento semirrígido das ligações, mas só a partir da década de 60, com a visível necessidade de se incorporar esse comportamento à análise estrutural, essas pesquisas foram intensificadas.

As ligações completamente soldadas começaram a ser estudadas a partir da publicação de Johnson (1959), pioneiro na realização de estudos experimentais sobre o comportamento estrutural deste tipo de ligação.

Considerada como idealmente rígidas, as ligações completamente soldadas passam a ser utilizadas como parâmetro de controle para a avaliação do desempenho de outras ligações, também consideradas rígidas, com outras configurações. Como ilustrado esquematicamente na figura 2.1, para as ligações completamente soldadas admitia-se a transmissão do momento fletor através de um binário atuando nas mesas, sendo o esforço cortante transmitido pela alma da viga.

Outros estudos importantes sobre o comportamento deste tipo de ligação foram realizados por Beedle e Christopher (1964), Huang et al. (1973), Regec et al. (1973), Parfitt Jr. e Chen (1976), Chen e Patel (1981), Witteveen et al. (1982) e Chen e Lui (1988a), entre outros.

No Brasil, Queiroz (1992) analisou os estados limites aplicáveis às ligações completamente soldadas e às ligações com chapa de topo, determinando as resistências últimas considerando a presença ou não de enrijecedores no pilar. Em outra pesquisa, Queiroz (1995) analisou as informações disponíveis na bibliografia sobre resistência,

rigidez e capacidade de deformação das ligações completamente soldadas utilizando perfis soldados com dimensões da seção transversal diferentes das usuais para perfis laminados. Com os resultados de ensaios, realizados no Laboratório do Instituto para Construção em Aço e Madeira da Universidade de Innsbruck (Áustria), efetuou comparações com outros resultados obtidos através de análise elasto-plástica via método dos elementos finitos, apresentando um modelo teórico para a análise de estruturas formadas por barras.

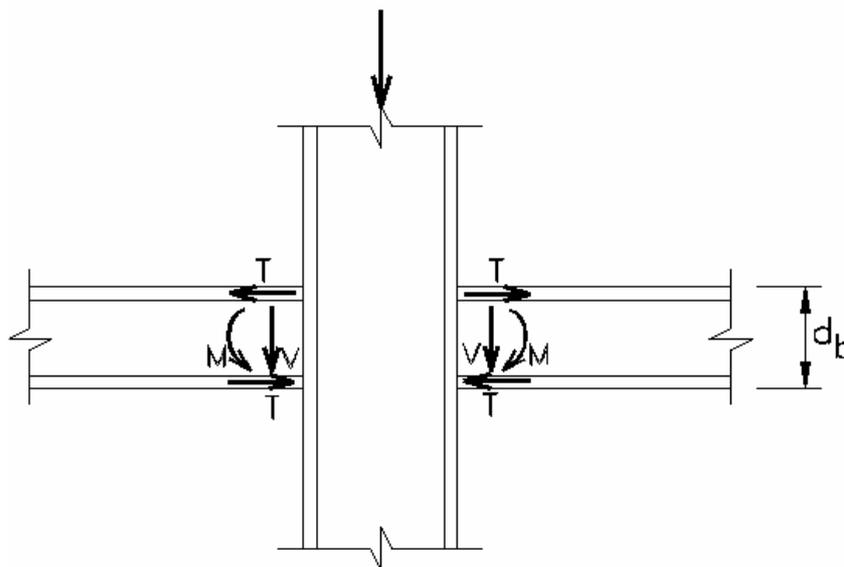


Figura 2.1 - Ligação completamente soldada

Com relação à modelagem numérica, Maggi (2000) chamou a atenção para a importância deste tipo de modelagem como uma das vertentes para o estudo do comportamento de ligações, com o objetivo de estabelecer métodos que levem em conta a rigidez das ligações, por meio de curvas momento-rotação na análise e dimensionamento das estruturas metálicas. Observa-se também que alguns trabalhos utilizaram modelos lineares, o que apresentava desvantagens por não representar o comportamento da ligação em toda a faixa da possível variação das rotações.

Na tentativa de corrigir as desvantagens dos modelos lineares, foram propostas análises com modelos bi-lineares, nos quais era reconhecida a redução da rigidez da ligação acima de determinados níveis de rotação relativa entre os elementos conectados. Com esse enfoque, Ribeiro (1998) cita os trabalhos de Lionberger e Weaver (1969), Romstad e Subramanian (1970), Tarpy e Cardinal (1981) e Lui e Chen (1986).

Ainda no Brasil, Ribeiro (1998) realizou um trabalho teórico-experimental, analisando experimentalmente 28 protótipos, sendo 24 utilizando ligações viga-pilar

com chapa de topo. Analisou alguns parâmetros de influência no comportamento momento-rotação da ligação, como espessura da chapa de topo e diâmetro dos parafusos, utilizando também simulações numéricas para comparação dos resultados, nas quais considerou os parafusos em modelos tridimensionais. Utilizando também modelos tridimensionais e simulação numérica, Maggi (2004) estudou o comportamento de ligações semirrígidas parafusadas com chapa de topo estendida.

O desenvolvimento dos trabalhos citados anteriormente permitiu, ao longo do tempo, o aprimoramento do estudo das ligações viga-pilar, possibilitando uma adequação gradativa dos métodos utilizados para o dimensionamento e análise das ligações em estruturas metálicas aos conceitos do comportamento semirrígido. Porém, as ligações viga-pilar eram estudadas com a viga conectada na direção de maior inércia do pilar. Na década de 90, começaram os primeiros estudos de ligações viga pilar conectados segundo a direção de menor inércia do pilar, dentre eles pode-se citar o trabalho de Lima et al (1999) relacionado às ligações semirrígidas parafusadas na alma do pilar segundo o seu eixo de menor inércia. Foram desenvolvidos, neste trabalho, modelos numéricos em elementos finitos para possibilitar estudos paramétricos e foi proposto um modelo de dimensionamento, incluindo a rigidez da alma do pilar, tendo como base o modelo analítico do Eurocode 3 (2000) para cálculo da rigidez da ligação e as observações oriundas da análise numérica. Além deste, alguns trabalhos direcionados ao estudo das ligações segundo o eixo de menor inércia foram bastante expressivos como os de Neves (1996), Bessa (2004) e Neves (2004), Hotes (2006) e Silva (2007).

Bessa (2004) apresentou o desenvolvimento de uma análise numérica, via Método dos Elementos Finitos, do comportamento de ligações viga-coluna com chapa de topo, segundo o eixo de menor inércia dos pilares. Foram analisados diferentes configurações, variando-se alternadamente a espessura e a altura da alma do pilar, a espessura da chapa de topo e o diâmetro dos parafusos. Bessa (2004) apresentou ainda, uma avaliação de distribuição de forças de tração nos parafusos e, por último, uma comparação de comportamento momento x rotação dos seus modelos numéricos com a classificação do EUROCODE 3 (2000), baseada no critério de rigidez.

Hotes (2006) também apresentou o desenvolvimento de uma análise numérica, via Método dos Elementos Finitos, do comportamento de ligações viga-coluna com chapa de topo, segundo o eixo de menor inércia dos pilares, enfatizando a capacidade resistente da alma do pilar sob efeito do momento fletor. Além disto, estudou a influência no comportamento momento x rotação em função da variação da espessura e

altura da alma do pilar, visando a coleta de dados de informações que permitam a realização de estudos experimentais.

Silva (2007) apresentou o desenvolvimento de uma análise numérica tridimensional, via Método dos Elementos Finitos, do comportamento de ligações viga-pilar com chapa de topo curta, na direção do eixo de menor inércia do pilar. Seus resultados foram comparados com os fornecidos pelo “Component Method” adotado pelo EUROCODE 3(2005), em termos de capacidade resistente dos componentes (viga, chapa de topo e parafusos) e com os obtidos através dos modelos de GOMES(1990) e de Neves (2004), respectivamente, utilizados para a obtenção da capacidade resistente e rigidez inicial da alma do pilar. Silva (2007) também analisou a influência da variação geométrica do pilar no comportamento da curva momento-rotação, a partir da padronização das dimensões da viga, chapa de topo e parafusos.

Esses estudos evidenciam que, para análise do comportamento estrutural de ligações, existe a necessidade de se considerar a resposta não-linear física e geométrica das estruturas e das ligações como complemento da análise estrutural, sendo também fundamental para o entendimento do funcionamento real da estrutura.

Neste contexto, o presente capítulo tem como objetivo esclarecer alguns conceitos, bem como apresentar e discutir alguns estudos já realizados na área de ligações em estruturas metálicas. Será apresentado e discutido, sucintamente, o modelo de Neves (2004), que trata da determinação da rigidez inicial de ligações segundo o eixo de menor inércia do pilar; os critérios de verificação da resistência da viga que compõe a ligação, bem como o modelo de GOMES(1990), utilizado para obtenção da capacidade resistente da alma do pilar.

2.2 – Modelo de GOMES (1990)

O modelo de ligação viga-pilar desenvolvido por GOMES(1990) compreende uma viga conectada diretamente à alma do pilar através de uma placa de extremidade, (figura 2.2) causando flexão da alma da coluna, em relação ao eixo de menor inércia do pilar.

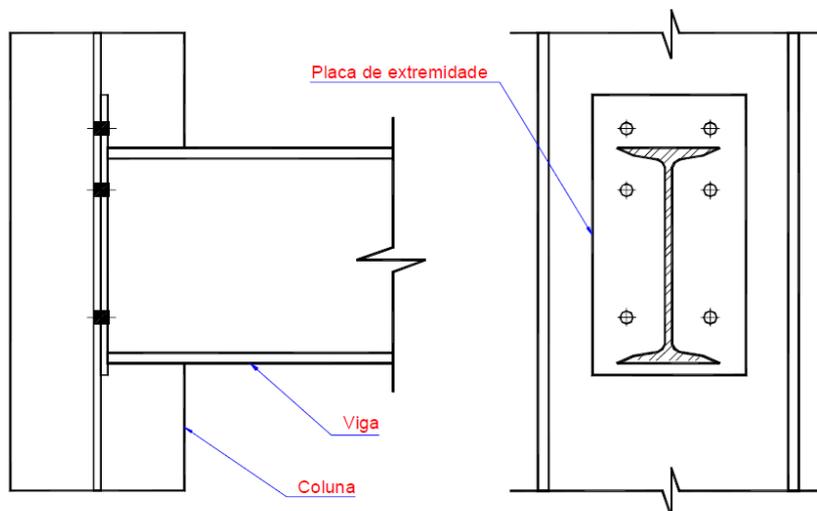


Figura 2.2 – Detalhe da ligação de GOMES(1990) para o eixo de menor inércia

A resistência é limitada pela formação de rótulas plásticas na alma do pilar, definidas a partir da formação dos mecanismos global e local. Para o mecanismo local, a linha de charneira localiza-se apenas na zona de compressão ou na zona de tração, enquanto no mecanismo global a linha de charneira envolve ambas as zonas de compressão e tração (figura 2.3).

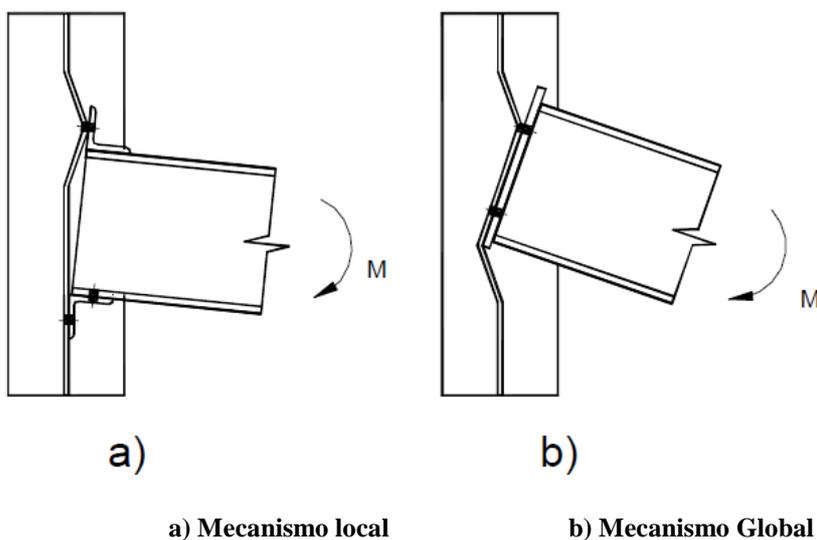


Figura 2.3 – Mecanismos na alma da coluna segundo GOMES(1990)

O momento transmitido pela viga para a coluna pode ser decomposto em um binário de forças F atuando nas zonas de compressão e tração. Dois casos diferentes de carregamento são discutidos.

Caso 1 – A carga F atua no retângulo rígido com dimensões $b \times c$ (figura 2.4), como no caso de ligações soldadas sendo tais dimensões definidas pelo perímetro do cordão de solda ao redor da mesa da viga.

Caso 2 – A carga F é transmitida por uma ou mais linhas de parafusos da zona de tração de ligações parafusadas (figura 2.5).

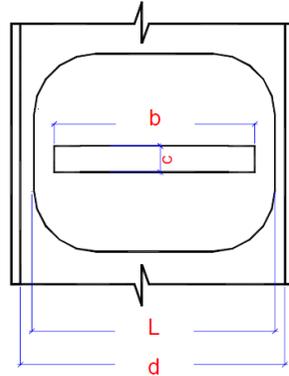


Figura 2.4- Mecanismo Local
Fonte: Lima (1999)

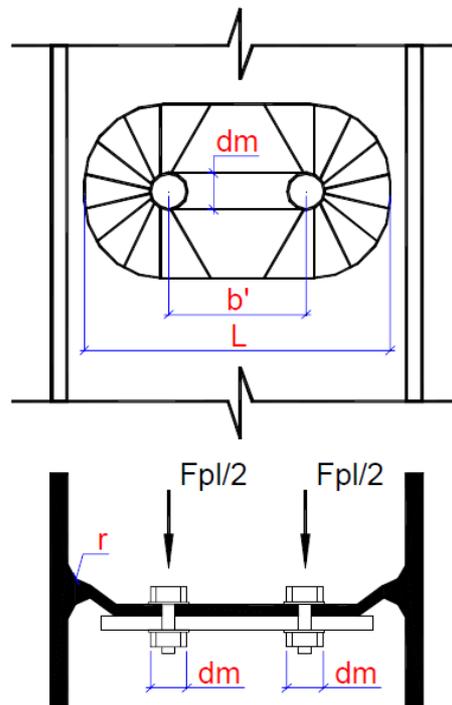


Figura 2.5 – Mecanismo local com indicação de charneira plástica
Fonte: Lima (1999)

Para o caso de ligações parafusadas, o retângulo é definido em função do diâmetro médio dos parafusos e da distância entre eles (Figura 2.6). Assim, a carga de colapso na zona de tração é obtida através de um retângulo de dimensões b e c dados por $b = b_0 + 0,9 \cdot d_m$ e $c = c_0 + 0,9 \cdot d_m$, onde $d_m = (d_1 + d_2)/2$ é o diâmetro médio utilizado para a cabeça do parafuso, como indicado na Figura 2.7.

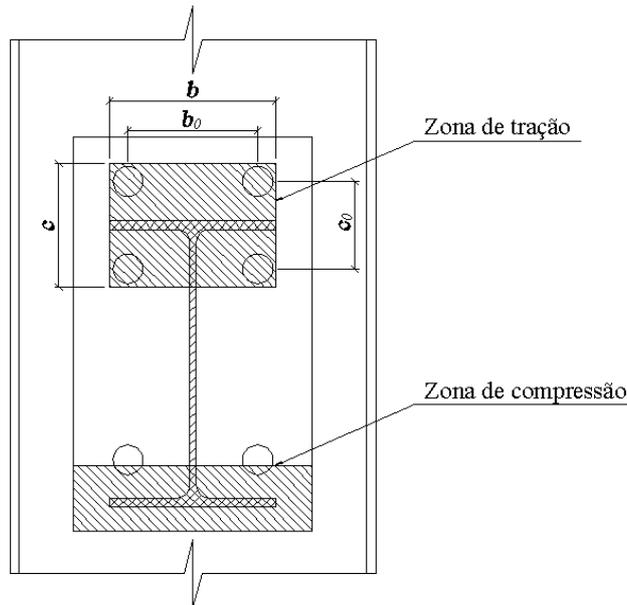


Figura 2.6: Zonas de tração e compressão de uma ligação parafusada.
Adaptado de Lima (1999)

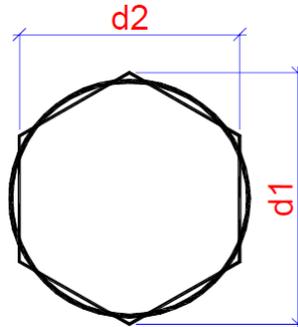


Figura 2.7: Cabeça do parafuso ou da porca.
Fonte: Lima (1999)

2.2.1 - Colapso Local

2.2.1.1 - Mecanismo de flexão

O mecanismo básico de ruptura é obtido por meio do método de charneiras plásticas. O momento plástico por unidade de comprimento da charneira é dado por:

$$m_{pl} = 0,25 \cdot t_w^2 \cdot f_y \quad (2.1)$$

onde t_w - espessura da alma da coluna;

f_y - resistência ao escoamento do aço.

A carga de ruptura plástica associada ao mecanismo da figura 2.5, para uma força F atuando no retângulo $b \times c$ é dada pela equação:

$$F_{pl} = 4\pi n_{pl} \left(1 + \frac{4}{\pi} \cot g \theta + \cot g^2 \theta + \frac{2c}{\pi(L-d)} \right) \quad (2.2)$$

onde θ é a solução da equação $\frac{b}{L-b} = 2e^{\frac{\pi}{2} \cot g \theta} \cdot \cot g \theta \quad (2.3)$

$$L = d - 1,5r$$

r = raio de concordância entre mesa e alma do pilar

Alternativamente pode ser utilizada a expressão simplificada dada por:

$$F_{pl} = \frac{4\pi n_{pl}}{1 - \frac{b}{L}} \left(\sqrt{1 - \frac{b}{L}} + \frac{2c}{\pi L} \right) \quad (2.4)$$

2.2.1.2 - Mecanismo de Puncionamento

Para o caso de ligações soldadas, o perímetro de puncionamento é o retângulo de dimensões $b \times c$, sendo a carga de puncionamento dada por:

$$F_{punc} = 2(b+c)V_{pl} \quad (2.5)$$

onde $V_{pl} = \frac{t_w f_y}{\sqrt{3}}$

2.2.1.3 - Mecanismo de Flexão e Puncionamento Combinados:

Os mecanismos combinados de flexão e puncionamento não ocorrem apenas nas linhas de charneiras (linhas contínuas da figura 2.8), mas também na linha de puncionamento (linha tracejada da figura 2.8).

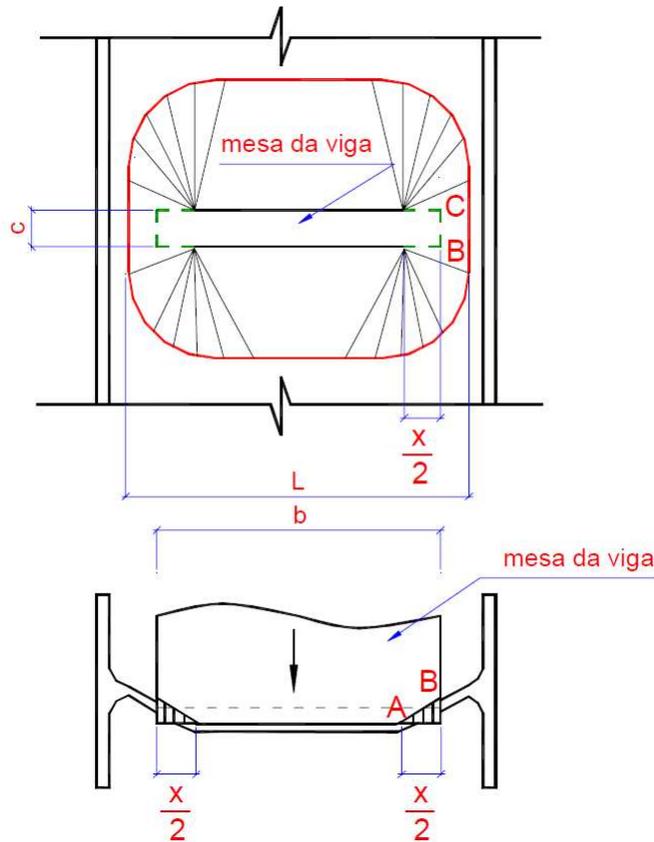


Figura 2.8 – Ruptura por flexão e punçonnemento combinados
Fonte: Lima (1999)

A carga de ruptura associada à formação de tal mecanismo é dada por:

$$F_{Q2} = 4 \cdot m_{pl} \cdot \left[\frac{\pi \cdot \sqrt{L \cdot (a + x)} + c}{a + x} + \frac{2 \cdot c \cdot x + x^2}{\sqrt{3} \cdot t_w \cdot (a + x)} \right] \quad (2.6)$$

onde $a = L - b$

e $x \geq 0$ determinado por processo iterativo com $x_0 = 1,95 \cdot t_w^{2/3} \cdot L^{1/3}$ e

$$x_{i+1} = -a + \sqrt{a^2 - 2 \cdot a \cdot c + \frac{\sqrt{3} \cdot t_w}{2} \cdot [\pi \cdot \sqrt{L \cdot (a + x_i)} + 2 \cdot c]} \quad (2.7)$$

- Se $x_{i+1} \leq 0$ adota-se $F_{Q2} = F_{local}$

- Se $t_w \leq 20$ e $b/L \leq 0,8$ adota-se $F_{Q2} = F_{local}$

Lima (1999) não indica nenhum processo iterativo, propondo a obtenção da carga crítica do mecanismo de flexão pela equação:

$$F_{Q2} = 4 \cdot m_{pl} \cdot \left[\frac{\pi \cdot \sqrt{L \cdot (a + x)} + c}{a + x} + \frac{2 \cdot c \cdot x + x^2}{\sqrt{3} \cdot t_w \cdot (a + x)} \right] \quad (2.8)$$

onde $a = L - b$

$$\text{Se } \begin{cases} b \leq b_m \rightarrow x = 0 \\ b > b_m \rightarrow x = -a + \sqrt{a^2 - 1,5ac + \frac{t_w \sqrt{3}}{2} [\pi \sqrt{L(a + x_0)} + 4c]} \end{cases}$$

$$x_0 = L \left[\left(\frac{t}{L} \right)^{2/3} + 0,23 \frac{c}{L} \left(\frac{t}{L} \right)^{1/3} \right] \left(\frac{b - b_m}{L - b_m} \right) \quad (2.9)$$

$$b_m = L \left[1 - 0,82 \frac{t_w^2}{c^2} \left(1 + \sqrt{1 + 2,8 \frac{c}{t_w L}} \right)^2 \right] \geq 0 \quad (2.10)$$

Segundo Lima (1999), esta solução é válida para todos os possíveis valores de b , ou seja, $0 \leq b \leq L$, e também leva em consideração que o momento plástico por unidade de comprimento da linha de charneira é reduzido pela presença de esforço cortante quando o esforço cortante por unidade de comprimento exceder 50% de V_{pl} .

Considerando que a carga de plastificação, obtida pelo método da linha de charneira plástica, difere da solução baseada no critério de escoamento de Von Mises, é proposta a correção da expressão de F_{Q2} por intermédio de um parâmetro k dado por:

$$k = \begin{cases} 1 & \text{se } (b + c)/L \geq 0,5 \\ 0,7 + 0,6 \cdot (b + c)/L & \text{se } (b + c)/L \leq 0,5 \end{cases}$$

Dessa forma, o mecanismo de colapso local é o mecanismo associado à menor carga plástica dada por:

$$F_{local} = \min(F_{punc}; kF_{Q2}) \quad (2.11)$$

2.2.2 - Colapso Global

O colapso global ocorre para os mecanismos de flexão ou de flexão e punção combinados, considerando-se a ação simultânea das forças F originadas do binário $M = F \cdot h$, aplicado à alma do pilar, correspondendo a uma carga de colapso global, dada por:

$$F_{global} = \begin{cases} m_{pl} \left(\frac{2b}{h} + \frac{\alpha k}{2} + \pi + \frac{2h}{L - b} \right) & \text{se } \frac{h}{L - b} \geq 1 \\ m_{pl} \left(\frac{2b}{h} + \frac{\alpha k}{2} + \pi + 2 \right) & \text{se } \frac{h}{L - b} \leq 1 \end{cases}$$

válida no intervalo $0,7 \leq h/(L-b) \leq 10$, sendo h a distância entre os centros das zonas tracionada e comprimida da alma do pilar.

Lima (1999) propõe que a carga de colapso global seja obtida por:

$$F_{global} = \frac{kF_{Q2}}{2} + m_{pl} \left(\frac{2b}{h} + \pi + 2\rho \right) \quad (2.12)$$

onde $\rho = h/(L-b)$, assumindo os valores particulares

$$\begin{cases} \rho = 1 & \text{para } h/(L-b) < 1 \\ \rho = 10 & \text{para } h/(L-b) > 10 \end{cases}$$

Finalmente, o momento plástico M_{pl} é dado por:

$$M_{pl} = h \cdot \min(F_{local}; F_{global}) \quad (2.13)$$

2.3 - Modelo de Blodgett (1982)/Lima (1999)

Blodgett (1982), em estudo relativo a seções vazadas sujeitas a esforços perpendiculares ao plano da alma, sugeriu a adoção de uma configuração geométrica de charneira plástica (figura 2.9) para ligações parafusadas, adotando as seguintes considerações:

- As faces laterais são consideradas apoiadas e as faces superior e inferior são consideradas engastadas;
- A força aplicada através dos parafusos é considerada distribuída linearmente na linha definida pelos centros dos mesmos.

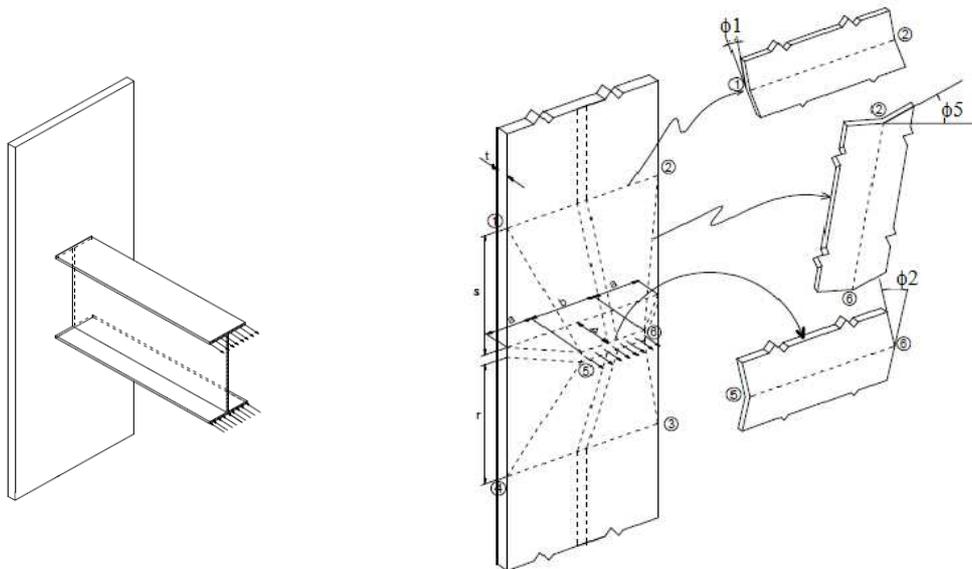


Figura 2.9 - Modelo de deformação da alma da coluna
Fonte: Blodgett (1982)

Uma vez que a expressão da carga última estabelecida pelo citado autor é particularizada para o caso em que $r = s = 16t_w$, Lima (1999) apresentou uma generalização do modelo proposto para uma situação em que r e s são variáveis (figura 2.10).

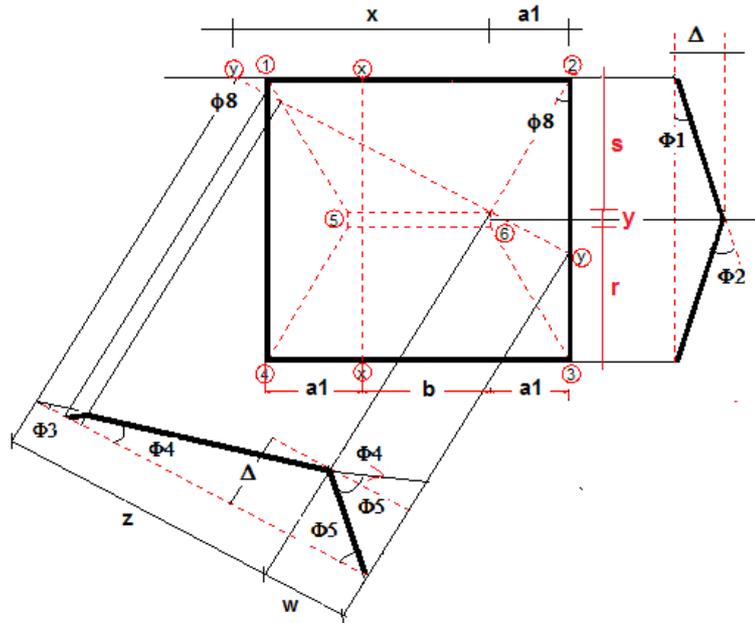


Figura 2.10 - Projeção da deformada da alma da coluna - Fonte: Lima (1999)

Utilizando o Método dos Trabalhos Virtuais, ou seja, considerando que o trabalho realizado pelas forças externas é igual ao realizado pelas forças internas ($W_e = W_i$), tem-se:

$$W_i = p [\phi_1 (2a_1 + b) + \phi_3 (2a_1 + b) + \phi_2 b + 2 \phi_6 \sqrt{a_1^2 + b^2} + 2 \phi_{11} \sqrt{a_1^2 + r^2}]$$

onde:

$$\phi_1 \cdot (2a_1 + b) = \Delta \cdot \frac{2a_1 + b}{s}$$

$$\phi_3 \cdot (2a_1 + b) = \Delta \cdot \frac{2a_1 + b}{r}$$

$$\phi_2 b = \Delta \cdot \left(\frac{b}{s} + \frac{b}{r} \right)$$

$$2 \cdot \phi_6 \sqrt{a_1^2 + s^2} = 2 \cdot \Delta \cdot \left(\frac{a_1^2 + s^2}{a_1 s} \right)$$

$$2 \phi_{11} \sqrt{a_1^2 + r^2} = 2 \cdot \Delta \cdot \left(\frac{a_1^2 + r^2}{a_1 s} \right)$$

$$W_i = m_{pl} \cdot \Delta \cdot \left[\frac{2a_1 + b}{s} + \frac{2a_1 + b}{r} + \frac{b}{s} + \frac{b}{r} + \frac{2a_1^2 + 2s^2}{a_1 \cdot s} + \frac{2a_1^2 + 2r^2}{a_1 \cdot r} \right]$$

$$W_i = m_{pl} \cdot \frac{2 \cdot \Delta \cdot (r+s)}{r \cdot s} \left[2a_1 + b + \frac{r \cdot s}{a_1} \right] \quad (2.14)$$

O trabalho externo realizado pela força P_u é dado por:

$$W_e = P_u \cdot \Delta \quad \therefore \quad P_u = m_{pl} \cdot \left(\frac{r+s}{rs} \right) \left[2 \cdot a_1 + b + \frac{r \cdot s}{a} \right] \quad (2.15)$$

Admitindo a hipótese em que o deslocamento Δ ocorre em duas linhas de parafusos (figura 2.11) e seguindo a mesma metodologia anteriormente aplicada, Lima (1999) estabelece que a carga última P_u é dada por:

$$P_u = m_{pl} \left[\left(\frac{r-s}{rs} \right) (4a_1 + 2b) + \frac{4}{a_1} (r + d + s) \right]$$

$$P_u = m_{pl} \left[\left(\frac{r-s}{rs} \right) (4a_1 + 2b) + \frac{4}{a_1} (r + d + s) \right]$$

Para as ligações soldadas, considerando-se que a transmissão da carga é feita através de um retângulo de dimensões $b \times c$, é possível a utilização da expressão anterior, reescrita como:

$$P_u = m_{pl} \left[\left(\frac{r-s}{rs} \right) (4a_1 + 2b) + \frac{4}{a_1} (r + c + s) \right] \quad (2.16)$$

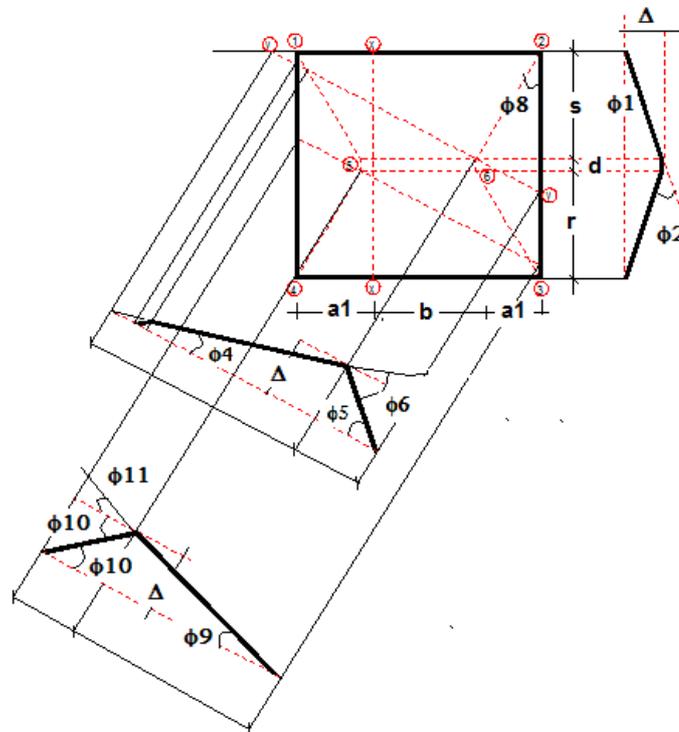


Figura 2.11 - Modelo de deformação da alma da coluna para duas linhas de parafusos
Fonte: Lima (1999)

Sendo P_u função de r e s , considerando-se a , b e c constantes, a carga crítica P_u será mínima se:

$$\frac{\partial P_u}{\partial r} = 0 \quad \text{e} \quad \frac{\partial P_u}{\partial s} = 0, \quad \text{desde que} \quad \frac{\partial^2 P_u}{\partial r^2} > 0 \quad \text{e} \quad \frac{\partial^2 P_u}{\partial s^2} > 0$$

$$\frac{\partial P_u}{\partial r} = 0 \rightarrow m_{pl} \left(-\frac{4a_1 + 2b}{r^2} + \frac{4}{a_1} \right) = 0 \quad \therefore \quad r = \frac{\sqrt{4a_1^2 + 2a_1b}}{2}$$

$$\frac{\partial P_u}{\partial s} = 0 \rightarrow m_{pl} \left(-\frac{4a_1 + 2b}{s^2} + \frac{4}{a_1} \right) = 0 \quad \therefore \quad s = \frac{\sqrt{4a_1^2 + 2a_1b}}{2}$$

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2} = m_{pl} \frac{4a_1 + b}{r^3} > 0 \quad \text{e} \quad \frac{\partial^2}{\partial s^2} = m_{pl} \frac{4a_1 + b}{s^3} > 0$$

Portanto, a carga última mínima será dada por:

$$(P_u)_{\min} = \frac{4m_{pl}}{a_1} \left(2\sqrt{4a_1^2 + 2a_1b} + c \right) \quad (2.17)$$

2.3 – Modelo de Neves (1996, 2004)

2.3.1 - Rigidez Inicial do Componente

Neves (1996), em continuidade aos estudos de GOMES(1990), realizou um estudo paramétrico do comportamento da alma do pilar para a determinação das componentes de rigidez. Com relação à rigidez inicial S_i , Neves (1996) considerou que a alma do pilar pode ser modelada como uma placa engastada na ligação com as mesas e livre nas outras duas bordas.

A dedução do modelo para caracterizar a componente placa carregada transversalmente com rotação impedida nos bordos laterais baseia-se no carregamento do componente por um retângulo rígido de dimensões $b \times c$ (no caso de ligações soldadas b é a largura da mesa da viga e c a espessura da mesa da viga), e no funcionamento unidirecional entre os bordos laterais, resultado da observação numérica e experimental da predominância de tensões de flexão nessa direção (figura 2.12).

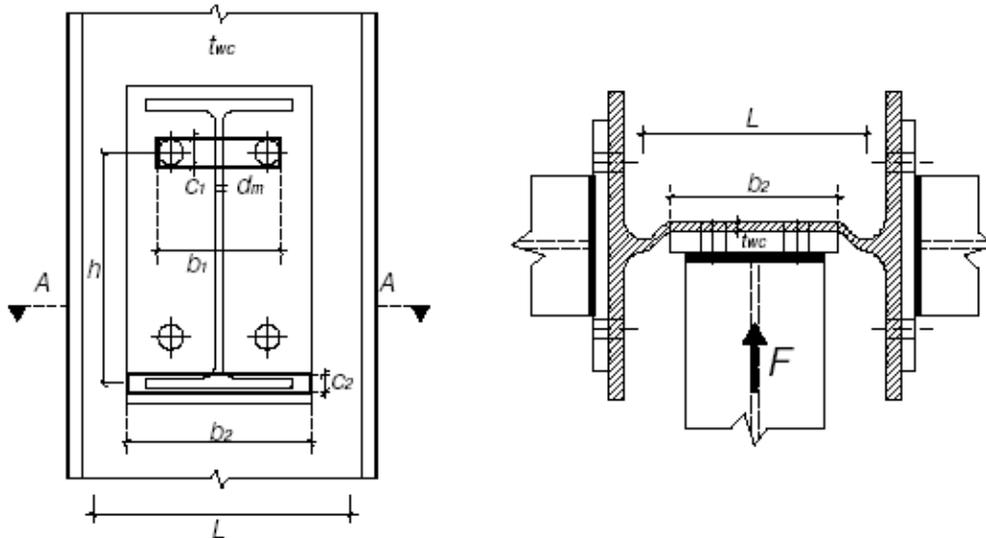


Figura 2.12- Características geométricas na direção do eixo de menor inércia do pilar

Assim é definida uma largura equivalente engastada em dois bordos e livre nos outros dois (figura 2.12).

Com relação às características geométricas relevantes na direção do eixo de menor inércia do pilar conforme indicado na figura 2.13, a alma do pilar tem uma largura característica L que pode ser a distância entre as mesas, ou a dimensão da zona plana da alma do pilar, ou ainda uma dimensão intermediária. As zonas de transmissão das forças de tração e compressão correspondentes ao momento fletor têm largura b e altura c . O índice 1 é usado para a zona de tração e o índice 2 para a zona de compressão. O diâmetro médio da cabeça dos parafusos numa ligação parafusada é definido por d_m . A distância entre os centros das áreas anteriormente referidas, definida por h , é o braço de alavanca das forças.

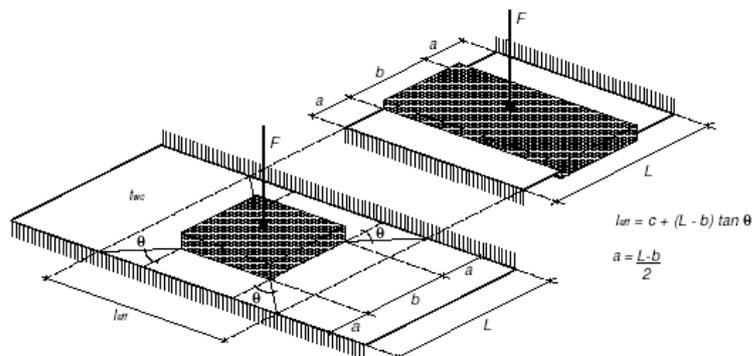


Figura 2.13 - Componente carregada por uma zona rígida de dimensões $b \times c$, e faixa equivalente de largura l_{eff} .

São estabelecidos os seguintes parâmetros adimensionais, com influência sobre o comportamento da alma: sua esbeltez (relação entre a dimensão característica e a espessura, $\mu = L/t_{wc}$), e relações geométricas $\beta = b/L$, $\alpha = c/L$ e $\gamma = h/L$.

Assume-se ainda um funcionamento predominantemente de flexão que é rigorosamente válido apenas se $\mu \geq 20$ e $\beta \leq 0,8$. As deformabilidades consideradas no desenvolvimento incluem a flexão e o esforço transversal.

A largura equivalente, l_{eff} , é estabelecida com o auxílio de um ângulo θ :

$$l_{eff} = c + (L - b) \cdot \tan \theta \quad (2.18)$$

Introduzindo os já definidos parâmetros adimensionais $\alpha = c/L$ e $\beta = b/L$, tem-se:

$$\frac{l_{eff}}{L} = \frac{c}{L} + \left(1 - \frac{b}{L}\right) \cdot \tan \theta \quad \text{ou} \quad \frac{l_{eff}}{L} = \alpha + (1 - \beta) \cdot \tan \theta \quad (2.19)$$

Inicialmente o ângulo utilizado para a definição da largura efetiva l_{eff} havia sido tomado como $\theta = 35 - 10\beta$. Porém, novos estudos (Neves, 2004) conduziram à proposição de uma nova expressão, utilizando-se a anterior para $\beta < 0,7$ e adotando-se $\theta = 49 - 30\beta$ para $\beta \geq 0,7$.

2.3.2 - Dedução da rigidez inicial do nó para o caso de uma linha de parafusos tracionados

A figura 2.14 representa a ligação a ser analisada para a obtenção das expressões gerais da rigidez inicial ($M-\phi$) do nó, com uma linha de parafusos tracionados, considerando-se apenas a deformabilidade da alma do pilar, a partir das leis F - δ desse componente. Admite-se a existência de molas de translação em cada linha de parafusos, representando as forças de tração e de compressão. A principal hipótese do modelo proposto é admitir que o conjunto viga e chapa de topo funciona de forma rígida.

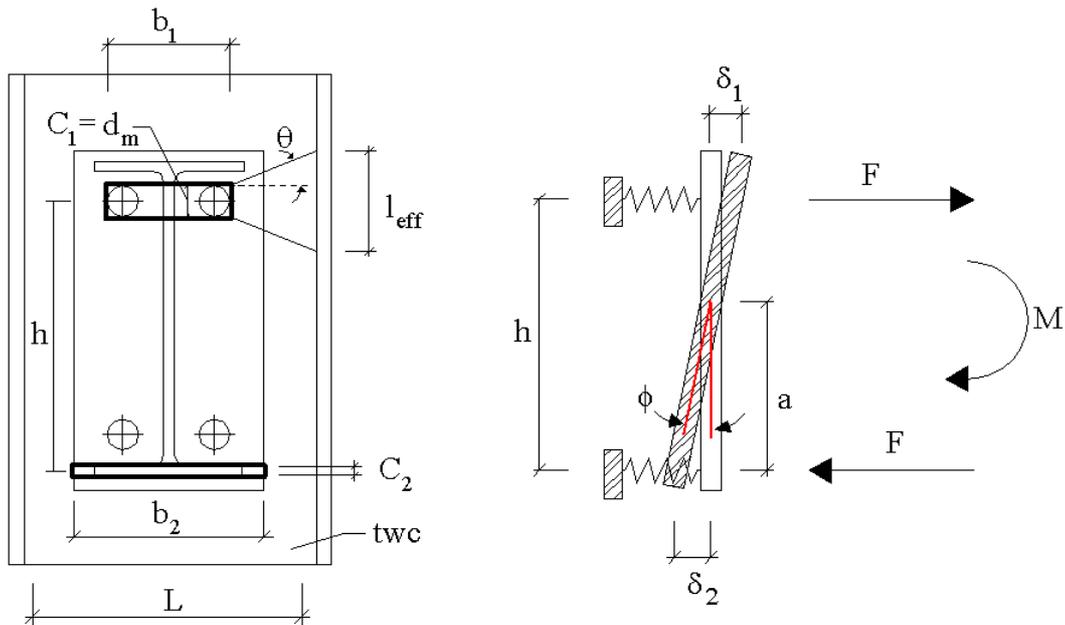


Figura 2.14 - Modelo para obtenção das curvas $M - \phi$ para a ligação com uma linha de parafusos tracionados, a partir das leis $F - \delta$.

Esse pressuposto foi verificado nos ensaios realizados por Neves (2004), mas no caso de chapas de topo muito flexíveis esse fato pode não ser muito exato para a obtenção da rigidez inicial.

É importante notar que a aplicação do modelo proposto anteriormente leva ao estabelecimento de uma largura efetiva, l_{eff} , que é a largura da faixa equivalente para cada mola de translação do componente.

A resolução do modelo representado, dada a geometria e o momento atuante M , permite obter as forças nas linhas de parafusos F_1 e F_2 , a posição do centro de rotação “a”, os deslocamentos δ_1 e δ_2 e a rotação ϕ .

A força F_i em cada linha de parafusos relaciona-se com o deslocamento correspondente δ_i através da rigidez translacional S_i , determinada por:

$$F_i = S_i \cdot \delta_i \quad (2.20)$$

sendo S_1 a rigidez na zona de tração e S_2 na zona de compressão.

Os deslocamentos correspondentes são:

$$\delta_1 = \frac{F}{S_1} \text{ e } \delta_2 = \frac{F}{S_2}$$

A rotação ϕ e o momento M são dados por:

$$\phi = \frac{\delta_1 + \delta_2}{h} \text{ e } M = F \cdot h$$

E a rigidez rotacional S_j é dada pela expressão:

$$S_j = \frac{M}{\phi} = \frac{h^2}{\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2}} \quad (2.21)$$

Em um novo trabalho relativo ao comportamento de ligações no eixo de menor inércia em estruturas metálicas e mistas, Neves (2004) estabeleceu que a rigidez inicial translacional, para a situação de impedimento da rotação dos bordos da alma (ligação com as mesas do pilar), é dada por:

$$S_i = \frac{Et_{wc}^3}{L^2} 16 \frac{\alpha + (1 - \beta) \operatorname{tg} \theta}{(1 - \beta)^3 + \frac{10,4(k_1 - k_2\beta)}{\mu^2}} \quad (2.22)$$

onde $\mu = \frac{L}{t_{wc}}$ é a esbeltez da alma do pilar;

$\beta = \frac{b}{L}$ é o parâmetro adimensional da zona de tração ou compressão;

$k_1 = 1,5$ e $k_2 = 1,63$ são fatores corretivos para tornar o modelo adotado independente do parâmetro μ .

Adicionalmente, Neves (2004) estabeleceu, por intermédio de calibração via simulações numéricas, que a expressão de S_i seria válida para $10 \leq \mu \leq 50$, $0,08 \leq \beta \leq 0,75$ e $0,05 \leq \alpha \leq 0,2$.

Analisando a situação em que ocorre restrição apenas parcial à rotação dos bordos da alma, o citado autor constatou que a rigidez inicial é quatro vezes inferior à do caso anterior.

Assim, considerando que o impedimento à rotação relativa da alma do pilar está relacionada à condição de restrições impostas às mesas do pilar, foi estabelecido que:

$$S_{j,ini,livres} = \frac{(\mu / \beta)^{1,25}}{230} S_{j,ini,fixos} \leq S_{j,ini,fixos} \quad (2.23)$$

para ligações em que a alma do pilar apresenta $\lambda_w \leq 35$, e

$$S_{j,ini,livres} = \frac{(\mu / \beta)^{1,25}}{410} S_{j,ini,fixos} \leq S_{j,ini,fixos} \quad (2.24)$$

para ligações em que a alma do pilar possui $\lambda_w > 35$.

onde $S_{j,ini,fixos}$ é a rigidez da alma do pilar com restrição de rotação nas mesas, dada por:

$$S_{j,ini,fixos} = \frac{h^2}{\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_3}} \quad (2.25)$$

onde S_1 e S_3 são, respectivamente, as rigidezes das regiões tracionada e comprimida da alma do pilar.

Portanto, para o caso das ligações soldadas, $S_1 = S_3 = S$ e a expressão acima assume a forma:

$$S_{j,ini,fixos} = \frac{S \cdot h^2}{2} \quad (2.26)$$

A utilização da rigidez inicial de uma ligação na análise estrutural é um meio de se obter indicações da influência de seu comportamento na resposta global da estrutura, podendo indicar se as considerações simplificadas (ligação rígida, semirrígida ou flexível) são condizentes com o seu comportamento real, além de se constituir em uma importante ferramenta para a avaliação da adequação das soluções propostas quanto à estabilidade da estrutura.

2.4 - Verificação da capacidade resistente da viga e da solda

A verificação da capacidade resistente dos elementos da viga é feita utilizando-se as recomendações da NBR 8800 (ABNT, 2008), analisando-se aspectos relacionados às mesas tracionada e comprimida e à resistência da alma da viga ao cisalhamento, pressupondo-se que a capacidade da viga para o estado limite de Flambagem Lateral com Torção (FLT) não seja crítica.

ANÁLISE NUMÉRICA

3.1 – Introdução

Este capítulo é dedicado à apresentação da metodologia adotada no desenvolvimento e aplicação dos modelos numéricos que foram utilizados, para o estudo do comportamento de ligações soldadas na direção de menor inércia do pilar.

Assim, alguns aspectos da modelagem serão discutidos, como a definição da geometria, os tipos de elementos finitos utilizados e a representação das relações constitutivas dos materiais. Apresentam-se, ainda, discussões mais abrangentes sobre a representatividade dos modelos propostos e a aplicação da modelagem numérica na análise do comportamento das ligações soldadas em geral.

Todos os modelos numéricos foram analisados com o software *Ansys 11.0* utilizando-se ainda um software específico para o pré-processamento, denominado de *TrueGrid*, que tornou possível ganhos significativos de produtividade na fase de construção da malha de elementos finitos.

Os modelos numéricos foram definidos visando obter resultados mais próximos do comportamento real da ligação e tornando desta forma possível a comparação entre os resultados numéricos com os experimentais. Foram utilizados modelos tridimensionais e a partir de um pré-dimensionamento, utilizando-se as prescrições da norma brasileira ABNT NBR 8800:2008 para identificar os elementos críticos e os possíveis modos de colapso correspondentes. Foram adotados os mesmos perfis laminados H e I utilizados por Silva (2007) para os pilares, utilizando-se, para todos os modelos analisados, o perfil W360x44 para a viga, admitindo-se um balanço com comprimento L_x igual a 1,50m, com o intuito de que fosse possível a análise da influência da esbeltez da alma do pilar. Desse modo, foram estudados grupos de modelos que consistem em uma viga soldada na alma do pilar, na direção de menor inércia. Os modelos diferenciam-se apenas pelas características geométricas dos perfis dos pilares. A partir dessas considerações, as características da análise e as simplificações adotadas são as mesmas para todos os modelos utilizados, levando-se em consideração as características de não linearidade física descrita à frente. Os detalhes das etapas desse desenvolvimento são descritos a seguir.

3.2 – Critérios utilizados na análise numérica

Para se representar um modelo o mais próximo da realidade a modelagem numérica depende de uma série de critérios, dos quais os mais significativos são a escolha dos elementos finitos - o que define a tipologia e a complexidade da discretização, a escolha dos modelos de plasticidade dos materiais com as respectivas descrições constitutivas da relação tensão-deformação e a adequação da geometria de alguns componentes para simular comportamentos específicos, como é o caso da solda.

Esses fatores influenciam diretamente nos mecanismos utilizados para simular o comportamento da ligação estudada e, tratando-se especialmente do aspecto qualitativo, são de fundamental importância na validação dos resultados numéricos, viabilizando assim a utilização da modelagem em análises paramétricas.

Considerando-se a natureza dos resultados que se pretende obter, a adoção de modelos tridimensionais é ainda mais representativa pela possibilidade de simular determinados mecanismos de transferência de esforços que, muitas vezes por impossibilidades numéricas, não podem ser considerados em tipos específicos de elementos finitos bidimensionais.

A distribuição das deformações plásticas ao longo da espessura da alma do pilar, por exemplo, pode ser facilmente observada em elementos volumétricos. Assim, adotando como princípio básico a melhor representatividade dos modelos tridimensionais, todos os componentes das ligações, isto é, viga, pilar e solda, foram simulados de acordo com suas características geométricas, seguindo uma metodologia de modelagem 3D.

3.3 – Não Linearidade Física

A rigidez inicial dos modelos das ligações depende das características elásticas dos materiais, da geometria dos modelos e da tipologia do carregamento a que estão submetidos os seus componentes.

O desenvolvimento de deformações plásticas e a redistribuição de tensões, assim como a caracterização do colapso, dependem somente dos modelos constitutivos utilizados na simulação da plasticidade dos materiais.

Foram adotados diagramas multilíneares para a representação do comportamento

tensão-deformação do aço da viga e pilar, para uma melhor consideração das características dos materiais envolvidos na ligação, conforme figura 3.1. A representação do comportamento do aço da solda foi feita através de um diagrama bilinear, apresentado na figura 3.1, sendo utilizado o mesmo aço da viga e do pilar. Após a tensão máxima f_{\max} , o trecho descendente no diagrama tensão deformação representa uma sofisticação das relações constitutivas com relação à sua aplicação nas simulações numéricas, já que pode representar a ruptura do material. Como o colapso nos modelos é obtido, usualmente, pela falta de convergência da solução numérica, o que geralmente ocorre em estágios avançados de carregamento quando a solução não linear torna-se instável, a adoção de trechos descendentes com inclinação acentuada facilita a caracterização da instabilidade global do modelo numérico e, desta forma, dos estados limites últimos das ligações analisadas. Assim, duas relações típicas para as curvas tensão-deformação do aço, são mostradas na figura 3.1 representando esquematicamente possíveis configurações para simular os diagramas do aço dos perfis e da solda. O modelo constitutivo dos perfis foi proposto por Maggi (2004). Este modelo consiste em segmentos de retas consecutivos que servem para definir o comportamento elástico, a plastificação e o comportamento pós-plástico do material, de acordo com os parâmetros fornecidos pelo usuário.

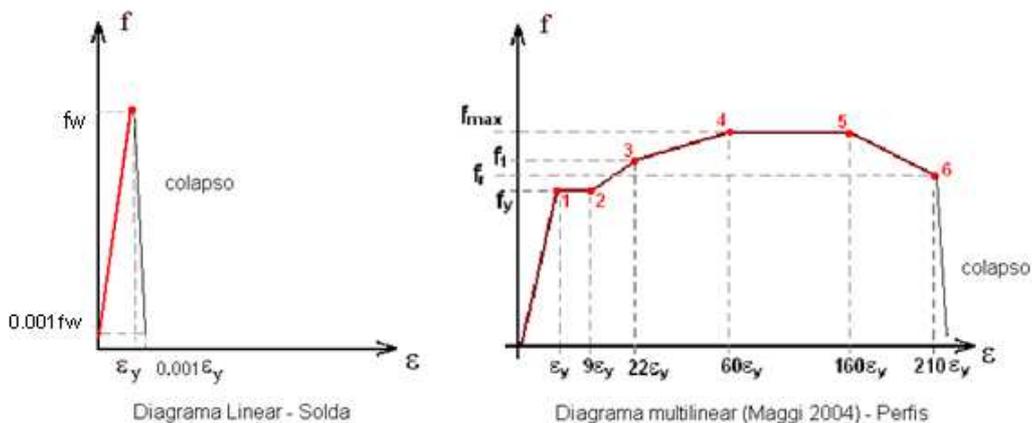


Figura 3.1 – Representação dos diagramas tensão - deformação utilizados

Foi utilizada a opção MISO disponível no Ansys para a representação desses diagramas, designado Multilinear Isotropic Hardening Plastic. O modelo MISO é capaz de reproduzir a plasticidade do aço utilizando as tensões equivalentes de Von Mises como critério de plastificação.

3.4 - Perfis Utilizados

Na determinação do comportamento elástico e pós-elástico da ligação na alma do pilar, é fundamental conhecer sua esbeltez λ_w dada pela relação:

$$\lambda_w = L_w / t_w$$

onde $L_w = d - 1,5 \cdot r$, sendo:

d = altura da alma da coluna;

r = raio de laminação;

t_w = espessura da alma da coluna.

Para perfis comerciais das classes IPE e HE, a esbeltez da alma varia aproximadamente de 10 a 50. Segundo Neves (1996), para determinados valores de λ_w , tem-se a predominância dos comportamentos de cisalhamento ou flexão e cisalhamento combinados na resposta da curva momento-rotação para a alma da coluna.

Diante da grande variação deste parâmetro, neste trabalho foram utilizados perfis laminados padronizados, semelhantes aos da série HE, produzidos no mercado brasileiro. Assim, foram utilizados os mesmos perfis analisados nos modelos de Hotes (2006) e Silva (2007) que estudaram ligações com chapa de topo na direção do eixo de menor inércia do pilar, de forma a se fazer, quando cabível, alguma comparação dos seus resultados com os obtidos nos modelos desenvolvidos neste trabalho.

3.5 – Preparação dos Modelos Numéricos

A montagem dos modelos numéricos consistiu das seguintes fases:

- i. Montagem da geometria dos modelos;
- ii. Escolha dos tipos de elementos finitos a serem utilizados;
- iii. Definição das características dos materiais envolvidos;
- iv. Preparação da malha de elementos finitos na geometria;
- v. Definição das condições de contorno do modelo;
- vi. Aplicação do carregamento.

É conveniente enfatizar que os procedimentos detalhados a seguir são referentes a aspectos qualitativos da modelagem, não se atendo em nenhum momento aos comandos ou procedimentos específicos dos softwares utilizados no pré-processamento e na análise. Ressalta-se ainda que, nesta fase, não há preocupação em validar os modelos numéricos comparando-os com resultados experimentais. Tais comparações serão feitas mais adiante.

3.6 - Ferramentas auxiliares para a modelagem

O processo de simulação numérica é iniciado por uma fase que, comumente, denomina-se de “pré-processamento”, na qual se definem a geometria dos modelos, a discretização, o carregamento e as condições de contorno. Em geral, o tempo gasto nesta fase depende da complexidade dos modelos, consumindo grande parte do tempo total da análise numérica. Para a análise paramétrica, a variação das características geométricas é um aspecto importante e, neste caso, é desejável a utilização de ferramentas que possibilitem a parametrização dos modelos numéricos, permitindo um pré-processamento rápido ao haver necessidade de mudanças, no caso deste trabalho, das características geométricas do pilar de cada modelo. Desta forma, utilizou-se um software específico para o pré-processamento, denominado TrueGrid, que juntamente com o software de análise, permitiu a construção das malhas por meio de arquivos parametrizados.

Desta forma fica muito mais prático incorporar as variações do modelo, visto que a utilização de um arquivo texto facilita a mudança de parâmetros como geometria, materiais, condições de contorno, e outros. Utilizou-se o critério de convergência Newthou Raphson e os modelos demoraram aproximadamente 30 minutos para finalizar o processo.

3.7 – Montagem da geometria dos modelos

3.7.1 - Escolha dos Modelos

Como já mencionado, foram adotados os perfis laminados H e I do catálogo da AÇOMINAS, os mesmos utilizados por Hotes(2006)e Silva (2007), buscando uma faixa ampla de variação da esbeltez da alma do pilar.

3.7.2 - Características Geométricas dos Modelos

A figura 3.2, ilustra a seção transversal da viga (perfil W360x44) – com suas respectivas dimensões e propriedades geométricas – que foi utilizada em todos os modelos analisados, admitindo-se a viga em balanço com comprimento $L_x = 1,50\text{m}$.

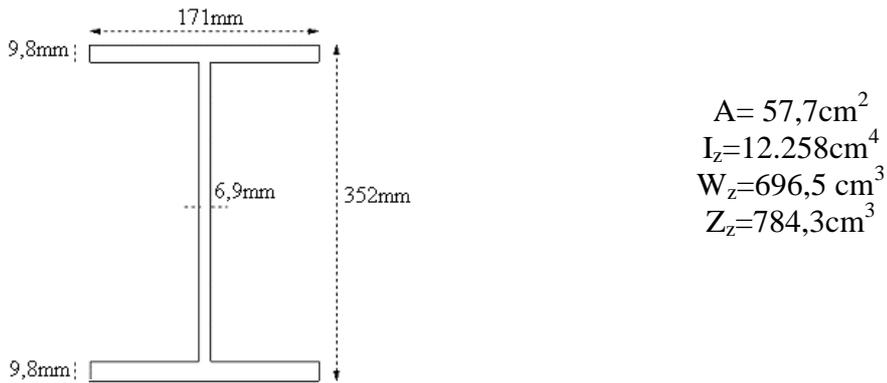


Figura 3.2 – Propriedades geométricas da seção transversal escolhida para a viga dos modelos numéricos (perfil W360x44)

A figura 3.3 apresenta, esquematicamente, os principais parâmetros da seção transversal dos perfis adotados para os pilares.

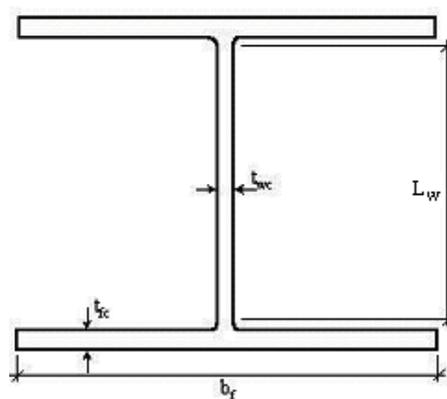


Figura 3.3 - Geometria esquemática do pilar

A tabela 3.1 apresenta as características geométricas dos pilares dos modelos analisados no trabalho, incluindo a designação dos correspondentes modelos numéricos,

indicando o tipo de perfil utilizado no pilar.

Tabela 3.1: Dimensões da seção dos perfis utilizados no pilar

Classes	Modelos	Perfil	t_w (mm)	L_w (mm)	$\lambda_w=L_w/t_w$	t_{fc} (mm)	b_f (mm)
Classe 1	BIE₁	HP310 x 125	17,4	253	14,54	17,4	312
	BIE₂	HP310 x 110	15,4	253	16,43	15,5	310
	BIE₃	HP310 x 93	13,1	253	19,31	13,1	308
Classe2	MIE₁	W310 x 117	11,9	253	21,26	18,7	307
	MIE₂	W360 x 122	13,0	296	22,77	21,7	257
	MIE₃	W310 x 107	10,9	253	23,21	17,0	306
	MIE₄	W310 x 97	9,9	253	25,56	15,4	305
	MIE₅	W360 x 110	11,4	296	25,96	19,9	256
	MIE₆	W250 x 44,8	7,6	225	29,61	13,0	148
Classe3	AIE₁	W360 x 79	9,4	296	31,49	16,8	205
	AIE₂	W360 x 72	8,6	296	34,42	15,1	204
	AIE₃	W360 x 57,8	7,9	314	39,75	13,1	172
	AIE₄	W360 x 51	7,2	314	43,61	11,6	171
	AIE₅	W360 x 44	6,9	314	45,51	9,8	171
	AIE₆	W360 x 39	6,5	314	48,31	10,7	128
	AIE₇	W530 x 82	9,5	483	50,84	13,3	209
	AIE₈	W410 x 46,1	7,0	363	51,86	11,2	140
	AIE₉	W360 x 32,9	5,8	314	54,14	8,5	127

Como o principal parâmetro que definiu os pilares utilizados nos modelos numéricos foi a esbeltez da alma (λ_w), definida pela relação entre a altura e a espessura da mesma, as denominações BIE, MIE e AIE apresentadas na tabela 3.1 referem-se, respectivamente, aos modelos pertencentes às classes 1, 2 e 3, ou seja, ligações com baixo ($\lambda_w < 20$), médio ($20 \leq \lambda_w < 30$) e alto ($\lambda_w \geq 30$) índice de esbeltez da alma do pilar.

A solda representada nos modelos foi uma solda de filete.

3.7.3 - Escolha dos tipos de elementos finitos a serem utilizados

3.7.3.1 - Elemento volumétrico

O elemento finito 3D escolhido para ser utilizado na discretização do modelo, principalmente devido às características da geometria é o elemento volumétrico. Além da necessidade de obtenção de precisão nos resultados, juntamente com a otimização do modelo, é necessário obter uma razão eficiente entre qualidade dos resultados e minimização do esforço computacional, principalmente no que se refere ao tempo de

processamento.

Sendo assim, foi escolhido o elemento finito denominado no ANSYS por SOLID45. Esse elemento possui 8 nós, cada um com liberdade de translação nas direções X, Y e Z.

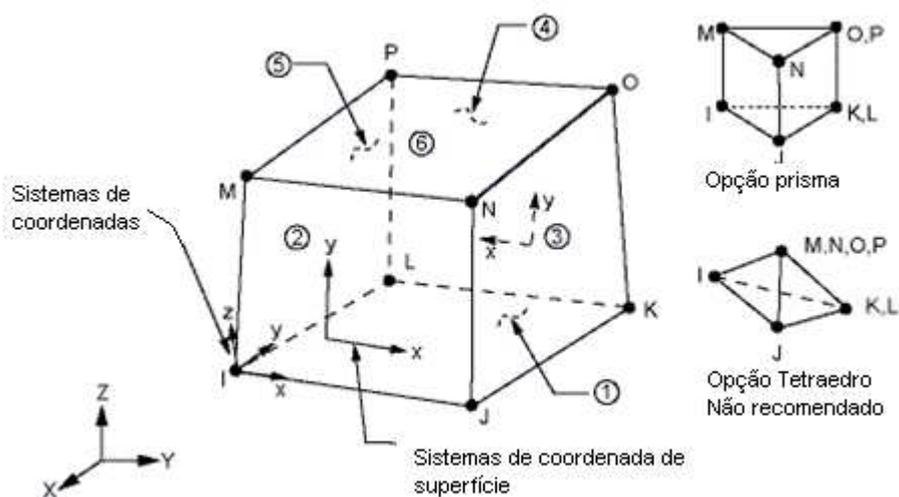


Figura 3.4 - Elemento SOLID45 - Fonte: ANSYS Help System Release 11.0.

Possui ainda características de plasticidade, admitindo a utilização de diagrama multilinear para a representação do comportamento tensão-deformação do material utilizado. A sua representação esquemática é apresentada na figura 3.4. O elemento solid 45 foi utilizado para o pilar, a viga e também para a solda de filete.

3.7.3.2 - Elemento de Barra

Um elemento unidimensional de barra foi utilizado para representar parte do comprimento da viga, visando-se à diminuição do número de elementos nas regiões onde apenas a transmissão de esforços é preponderante (próximo à extremidade da viga) sem o comprometimento da análise na região da ligação.

O elemento linear utilizado foi o BEAM3 (figura 3.5) que possui três graus de liberdade por nó (translações nas direções X e Y e rotação em torno do eixo Z) e é

definido através da área da seção transversal, do momento de inércia em relação ao eixo Z, da altura da seção e das propriedades do material.

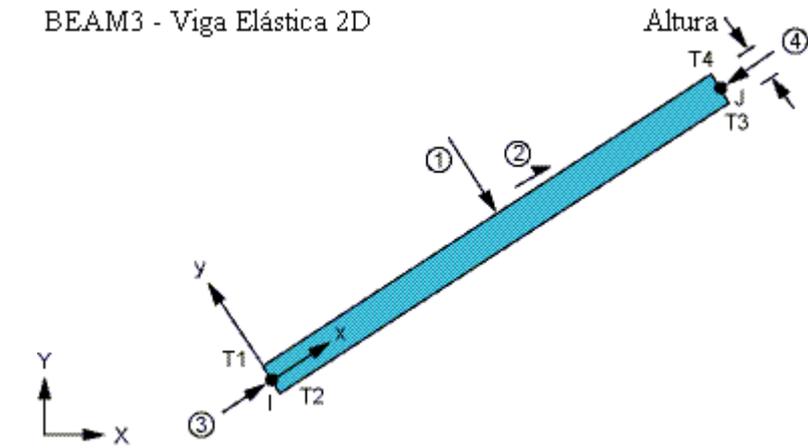


Figura 3.5 - Elemento BEAM3 - Fonte: ANSYS Help System Release 11.0.

A continuidade dos esforços dos elementos de barra (BEAM3) para os elementos volumétricos (SOLID45) na viga é garantida pelo acoplamento dos graus de liberdade nos nós de interseção dos dois tipos de elementos.

3.7.4- Definição das características dos materiais envolvidos

Para representar a viga, o pilar e a solda foi utilizado, na análise numérica um único tipo de material: o aço ASTM-A572-Grau50. ($f_y=34,5\text{kN/cm}^2$), lembrando que para a solda foi utilizado um diagrama linear.

Para a caracterização do comportamento dos materiais da viga, pilar e solda foram usados os diagramas tensão x deformação já comentados cujas constantes foram utilizadas para todos os modelos.

3.7.5 - Preparação da malha de elementos finitos na geometria

A definição da malha de elementos finitos é parte essencial da análise, na qual a geometria da discretização é moldada com os elementos finitos previamente escolhidos.

O comprimento do pilar foi estendido, a partir do plano médio das mesas inferior e superior da viga, com comprimentos equivalentes a 1,5 vezes a altura da seção

transversal da viga.

Para a análise utilizou-se 1,50m como o comprimento total do vão livre da viga fazendo-se uso dos elementos finitos tridimensionais na faixa de comprimento equivalente a $2H$ (H = altura da viga), a partir da ligação, adotando-se o elemento de barra para o trecho restante.

A continuidade dos esforços foi garantida através do acoplamento dos graus de liberdade na seção de interseção dos dois tipos de elementos, de modo a garantir a transmissão dos deslocamentos e rotações dos elementos de barra para os tridimensionais.

Esse acoplamento foi executado considerando-se as condições representadas pelas equações (40) e (41):

$$U_{y(SOLID)} = U_{y(BEAM)}$$
$$U_{x(SOLID)} = U_{x(BEAM)} + ROT_{z(BEAM)} \cdot d_{y(BEAM-SOLID)}$$

Os parâmetros U_x e U_y correspondem aos deslocamentos segundo as direções X e Y dos nós dos elementos SOLID e BEAM; ROT_z é a rotação, em torno do eixo Z, do nó do elemento BEAM e d_y é a distância, medida segundo a direção Y, entre o nó do elemento BEAM e os demais nós dos elementos SOLID situados na seção transversal, sendo o nó do elemento BEAM considerado como nó de referência.

Na figura 3.6 são apresentados alguns detalhes das malhas geradas para os componentes do modelo.

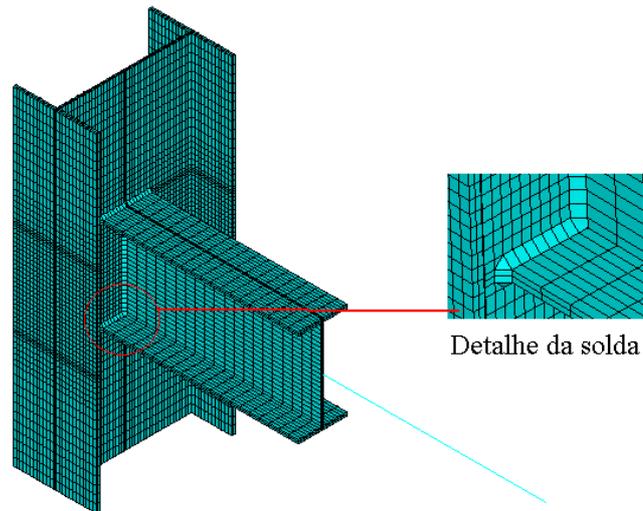


Figura 3.6 - Malha de elementos finitos

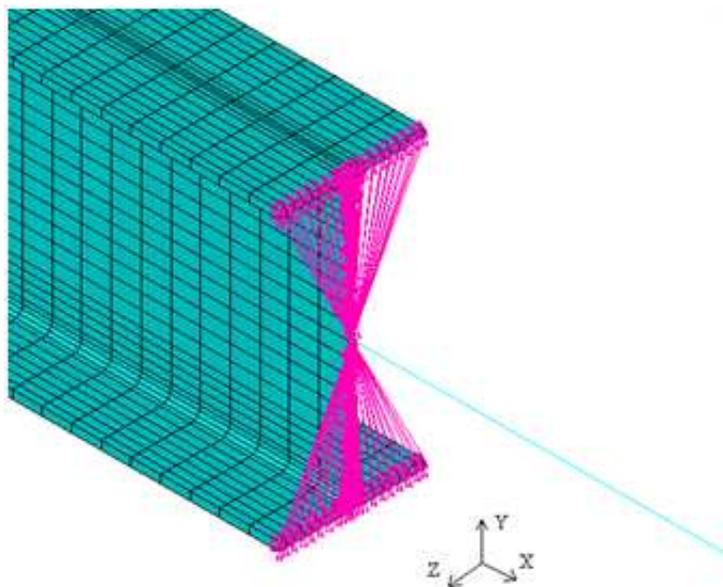


Figura 3.7 – Acoplamento dos nós na seção de interseção Beam-Solid

3.7.6 - Definição das condições de contorno do modelo

Quanto às condições de contorno, nas extremidades inferior e superior do pilar foram impostas as restrições à translação nas direções X, Y e Z (figura 3.8).

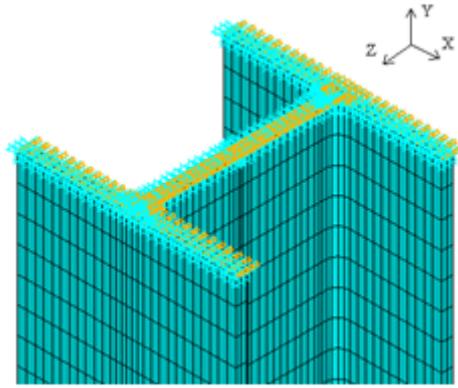


Figura 3.8 - Vinculação das extremidades do pilar nas três direções

3.7.7 - Aplicação do carregamento

A introdução do carregamento foi feita através da aplicação de uma força vertical em Y, de cima para baixo, na extremidade livre do elemento de viga. Utilizou-se o elemento de barra para amenizar os efeitos da aplicação de carga diretamente no volume do modelo.

O valor máximo da carga vertical foi estabelecido, em função do modo crítico verificado em cada modelo, onde a verificação da alma foi feita utilizando-se o modelo de GOMES(1990), e as demais componentes da ligação foram verificadas utilizando-se a ABNT NBR 8800 (2008).

O carregamento foi aplicado de forma incremental-iterativa. O processo iterativo para a solução do sistema de equações não lineares foi o método de Newton-Raphson Padrão. A figura 3.9 mostra a carga aplicada à extremidade livre do elemento Beam.

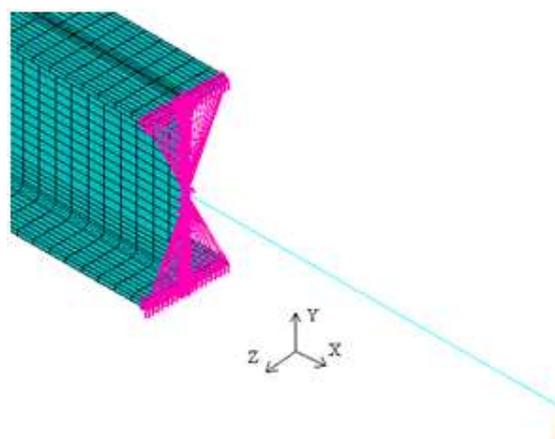


Figura 3.9 - Carregamento aplicado na extremidade livre do elemento Beam

3.8 - Apresentação dos Resultados Numéricos

3.8.1 - Aspectos Gerais

São apresentados neste capítulo os resultados obtidos para os modelos numéricos das classes de esbelteza estudadas. A título de simplificação será mostrado detalhadamente o que foi analisado para apenas um modelo de cada classe, ou seja, um da classe 1 (BIE2, baixo índice de esbelteza, menor que 20), um para a classe 2 (MIE2, médio índice de esbelteza, entre 20 e 30) e um para a classe 3 (AIE5, alto índice de esbelteza, superior a 30), sendo que para os demais a análise foi feita de forma similar.

Estes modelos foram escolhidos para apresentação detalhada dos resultados detalhadamente, uma vez que, juntamente com o modelo MIE6, também foram analisados experimentalmente, facilitando a comparação entre os resultados obtidos nos dois tipos de análise.

3.8.2 - Modelo BIE2

O modelo BIE₂ é um modelo da classe 1 (baixo índice de esbelteza), com $\lambda_w = 16,43$. Para a viga foi utilizado o perfil W360x44 e para o pilar o perfil HP310x110. Na tabela 3.2 são apresentadas as propriedades geométricas dos perfis utilizados no modelo.

Tabela 3.2 – Propriedades Geométricas dos perfis que compõem o modelo BIE2

Coluna	h_c	30,8cm	Altura do perfil do pilar
	b_{fc}	31,0cm	Largura da mesa do pilar
	t_{wc}	1,54cm	Espessura da alma do pilar
	t_{fc}	1,55cm	Espessura da mesa do pilar
Viga	h_v	35,2cm	Altura do perfil da viga
	b_{fv}	17,1cm	Largura da mesa da viga
	t_{wv}	0,69cm	Espessura da alma da viga
	t_{fv}	0,98cm	Espessura da mesa da viga

Na figura 3.10 é mostrada uma visão geral do modelo BIE2.

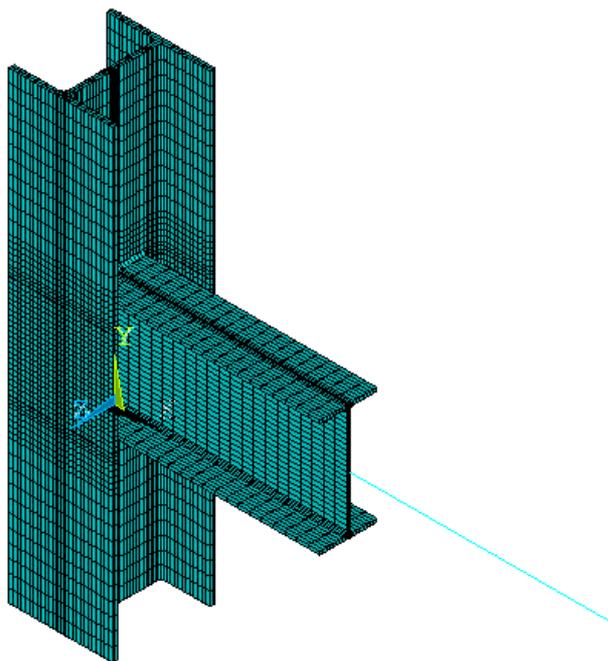


Figura 3.10 – Visão geral do modelo BIE2

Para o modelo BIE2, a carga teórica de plastificação foi de 437,56kN (mecanismo combinado de puncionamento e flexão), correspondendo ao momento teórico de plastificação igual a 14.973kN.cm, equivalente à aplicação de uma carga de 99,8kN na extremidade da viga do modelo numérico. A análise numérica, entretanto, foi encerrada com uma carga de 175,63kN.

3.8.2.1 - Curva Momento x Rotação

A curva momento x rotação visa a avaliação do comportamento da ligação viga-pilar, sendo uma curva que possui como abscissa a rotação relativa ϕ da ligação e como ordenada o momento M aplicado.

A rotação da viga, para a obtenção da curva momento x rotação foi calculada (para cada incremento de carga) a partir da diferença y do deslocamento vertical de dois nós, próximos entre si, localizados na mesa inferior da viga, dividida pela distância L entre esses pontos, conforme ilustrado na figura 3.11. Foi adotado como o primeiro desses nós o ponto de interseção entre a viga e a alma do pilar, estando o segundo nó localizado a uma distância de 11,2cm do primeiro.

Já para a rotação da alma, como também indicado na figura 3.11, a cada incremento de carga foi determinada pela diferença y' do deslocamento horizontal relativo entre dois nós localizados na alma do pilar e pela distância L' entre eles. Esses

nós situam-se nos pontos de interseção entre a alma e o ponto mais externo da continuidade da mesa da viga, ou seja, seleciona-se na alma do pilar os pontos em que a mesma coincidiria com a extensão da mesa da viga.

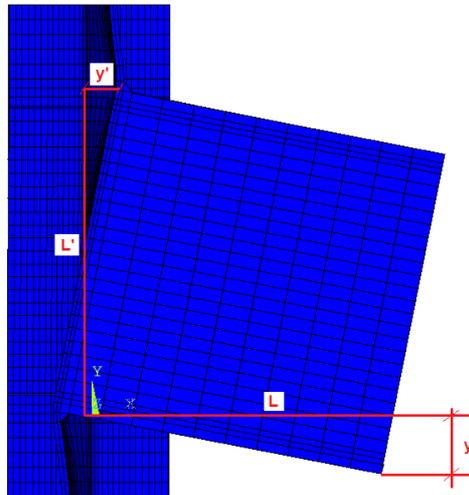


Figura 3.11: Determinação das rotações: alma e ligação.

As curvas momento x rotação da viga e da alma, para o modelo BIE2, são apresentadas na figura 3.12.

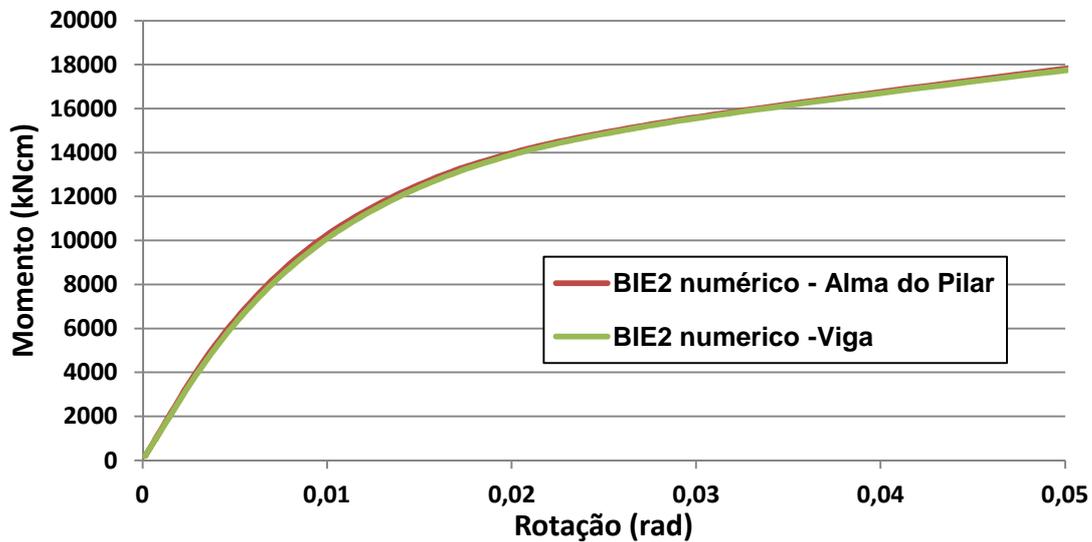


Figura 3.12 – Curva momento x rotação do modelo BIE2

Os resultados obtidos demonstram que são praticamente idênticas as curvas momento x rotação relativas à viga e à alma do pilar, evidenciando que não ocorrem rotações relativas entre esses elementos da ligação ou, em outras palavras, a viga sofre deslocamentos de corpo rígido decorrentes da rotação da alma do pilar.

Assim, com os resultados da análise numérica e a partir da tangente às curvas na origem, pode-se calcular a rigidez inicial da ligação, obtendo-se o valor de 1.363.553kN.cm/rad.

3.8.2.2 – Tensões de Von Mises

Para um corpo submetido a um sistema tridimensional de solicitações, o critério de Von Mises possibilita o estabelecimento de uma tensão resultante em qualquer ponto, de modo a possibilitar a análise comparativa dessa tensão com resistência ao escoamento do material. Assim, se a tensão equivalente de Von Mises exceder o limite de elasticidade, o material é considerado na condição de falha. Para o caso do modelo apresentado a tensão de escoamento é de 34,5kN/cm² e a tensão de ruptura do material é de 45kN/cm².

Para o modelo BIE2 as distribuições de tensões de Von Mises estão representadas nas figuras 3.13 a 3.15 (alma do pilar, mesa superior e mesa inferior da viga, respectivamente), para 4 níveis de carregamento aproximadamente equivalentes a carregamentos de 1/4F_{últ}, 1/2 F_{últ}, 3/4 F_{últ}, e F_{últ}, sendo F_{últ} = 175,63kN a carga final da análise numérica do modelo BIE2. Desta forma visa-se obter uma visão geral da distribuição de tensões ao longo de todo o carregamento do modelo.

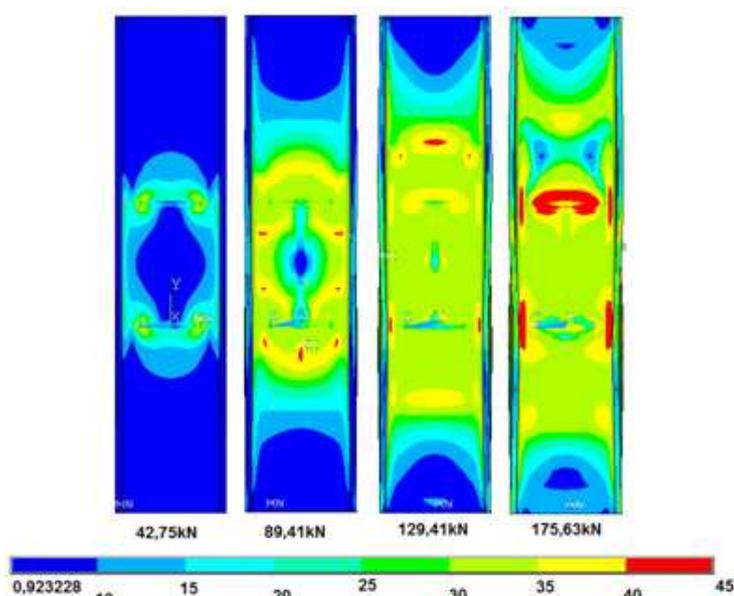


Figura 3.13 – Distribuição de Tensões de Von Mises (kN/cm²) na alma do pilar (Modelo BIE2)

A observação dos resultados obtidos revela que, para a aplicação de uma carga de 89,41kN na extremidade da viga, correspondente ao momento de 13.412kN.cm na ligação, já podem ser identificadas regiões com tensões superiores à tensão de

escoamento do material na alma do pilar (regiões em amarelo na figura 3.13), inclusive algumas (de pequenas dimensões), nas quais a tensão de Von Mises atingem valores iguais ou superiores a 40kN/cm^2 (pontos em vermelho na figura 3.13).

Para a carga de $129,41\text{kN}$ (momento na ligação igual a $19,412\text{kN}\cdot\text{cm}$), a alma apresenta uma região bastante definida de plastificação total na região correspondente à mesa superior da viga e em uma região abaixo da mesa inferior da viga, além de outra acima da mesa superior, nesse último caso também apresentando uma área razoavelmente considerável com tensões de Von Mises iguais ou superiores a 40kN/cm^2 .

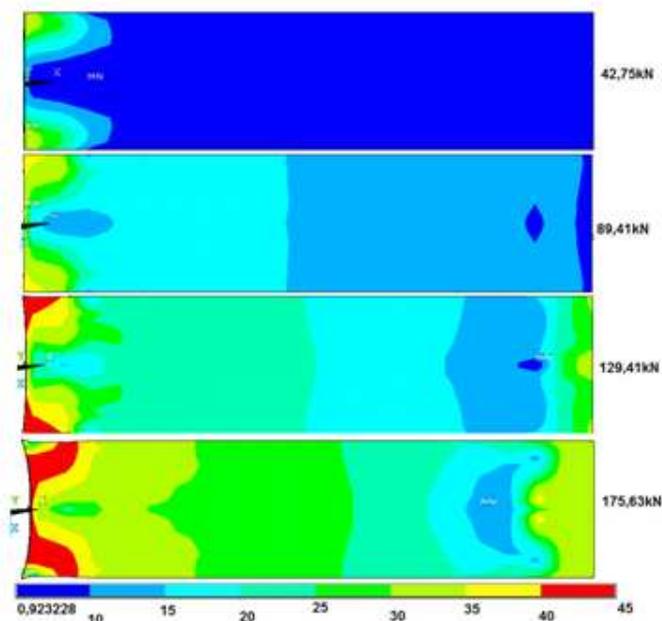


Figura 3.14 – Tensões de Von Mises (kN/cm^2) na mesa superior da viga (Modelo BIE2)

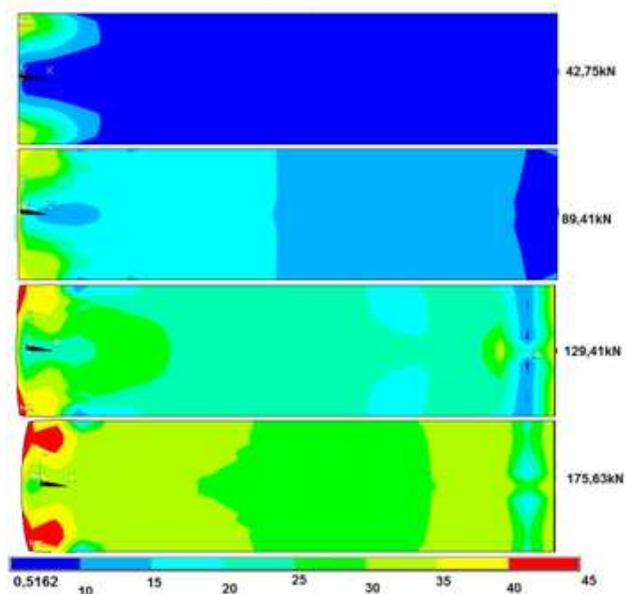


Figura 3.15 – Tensões de Von Mises (kN/cm^2) na mesa inferior da viga (Modelo BIE2)

Observa-se ainda (figuras 3.14 e 3.15) que o comportamento das mesas superior e inferior da viga é praticamente idêntico, com regiões muito diminutas com tensões da mesma ordem de grandeza de f_y (carga de 89,41kN) e pequenas regiões com tensões iguais ou superiores a 40kN/cm^2 para carga de 129,41kN.

É importante salientar que a carga de 99,8kN, aplicada à extremidade da viga do modelo BIE2 corresponde ao valor teórico de plastificação total da região tracionada da alma do pilar, caracterizando a formação do mecanismo combinado de puncionamento e flexão.

3.8.2.3 - Deslocamentos da alma do pilar

A figura 3.16 apresenta, de modo qualitativo, as deformações da alma do pilar nas regiões correspondentes aos planos médios das mesas inferior e superior da viga (linhas 1 e 2, respectivamente), apresentando-se em seguida (figura 3.17) o gráfico dos respectivos deslocamentos da alma nessas regiões, na direção paralela ao eixo da viga, para a carga última obtida na análise numérica.

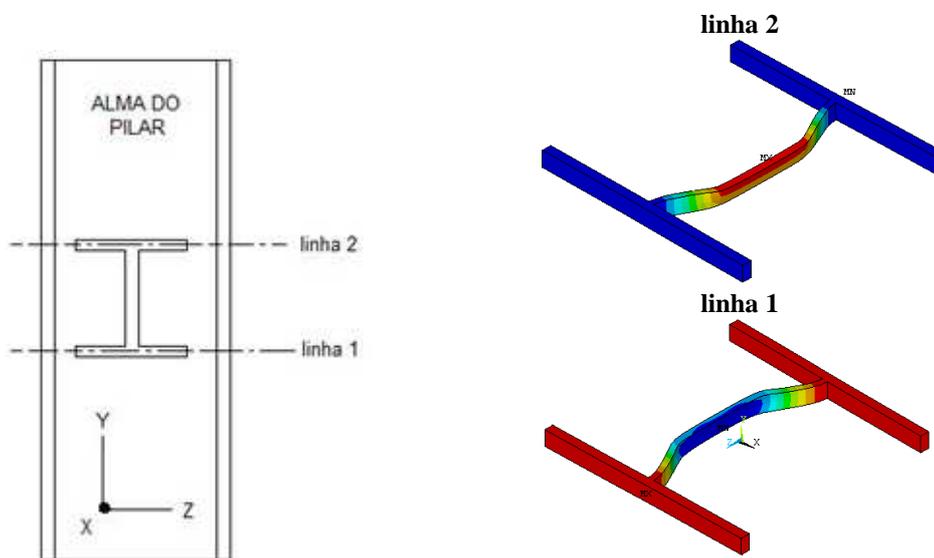


Figura 3.16 – Representação qualitativa dos deslocamentos da alma do pilar, na direção X, nas linhas correspondentes aos planos médios das mesas da viga (Modelo BIE2 - Carga = 175,63kN)

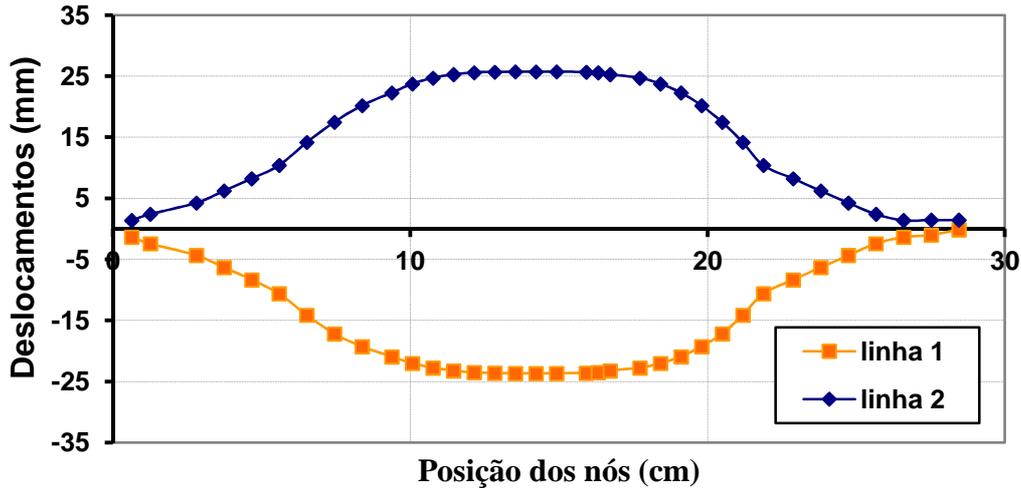


Figura 3.17 – Deslocamentos da alma do pilar, na direção X, nas linhas correspondentes aos planos médios das mesas da viga (Modelo BIE2 - Carga = 175,63kN)

Analogamente, para 3 linhas ao longo do eixo Z (eixo do pilar), pode-se observar na figura 3.18, ainda de modo qualitativo, as deformações da alma do pilar, sendo apresentados na figura 3.19 os gráficos correspondentes, também para a carga última da análise numérica.

Levando-se em consideração os deslocamentos máximos (verificados nas linhas 1 e 2), a rotação da alma do pilar seria igual a 0,143rad ou 8,21°, correspondendo a um deslocamento vertical da extremidade da viga (150cm de comprimento) aproximadamente igual a 21,5cm, ou seja, cerca de 25 vezes o deslocamento vertical máximo recomendado pelo Anexo C da NBR8800 (ABNT, 2008), admitindo-se a viga como de piso.

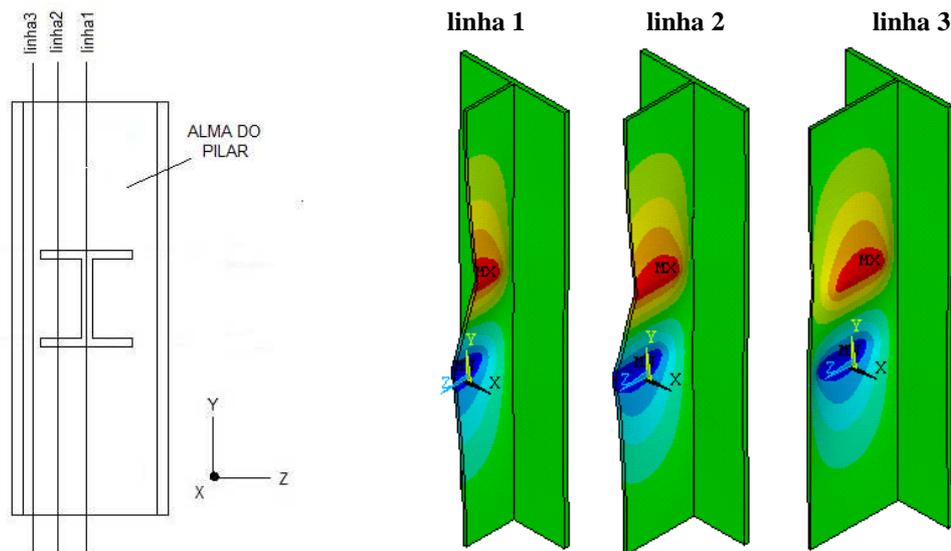


Figura 3.18 – Representação qualitativa dos deslocamentos da alma do pilar, na direção X, ao longo de linhas paralelas ao eixo do pilar (Modelo BIE2 - Carga = 175,63kN).

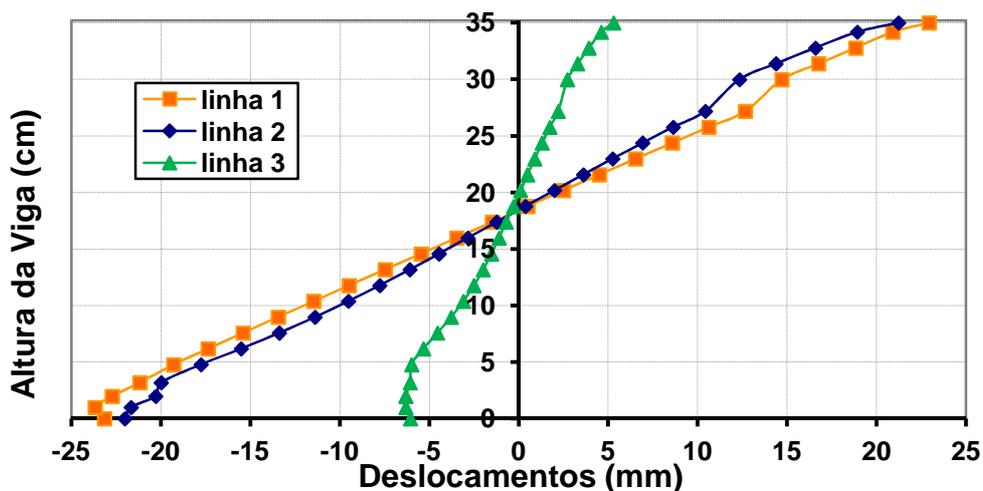


Figura 3.19 – Deslocamentos da alma do pilar, na direção X, ao longo de linhas paralelas ao eixo do pilar (Modelo BIE2 - Carga = 175,63kN)

Observando-se as curvas apresentadas na figura 3.18 e considerando-se que a altura total da seção transversal da viga é de 352mm, verifica-se que o ponto da alma do pilar com deslocamento nulo não corresponde ao ponto equivalente à metade da altura da seção transversal da viga. Em outras palavras, como já constatado em termos da diferença entre os deslocamentos correspondentes aos planos médios das mesas da viga, conclui-se que o ponto com deslocamento nulo situa-se 3mm abaixo do ponto médio da altura da seção transversal da viga, evidenciando comportamentos praticamente idênticos das regiões tracionada e comprimida da ligação.

3.8.3 - Modelo MIE2

O modelo MIE₂ é um modelo composto pela viga comum a todos os modelos (perfil W360x44) e pilar constituído por perfil W360x122, com $\lambda_w = 22,77$, considerado como médio índice de esbelteza (Classe 2), sendo apresentadas, na Tabela 3.3, as propriedades geométricas dos perfis utilizados e, na figura 3.20, uma visão geral do modelo analisado.

Tabela 3.3 – Propriedades geométricas dos perfis que compõem o modelo MIE2

Coluna	h_c	36,3cm	Altura do pilar
	b_{fc}	25,7cm	Largura da mesa do pilar
	t_{wc}	1,30cm	Espessura da alma do pilar
	t_{fc}	2,17cm	Espessura da mesa do pilar
Viga	h_v	35,2cm	Altura da viga
	b_{fv}	17,1cm	Largura da mesa da viga
	t_{wv}	0,69cm	Espessura da alma da viga
	t_{fv}	0,98cm	Espessura da mesa da viga

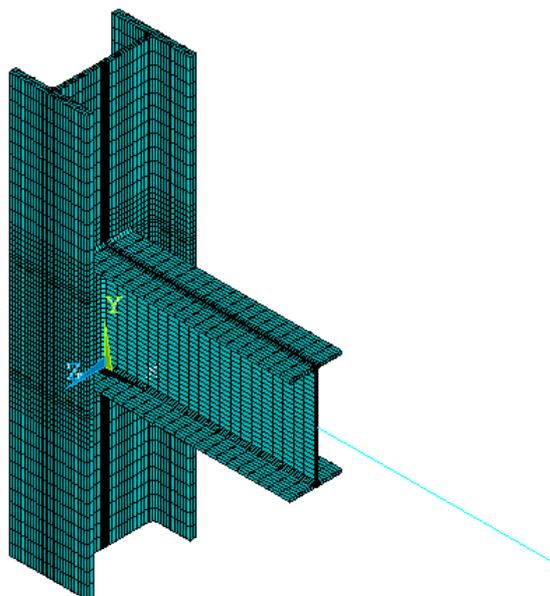


Figura 3.20 – Visão geral do modelo MIE2

Para o modelo MIE2, foi considerada a carga teórica de plastificação, correspondente ao mecanismo global, de 281,74kN, resultando em sollicitação máxima na ligação de 9.641kN.cm. Esta sollicitação corresponde à aplicação de uma carga igual a 64,27kN na extremidade da viga do modelo mas a análise numérica foi encerrada para uma carga de 178,09kN (aproximadamente 2,77 vezes a carga teórica).

3.8.3.1- Curva Momento x Rotação

As curvas momento x rotação, obtidas utilizando-se o mesmo procedimento mencionado no item 3.8.2.1, são apresentadas na figura 3.21, observando-se, novamente, uma grande coincidência das curvas obtidas pela rotação da viga e da alma do pilar, pelo menos até momento fletor da ordem de 17.400kN.cm.

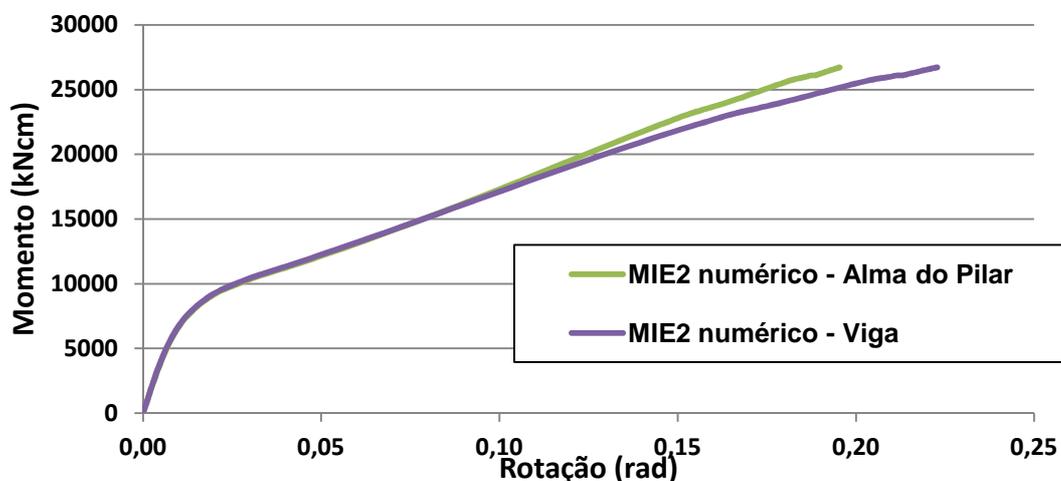


Figura 3.21- Curva momentox rotação do modelo MIE2

Assim, considerando-se a tangente às curvas na origem, determinou-se o valor de 831.726kN.cm/rad para a rigidez inicial do modelo.

3.8.3.2– Tensões de Von Mises

Nas figuras 3.22 a 3.24 são apresentadas as distribuições das tensões de Von Mises (respectivamente para alma do pilar, para a mesa superior e para a mesa inferior da viga), considerando-se os mesmos quatro níveis de carregamento ($1/4F_{\text{últ}}$, $1/2 F_{\text{últ}}$, $3/4 F_{\text{últ}}$, e $F_{\text{últ}}$) em relação à carga última obtida na análise numérica.

Observa-se que para a situação de carregamento na extremidade da viga igual a 89,71kN (aproximadamente 1,4 vezes a carga teórica prevista), já são verificadas tensões de Von Mises iguais ou superiores à tensão nominal de escoamento do material, caracterizando-se uma região com configuração muito próxima à geometria da charneira de plastificação teórica. Entretanto, em duas pequenas regiões da alma do pilar, localizadas acima da mesa da viga, ocorrem tensões iguais ou superiores a 40 kN/cm^2 .

Com o crescimento da sollicitação (carga aplicada de 136,08kN) são observadas redistribuições de tensões, com diminuição das tensões nas regiões acima mencionadas, mas com forte concentração de tensões tanto na região da mesa tracionada da viga, quanto nas junções da alma com as mesas do pilar, em regiões correspondentes às mesas tracionada e comprimida da viga.

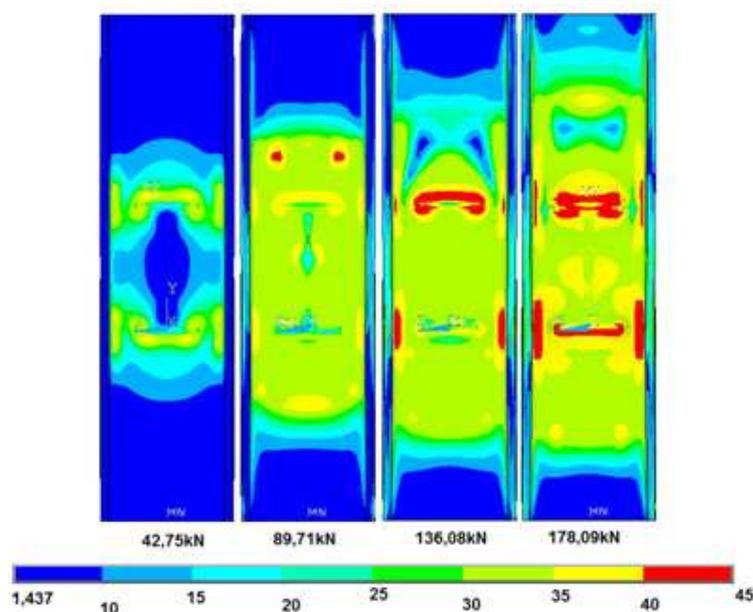


Figura 3.22– Distribuição de Tensões de Von Mises (kN/cm^2) na alma do pilar (Modelo MIE2)

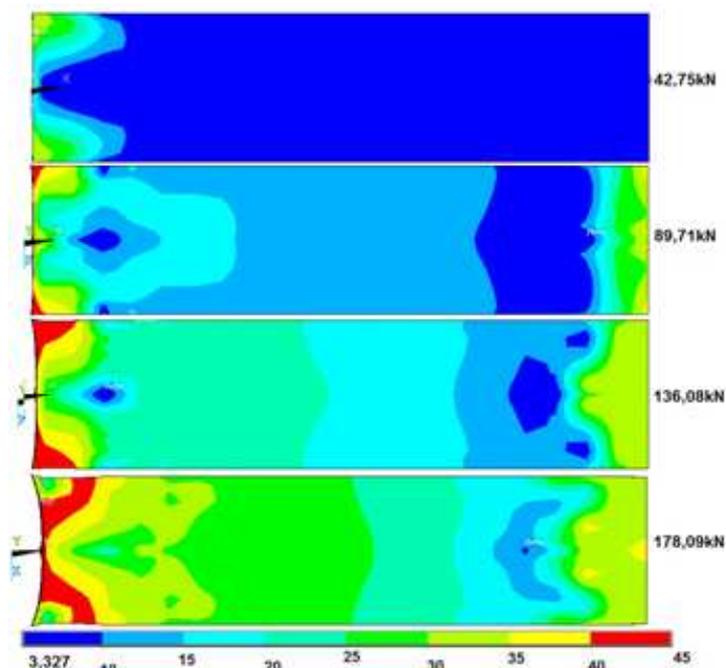


Figura 3.23 – Tensões de Von Mises (kN/cm^2) na mesa superior da viga (Modelo MIE2)

As distribuições de tensões de Von Mises, nesse caso, somente são semelhantes nas mesas superior e inferior da viga (figuras 3.23 e 3.24) para o carregamento de 42,75kN, apresentando diferenças que se tornam mais significativas à medida que crescem as solicitações. Assim, a partir da carga de 89,71kN, a mesa superior passa a apresentar concentrações mais significativas, especialmente na junção da mesa da viga com a alma do pilar sob carregamentos de 136,08kN e 178,09kN, evidenciando, nesse caso, um comportamento diferenciado entre as regiões tracionada e comprimida da ligação.

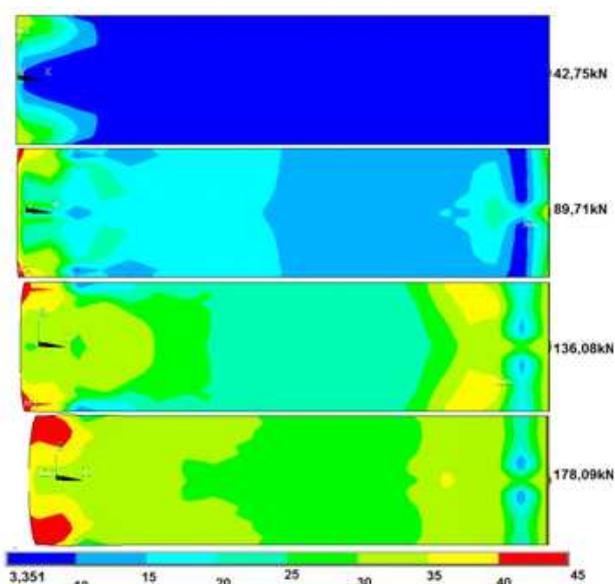


Figura 3.24 – Tensões de Von Mises (kN/cm^2) na mesa inferior da viga (Modelo MIE2)

3.8.3.3 - Deslocamentos da alma do pilar

Como no caso anterior, foram coletados os resultados correspondentes aos deslocamentos da alma do pilar, na direção perpendicular ao seu plano, em linhas coincidentes com os planos médios da mesa inferior (linha 1) e da mesa superior (linha 2) da viga da ligação, apresentados na figura 3.24 para a última etapa de carga verificada na análise numérica.

Os deslocamentos máximos verificados foram de -32,65mm (linha 1) e de 29,11mm (linha2), correspondendo a uma rotação igual a 0,179rad (ou 10,23°) da alma do pilar, com deslocamento vertical da extremidade da viga de aproximadamente 26,8cm (31,2 vezes o deslocamento vertical máximo recomendado).

Considerando-se as mesmas três linhas verticais utilizadas no caso do modelo BIE2, são apresentadas na figura 3.25 as curvas correspondentes aos deslocamentos da alma do pilar para a carga última da análise numérica do modelo MIE2 (178,09kN).

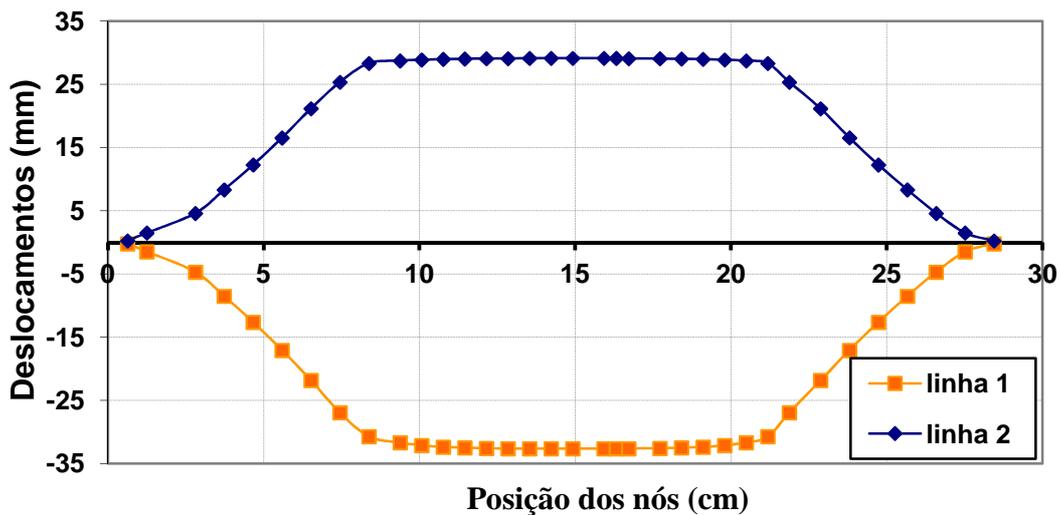


Figura 3.25 – Deslocamentos da alma do pilar, na direção X, nas linhas correspondentes aos planos médios das mesas da viga (Modelo MIE2 - Carga = 178,09kN)

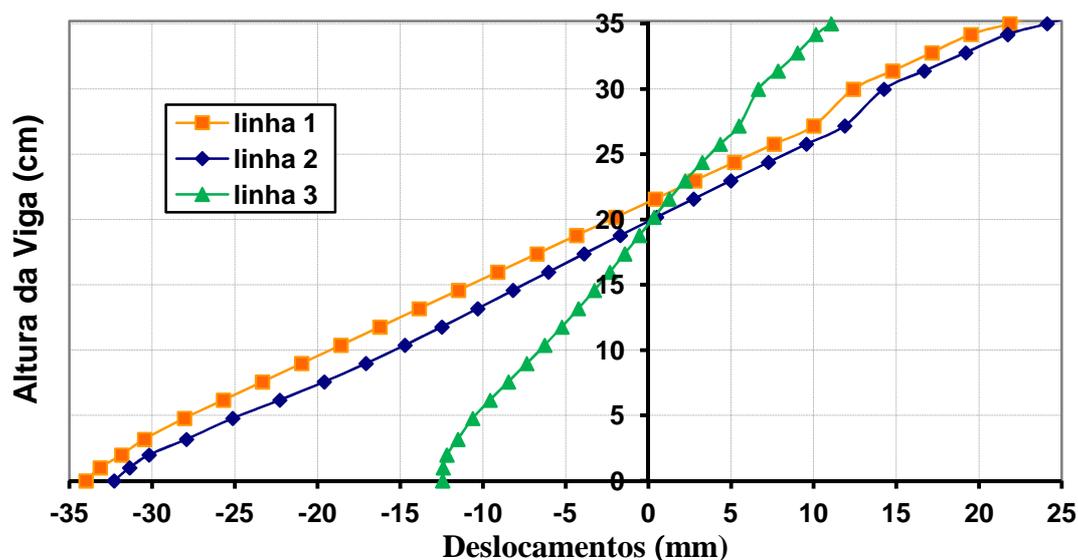


Figura 3.26 – Deslocamentos da alma do pilar, na direção X, ao longo de linhas paralelas ao eixo do pilar (Modelo MIE2 - Carga = 178,09kN)

Os resultados obtidos para a curva da linha 1 (figura 3.18), coincidente com o plano médio da alma da viga, possibilitam calcular a posição do ponto da alma do pilar com deslocamento nulo, situado a 3,8cm abaixo do ponto médio da altura da seção transversal da viga, evidenciando comportamentos distintos das regiões tracionada e comprimida da ligação.

3.8.4- Modelo AIE5

Para apresentação dos resultados numéricos da classe 3 (alto índice de esbeltez), foi escolhido o modelo AIE₅ (esbeltez igual a 45,51), composto por perfis W360x44 tanto para a viga quanto para o pilar, cujas propriedades geométricas são indicadas na tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Propriedades Geométricas do perfil utilizado no modelo AIE5

Coluna e Viga	h_c e h_v	35,2cm	Altura do pilar e da viga
	b_{fc} e b_{fv}	17,1cm	Largura da mesa do pilar e da viga
	t_{wc} e t_{wv}	0,69cm	Espessura da alma do pilar e da viga
	t_{fc} e t_{fv}	0,98cm	Espessura da mesa do pilar e da viga

Uma visão geral do modelo AIE5 é mostrada na figura 3.27, cuja carga máxima na análise numérica, aplicada á extremidade da viga foi de 89,03kN (solicitação na ligação de 13,354kN.cm), em uma situação de consideração de 75,73kN para a carga teórica de plastificação, correspondente ao momento fletor de 2.591kN.cm e carga de 17,28kN aplicada à extremidade da viga.

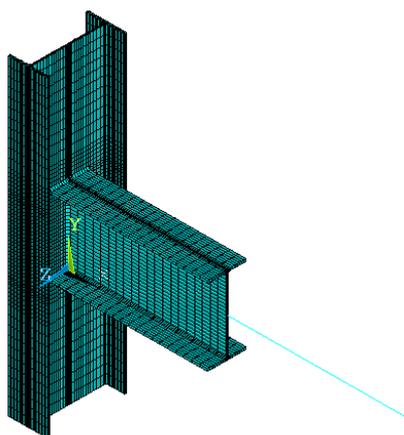


Figura 3.27 – Visão geral do modelo AIE5

3.8.4.1- Curva Momento x Rotação

As curvas momento x rotação apresentadas na figura 3.28, obtidas por intermédio dos deslocamentos da alma do pilar e da viga, apresentam-se praticamente idênticas ao longo de todas as etapas de carregamento, a exemplo do que foi verificado no caso do modelo BIE2, possibilitando a determinação do valor de 129.927kN.cm/rad para a rigidez inicial da ligação.

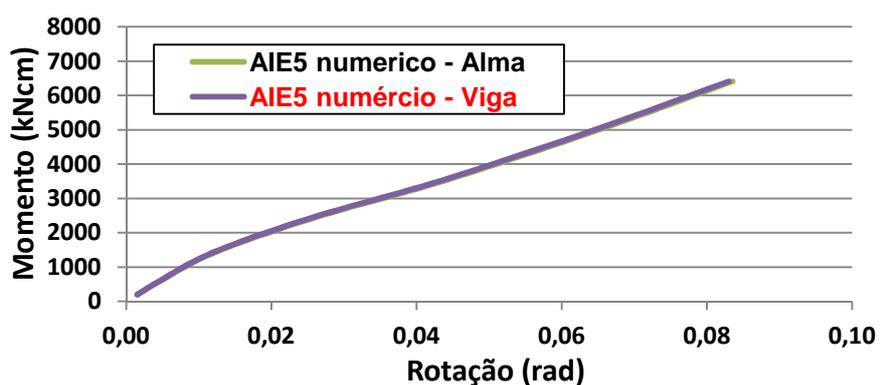


Figura 3.28 – Curva momentox rotação do modelo AIE5

3.8.4.2– Tensões de Von Mises

Para carregamentos equivalentes a $1/4F_{\text{últ}}$, $1/2 F_{\text{últ}}$, $3/4 F_{\text{últ}}$, e $F_{\text{últ}}$, sendo $F_{\text{últ}}$ igual à máxima carga observada na análise numérica, são apresentadas nas figuras 3.29 a 3.31

as distribuições das tensões de Von Mises na alma do pilar e nas mesas da viga.

A observação dos resultados apresentados (figura 3.28) permite verificar que, para uma carga de extremidade igual a 16,08kN (equivalente a 93% da carga que teoricamente causaria a formação de charneiras plásticas), aparecem regiões com tensões de Von Mises próximas ao valor nominal da tensão de escoamento do material, porém localizadas em regiões situadas próximas á ligação da alma com as mesas do pilar, ligeiramente abaixo da posição da mesa tracionada da viga.

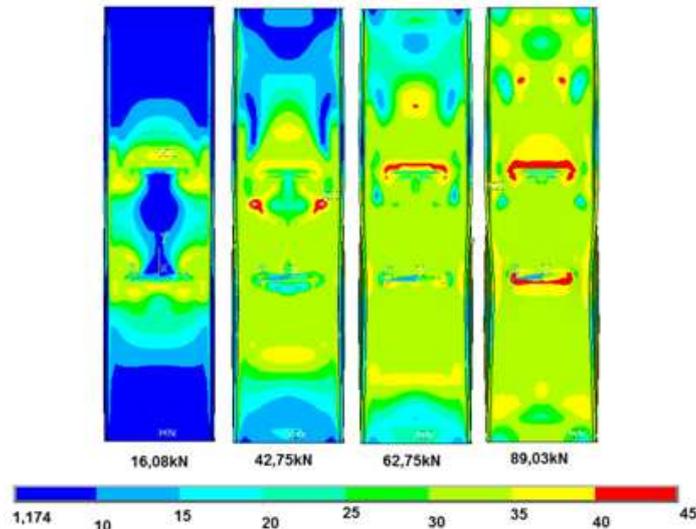


Figura 3.29– Distribuição de Tensões de Von Mises (kN/cm^2) na alma do pilar (Modelo AIE5)

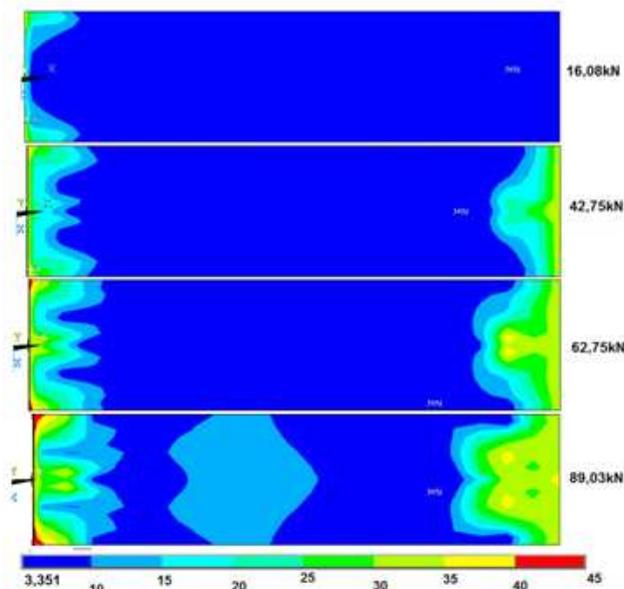


Figura 3.30 – Tensões de Von Mises (kN/cm^2) na mesa superior da viga (Modelo AIE5)

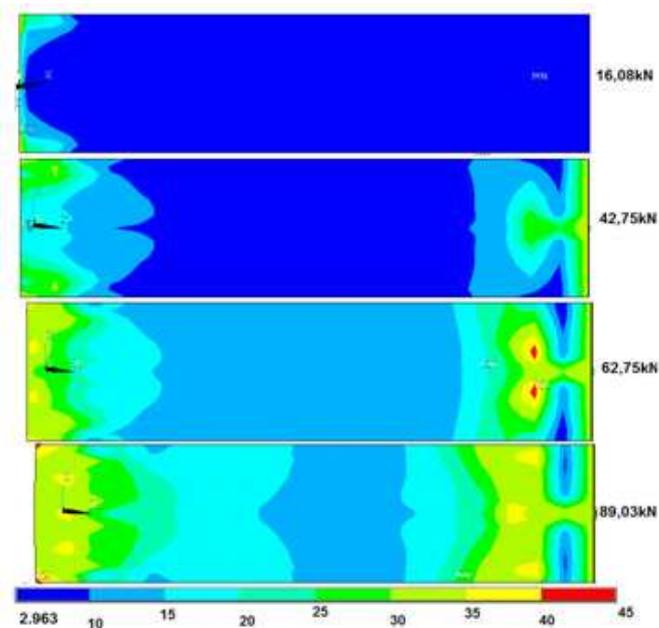


Figura 3.31 – Tensões de Von Mises (kN/cm^2) na mesa inferior da viga (Modelo AIE5)

Entretanto, com o crescimento da solicitação, ocorrem redistribuições de tensões e, somente quando a carga aplicada atinge 42,75kN (aproximadamente 2,47 vezes a carga teórica) é que começam a formar-se regiões com alta concentração de tensões no entorno da mesa tracionada da viga, porém com o aparecimento simultâneo de regiões com tensões atingindo valores iguais ou superiores a $40\text{kN}/\text{cm}^2$.

Já para a situação de carga de extremidade igual a 62,75kN pode-se observar que ocorreram novas redistribuições de tensões (relativamente à situação do carregamento de 42,75kN), verificando-se concentração de tensões iguais ou superiores a $40\text{kN}/\text{cm}^2$ na região da mesa tracionada da viga.

Relativamente às tensões nas mesas da viga, devido à grande flexibilidade da alma do pilar, não são observadas regiões com dimensões significativas nas quais as tensões de Von Mises apresentem valores muito elevados, exceto na condição de carga última da análise numérica.

3.8.4.3- Deslocamentos da alma do pilar

Nas figuras 3.31 e 3.32 são apresentados os gráficos correspondentes aos deslocamentos da alma do pilar nas linhas correspondentes aos planos médios da mesa inferior e superior da viga (linhas 1 e 2, respectivamente) e os deslocamentos segundo linhas paralelas ao eixo do pilar.

A partir dos deslocamentos máximos nas linhas 1 e 2 (figura 3.32), sob carga de

extremidade igual 89,03kN, a alma do pilar apresentou rotação aproximadamente igual a 0,198rad (11,32°), correspondendo a um deslocamento vertical de 29,6cm da extremidade da viga (29,6 vezes o deslocamento vertical máximo recomendado).

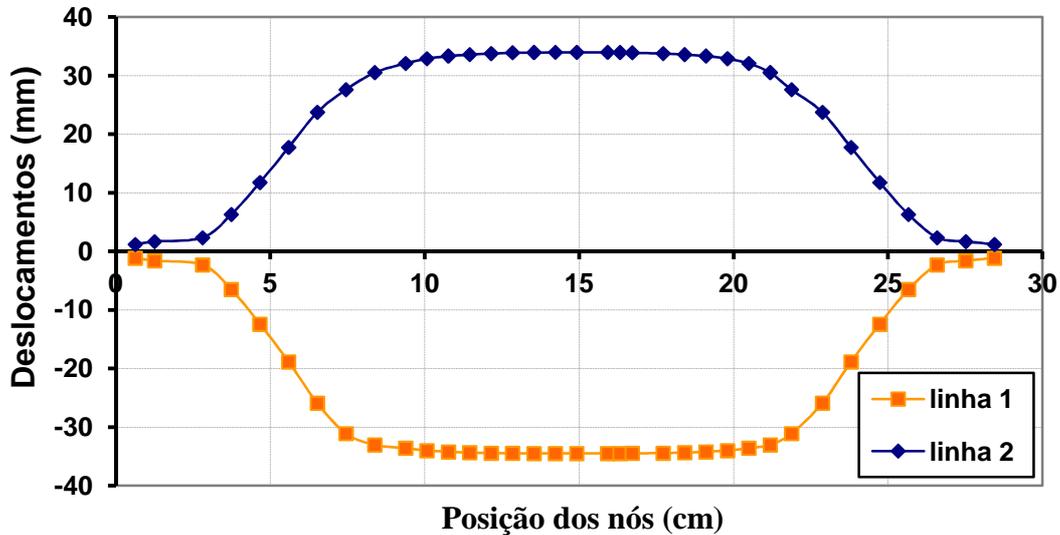


Figura 3.32 – Deslocamentos da alma do pilar, na direção X, nas linhas correspondentes aos planos médios das mesas da viga (Modelo AIE5 - Carga = 89,03kN)

Do mesmo modo que nos casos anteriores, as curvas apresentadas na figura 3.33 permitem constatar que o ponto de deslocamento nulo situa-se 1,6cm abaixo do ponto médio da altura da seção transversal da viga, evidenciando comportamentos distintos das regiões tracionada e comprimida da ligação, embora não tão diferentes quando comparados com a situação do modelo MIE2 anteriormente analisado.

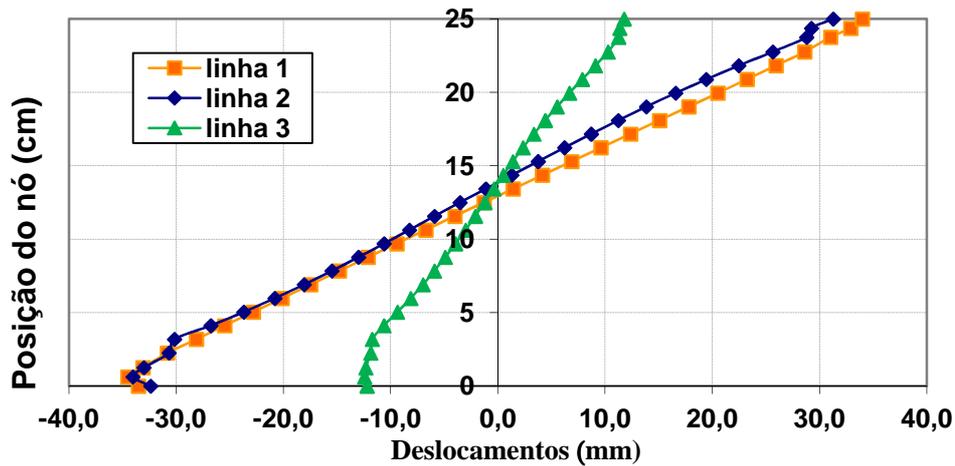


Figura 3.33 – Deslocamentos da alma do pilar, na direção X, ao longo de paralelas ao eixo do pilar (Modelo AIE5 - Carga = 89,03kN)

3.9 - Discussões dos Resultados Numéricos

No tópico anterior foram apresentados alguns dos resultados relevantes, obtidos na análise numérica, para os modelos BIE2, MIE2 e AIE5.

A seguir são apresentadas e discutidas algumas questões, consideradas relevantes, em termos dos resultados obtidos todos os modelos estudados. Tal análise tem como finalidade estabelecer-se algumas comparações referentes à influência da esbeltez da alma do pilar na capacidade resistente da ligação, assim como a eventual importância da restrição imposta pelas mesas do pilar na capacidade rotacional na direção do eixo de menor inércia do pilar.

São também apresentadas:

- i) as curvas momento-rotação obtidas para os modelos numéricos;
- ii) a comparação entre o momento resistente calculado a partir do Método dos Componentes com o momento último atingido na análise numérica;
- iii) a comparação entre a formação do mecanismo plástico da alma do pilar através do modelo de GOMES(1990) e do modelo numérico, e
- iv) a avaliação da rigidez inicial pelo modelo de Neves (2004) e pelos modelos analisados.

Na tabela 3.5 são apresentados os valores, obtidos na análise numérica, da carga última aplicada à extremidade da viga dos modelos, dos correspondentes momentos na ligação e das forças transmitidas pelas mesas, estes últimos valores calculados com a consideração de um braço de alavanca igual à distância entre os planos médios das mesas.

Tabela 3.5: Valores últimos da análise numérica

Modelos	Esbeltez	$F_{\text{últ}}$ (kN)	Momento (kN.cm)	Forças nas mesas (kN)
AIE1	31,49	136,13	20.419	596,70
AIE2	34,42	118,28	17.742	518,47
AIE3	39,75	106,05	15.907	464,85
AIE4	43,61	106,05	15.907	464,85
AIE5	45,51	89,03	13.354	390,24
AIE6	48,31	91,47	13.720	400,94
AIE7	50,84	143,27	21.490	628,00
AIE8	51,86	102,96	15.444	451,32
AIE9	54,14	82,10	12.315	359,88
MIE1	21,26	169,27	25.390	741,96
MIE2	22,77	178,09	26.713	780,63
MIE3	23,21	153,80	23.070	674,17
MIE4	25,56	137,22	20.583	601,49
MIE5	25,96	161,87	24.281	709,56
MIE6	29,61	90,73	13.609	397,69
BIE1	14,54	195,91	29.387	858,77
BIE2	16,43	175,63	26.344	769,84
BIE3	19,31	163,03	24.455	714,64

A despeito do fato de que, em todos os casos, o valor máximo obtido na análise numérica para a carga aplicada na extremidade da viga ($F_{\text{últ}}$), em todos os casos, ter sido superior à que seria passível de ser aplicada a cada modelo, é possível verificar-se como os valores obtidos relacionam-se com a esbeltez da alma do pilar de cada modelo, como demonstrado na figura 3.34, observando-se que a tentativa de correlação linear apresentou um baixo valor de R^2 , o mesmo acontecendo para as tentativas de correlação exponencial, de potência, logarítmica e polinomiais de 2ª até 6ª ordens, para as quais foram conseguidos valores do fator de correlação variando de 0,6595 a 0,7319.

Entretanto, observa-se que os valores mais discrepantes são os relativos aos modelos MIE6, AIE7 e AIE8. A análise das propriedades geométricas dos perfis utilizados nesses modelos mostra que:

i) O modelo MIE6, apesar de apresentar o mais alto índice de esbeltez da alma do pilar dentro de sua classe (médio índice de esbeltez) também apresenta o menor valor de $L = d - 1,5r$, resultando uma pequena distância entre a lateral da mesa da viga e a face interna da face do pilar (apenas 2,7cm de cada lado) e proporcionando um valor de $F_{\text{últ}}$ sensivelmente inferior à média dos demais modelos da classe;

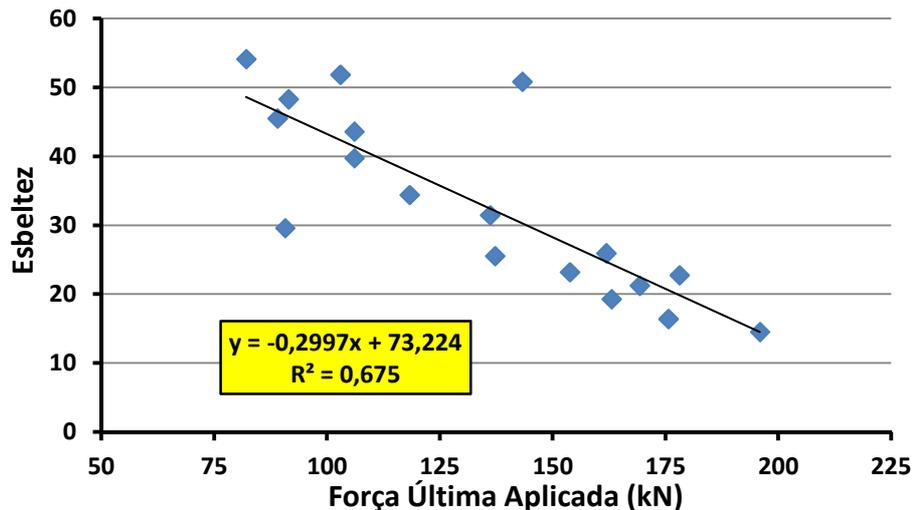


Figura 3.34 - Variação da força última da análise numérica em função da esbelteza

ii) O modelo AIE7, por sua vez, apresenta valor de $F_{\text{últ}}$ 5,24% superior ao valor obtido para o modelo AIE1, embora com esbelteza 61,64% superior. Entretanto, o valor de $L = d - 1,5r$ é 63,17% maior que o do modelo AIE1, resultando em grande distância entre a lateral da mesa da viga e a face interna da face do pilar (15,6cm de cada lado, contra apenas 6,25cm no modelo AIE1), portanto com maior área para o desenvolvimento da charneira plástica;

iii) Já o modelo AIE8, com valor de $F_{\text{últ}}$ apenas 2,91% inferior ao valor obtido para os modelos AIE3 e AIE4, tem esbelteza respectivamente 30,46% e 18,92% superior às esbeltezas dos mesmos modelos. O valor de $L = d - 1,5r$, porém, é 15,61% maior que o desses modelos, resultando em distância entre a lateral da mesa da viga e a face interna da face do pilar 34,26% superior (9,6cm e 7,15cm de cada lado, respectivamente), em acordo com as observações feitas para o modelo AIE&.

Assim, deixando de lado os valores relativos aos modelos MIE6, AIE7 e AIE8, a relação $F_{\text{últ}} \times$ Esbelteza passa a ter uma correlação linear razoavelmente satisfatória ($R^2 = 0,9354$), obtendo-se uma correlação melhor para ajuste por intermédio de uma função polinomial de 4ª ordem, como respectivamente indicado nas figuras 3.35 e 3.36.

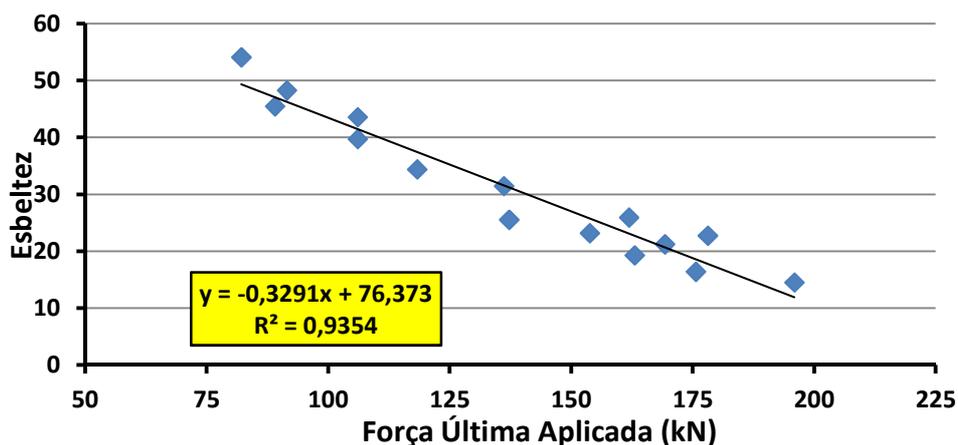


Figura 3.35- Variação da força última da análise numérica em função da esbeltez (Sem modelos MIE6, AIE7 e AIE8 - Correlação linear)

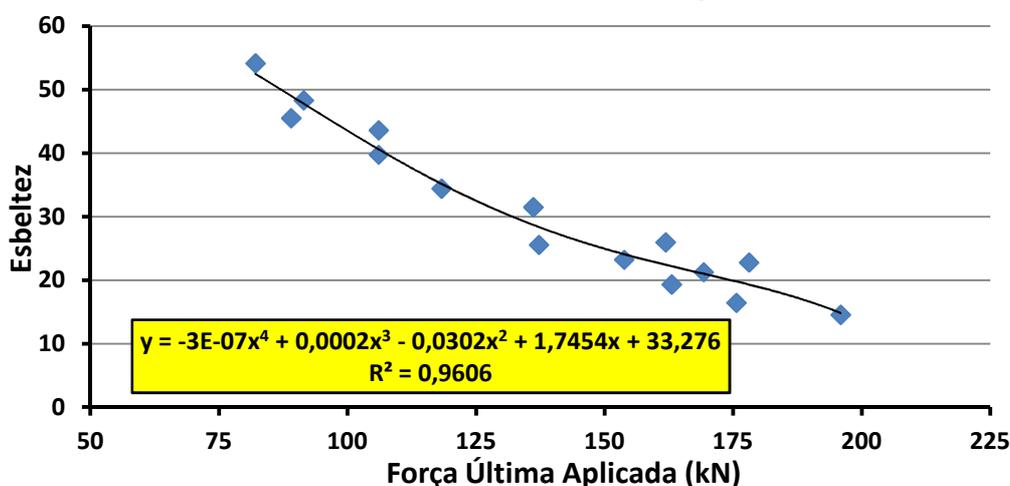


Figura 3.36 - Variação da força última da análise numérica em função da esbeltez (Sem modelos MIE6, AIE7 e AIE8 - Correlação polinomial de 4ª ordem)

3.9.1 - Modelos com Pilares de Baixa Esbeltez da Alma (Classe 1)

Na tabela 3.6 são apresentadas as características geométricas dos modelos numéricos analisados para ligações com pilares de alma pouco esbelta (classe 1), escolhidos visando à avaliação da influência dos parâmetros altura L_w e espessura t_w da alma, em termos de resistência e rigidez, bem como para verificar o comportamento de toda a ligação por meio de suas curvas momento-rotação.

Tabela 3.6: Características geométricas dos modelos da classe 1

Modelos	Perfil	t_w (mm)	L_w (mm)	$\lambda_w=L_w/t_w$	t_{fc} (mm)	b_f (mm)	I_z (cm ⁴)
BIE1	HP 310x125	17,4	253	14,54	17,4	312	8.823
BIE2	HP 310x110	15,4	253	16,43	15,5	310	7.707
BIE3	HP 310x93	13,1	253	19,31	13,1	308	6.387

A análise numérica foi desenvolvida, tendo como ponto de partida os resultados teóricos críticos em termos da plastificação da alma (GOMES(1990)), observando-se

porém as condições de segurança quanto a situações limites dos componentes da ligação, em especial o momento de plastificação total da seção transversal da viga

$$M_{pl,viga} = Z_x \cdot f_y = 787,3 \times 34,5 = 27.058 \text{ kN.cm}$$

e o momento correspondente à plastificação total da mesa da viga

$$M_{pl,mesa} = A_f \cdot f_y \cdot (h - t_f) = 17,1 \times 0,98 \times 34,5 \times (35,2 - 0,98) = 19.784 \text{ kN.cm.}$$

Os resultados obtidos na última etapa da análise numérica dos modelos desta classe, no entanto, extrapolaram os valores teóricos previstos, chegando-se a situações que, pelo menos teoricamente, produziram plastificação não só das mesas mas de toda a seção transversal da viga.

Na tabela 3.9 são reapresentados os valores finais obtidos na análise numérica relativos ao momento na ligação e dos valores das forças transmitidas pelas mesas da viga, considerando-se um binário com braço de alavanca igual à distância entre os seus planos médios. Também são apresentados os valores obtidos na análise numérica para a rigidez inicial dos modelos dessa classe, obtidos a partir das curvas apresentadas na figura 3.37, correspondentes ao comportamento momento x rotação.

Analisando-se os resultados finais obtidos, sem questionamento quanto ao comportamento de cada elemento da ligação, constata-se claramente (figura 3.36) que o aumento da esbeltez corresponde a diminuição da capacidade resistente, bem como da rigidez inicial, sendo possível obter-se uma razoável correlação linear entre esses fatores, como demonstrado nas figuras 3.38 e 3.39, com fatores de correlação R^2 respectivamente iguais a 0,9371 e 0,9791.

Tabela 3.7: Valores finais do momento na ligação, das forças transmitidas pelas mesas da viga e da rigidez inicial (Modelos da classe 1)

Modelo	Momento na Ligação (kN.cm)	Forças nas Mesas (kN)	Rigidez Inicial (kN.cm/rad)
BIE1	29.387	857,77	1.751.246
BIE2	26.344	769,84	1.363.553
BIE3	24.455	714,64	1.009.162

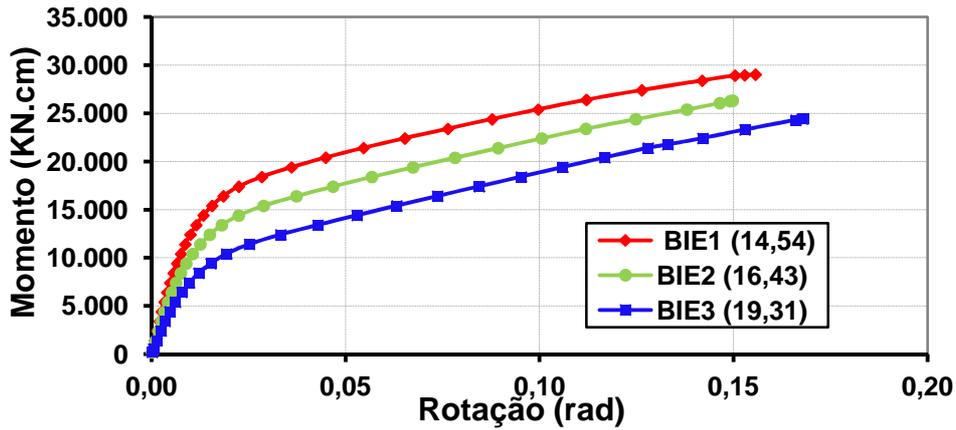


Figura 3.37 - Curvas momento-rotação dos modelos da Classe 1

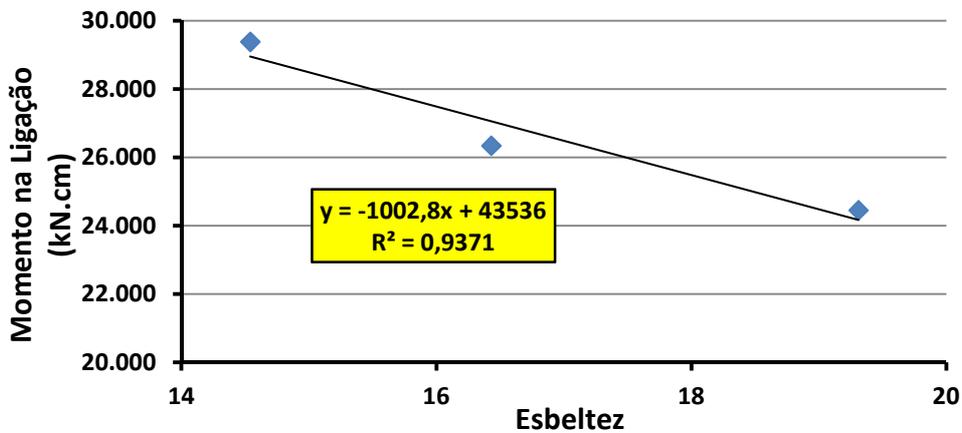


Figura 3.38 - Momento na Ligação x Esbeltez da Alma do Pilar (Modelos da classe 1)

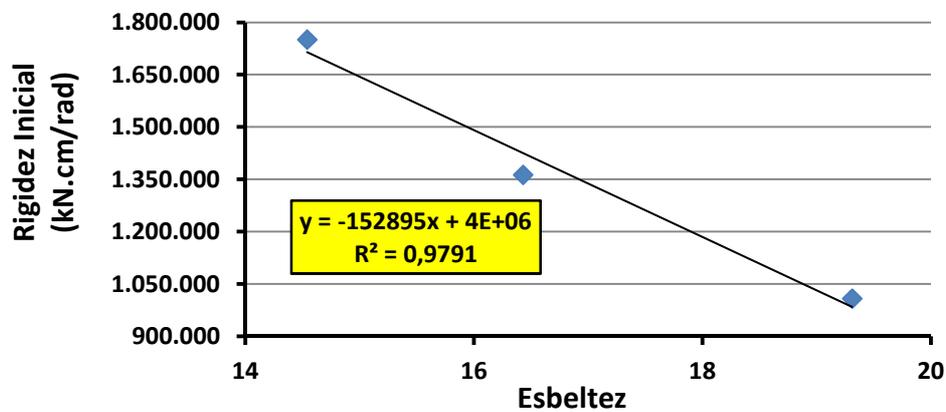


Figura 3.39 - Rigidez Inicial x Esbeltez da Alma do Pilar (Modelos da classe 1)

A despeito das boas correlações demonstradas nas duas figuras anteriores, os resultados obtidos na análise numérica induzem à indagação sobre a influência única da esbeltez no comportamento momento x rotação e na rigidez inicial das ligações. Assim, como será mais detalhadamente analisado nos capítulos seguintes, são apresentadas nas figuras 3.40 e 3.41, as correlações da rigidez inicial com a inércia dos pilares em relação ao eixo coincidente com o plano médio da alma dos pilares, bem como em relação à largura da mesa do pilar, em ambos os casos normalizando-se os parâmetros (inércia e

largura da mesa) em função da esbeltez.

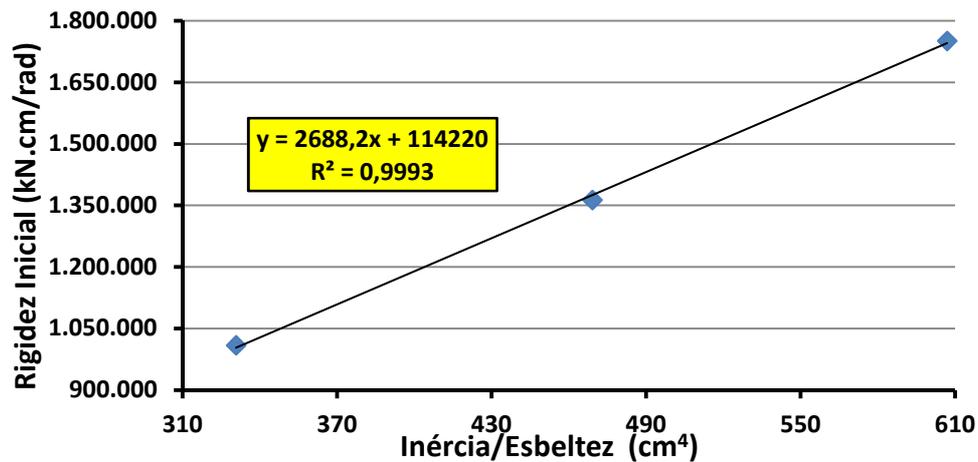


Figura 3.40 - Rigidez Inicial x Menor Inércia/Esbeltez (Modelos da classe 1)

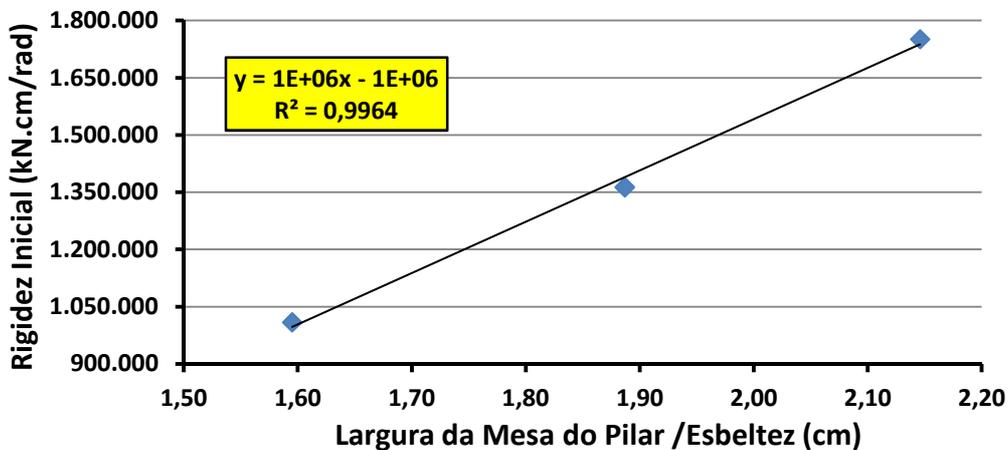


Figura 3.41- Rigidez Inicial x Largura da Mesa do Pilar/Esbeltez (Modelos da classe 1)

Em ambos os casos observa-se uma relação direta, com crescimento da rigidez inicial proporcional à inércia I_z e à largura da mesa do pilar, independentemente da esbeltez da alma do pilar.

3.9.2 - Modelos com Pilares de Média Esbeltez da Alma (Classe 2)

Para os modelos com pilares de alma medianamente esbelta são apresentadas na tabela 3.8 as características geométricas dos perfis dos pilares e na tabela 3.9 os valores finais obtidos na análise numérica.

Tabela 3.8: Características geométricas dos modelos da classe 2

Modelos	Perfil	t_w (mm)	L_w (mm)	$\lambda_w=L_w/t_w$	t_{fc} (mm)	b_f (mm)	I_z (cm ⁴)
MIE1	W 310x117	11,9	253	21,26	18,7	307	9.024
MIE2	W 360x122	13,0	296	22,77	21,7	257	6.147
MIE3	W 310x107	10,9	253	23,21	17,0	306	8.123
MIE4	W 310x97	9,9	253	25,56	15,4	305	7.286
MIE5	W 360x110	11,4	296	25,96	19,9	256	5.570
MIE6	W 250x44,8	7,6	225	29,61	13,0	148	704

Tabela 3.9: Valores finais do momento na ligação, das forças transmitidas pelas mesas da viga e da rigidez inicial (Modelos da classe 2)

Modelo	Momento na Ligação (kN.cm)	Forças nas Mesas (kN)	Rigidez Inicial (kN.cm/rad)
MIE1	25.390	741,96	1.207.227
MIE2	26.713	780,63	831.726
MIE3	23.070	674,17	922.446
MIE4	20.583	601,49	735.164
MIE5	24.281	709,56	642.506
MIE6	13.609	397,69	574.694

No caso dos modelos compostos por pilares com média esbeltez de alma, os resultados finais da análise numérica não chegaram a extrapolar o valor do momento de plastificação total da viga ($M_{pl,viga} = 27.058\text{kN.cm}$) mas, exceto para o modelo MIE6, apresentaram resultados superiores à solicitação que teoricamente produziria a plastificação total das mesas ($M_{pl,mesa} = 19.784\text{kN.cm}$).

Ao contrário dos resultados obtidos para a Classe 1, observa-se que, pelo menos no caso dos modelos MIE2/MIE3 e MIE3/MIE4, o aumento da esbeltez da alma do pilar não mais corresponde a uma diminuição da rigidez inicial. A figura 3.35 apresenta as curvas momento-rotação obtidas para a alma dos modelos MIE₂ e MIE₆, destacando a diminuição da rigidez inicial com o aumento da esbeltez da alma do pilar.

Além disso, o momento solicitante final na ligação do modelo MIE2 foi superior ao obtido para o modelo MIE1, a despeito do aumento da esbeltez da alma do pilar (de 21,26 para 22,77), enquanto para um aumento muito pequeno da esbeltez (de 25,56 para 25,96) nos modelos MIE4 e MIE5, verificou-se um significativo aumento (17,96%) do momento final solicitante.

Assim, como demonstrado nas figuras 3.42 e 3.43, não é mais possível estabelecer-se uma relação de proporcionalidade entre a esbeltez e o momento solicitante final na ligação, nem entre a esbeltez e a rigidez inicial.

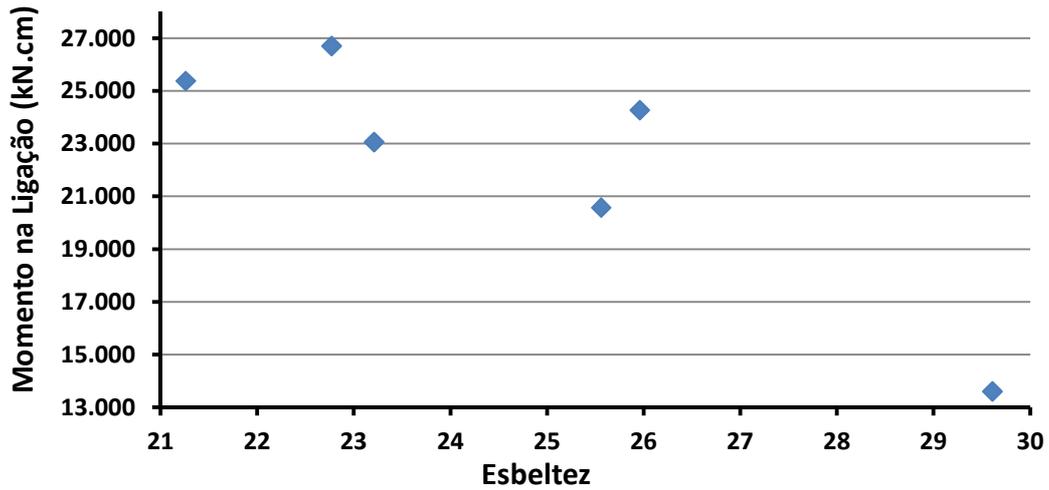


Figura 3.42 - Momento na Ligação x Esbeltez da Alma do Pilar (Modelos da classe 2)

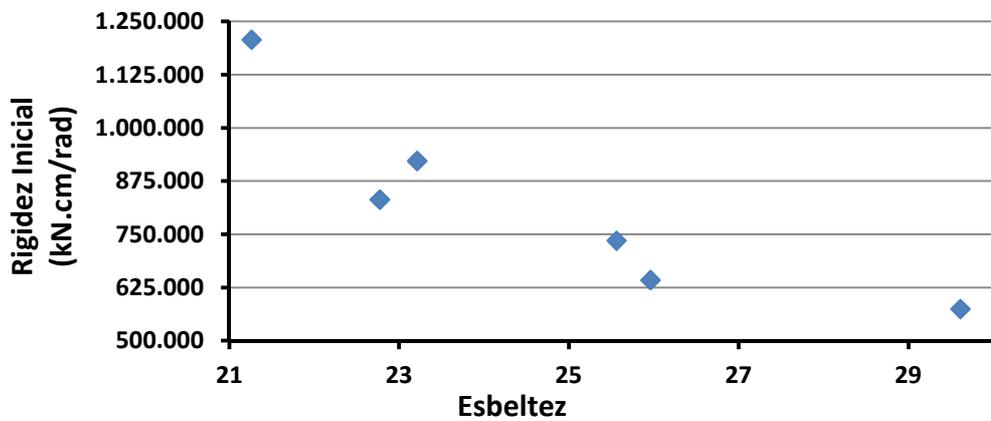


Figura 3.43 - Rigidez Inicial x Esbeltez da Alma do Pilar (Modelos da classe 2)

De modo semelhante à análise realizada para os modelos da classe 1, nas figuras 3.44 e 3.45 são apresentadas, as relações entre rigidez inicial e $I_y/Esbeltez$ e entre rigidez inicial e $b_f/Esbeltez$.

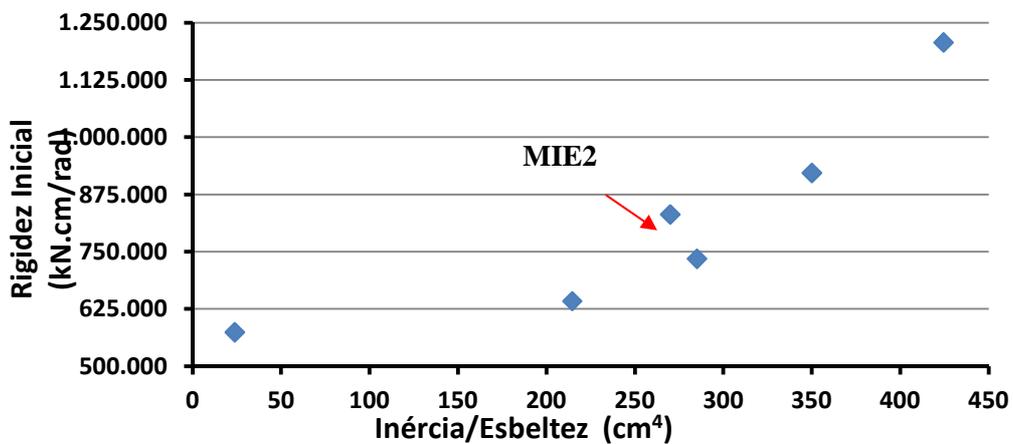


Figura 3.44 - Rigidez Inicial x Menor Inércia/Esbeltez (Modelos da classe 2)

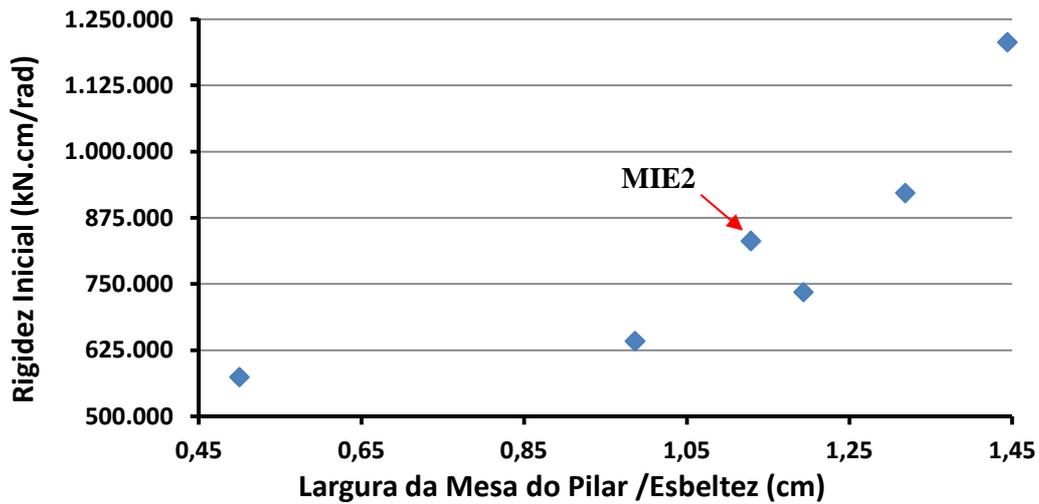


Figura 3.45- Rigidez Inicial x Largura da Mesa do Pilar/Esbeltez (Modelos da classe 2)

Os resultados apresentados nas figuras 3.43 e 3.44 demonstram que os resultados são discrepantes apenas para o modelo MIE2, sendo possível estabelecer-se correlações de 3ª ordem entre os parâmetros analisados (figuras 3.46 e 3.47).

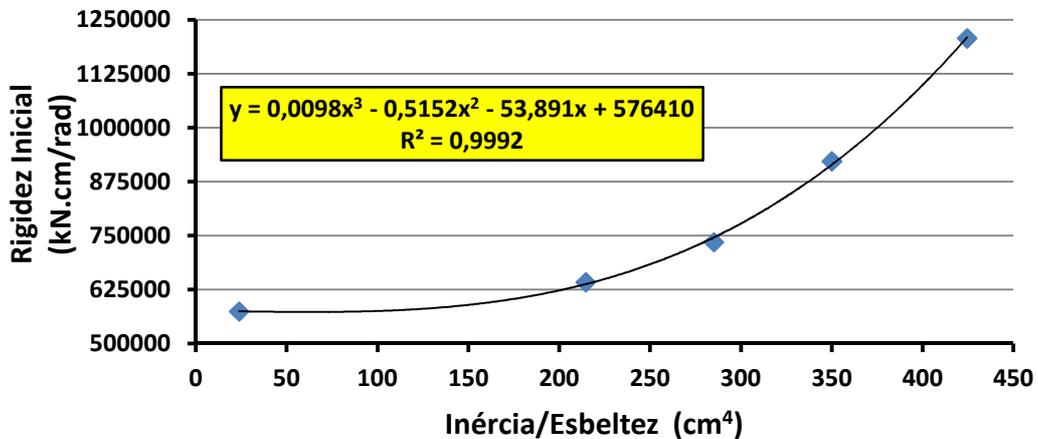


Figura 3.46 - Correlação de 3ª Ordem entre Rigidez Inicial x Menor Inércia/Esbeltez (Modelos da classe 2, exceto MIE2)

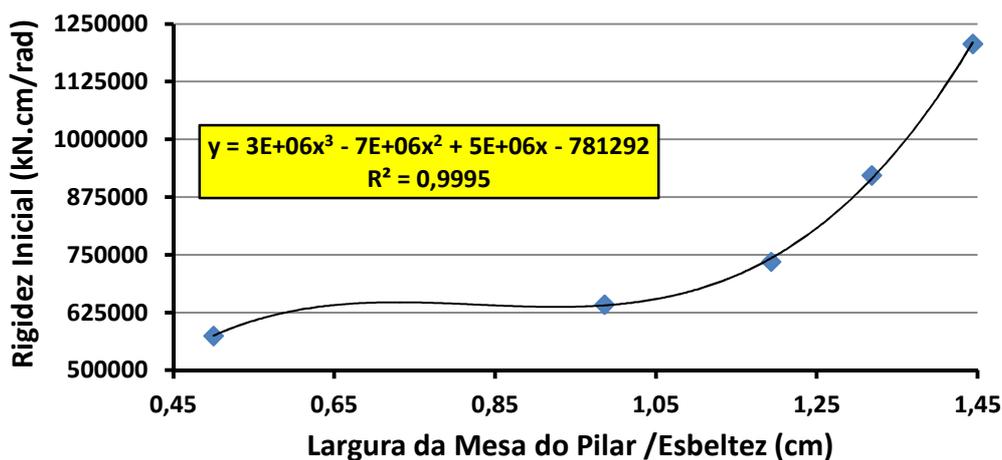


Figura 3.47 - Correlação de 3ª Ordem entre Rigidez Inicial x Largura da Mesa/Esbeltez (Modelos da classe 2, exceto MIE2)

É interessante ressaltar que os modelos MIE2 e MIE5 apresentam valores iguais de L_w , ou muito próximos de b_f . Entretanto, o aumento de 14% da esbeltez (de 22,77 para 25,96, respectivamente) resultou em redução de 9,1% do momento fletor solicitante final e de 22,75% da rigidez inicial, embora a inércia I_z tenha sido reduzida de 9,4%.

3.9.3 - Modelos com Pilares de Alta Esbeltez da Alma (Classe 3)

As características geométricas dos perfis dos pilares utilizados nos os modelos de alta esbeltez são apresentadas na tabela 3.10, sendo relacionados na tabela 3.11 os resultados relevantes da análise numérica desses modelos.

Tabela 3.10: Características geométricas dos modelos da classe 3

Modelos	Perfil	t_w (mm)	L_w (mm)	$\lambda_w=L_w/t_w$	t_{fc} (mm)	b_f (mm)	I_z (cm ⁴)
AIE1	W 360x79	9,4	296	31,49	16,8	205	2.416
AIE2	W 360x72	8,6	296	34,42	15,1	204	2.140
AIE3	W 360x57,8	7,9	314	39,75	13,1	172	1.113
AIE4	W 360x51	7,2	314	43,61	11,6	171	968
AIE5	W 360x44	6,9	314	45,51	9,8	171	818
AIE6	W 360x39	6,5	314	48,31	10,7	128	375
AIE7	W 530x82	9,5	483	50,84	13,3	209	2.028
AIE8	W 410x46,1	7,0	363	51,86	11,2	140	514
AIE9	W 360x32,9	5,8	314	54,14	8,5	127	291

Tabela 3.11: Valores finais do momento na ligação, das forças transmitidas pelas mesas da viga e da rigidez inicial (Modelos da classe 3)

Modelo	Momento na Ligação (kN.cm)	Forças nas Mesas (kN)	Rigidez Inicial (kN.cm/rad)
AIE1	20.419	596,70	395.265
AIE2	17.742	518,47	326.538
AIE3	15.907	464,85	201.465
AIE4	15.907	464,85	159.156
AIE5	13.354	390,24	129.927
AIE6	13.720	400,94	113.926
AIE7	21.490	628,00	103.421
AIE8	15.444	451,32	90.031
AIE9	12.315	359,88	79.664

A rigidez inicial das ligações com alta esbeltez da alma do pilar guardam uma relação inversa com a esbeltez, ou seja, quanto maior a esbeltez menor a rigidez inicial. Entretanto, ao contrário do observado para os modelos da classe 2, foi possível obter-se um ajuste razoável para a variação desses fatores, como demonstrado na figura 3.48, utilizando-se uma função polinomial de 3ª ordem.

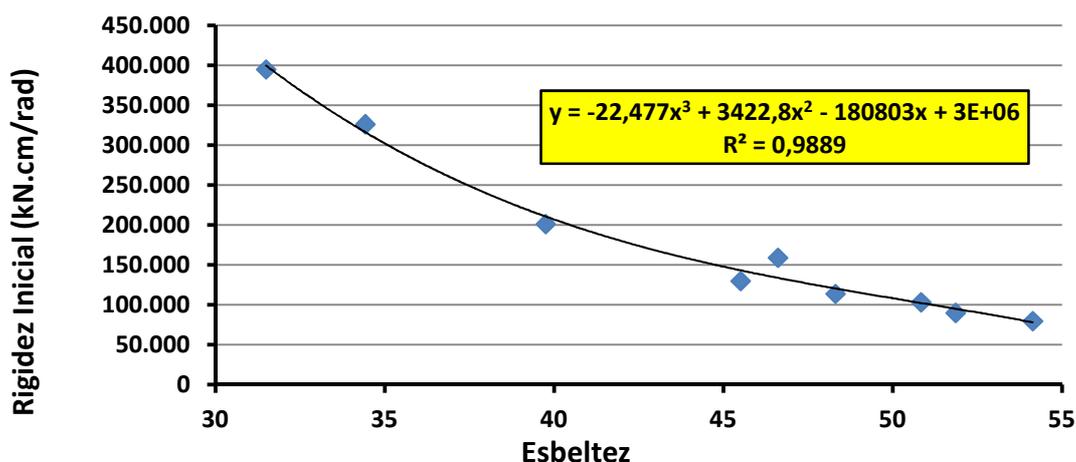


Figura 3.48 - Rigidez Inicial x Esbeltez da Alma do Pilar (Modelos da classe 3)

Porém, a variação do momento final solicitante em função da esbeltez apresenta uma série de discrepâncias (figura 3.49), especialmente quanto ao comportamento do modelo AIE7, lembrando que, para este modelo e também para o modelo AIE1, o valor do momento solicitante final foi superior ao valor teórico de plastificação total das mesas da viga. A análise dessas discrepâncias será apresentada de forma mais detalhada nos capítulos seguintes, nos quais serão apresentadas as comparações entre os resultados obtidos nas análises numérica e experimental, bem como em relação aos valores teoricamente previstos para alguns aspectos do comportamento das ligações estudadas neste trabalho.

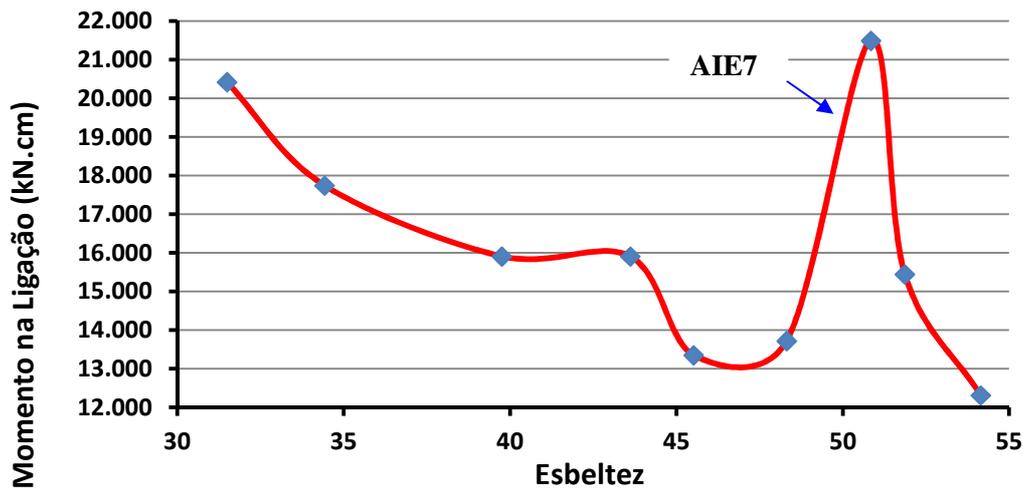


Figura 3.49 - Momento na Ligação x Esbeltez da Alma do Pilar (Modelos da classe 3)

As variações da rigidez inicial relativamente às relações $I_z/\text{Esbeltez}$ e $b_f/\text{Esbeltez}$ para o conjunto de modelos da classe 3 são apresentadas respectivamente nas figuras 3.50 e 3.51, nas quais, novamente, são observadas discrepâncias relativas ao modelo AIE7.

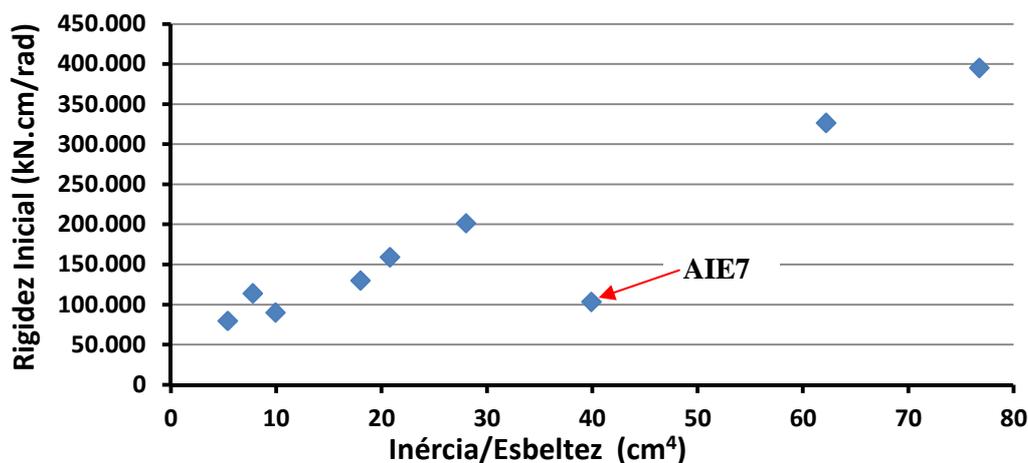


Figura 3.50 - Rigidez Inicial x Menor Inércia/Esbeltez (Modelos da classe 3)

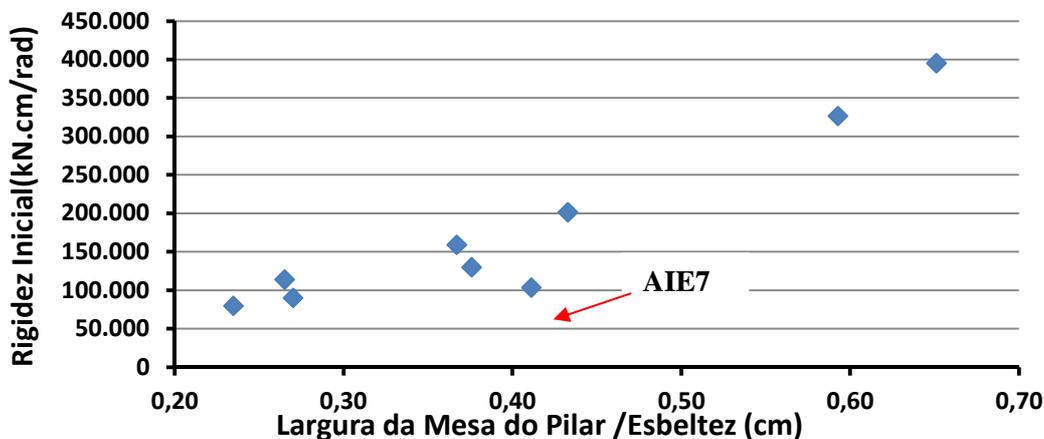


Figura 3.51 - Rigidez Inicial x Largura da Mesa do Pilar/Esbeltez (Modelos da classe 3)

Excluindo-se os resultados do modelo AIE7, as mesmas relações são apresentadas nas figuras 3.52 e 3.53, nas quais são indicadas correlações bastante razoáveis para polinômios de segunda ordem, respectivamente com fatores R^2 iguais a 0,9890 e 0,9872.

Adicionalmente, são analisados, a seguir, alguns aspectos relativos aos modelos da classe 3, considerando-se os comportamentos em função dos valores de L_w e b_f .

Observa-se, pelas informações contidas na Tabela 3.12, que os modelos AIE3, AIE4 e AIE5 possuem $L_w = 214\text{mm}$ e b_f respectivamente iguais a 172mm, 171mm e 171mm. Já os modelos AEI6 e AEI9, com o mesmo valor de L_w do grupo anterior, apresentam valores de b_f respectivamente iguais a 128mm e 127mm.

Na tabela 3.12 são apresentadas as comparações entre as variações da esbelteza da alma dos pilares, da rigidez inicial das ligações, bem como das relações $I_z/\text{Esbeltez}$ e $b_f/\text{Esbeltez}$, obtidas a partir dos resultados da análise numérica desses modelos.

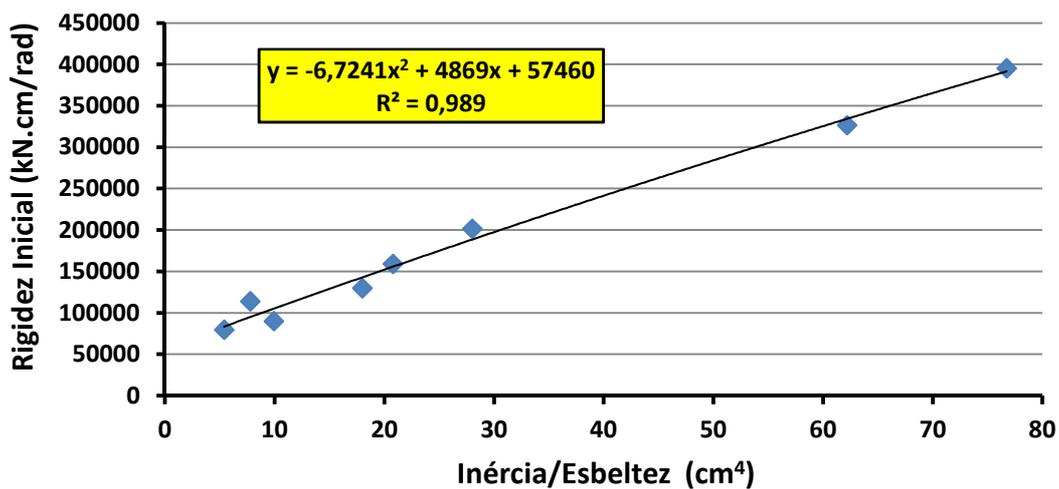


Figura 3.52 - Correlação de 2ª Ordem entre Rigidez Inicial x Menor Inércia/Esbeltez (Modelos da classe 3, exceto AIE7)

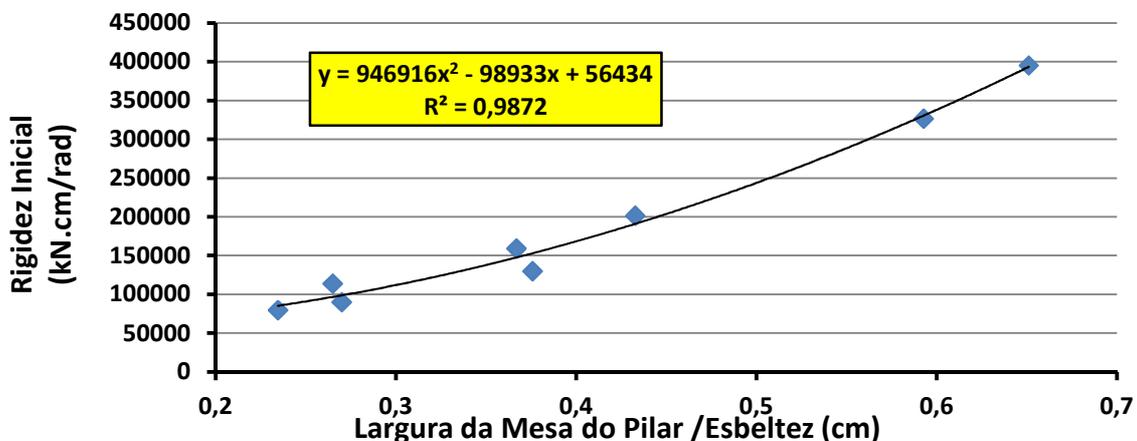


Figura 3.53 - Correlação de 2ª Ordem entre Rigidez Inicial x Largura da Mesa/Esbeltez (Modelos da classe 3, exceto AIE7)

Tabela 3.12 - Variações da Esbeltez e da Rigidez Inicial
(Modelos AIE1, AIE2, AIE3, AIE4 e AIE5)

Modelos Comparados	Variações (%)				
	Esbeltez	Rigidez Inicial	I_z	I_z /Esbeltez	b_f /Esbeltez
AIE4 - AIE5	+ 4,36	- 18,37	- 18,34	- 13,45	2,42
AIE3 - AIE4	+ 9,71	- 21,00	- 14,98	- 25,83	- 15,21
AIE3 - AIE5	+ 14,49	- 35,51	- 36,06	-35,81	- 13,16

Como esperado, o aumento da esbeltez da alma do pilar implica em diminuição da rigidez inicial, porém em proporções sensivelmente diferentes.

Assim, para um pequeno aumento da esbeltez (aumento de 4,36%, comparação AIE4 - AIE5), a rigidez inicial sofre redução de 18,37%. Entretanto, se o aumento da esbeltez é de 9,71% (comparação AIE3 - AIE4), a rigidez aumenta 21%, sofrendo 35,51% de redução se a esbeltez aumenta 14,49% praticamente idênticos.

Constata-se, também, que a redução da inércia I_z somente resultou em relação lógica e proporcional de redução da rigidez inicial nas comparações AIE4 - AIE5 e AIE3 - AIE5. Entretanto, para 14,98% de redução do momento de inércia I_z a diminuição da rigidez inicial foi de 21% (comparação AIE3 - AIE4).

Comparando-se, finalmente, as variações da rigidez inicial e das relações I_z /Esbeltez, verifica-se que a redução desse último parâmetro corresponde, nos três casos analisados, a reduções da rigidez inicial, embora não de forma linear, como demonstrado na figura 3.54, cujo ajuste linear resulta em um fator de correlação $R^2 = 0,8167$, ressaltando-se que são apenas três pontos disponíveis, correspondentes a modelos com mesmo valor de L_w e valores de b_f praticamente idênticos.

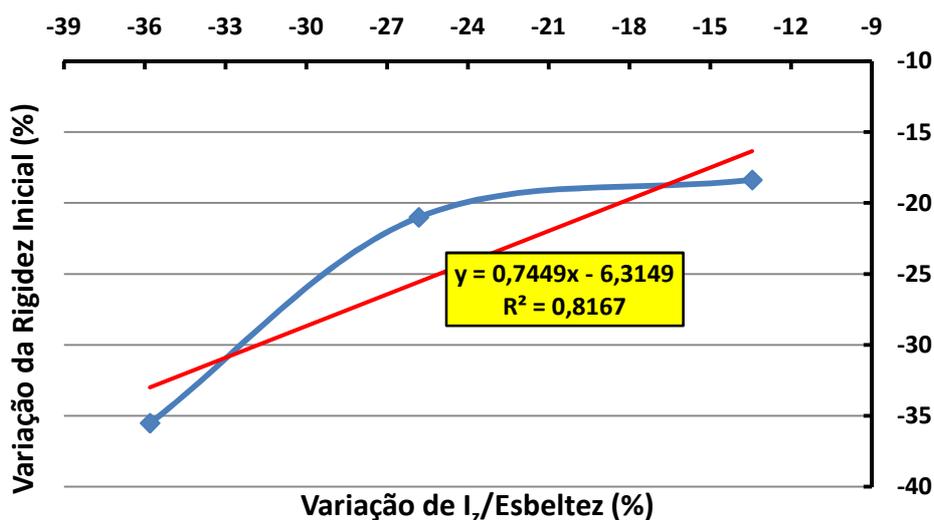


Figura 3.54 - Variação da Rigidez Inicial x Variação de I_z /Esbeltez
(Comparações: AIE4 - AIE5, AIE3 - AIE4 e AIE3 - AIE5)

3.10 - Outras Considerações sobre os Resultados da Análise Numérica

Os resultados numéricos analisados neste capítulo, de forma isolada para cada classe de esbeltez da alma, demonstraram algumas discrepâncias em termos da tentativa de estabelecimento de correlações entre os parâmetros envolvidos, em especial quanto à própria esbeltez.

Entretanto, analisando-se o conjunto total dos modelos analisados, observa-se que a variação da rigidez inicial em função da esbeltez da alma do pilar apresenta uma linha de tendência exponencial (figura 3.55), com correlação que pode ser considerada muito boa ($R^2 = 0,9903$).

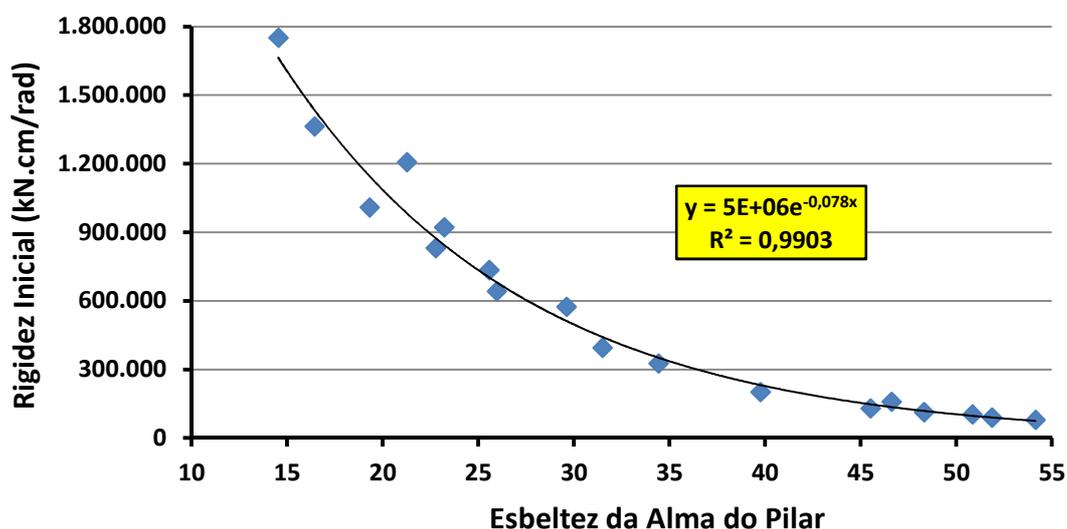


Figura 3.55- Rigidez Inicial x Esbeltez (Modelos das Classes 1, 2 e 3)

Esta constatação sugere, pelo menos preliminarmente e para os resultados da série de modelos analisados, que a classificação das ligações em classes segundo a esbeltez da alma do pilar somente tem sentido em termos didáticos, mas não tem qualquer representatividade em termos de descrição ou caracterização de comportamento estrutural.

Merecem destaque, ainda, as constatações referentes à variação da rigidez inicial em função das variações dos parâmetros I_z /Esbeltez e b_f /Esbeltez (figuras 3.56 e 3.57), cujos melhores ajustes foram obtidos, respectivamente para polinômios de 2ª e 3ª ordens.

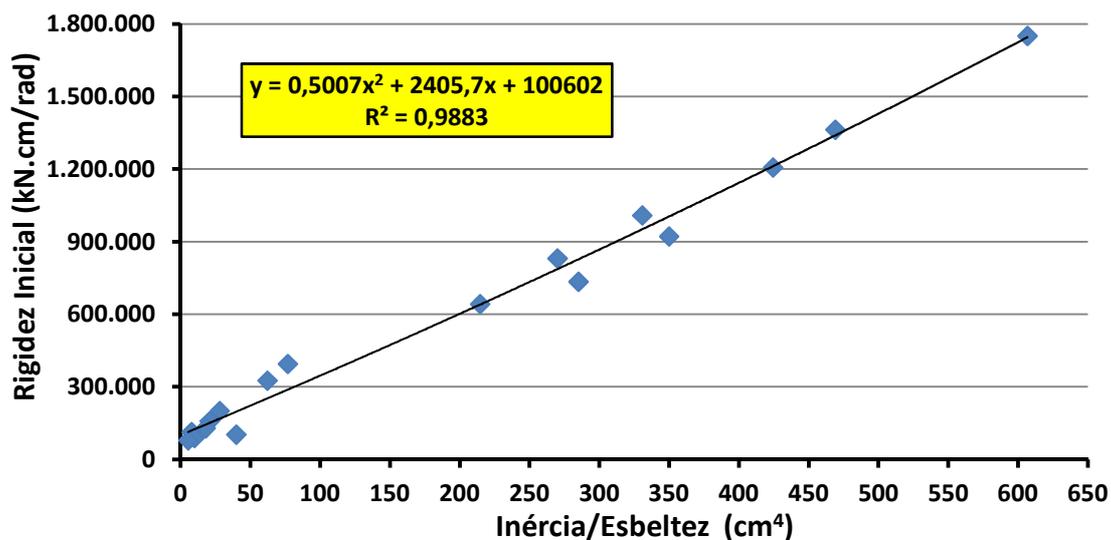


Figura 3.56 - Correlação de 2ª Ordem entre Rigidez Inicial x Menor Inércia/Esbeltez (Modelos das classes 1, 2 e 3, exceto MIE6)

Ressalte-se, porém, que estes ajustes foram obtidos com a exclusão do modelo MIE6, por apresentar resultados sensivelmente discrepantes para o conjunto dos modelos analisados, em decorrência, muito provavelmente, do valor extremamente baixo de I_z , juntamente com esbeltez próxima da média das esbeltezes dos modelos analisados.

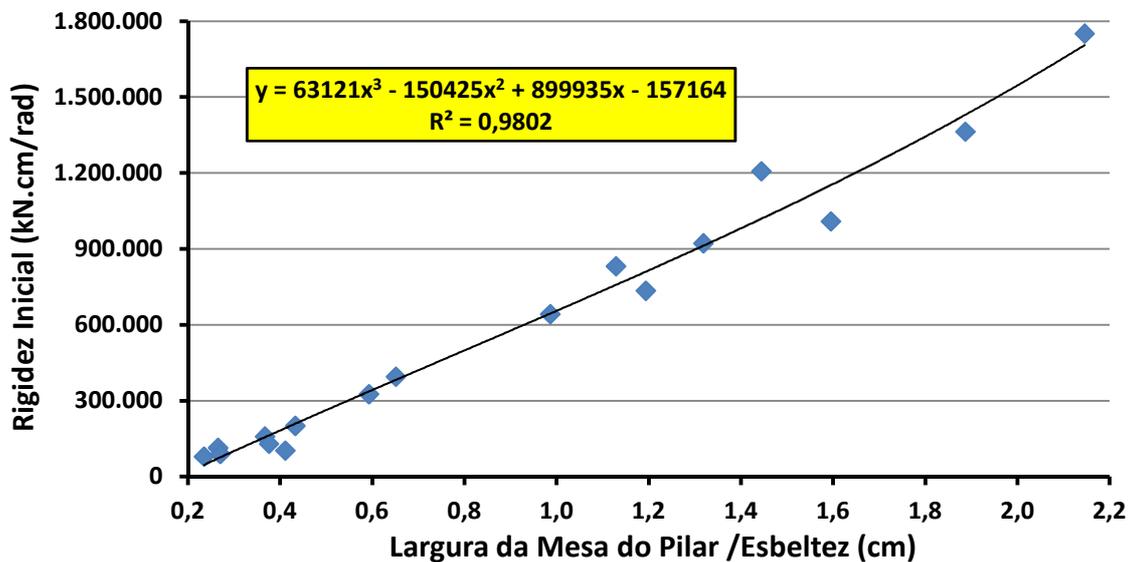


Figura 3.57 - Correlação de 3ª Ordem entre Rigidez Inicial x largura da mesa/Esbeltez (Modelos das classes 1, 2 e 3, exceto MIE6)

ANÁLISE EXPERIMENTAL

4.1 - Introdução

Ensaaios experimentais realizados em laboratório constituem a melhor forma de se obter o comportamento real das ligações estruturais. Com estes ensaios, torna-se 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. No entanto uma das questões mais desafiantes que se tem em um ensaio é obter dele todas as informações necessárias para a avaliação dos fenômenos de interesse. Sendo assim, o planejamento dos ensaios a serem realizados deve ser feito de forma bastante criteriosa.

No caso do presente trabalho, torna-se necessária a avaliação das componentes envolvidas na ligação para o carregamento imposto.

A ligação ensaiada é uma ligação soldada na direção da menor inércia do pilar, também estudada e formulada como modelo numérico, via método dos elementos finitos, Nos modelos ensaiados utilizou-se um só tipo de perfil para a viga e diferentes dimensões para perfis do pilar, de forma a avaliar-se, como foco principal do trabalho, a esbeltez da alma deste elemento.

Dessa forma, foi prevista um conjunto de ensaios com quatro grupos de protótipos, constituídos por pilares com perfis idênticos aos utilizados nos modelos numéricos AIE5 (classe 3, índice de esbeltez 45,55), MIE2 (classe 2, índice de esbeltez 22,77), MIE6 (classe 2, índice de esbeltez 29,61) e BIE2 (classe 1, índice de esbeltez 16,43). Em cada grupo foram realizados dois ensaios, exceto no grupo BIE2.

Na figura 4.1 são apresentadas as dimensões das seções transversais dos pilares utilizados, ressaltando-se que em todos os ensaios, a exemplo dos modelos numéricos analisados, a viga era constituída por um perfil W360 x 44.

Nos protótipos ensaiados foram utilizadas vigas com 1,65m de comprimento, porém com o carregamento aplicado a uma distância de 1,50m da face da alma do pilar, de modo a manter a compatibilidade com os modelos numéricos analisados. Esta providência foi necessária para garantir-se melhor acomodação dos dispositivos de aplicação da carga sobre a viga, sem o risco de serem introduzidas deformações

localizadas nos elementos da seção transversal da viga. Esta situação é esquematicamente apresentada na figura 4.2.

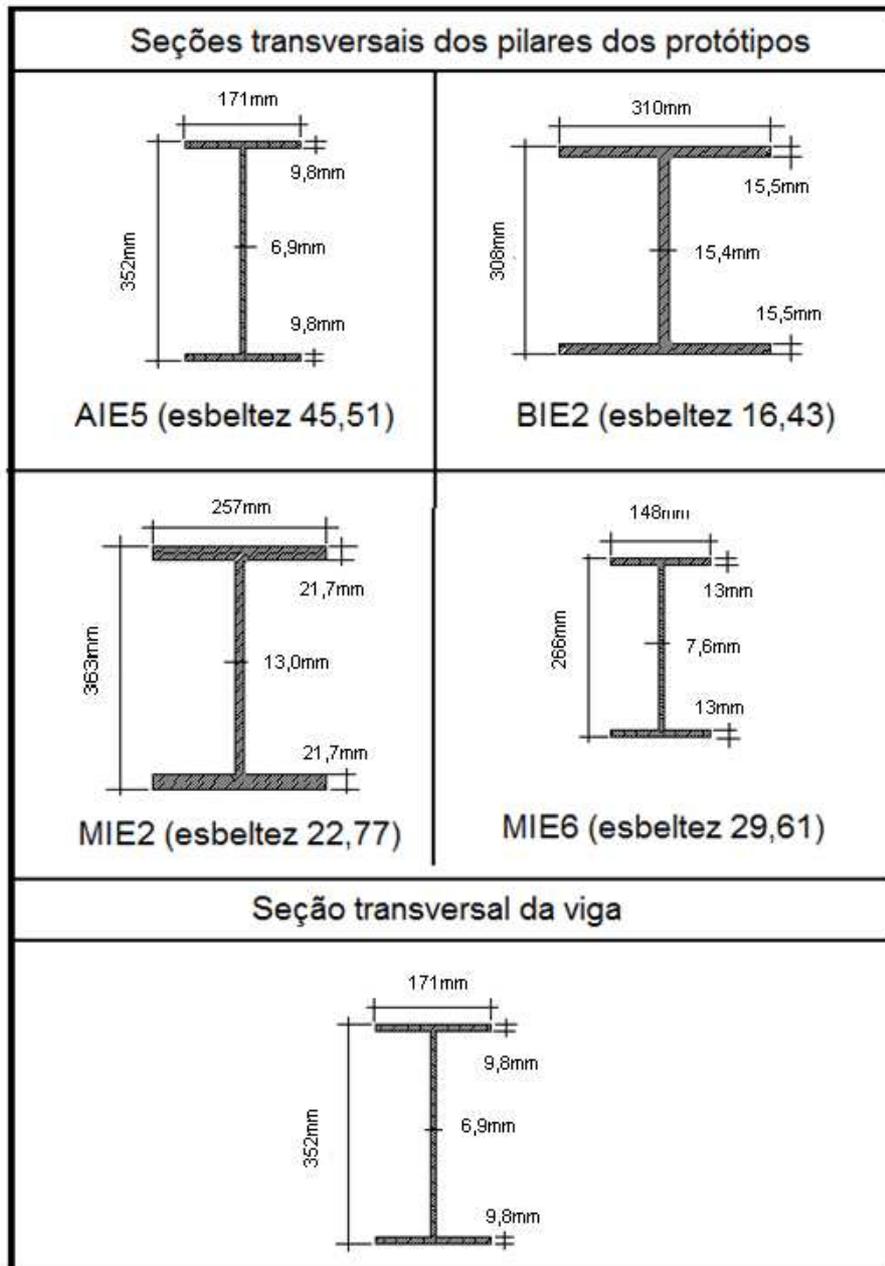


Figura 4.1 – Seções transversais dos pilares e da viga dos protótipos ensaiados

É importante observar a variação do perfil utilizado para o pilar de cada grupo de protótipos, além da variação da esbeltez da alma, que possibilita diferentes situações tanto em termos de espessuras e dimensões das mesas dos pilares (diferentes momentos de inércia em relação ao plano médio da alma do pilar), quanto em termos de distâncias entre as faces internas das mesas do pilar e as laterais das mesas da viga, possibilitando a avaliação da influência desses fatores no comportamento global das ligações. Na

figura 4.3 são apresentadas representações esquemáticas dos protótipos ensaiados em cada grupo, possibilitando a visualização desses fatores e evidenciando as diferenças geométricas entre eles.

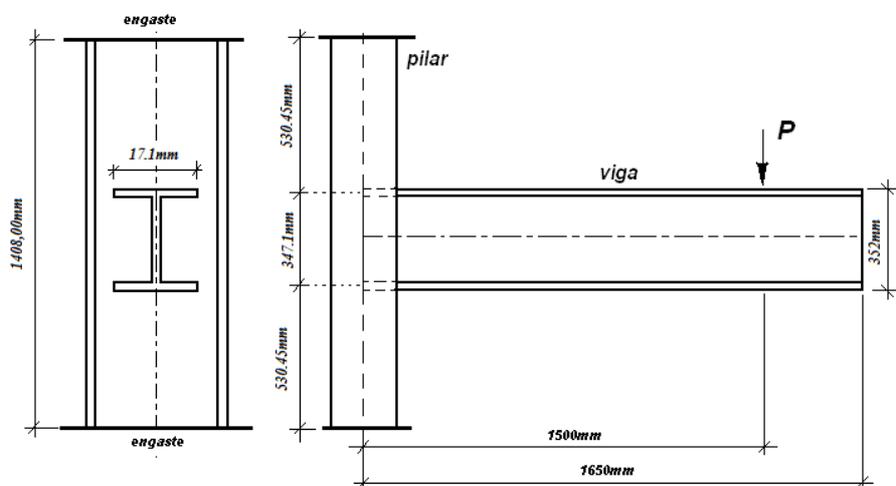


Figura 4.2 – Configuração Geral dos Protótipos

4.2 - Montagem dos Ensaio

O aparato de ensaios é constituído por dois pórticos de reação (PR1 e PR2), ancorados na laje de reação e posicionados a uma distância de 1,50m entre seus eixos. O pórtico PR1, com capacidade de carga de 600kN, foi utilizado para fixação do pilar de cada protótipo, sendo o pórtico PR2 (capacidade de carga de 300kN) utilizado para a instalação do sistema de aplicação do carregamento sobre a viga de cada protótipo ensaiado.

Para a fixação do pilar dos protótipos ao pórtico PR1 foram utilizados dois aparelhos de apoio, fixados no pórtico e na laje de reação, tendo sido utilizadas chapas soldadas às extremidades do pilar ligadas aos aparelhos de apoio por meio de parafusos de 19 mm de diâmetro.

Nas figuras 4.4 e 4.5 são apresentadas as configurações esquemáticas dos aparelhos de apoio e as fotografias dos mesmos já fixados ao pórtico PR1 e à laje de reação.

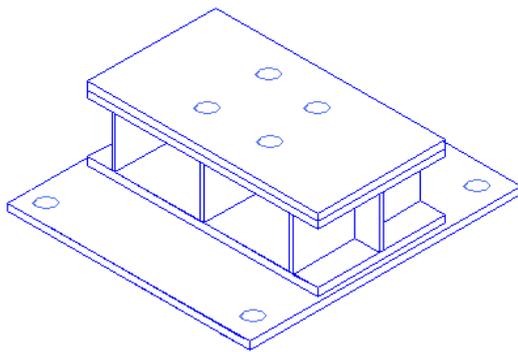


Figura 4.4 – Aparelho de apoio superior

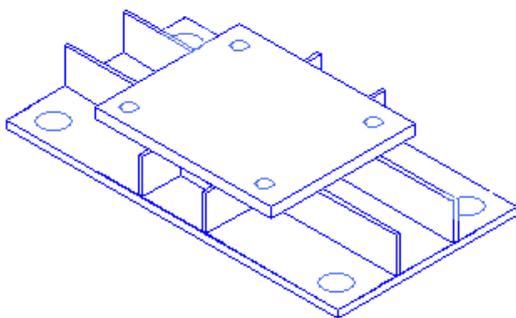


Figura 4.5 – Aparelho de apoio inferior

4.3 - Sistema de Aplicação do Carregamento

O sistema de aplicação de carga foi instalado no pórtico de reação PR2 e composto por um atuador hidráulico, com capacidade de 300kN (fabricado pela ENERPAC); uma célula de carga LT 50130-06-0128 de 500kN (fabricada pela GUNT HAMBURG), com sensibilidade de $2\mu\text{V}/\text{V}$; uma rótula de carga que proporciona a verticalização do carregamento e alguns acessórios. Dentre esses acessórios, foi utilizada uma placa de carga, instalada entre a viga e o sistema de aplicação de carga, com o objetivo de distribuir melhor o carregamento na região do flange e da alma evitando-se desta forma uma grande concentração de tensões em apenas um ponto. Na figura 4.6 é apresentada a configuração esquemática do sistema de aplicação de carga, juntamente com a fotografia desse sistema já instalado sobre um dos protótipos ensaiados.

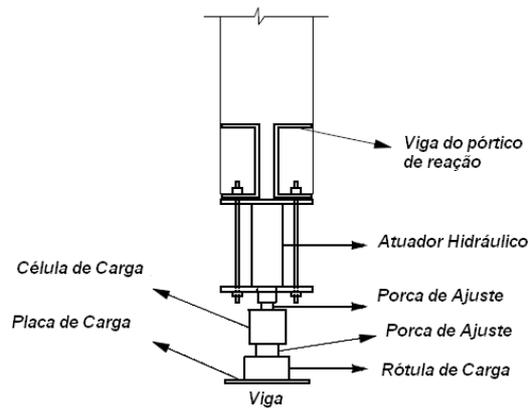


Figura 4.6 – Sistema de Aplicação de Carga

A montagem geral esquemática dos ensaios é apresentada na figura 4.7, apresentando-se na figura 4.8 uma fotografia da montagem de um dos ensaios, na qual são visualizados os pórticos de reação, os dispositivos de apoio, o sistema de aplicação do carregamento e os LVDT's.

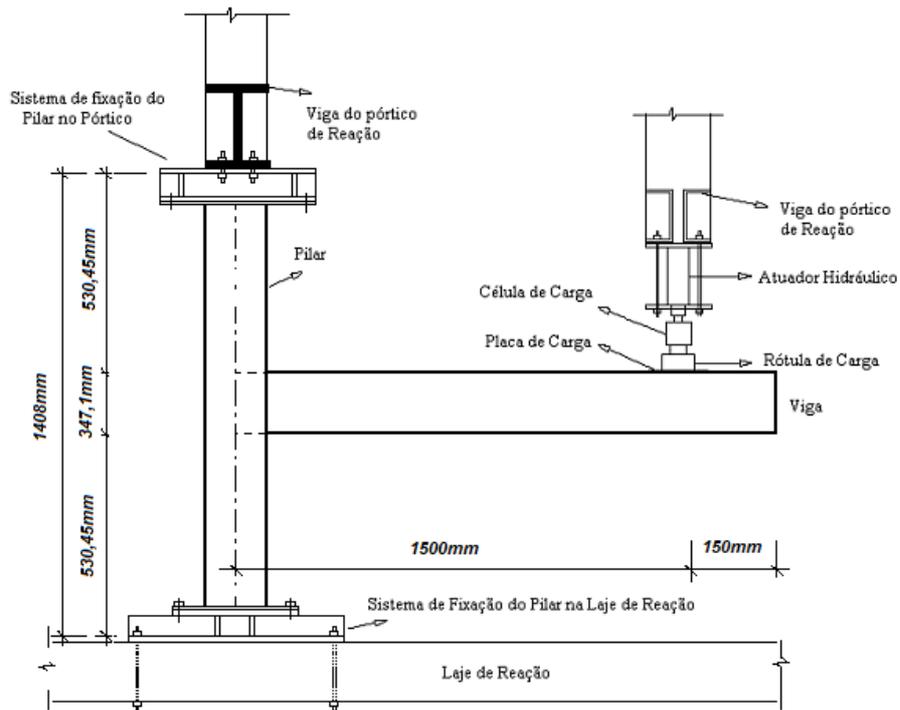


Figura 4.7 – Representação esquemática geral da montagem dos ensaios



Figura 4.8 - Esquema Geral do Ensaio

4.4 - Instrumentação

4.4.1 - Medição de deslocamentos

Para a instrumentação dos ensaios foram utilizados LVDT's (Linear Variable Displacement Transducers) e defletômetros para a medição dos deslocamentos. Os LVDT's, fabricados pela SENSOTEC, possuem sensibilidade de 0,001 mm e campo de medida variando de 25 a 50 mm. Os defletômetros permitem medir de 10 a 30 mm, com sensibilidade de 0,01 mm.

Os defletômetros foram utilizados nos ensaios com o intuito de se fazer o controle de descolamentos indesejáveis, ou seja, para verificação de eventuais deslocamentos em pontos críticos que pudessem comprometer a qualidade dos resultados obtidos. Foram monitorados os eventuais deslocamentos entre o aparelho de apoio superior e a chapa situada no topo do pilar (defletômetro 1), entre o aparelho de apoio inferior e a placa de base do pilar (defletômetro 2), entre a base do aparelho de apoio e a laje de reação (defletômetro 3) e também o deslocamento lateral na extremidade livre da viga dos protótipos (defletômetro 4).

O posicionamento desses defletômetros é apresentado nas figuras 4.9 a 4.11.



Figura 4.9 – Defletômetro 1



Figura 4.10 - Defletômetros 2 e 3



Figura 4.11 - Defletômetro 4

A utilização dos LVDT's foi necessária para se obter os deslocamentos na alma do pilar e na viga. Para a obtenção dos deslocamentos horizontais da alma do pilar (Figura 4.12), os LVDT's 5, 6, 7 e 8 foram posicionados na face posterior da alma do pilar, estando os LVDT's 6 e 7 localizados na direção das mesas superior e inferior da viga, respectivamente. Já o LVDT 5 foi posicionado a uma distância de $h/2$, sendo h a altura da viga, acima da mesa superior da viga na parte posterior da alma do pilar. Da mesma forma, o LVDT 8 foi posicionado a $h/2$, abaixo da mesa inferior da viga, também na parte posterior da alma do pilar.

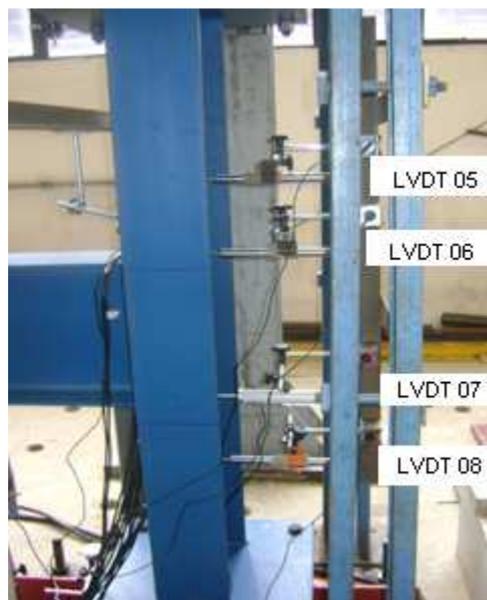


Figura 4.12 - Posição dos LVDT's 5, 6, 7 e 8 na parte posterior da alma do pilar

Mais quatro LVDT's foram utilizados no intuito de obter os deslocamentos verticais da viga. Os LVDT's 1, 2, 3 (Figura 4.13) foram posicionados abaixo da mesa inferior da viga, na direção da alma da mesma (centralizados) a uma distância de 50cm, 100 cm e 150cm da ligação viga/pilar, respectivamente. Já o LVDT 4 (Figura 4.14) foi

posicionado na mesa superior da viga a uma distância de $b_f/2$ da ligação soldada entre a viga e o pilar, sendo b_f a largura da mesa do pilar.

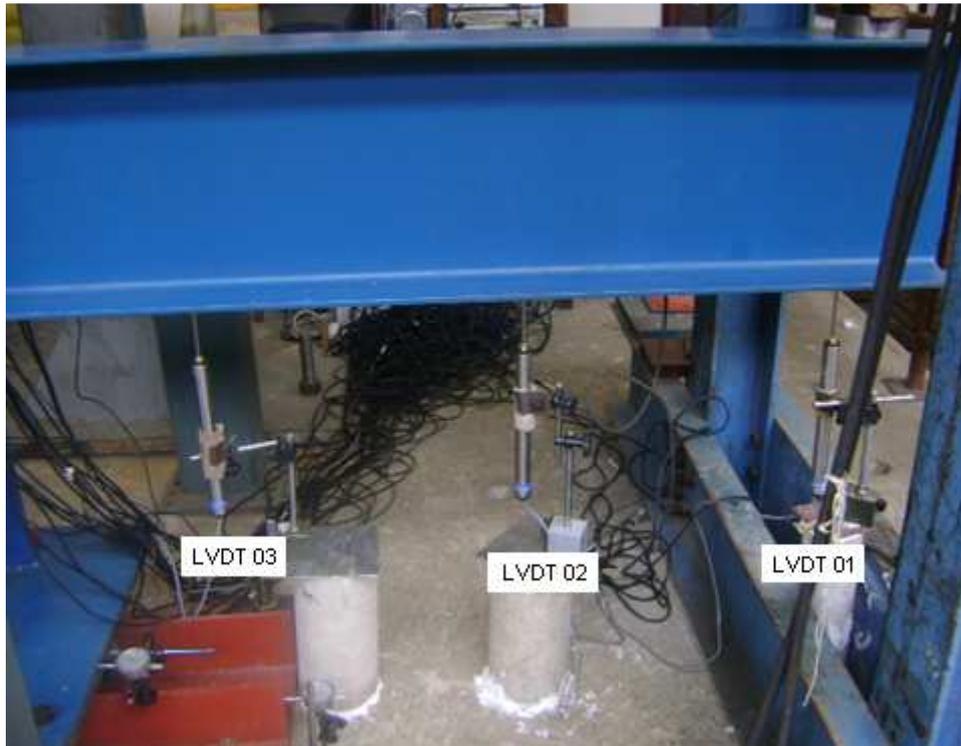


Figura 4.13 - Posição dos LVDT's 1, 2, 3 na parte inferior da viga



Figura 4.14 - Posição do LVDT 4, na mesa superior da viga

Apresenta-se na figura 4.15 a representação esquemática do conjunto de LVDT's utilizados nos ensaios.

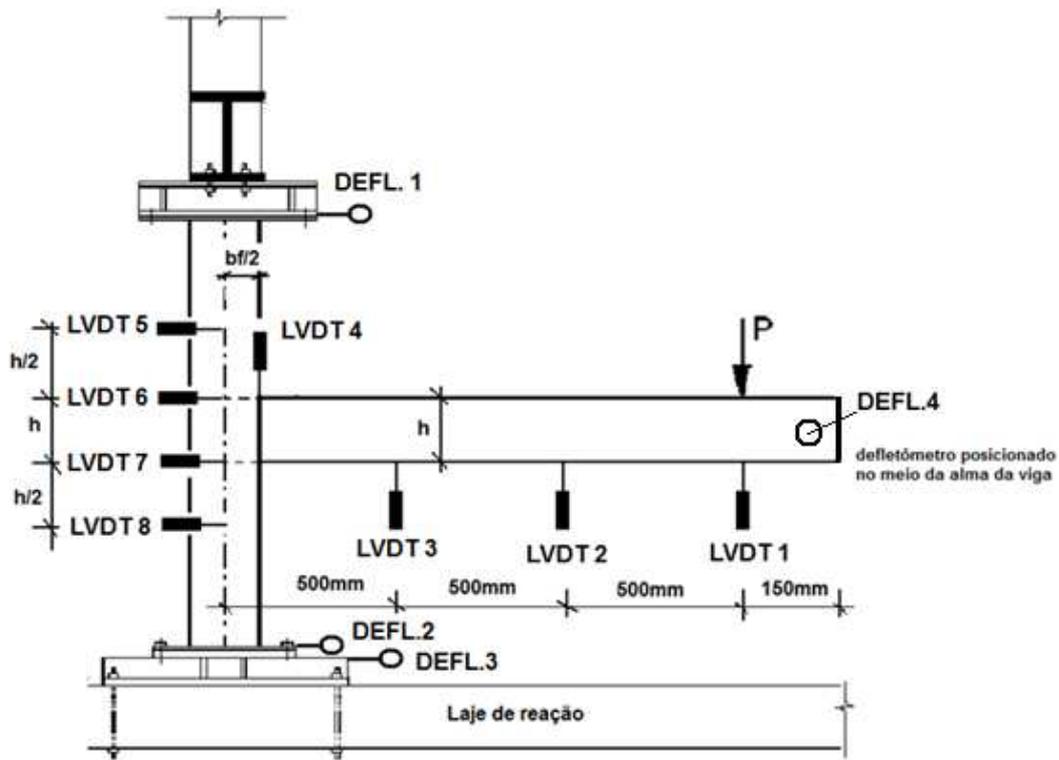


Figura 4.15 - Posição dos LVDT's e defletômetros utilizados nos ensaios

4.4.2 - Medição de deformações específicas

Para a medição das deformações específicas, foram utilizados extensômetros elétricos de resistência (Figura 4.16) e rosetas do fabricante KYOWA, cuja resistência é de $119,8 \pm 0,2 \Omega$.

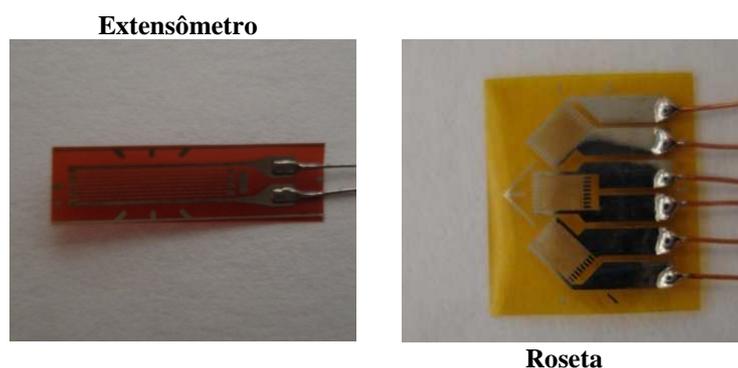


Figura 4.16 – Extensômetro e Roseta

Relativamente às rosetas e extensômetros, apresenta-se, na figura 4.17, o esquema de posicionamento na alma do pilar, bem como nas mesas e alma da viga. As rosetas 1, 2 e 3 tem extensômetros 3, 6 e 11 verticais, extensômetros 4, 7 e 12 inclinadas e 5, 8 e 13 horizontais, respectivamente.

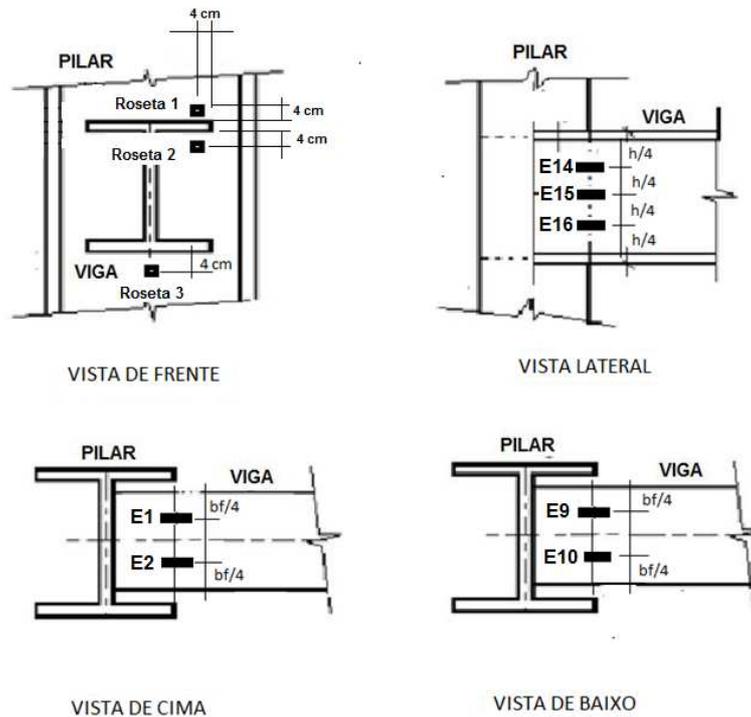


Figura 4.17 – Posicionamento dos extensômetros e rosetas

4.4.3 - Aquisição de dados

Um sistema automático controlado por computador, que consiste de dispositivos e de um programa de controle e monitoramento de aquisição de dados, foi utilizado para a coleta dos dados obtidos a partir dos LVDT's, dos extensômetros, das rosetas e da célula de carga. Esse sistema é constituído por quatro módulos de oito canais "Spider8" (Figura 4.18) fabricado pela HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik, 2003) com aquisição de dados efetuada pelo programa "Catman 4.5" e armazenada no computador (figura 4.18).



Figura 4.18 – Sistema automático de aquisição de dados "Spider 8"

4.4.4 - Montagem da barra de estabilização do pórtico PR1

Várias análises sobre a distribuição das forças após o carregamento antecederam os ensaios experimentais no intuito de analisar o comportamento dos pórticos de reação durante o ensaio. Foi observado que, após certo nível de carga, o pórtico PR1, poderia apresentar deslocamentos perpendiculares ao seu plano. Para prevenir esse possível problema foi adotado um sistema de travamento para estabilizar o pórtico PR1, fixando sua viga superior a um pórtico de reação muito mais robusto, que já se encontrava montado atrás do pórtico PR1 (Figura 4.19).



Figura 4.19 – Sistema de estabilização do pórtico PR1

4.5 - Apresentação dos Resultados Experimentais

4.5.1 – Considerações iniciais

Durante todos os ensaios foram feitas leituras da instrumentação utilizada em vários passos de carga, de forma a obter-se uma visão geral do comportamento do protótipo. A partir desses passos de carga foi possível estudar o comportamento da viga e do pilar, à medida que os protótipos foram sendo submetidos ao carregamento. Para a construção dos gráficos de análise foram utilizados os resultados de apenas alguns passos de carga considerados importantes em função do comportamento apresentado, pois é inviável a apresentação dos resultados para todos os passos de carga obtidos.

4.5.2 - Protótipos AIE5

Os protótipos AIE5 são os que possuem alto índice de esbeltez da alma do pilar, igual a 45,51, constituídos por perfis W360x44 tanto para o pilar quanto para a viga, cujas propriedades geométricas são apresentadas na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Propriedades geométricas dos perfis utilizados nos protótipos AIE5

Coluna	h_c	35,2cm	Altura do perfil do pilar
	b_{fc}	17,1cm	Largura da mesa do pilar
	t_{wc}	0,69cm	Espessura da alma do pilar
	t_{fc}	0,98cm	Espessura da mesa do pilar
Viga	h_v	35,2cm	Altura do perfil da viga
	b_{fv}	17,1cm	Largura da mesa da viga
	t_{wv}	0,69cm	Espessura da alma da viga
	t_{fv}	0,98cm	Espessura da mesa da viga

Dois ensaios com os protótipos AIE5, exatamente iguais, foram executados. No primeiro ensaio (protótipo AIE5a), para carregamento de 17,28kN (momento fletor aproximadamente igual a 2.592kN.cm na ligação), ocorreram deformações visíveis nas mesas do pilar. Tais deformações, semelhantes à flambagem local das mesas, apresentaram-se em regiões próximas às mesas da viga, observando-se aproximação das mesas do pilar na região da mesa inferior da viga e afastamentos na região da mesa superior da viga, com sentidos opostos de deslocamentos na região posterior do pilar (face da alma oposta à qual é soldada à viga). Com o aumento do carregamento esse comportamento é acentuado, como se pode observar na figura 4.20.

Durante a realização do ensaio, para carregamento de 28,33kN – correspondente à solitação de 4.250kN.cm na ligação, foi observada a instabilidade do pórtico PR2 (suporte do sistema de aplicação de carga), com tendência de inclinação na direção perpendicular a seu plano. Desse modo o ensaio foi encerrado prematuramente, tendo em vista o risco de comprometimento dos equipamentos e a própria confiabilidade dos resultados.

Para a realização do segundo ensaio do primeiro grupo (protótipo AIE5b), buscou-se a correção do problema de instabilidade do pórtico PR2 através da instalação de duas barras estabilizadoras, promovendo-se a interligação superior entre os pórticos PR1 e PR2, como apresentado na figura 4.21.

Com essa providência o ensaio do protótipo AIE5b ocorreu sem transtornos, encerrando-se o ensaio devido à perda de capacidade resistente do protótipo

(carregamento de 46,38kN, correspondente a momento fletor de 6957kN.cm na ligação).

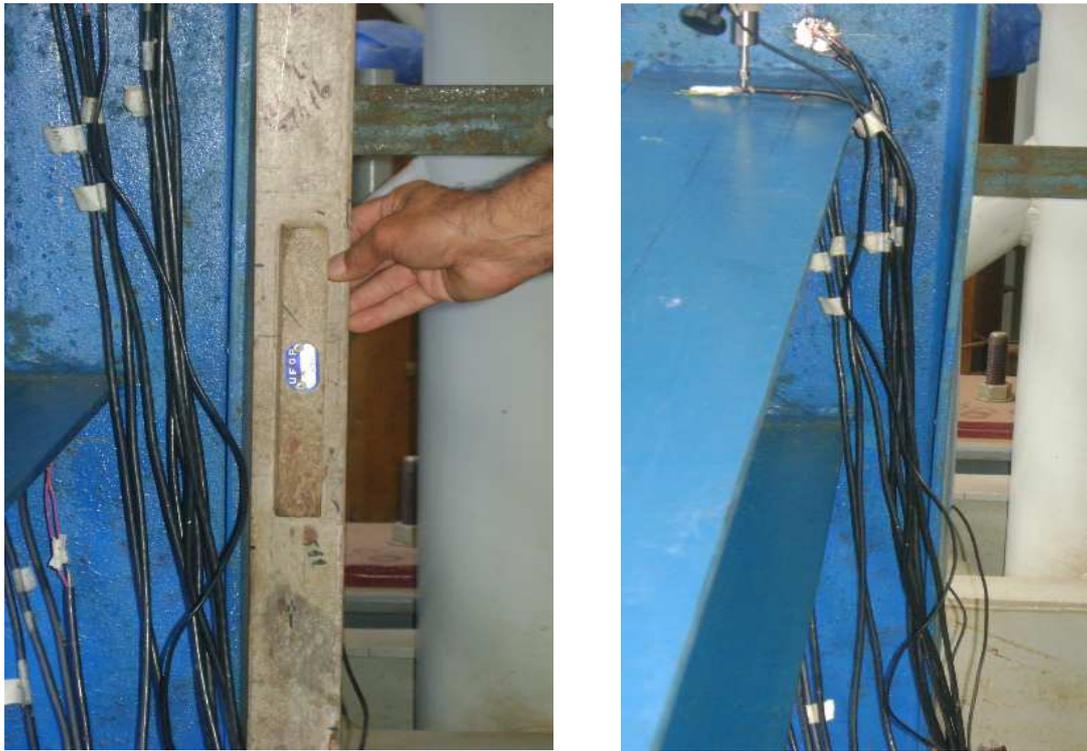


Figura 4.20 – Deformação das mesas do pilar – Protótipo AIE5a



Figura 4.21 – Barras estabilizadoras do pórtico PR2

O mesmo comportamento das mesas do pilar ocorrido no primeiro ensaio foi observado nesse ensaio, observando-se a deformação a partir do carregamento de 30,04kN, correspondente ao momento fletor de 4.505kN.cm, porém com um nível de deformação menor, como apresentado na figura 4.22.



Figura 4.22 – Deformação das mesas do pilar do protótipo AIE5b

4.5.2.1 - Deslocamentos da Viga e da Alma do Pilar

Na figura 4.23 são mostradas as situações correspondentes ao final dos ensaios dos protótipos AIE5a e AIE5b, observando-se que praticamente não houve deformação das vigas por flexão.



(i)



(ii)

Figura 4.23 - Deslocamento finais das vigas dos protótipos AIE5a (i) e AIE5b (ii)

O comportamento final das vigas, na verdade, foi o mesmo em todas as etapas de carregamento dos protótipos, como foi observado pela análise dos resultados

apresentados pelos LVDT's 1 a 4 (posicionados em diferentes pontos da viga) em cada etapa de carga.

Na figura 4.24 são apresentados os deslocamentos verticais obtidos para os protótipos AIE5a e AIE5b, respectivamente para carregamentos de 9,67kN e 9,64kN, observando-se que os deslocamentos do protótipo AIE5a são significativamente maiores que os do protótipo AIE5b, muito provavelmente devido ao problema de instabilidade do pórtico PR2 anteriormente mencionado.

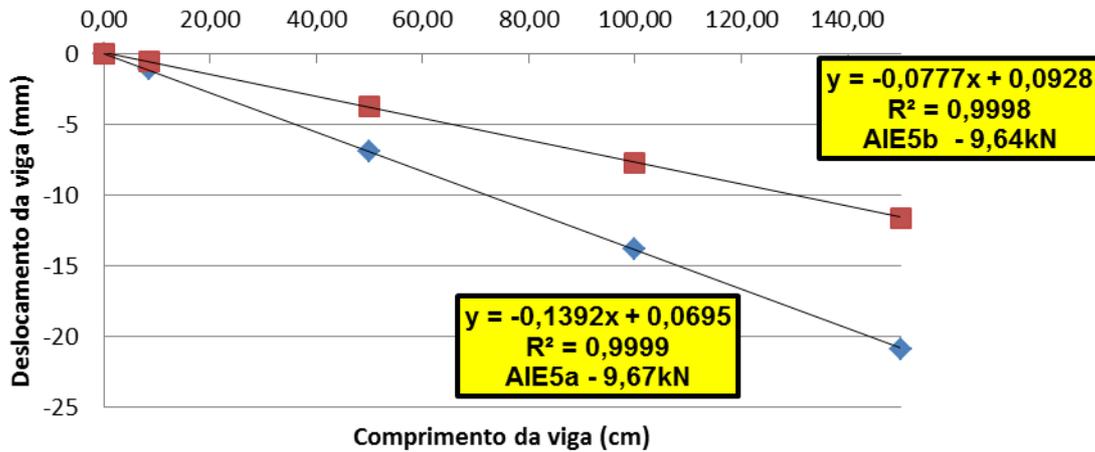


Figura 4.24 – Deslocamentos verticais das vigas dos protótipos AIE5 (cargas de 9,67kN e 9,64kN)

Os deslocamentos verticais para passos de carga de 13,70kN e 13,62kN; 21,41kN e 21,45kN; 28,33kN e 28,55kN são apresentados nas figuras 4.25 a 4.27, respectivamente para os protótipos AIE5a e AIE5b, apresentando-se na figura 4.28 apenas os deslocamentos obtidos no ensaio do protótipo AIE5b (carga de 46,81kN, última etapa de carga do ensaio), uma vez que o ensaio do protótipo AIE5a, como já mencionado, foi prematuramente encerrado.

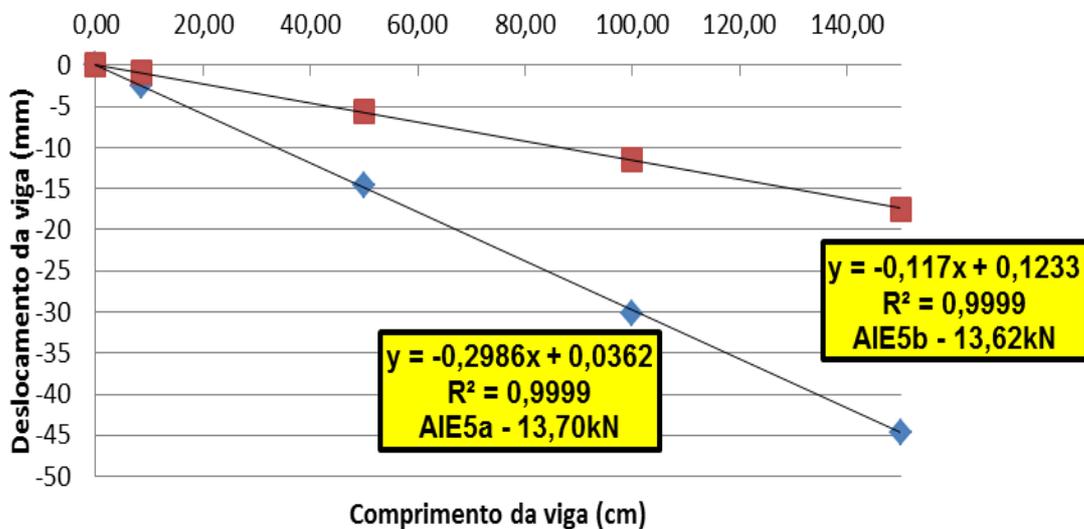


Figura 4.25 – Comportamento das vigas dos protótipos AIE5 (cargas de 13,70kN e 13,62kN)

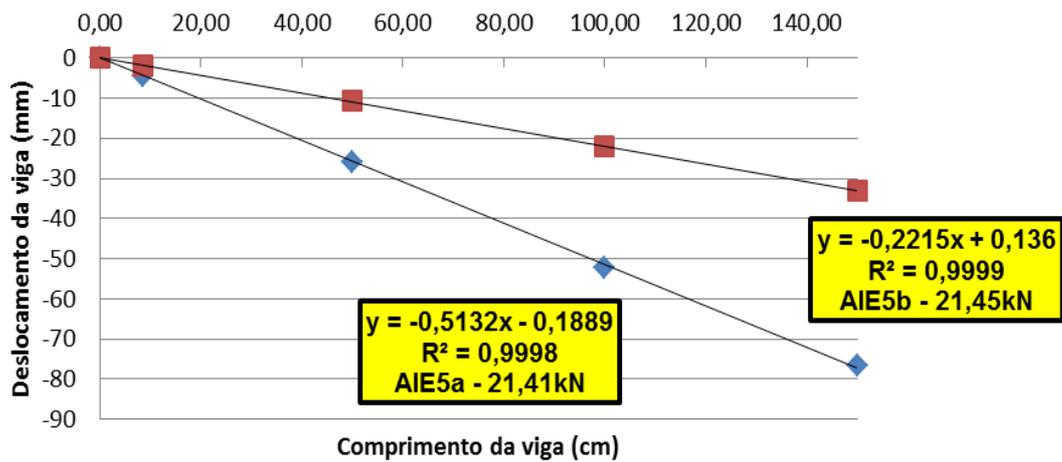


Figura 4.26 – Comportamento das vigas dos protótipos AIE5 (cargas de 21,41kN e 21,45kN)

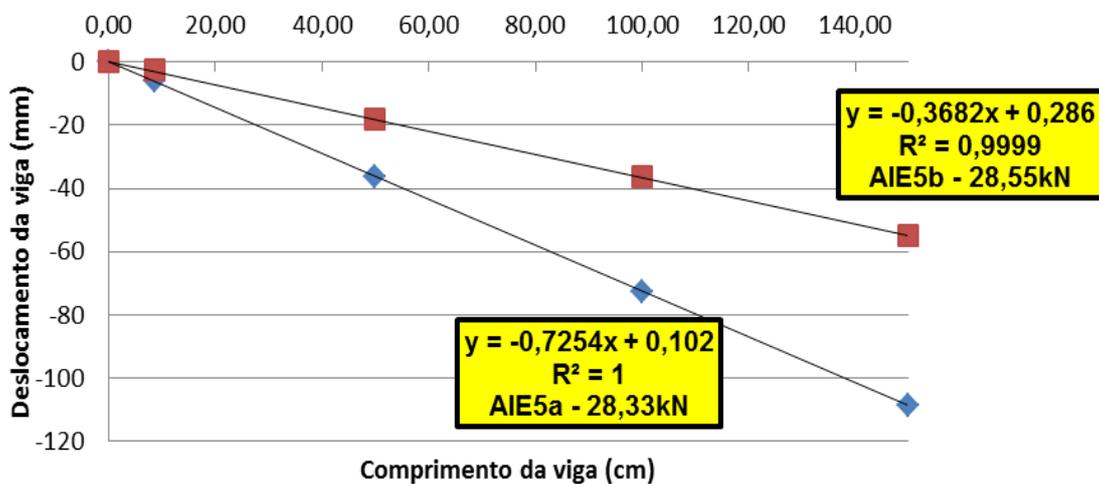


Figura 4.27 – Comportamento das vigas dos protótipos AIE5 (cargas de 28,33kN e 28,55kN)

Ressalte-se, ainda, que os deslocamentos do protótipo AIE5a foram sempre razoavelmente maiores que os obtidos no ensaio do protótipo AIE5b, em etapas de carga aproximadamente iguais, indicando que, provavelmente, os problemas detectados no ensaio tenham exercido influência no comportamento desde o início do ensaio, embora somente detectados para a etapa de carga de 28,33kN.

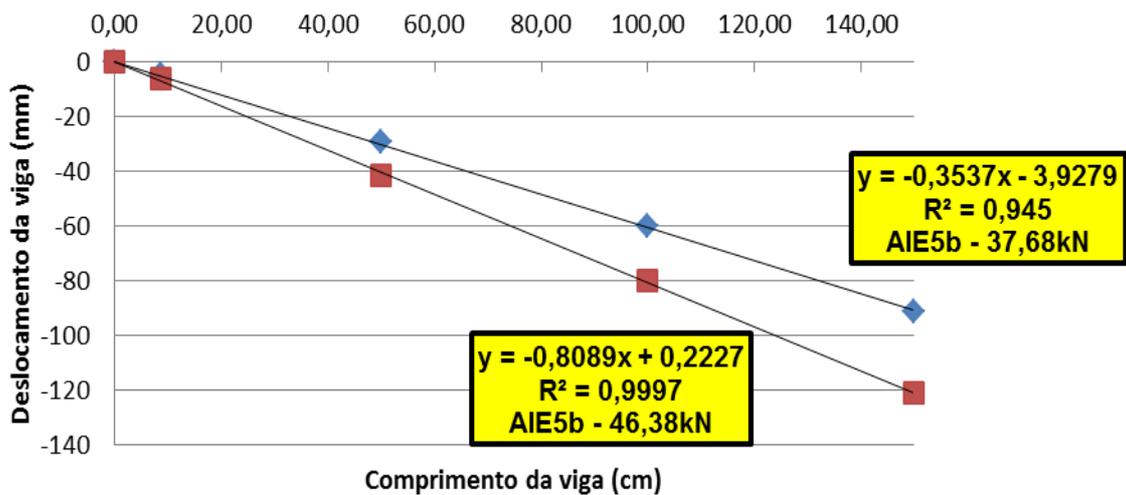


Figura 4.28 – Comportamento das vigas do protótipo AIE5b (cargas de 37,68 E 46,38kN)

Para a análise do comportamento da alma do pilar foram utilizados os resultados de deslocamento indicados pelos LVDT's 5, 6, 7 e 8, posicionados na parte posterior da alma do pilar, como apresentado na figura 4.29, respectivamente para os protótipos AIE5a e AIE5b.

Os resultados obtidos demonstram comportamento similar para as deformações das almas dos protótipos AIE5a e AIE5b, embora os deslocamentos dos pontos monitorados tenham sido sempre maiores no protótipo AIE5a.



(i) AIE5a



(ii) AIE5b

Figura 4.29 – Deslocamentos da alma do pilar dos protótipos AIE5a (i) e AIE5b (ii)

Nas figuras 4.30 a 4.33 são apresentados os gráficos correspondentes a diferentes etapas de carga para os protótipos AIE5a e AIE5b.

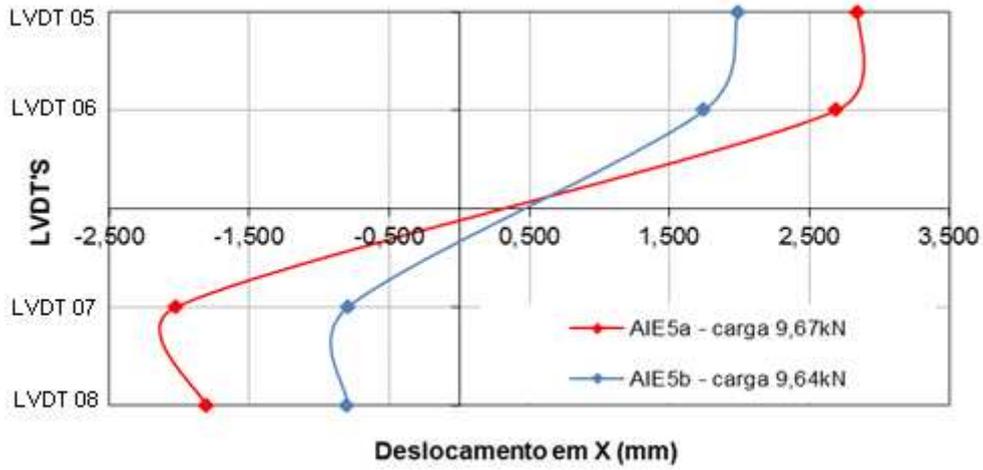


Figura 4.30 – Deslocamentos das almas dos pilares (cargas de 9,67kN e 9,64kN)

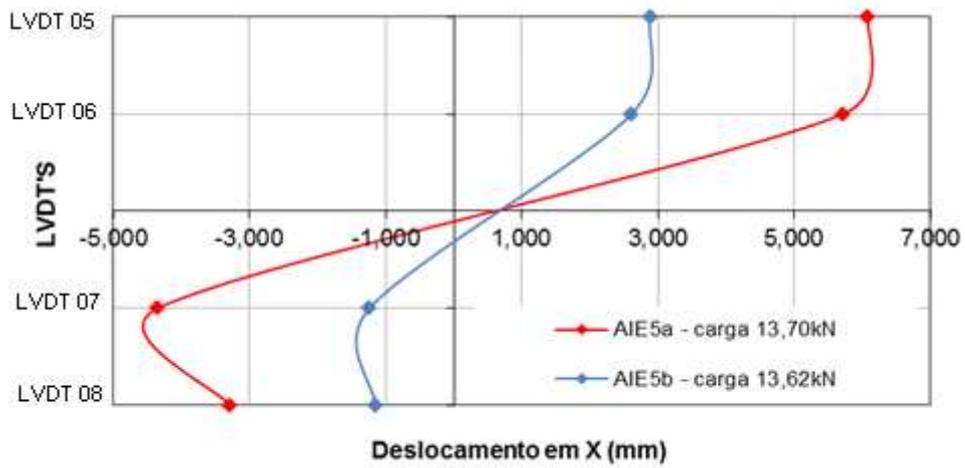


Figura 4.31 – Deslocamentos das almas dos pilares (cargas de 13,70kN e 13,62kN)

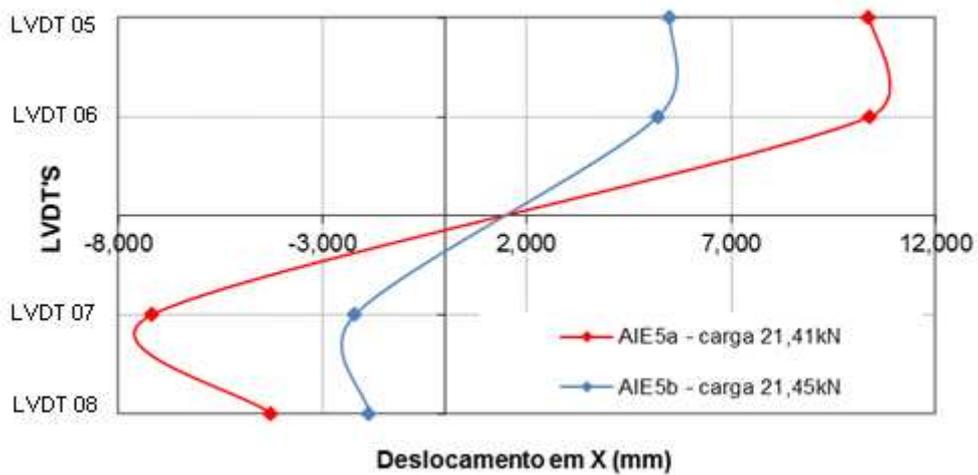


Figura 4.32 – Deslocamentos das almas dos pilares (cargas de 21,41kN e 21,45kN)

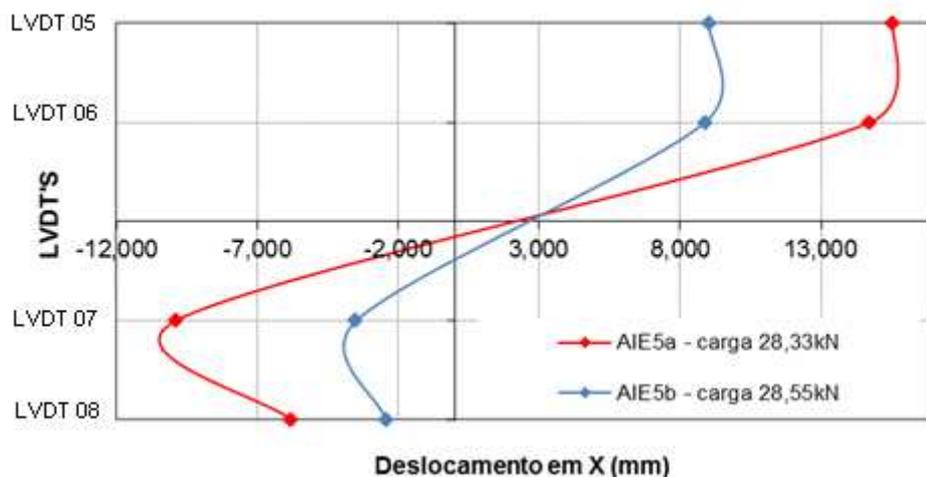


Figura 4.33 – Deslocamentos das almas dos pilares (cargas de 28,33kN e 28,55kN)

Como a carga máxima do ensaio AIE5a foi de 28,33kN, na figura 4.34 são apresentados os resultados obtidos apenas para o protótipo AIE5b sob cargas de 37,68kN e 46,38kN (etapa final de carregamento do ensaio).

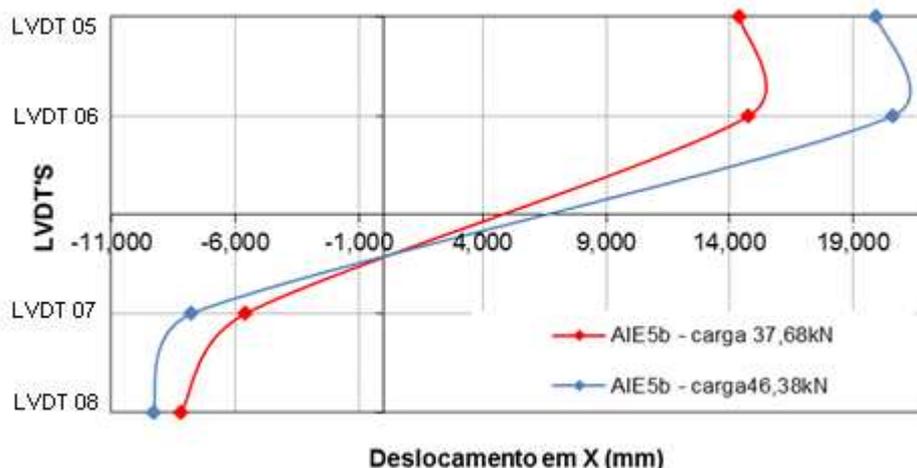


Figura 4.34 – Deslocamento da alma do pilar do protótipo AIE5b (carga de 37,68kN e 46,38kN).

Pode-se observar, comparando-se as figuras 4.33 e 4.34 que ocorrem mudanças de comportamento da alma do pilar do protótipo AIE5b, com deslocamentos maiores nos pontos correspondentes aos LVDT's 6 e 8 que os correspondentes aos LVDT's 5 e 7, respectivamente, o que ocasionou uma mudança no formato da curva, acima e abaixo das mesas da viga. Na realidade, observando-se a evolução desses deslocamentos, a cada passo de carga, observa-se que o deslocamento do ponto correspondente ao LVDT

6 passa a ser superior ao do LVDT 5 a partir da carga de 31,59kN, ocorrendo o mesmo para os deslocamentos dos LVDT's 8 e 7 a partir da carga de 30,04 kN.

Outro ponto importante observado nas figuras 4.30 a 4.34 é que não há simetria de deslocamentos nos pontos correspondentes às mesas da viga (LVDT's 6 e 7), ocorrendo variação da posição do ponto sem deslocamento na direção do eixo da viga, em decorrência das deformações impostas à alma do pilar.

Em outras palavras, o ponto que não sofre deslocamento na direção do eixo original da viga, desloca-se para baixo à medida que cresce a sollicitação na ligação, com tendência a situar-se , para o protótipo AIE5b, entre 7,7cm (carga de 30,04kN) e aproximadamente 8,4cm (carga final do ensaio igual a 46,38kN) abaixo da posição correspondente à metade da altura da viga.

4.5.2.2 – Momento x Rotação

Para a obtenção dos gráficos momento x rotação foram utilizados os resultados dos LVDT's. Os resultados medidos pelos LVDT's 6 e 7, posicionados na parte posterior da alma do pilar, na direção das mesas da viga foram utilizados para obter as rotações da alma do pilar, enquanto as rotações das seções transversais da viga foram obtida com os resultados medidos pelos LVDT's posicionados ao longo da mesma (LVDT's 1 a 4). Observa-se, entretanto, que as curvas são muito próximas (figuras 4.36 e 4.37), confirmando-se que a rotação da ligação pode ser considerada tanto pela deformação da alma do pilar quanto pelos deslocamentos da viga.

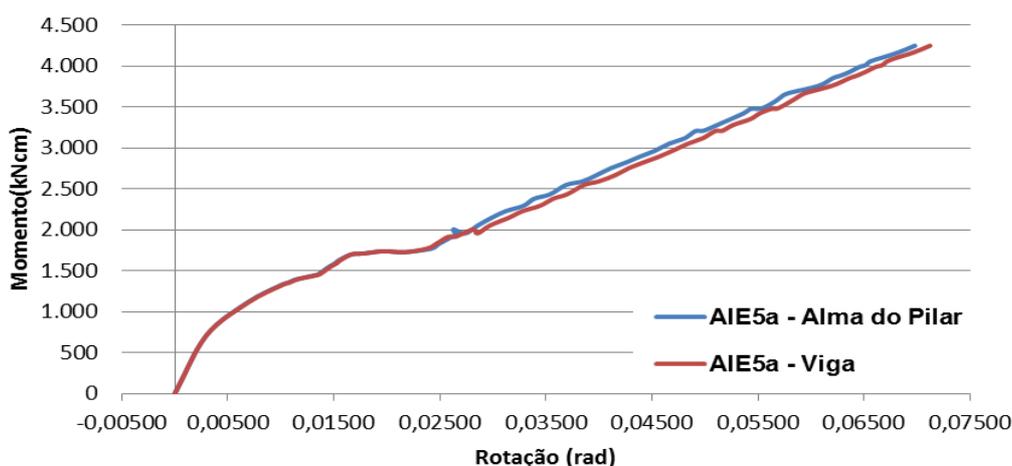


Figura 4.35 – Momento x Rotação – Alma do Pilar e Viga – Protótipos AIE5a

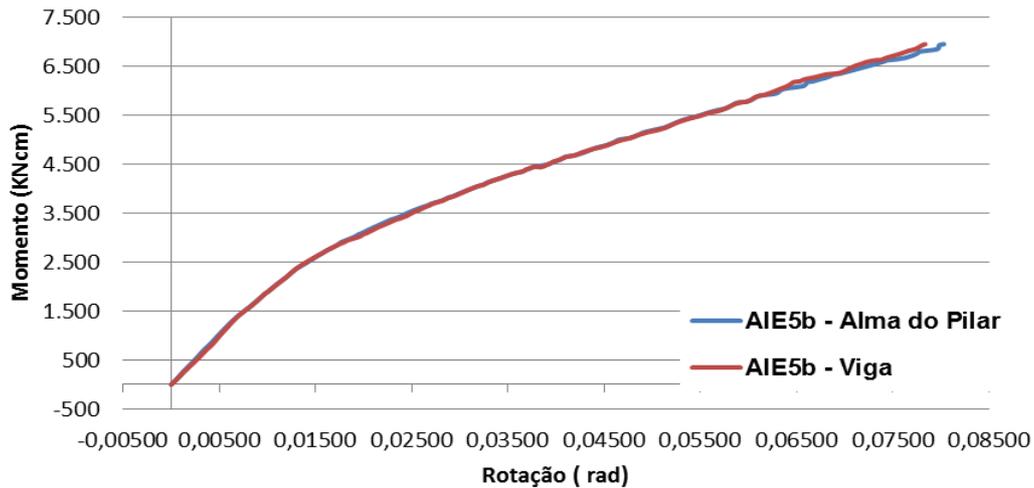


Figura 4.36 – Momento x Rotação – Alma do Pilar e Viga – Protótipos AIE5b

Nas figuras 4.37 e 4.38 são apresentadas as curvas momento-rotação comparativas dos resultados obtidos para os protótipos AIE5a e AIE5b considerando-se, respectivamente, a rotação da alma dos pilares e das vigas. As curvas permitem obter os valores apresentados na tabela 4.2, observando-se que a rigidez inicial, considerando-se os valores obtidos para a rotação da alma do pilar e da viga, apresenta variação de apenas 0,3% e 7,3%, respectivamente para os protótipos AIE5a e AIE5b.

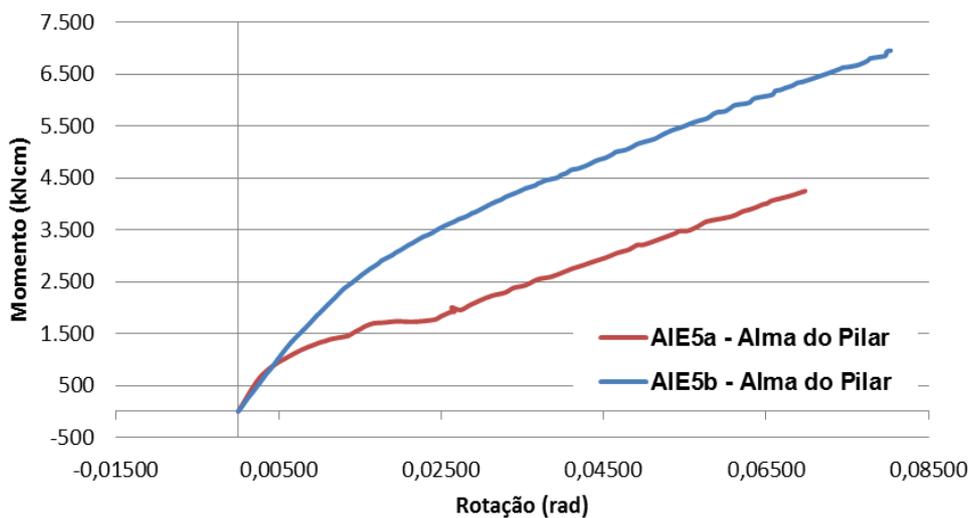


Figura 4.37 – Comportamento Momento x Rotação da Alma do Pilar dos protótipos AIE5a e AIE5b

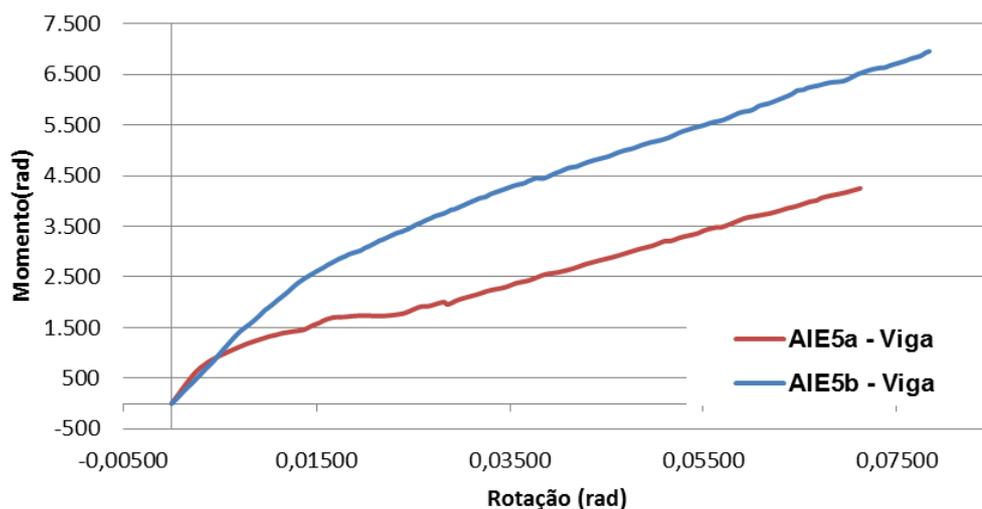


Figura 4.38 – Comportamento Momento x Rotação da Alma do Pilar dos protótipos AIE5a e AIE5b

Tabela 4.2 - Rigidez inicial dos protótipos AIE5a e AIE5b (kN.cm/rad)

	Alma do Pilar	Viga
AIE5a	238.544	237.852
AIE5b	220.689	204.505

4.5.2.3 – Solicitações nas mesas da viga

Para obtenção das solicitações nas mesas da viga, foram utilizados os extensômetros posicionados nas mesas superior e inferior da viga. Adotando-se a média dos valores fornecidos pelos extensômetros situados em cada mesa, são obtidas as tensões médias e as respectivas forças solicitantes nas mesas e transmitidas para a alma do pilar, cujos resultados são apresentados nas figuras 4.39 e 4.40, em função dos momentos fletores aplicados às ligações dos protótipos AIE5a e AIE5b. Nessas figuras são apresentadas, ainda, as curvas teóricas de transmissão do momento fletor pelas mesas, considerando-se um binário de forças de tração e compressão, obtidas pela divisão do valor do momento fletor pela distância entre os planos médios das mesas da viga

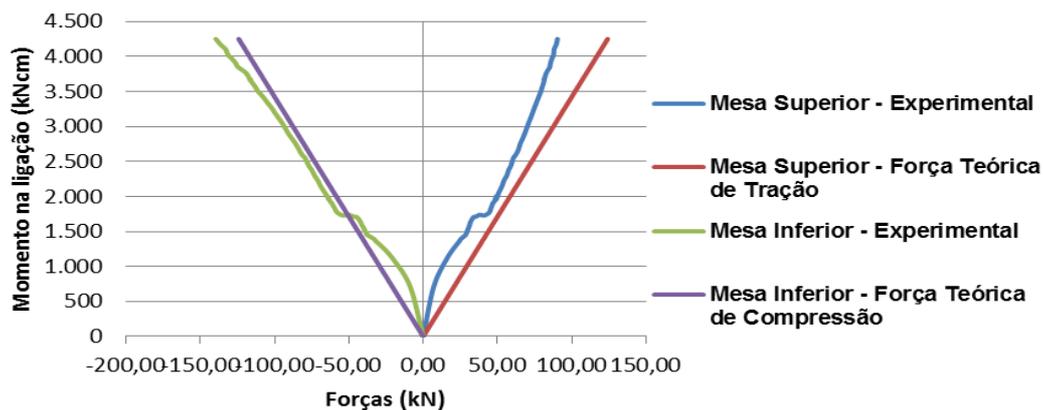


Figura 4.39 –Variação das forças de tração e compressão transmitidas pelas mesas da viga em função do momento na ligação (Protótipos AIE5a)

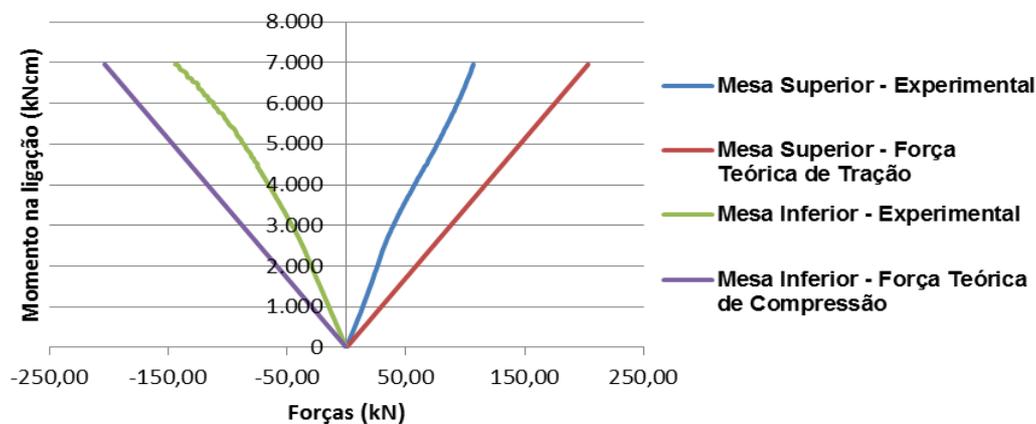


Figura 4.40 –Variação das forças de tração e compressão transmitidas pelas mesas da viga em função do momento na ligação (Protótipos AIE5b)

A despeito das diferenças entre os resultados dos ensaios dos protótipos AIE5a e AIE5b, pelas razões já comentadas, verifica-se que as forças transmitidas pelas mesas superior e inferior não são iguais (como será comentado no item 4.5.2.1), com relação aos valores das forças de tração e de compressão variando entre 65% e 82% (protótipo AIE5a) e entre 74% e 94% (protótipo AIE5b).

Na figura 4.41 são apresentadas, para o protótipo AIE5a, as variações entre os valores experimentais e teóricos das forças transmitidas pelas mesas da viga, em função do momento fletor atuante na ligação. Para a mesa tracionada esta relação varia entre 0,34 e 0,86 (valor médio de 0,76), com variação entre 0,42 e 1,12 (valor médio de 1,03) para a mesa comprimida.

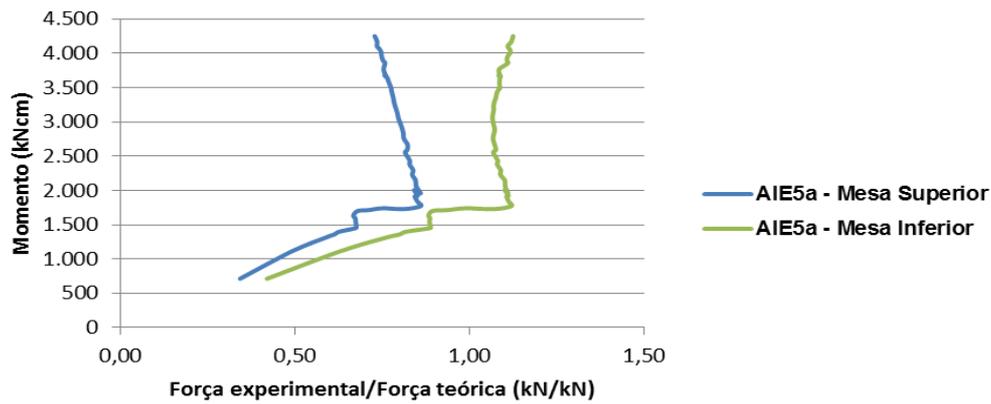


Figura 4.41 – Variação da relação entre os valores experimentais e teóricos das forças transmitidas pelas mesas da viga (Protótipos AIE5ab)

As mesmas variações, para o protótipo AIE5b, são apresentadas na figura 4.42, com valores entre 0,53 e 0,44 (valor médio de 0,50) para a mesa tracionada e entre 0,71 e 0,50 (valor médio de 0,58) para a mesa comprimida.

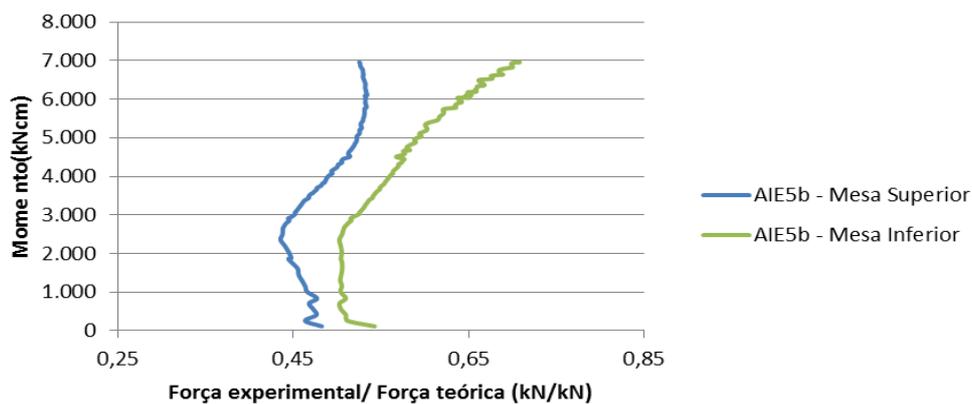


Figura 4.42 –Variação da relação entre os valores experimentais e teóricos das forças transmitidas pelas mesas da viga (Protótipos AIE5b)

Observando-se as curvas obtidas para o protótipo AIE5a, constata-se uma anomalia na variação entre os valores experimentais e teóricos para ambas as mesas da viga para momento fletor na ligação da ordem de aproximadamente 1.700kN.cm, possibilitando observar que, provavelmente, a questão da instabilidade do pórtico de reação (relatada anteriormente) já passa a influenciar os resultados a partir desse nível de solicitação, como também pode ser notado na curva momento-rotação apresentada na figura 4.36, bem como nas curvas referentes às forças transmitidas pelas mesas da viga.

Já para o protótipo AIE5b, a inversão da tendência de diminuição da relação entre os resultados experimentais e teóricos observados a partir da solicitação de aproximadamente 2.300kN.cm - considerando-se que não ocorreu nenhuma modificação significativa no comportamento momento-rotação (figura 4.37) e de

transmissão de esforços pelas mesas (figura 4.42) - pode ser interpretada como decorrente de redistribuição de esforços devido às deformações da alma do pilar, inclusive em função da já comentada deformação das mesas do pilar, embora, visualmente, tal deformação somente tenha sido detectada para momento fletor da ordem de 4.500kN.cm.

Considerando-se apenas os resultados do protótipo AIE5b, este comportamento pode então ser entendido como, fundamentalmente, decorrente das deformações da alma e das mesas do pilar, resultando em uma complexa distribuição da transmissão dos esforços normais ao plano dessa alma, com relevante parcela sendo transmitida pela alma da viga.

Ressalte-se, ainda, que os resultados foram obtidos mediante a instalação de extensômetros nas mesas da viga em posição bastante próxima da sua ligação com a alma do pilar. Como já previsto pela teoria, tais resultados sofreriam a influência dessa proximidade. Entretanto, justifica-se o procedimento adotado pela intenção de avaliar mais detalhadamente a efetiva distribuição de esforços das mesas da viga para a alma do pilar, uma vez que, como comprovado pelos resultados até aqui apresentados, é a alma do pilar o elemento mais significativo no comportamento da ligação.

4.5.2.4 – Tensões na alma da viga

Para analisar as solicitações na alma da viga foram utilizados os resultados fornecidos pelos extensômetros 14, 15 e 16, posicionados como indicado na figura 4.43.

Como observado nas figuras 4.44 e 4.45, respectivamente referentes aos protótipos AIE5a e AIE5b, para as etapas iniciais de carregamento, as tensões são muito pequenas (podendo ser consideradas até mesmo como não significativas), passando a apresentar valores diferentes em pontos simétricos à posição teórica da linha neutra, apenas a partir dos carregamentos de 21,41kN (AIE5a) e 28,55kN (AIE5b), respectivamente correspondentes a 3.212kN.cm e 4.283kN.cm

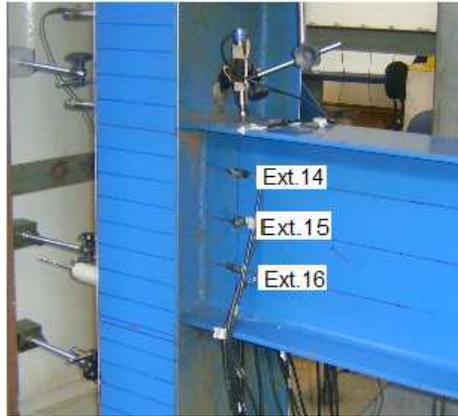


Figura 4.43 – Extensômetros posicionados na alma da viga dos protótipos ensaiados

Os resultados obtidos corroboram a constatação anterior de deslocamento da linha neutra da seção transversal em relação à posição correspondente à metade da altura da viga.

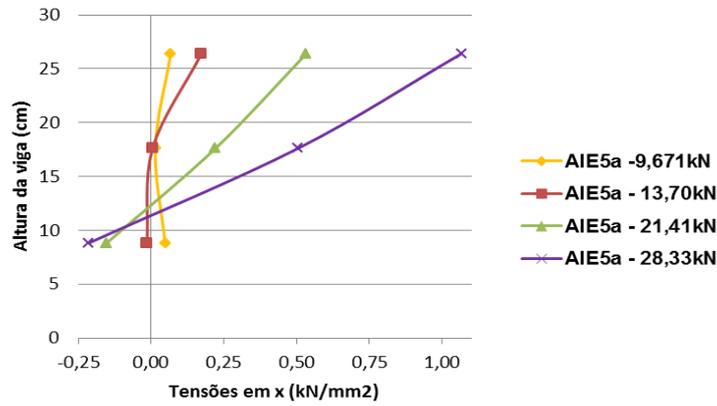


Figura 4.44 – Variação das tensões na alma da viga (Protótipo AIE5a)

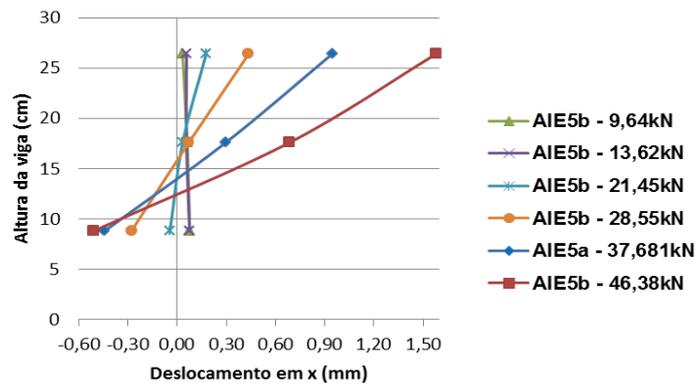


Figura 4.45– Variação das tensões na alma da viga (Protótipo AIE5b)

4.5.2.5 – Tensões na Alma do Pilar

As tensões na alma do pilar foram obtidas através das rosetas 1 e 2 (figura 4.47), posicionadas acima e abaixo da mesa superior (tracionada) da viga e da roseta 3 (figura

4.46), instalada abaixo da mesa inferior (comprimida) da viga, na direção do plano médio da alma da mesma.



Figura 4.46 – Rosetas 1 e 2 instaladas na alma do pilar, acima da mesa tracionada da viga



Figura 4.47 – Roseta 3 posicionada na alma do pilar, abaixo da mesa comprimida da viga

Nas figuras 4.48 e 4.49 são apresentados os gráficos que correlacionam o momento fletor na ligação com as tensões verticais (direção do eixo do pilar) e horizontais (direção perpendicular à alma da viga), obtidas a partir dos resultados fornecidos pelos extensômetros das rosetas 1 e 2, respectivamente, indicando-se também o nível de tensão correspondente à tensão limite de escoamento (f_y) nominal do material utilizado.

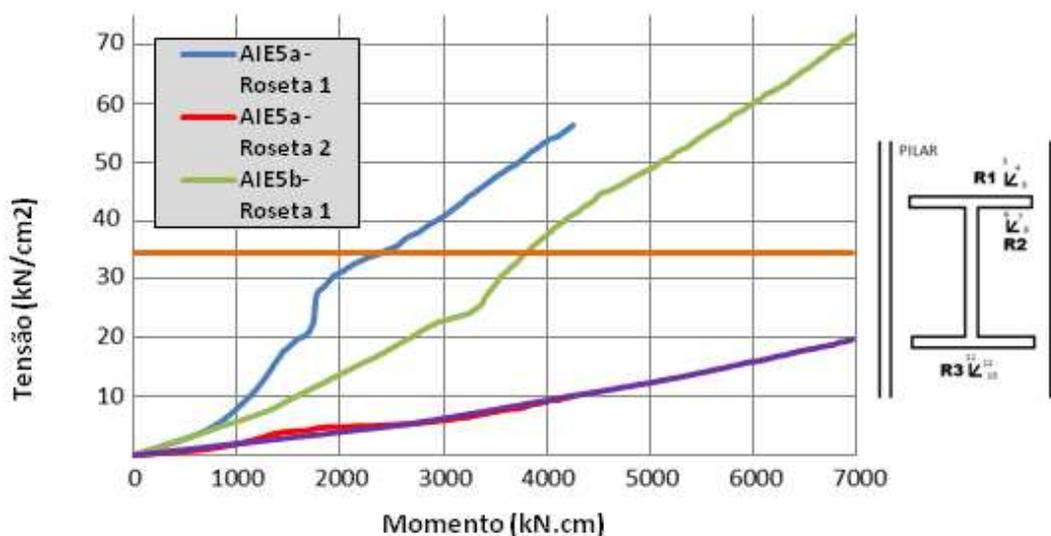


Figura 4.48 – Distribuições de tensões verticais na alma do pilar dos protótipos AIE5a e AIE5b (Rosetas 1 e 2)

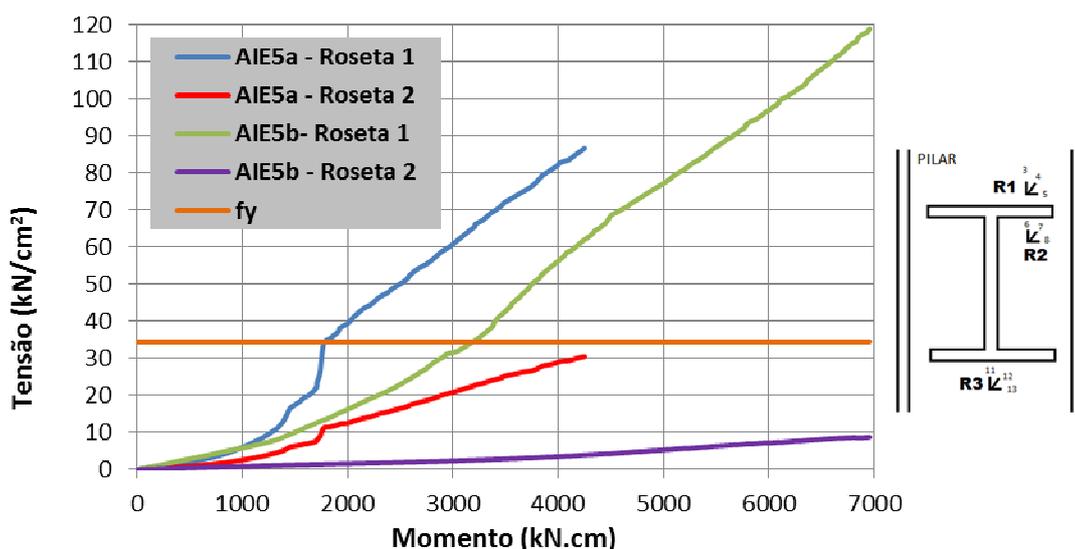


Figura 4.49 – Distribuições de tensões horizontais na alma do pilar dos protótipos AIE5a e AIE5b (Rosetas 1 e 2)

Observa-se que, no ponto correspondente à roseta 1, a tensão vertical (figura 4.48) ultrapassa o valor de f_y para solicitações a partir de aproximadamente 2.400kN.cm para o protótipo AIE5a e de aproximadamente 3.800kN.cm para o protótipo AIE5b.

Já para a tensão horizontal (figura 4.49), também para a roseta 1, o valor de referência é ultrapassado para solicitações de aproximadamente 1.800kN.cm e 3.200kN.cm, respectivamente para os protótipos AIE5a e AIE5b.

Relativamente à roseta 2, todos os valores obtidos, tanto para as tensões verticais quanto horizontais, em ambos os protótipos, foram inferiores a f_y (figura 4.49 e 4.50, respectivamente).

Contudo, como observado na figura 4.50, os resultados das tensões de Von Mises, já ultrapassam o valor da tensão nominal de escoamento do material para solicitações de aproximadamente 1.756kN.cm e 3.069kN.cm (respectivamente para os protótipos AIE5a e AIE5b) no ponto correspondente à roseta 1, atingindo valores de 33,04kN/cm² para o protótipo AIE5a e 30,49kN/cm² para o protótipo AIE5b relativamente próximos ao valor de referência (34,50kN/cm²) no ponto instrumentado com a roseta 2.

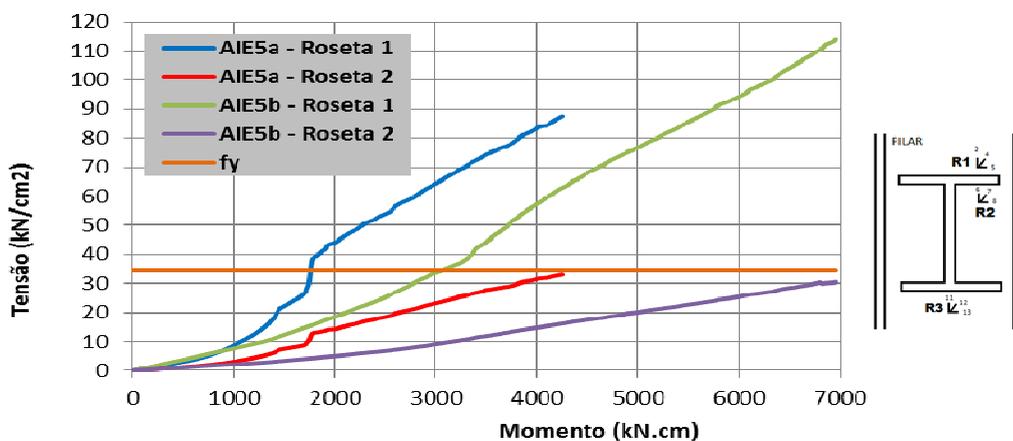


Figura 4.50 – Distribuições de tensões de Von Mises na alma do pilar dos protótipos AIE5a e AIE5b (Rosetas 1 e 2)

Os resultados obtidos no ponto de instalação da roseta 3, respectivamente para tensões nas direções vertical e horizontal, são apresentados nas figuras 4.51 e 4.53, apresentando-se na figura 4.53 os resultados correspondentes às tensões de Von Mises.

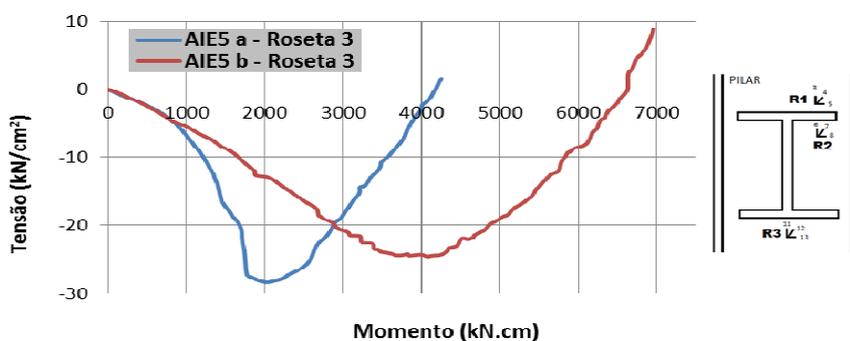


Figura 4.51 – Distribuições de tensões verticais na alma do pilar dos protótipos AIE5a e AIE5b (Roseta 3)

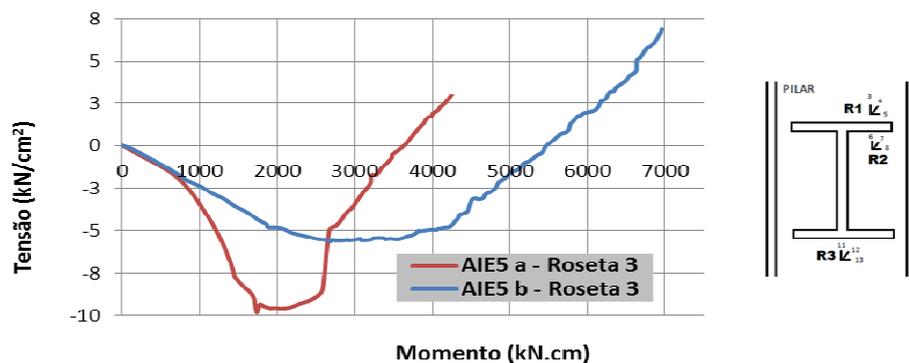


Figura 4.52– Distribuições de tensões horizontais na alma do pilar dos protótipos AIE5a e AIE5b (Roseta 3)

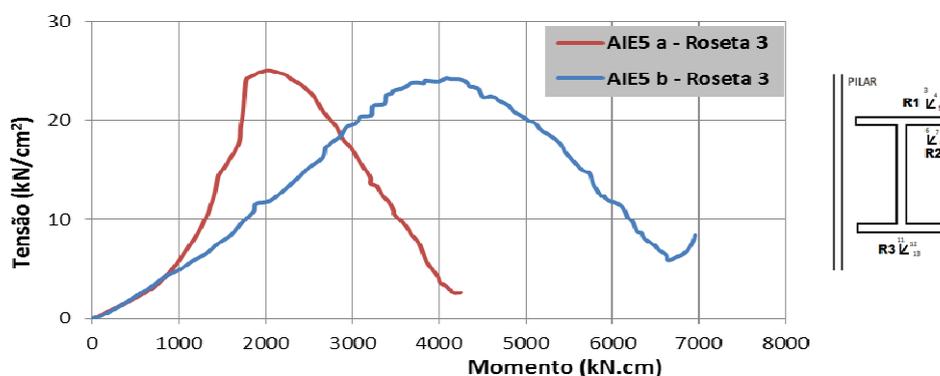


Figura 4.53 – Distribuições de tensões de Von Mises na alma do pilar dos protótipos AIE5a e AIE5b (Roseta 3)

Observa-se que nenhum dos resultados ultrapassou $f_y = 34,5 \text{ kN/cm}^2$, verificando-se, em todos os casos, uma tendência inicial de crescimento das tensões verticais, horizontais e de Von Mises, seguida de diminuição desses valores, inclusive com inversão de sinal, coerente com a variação, já apresentada, da posição da linha neutra.

4.5.3 - Protótipo MIE6

Os protótipos MIE6 possuem alma do pilar com índice de esbeltez igual a 29,61 (médio índice de esbeltez). Para a montagem desses protótipos MIE6 foi utilizado o perfil W250x44,8 para o pilar, mantendo-se a viga com o perfil W360x44, apresentando-se na tabela 4.5 as propriedades geométricas desses perfis.

Foram executados dois ensaios com protótipos MIE6 exatamente iguais. No primeiro ensaio (protótipo MIE6a), para carregamento de aproximadamente 50kN (momento fletor igual a 7.500kN.cm na ligação), ocorreu o rompimento localizado da solda na extremidade da mesa superior da viga (Figura 4.54). Na tentativa de

prosseguimento do ensaio observou-se perda total da capacidade resistente do protótipo para solicitação de 59,53kN (momento fletor na ligação igual a 8.929kN.cm).

Tabela 4.5 - Propriedades geométricas dos perfis utilizados nos protótipos MIE6.

Coluna	h_c	26,6cm	Altura do pilar
	b_{fc}	14,8cm	Largura da mesa do pilar
	t_{wc}	0,76cm	Espessura da alma do pilar
	t_{fc}	1,30cm	Espessura da mesa do pilar
Viga	h_v	35,2cm	Altura da viga
	b_{fv}	17,1cm	Largura da mesa da viga
	t_{wv}	0,69cm	Espessura da alma da viga
	t_{fv}	0,98cm	Espessura da mesa da viga



Figura 4.54 – Rompimento da solda no protótipo MIE6a

O segundo ensaio desse grupo (protótipo MIE6b) transcorreu normalmente, atingindo-se solicitação final de 63,88kN (equivalente a momento fletor de 9.582kN.cm na ligação) correspondente à perda da capacidade resistente do protótipo.

A exemplo do ocorrido nos ensaios do grupo AIE5, também no ensaio do grupo MIE6 foi observada a deformação das mesas do pilar, como mostrado na figura 4.55 para o protótipo MIE6a. Para o protótipo MIE6b essa deformação iniciou-se sob carregamento de 36kN, (momento fletor na ligação igual a 5.400kN.cm), tornando-se mais acentuada a partir da etapa correspondente a momento fletor de 6.750kN.cm (carga de aproximadamente 45kN), como mostrado na figura 4.56.

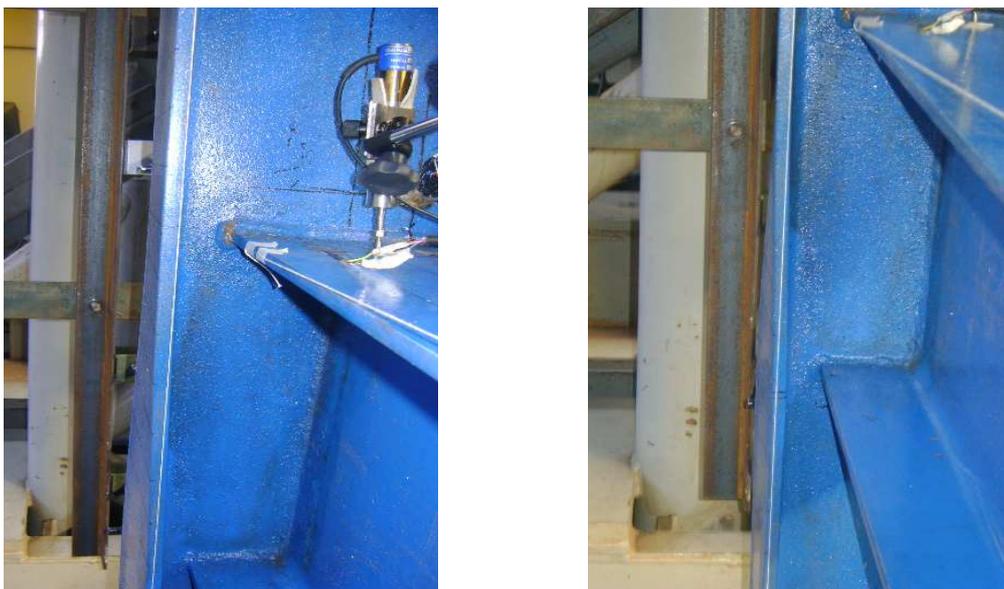


Figura 4.55 – Deformação das mesas do protótipo MIE6a

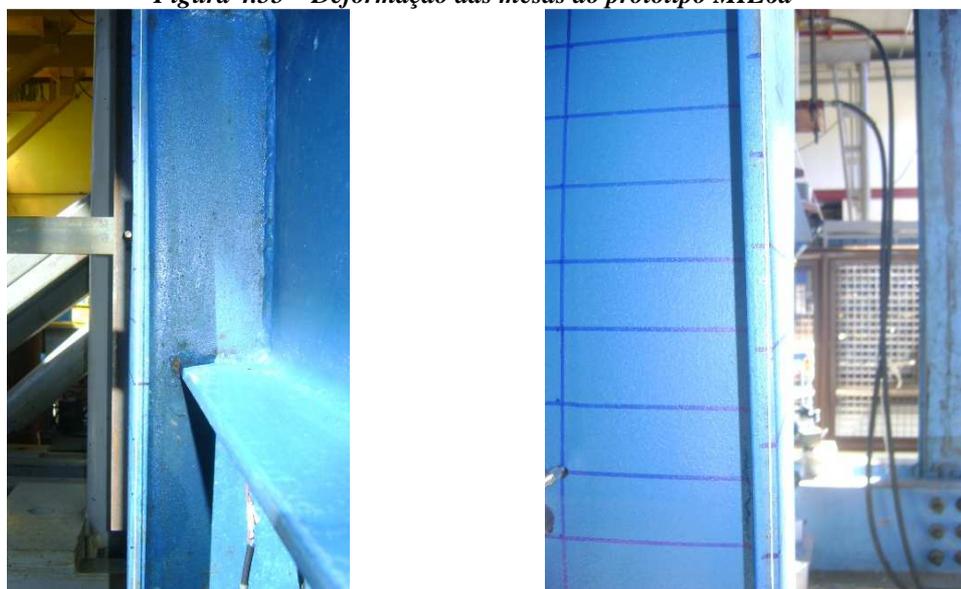


Figura 4.56 – Deformação das mesas do protótipo MIE6b

4.5.3.1 - Deslocamentos da Viga e da Alma do Pilar

As figuras 4.57 e 4.58 apresentam a situação final das vigas dos protótipos MIE6a e MIE6b respectivamente, ressaltando-se a referência da linha que indica a situação indeformada das vigas.

Em ambos os ensaios foi observado comportamento similar da viga, como demonstrado nas figuras 4.59 a 4.62 que apresentam os deslocamentos verticais obtidos por intermédio dos resultados fornecidos pelos LVDT's 1 a 4 (dispostos em diferentes pontos ao longo do comprimento da viga) para diferentes níveis de carregamento.



Figura 4.57 – Deformação final da viga do protótipo MIE6a



Figura 4.58– Deformação final da viga do protótipo MIE6b

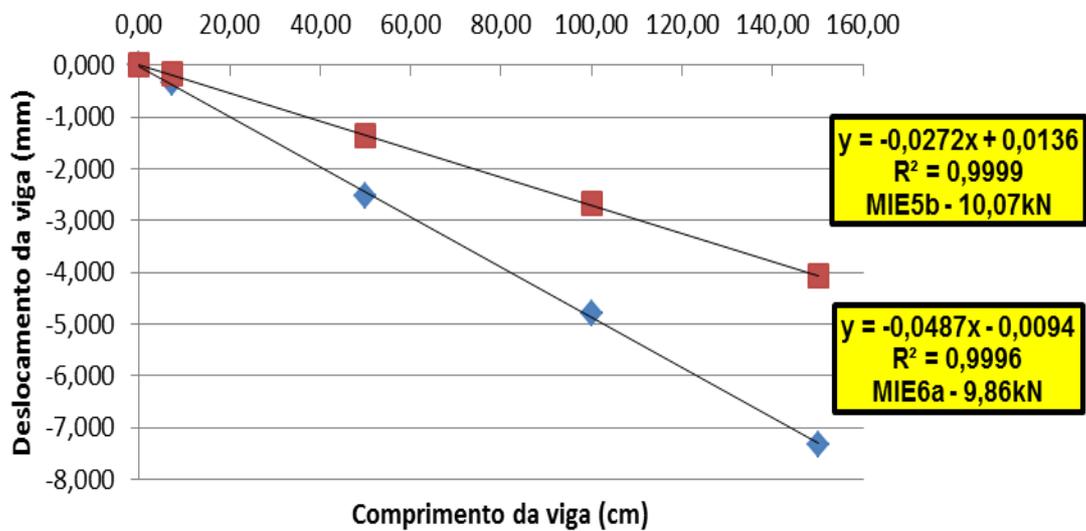


Figura 4.59 – Comportamento das vigas dos protótipos MIE6 (Cargas: 9,02kN e 9,20kN)

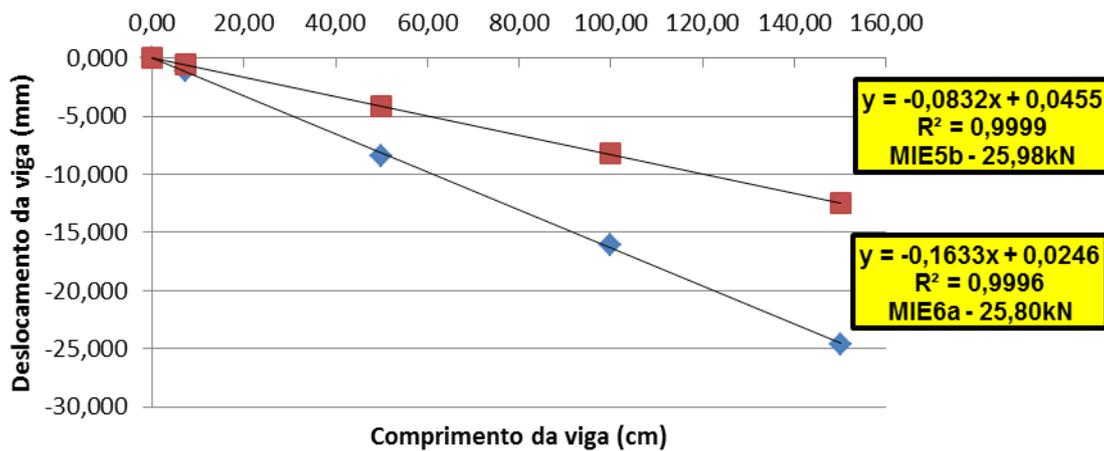


Figura 4.60- Comportamento das vigas dos protótipos MIE6 (Cargas: 18,04kN e 18,01kN)

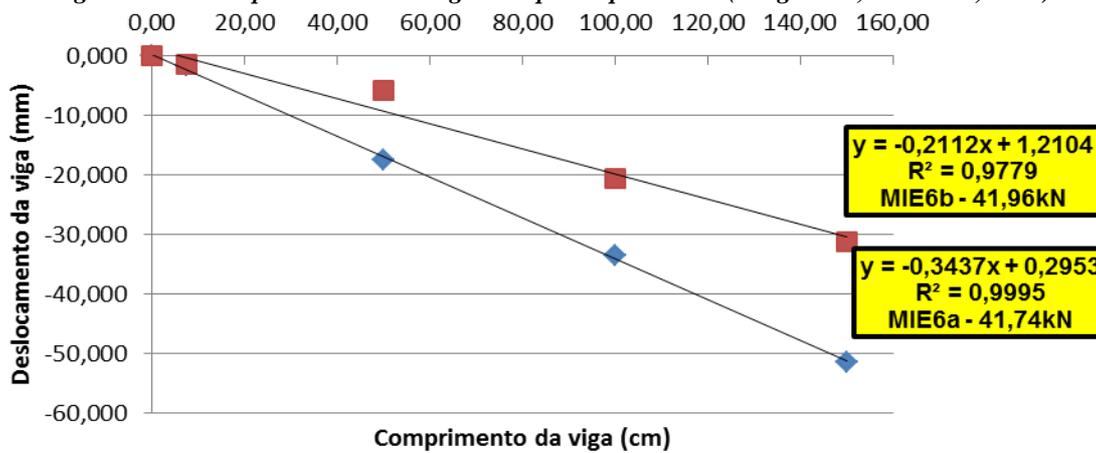


Figura 4.61 - Comportamento das vigas dos protótipos MIE6 (Cargas: 30,11kN e 30,18kN)

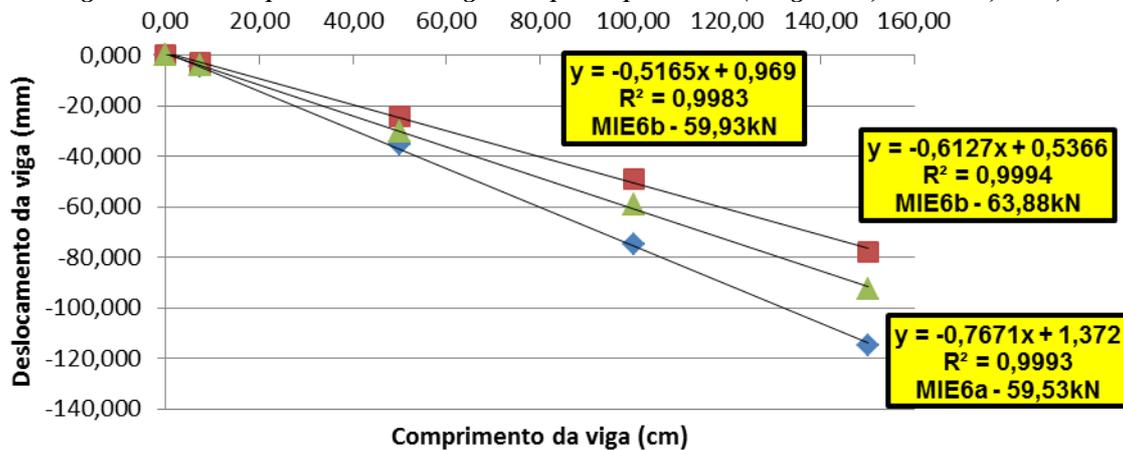


Figura 4.62 - Comportamento das vigas dos protótipos MIE6a (carga de 59,53kN) e MIE6b (Cargas: 59,93kN e 63,88kN)

Do mesmo modo que os obtidos nos ensaios do grupo AIE5, tais resultados conduzem à conclusão que a viga praticamente não sofreu deformações decorrentes de flexão.

Os resultados relativos aos deslocamentos da alma do pilar, obtidos por intermédio das leituras dos LVDT's 5 a 8, demonstram comportamento similar para as

deformações das almas dos protótipos MIE6a e MIE6b, embora os deslocamentos dos pontos monitorados tenham sido sempre maiores no protótipo MIE6a.

Nas figuras 4.63 a 4.65 são apresentados os gráficos correspondentes a diferentes etapas de carga para os protótipos MIE6a e MIE6b.

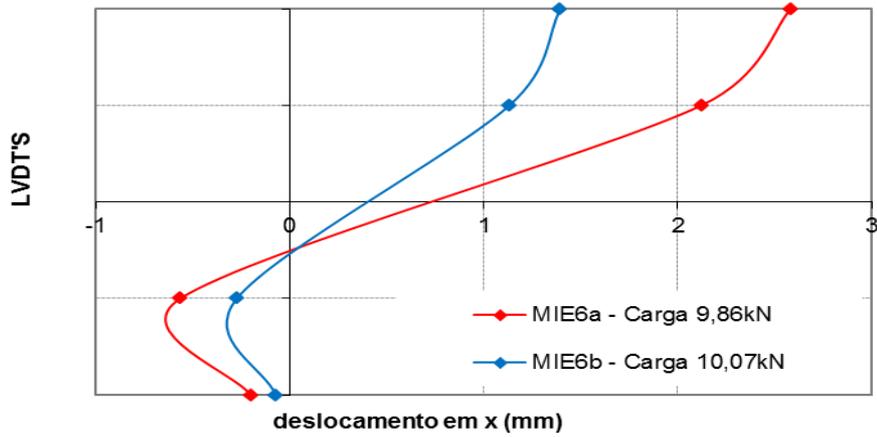


Figura 4.63– Deslocamentos das almas dos pilares para cargas de 9,86kN (MIE6a) e 10,07kN (MIE6b)

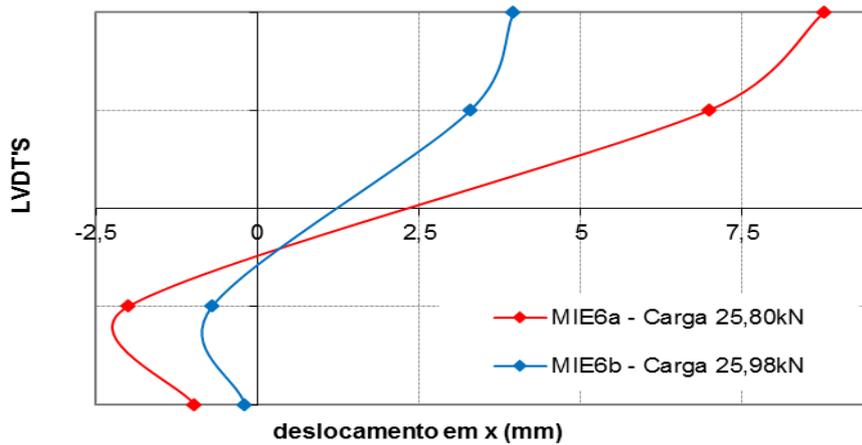


Figura 4.64 – Deslocamentos das almas dos pilares para cargas de 25,80kN (MIE6a) e 25,98kN (MIE6b)

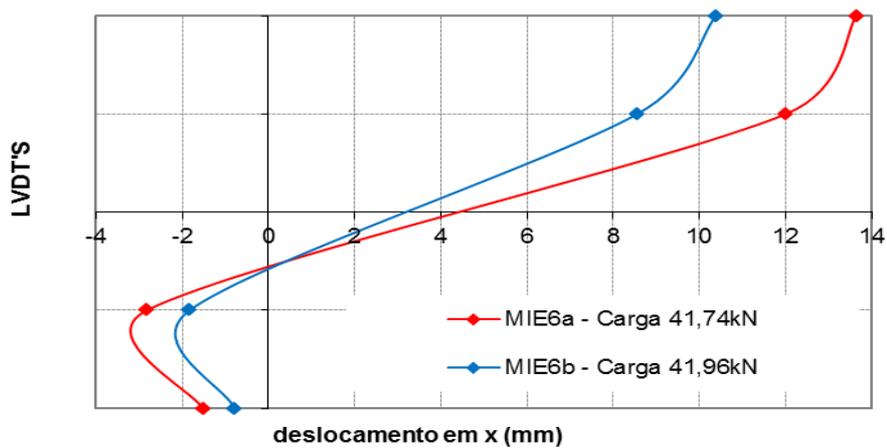


Figura 4.65– Deslocamentos das almas dos pilares para cargas de 41,74kN (MIE6a) e 41,96kN (MIE6b)

Como as cargas máximas dos ensaios MIE6a e MIE6b foram, respectivamente, iguais a 59,53kN e 63,88kN, na figura 4.66 são apresentados os resultados obtidos para essas cargas, juntamente com os relativos ao carregamento de 59,93kN para o protótipo MIE6b.

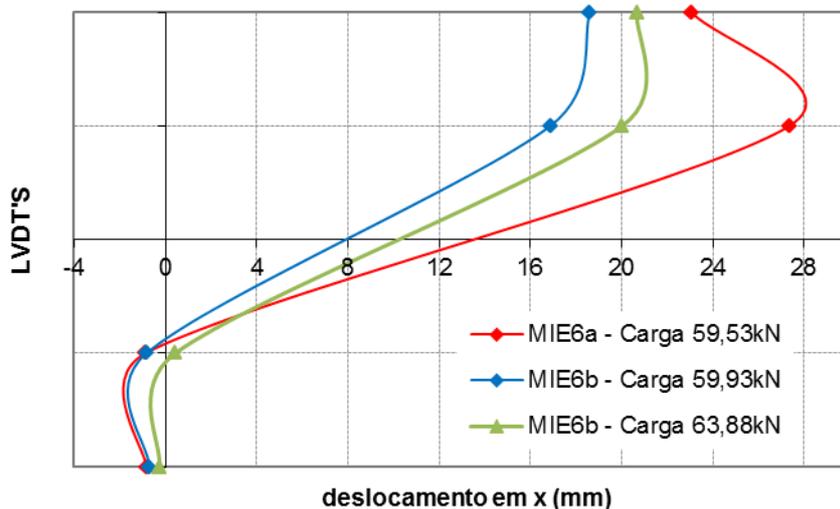


Figura 4.66 – Deslocamentos das almas dos pilares para cargas de 59,53kN (MIE6a), 59,93kN e 63,88kN (MIE6b)

As figuras anteriores permitem observar que no ensaio do protótipo MIE6a ocorreram deslocamentos do ponto correspondente ao LVDT 6 superiores aos do correspondente ao LVDT 5 (momento na ligação aproximadamente igual a 8.793kN.cm), permanecendo os valores dos deslocamentos indicados pelo LVDT 7 sempre maiores que os medidos pelo LVDT 8. Já no ensaio do protótipo MIE6b, os deslocamentos do LVDT 5 foram sempre superiores aos do LVDT 6, enquanto a partir do carregamento de 60,94kN (momento igual a 9.141kN.cm) os deslocamentos do LVDT 8 passaram a ser maiores que os do LVDT 7.

Observa-se, novamente, que não há simetria de deslocamentos nos pontos correspondentes às mesas da viga, com deformações na região da mesa superior da viga, em ambos os protótipos, muito maior que a deformação na região da mesa inferior.

Desse modo, também nesses ensaios observou-se variação da posição do ponto sem deslocamento na direção do eixo da viga, que se desloca para baixo à medida que cresce a solicitação na ligação, com tendência a situar-se a mais de 10cm da posição correspondente à metade da altura da viga para valores mais elevados do carregamento, chegando, para as cargas finais dos ensaios, a situar-se muito próximo da face inferior da mesa comprimida da viga (1,08cm acima, para MIE6a e 0,78cm abaixo para MIE6b).

4.5.3.2 – Momento x Rotação

As curvas apresentadas nas figuras 4.67 e 4.68, respectivamente para os protótipos MIE6a e MIE6b, representam as variações momento-rotação obtidas a partir dos resultados fornecidos pelos LVDT's 6 e 7 (rotação da alma do pilar) e pelos LVDT's 1 a 4 (rotação da viga). Observa-se, nesse caso, que as curvas, embora próximas (considerando-se a pequena ordem de grandeza das rotações), não mais podem ser consideradas coincidentes, ao contrário do que foi observado no caso dos ensaios do grupo AIE5. Este comportamento, muito provavelmente, decorre da menor esbelteza da alma do pilar.

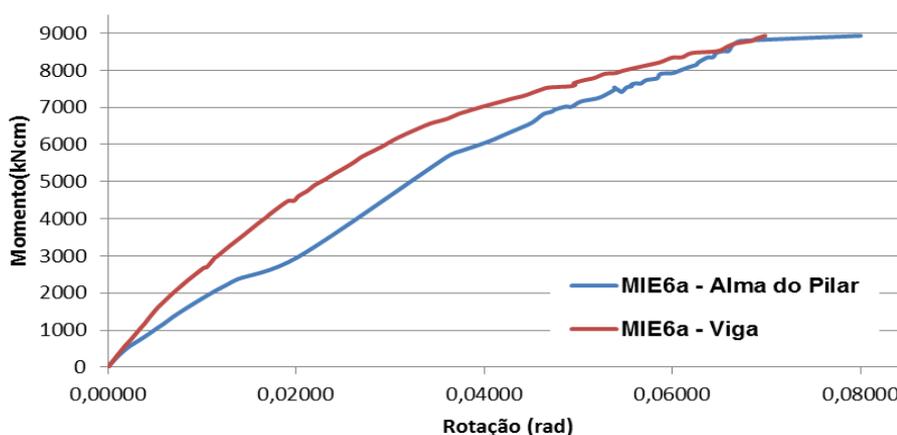


Figura 4.67 – Momento x Rotação – Alma do Pilar e Viga – Protótipo MIE6a

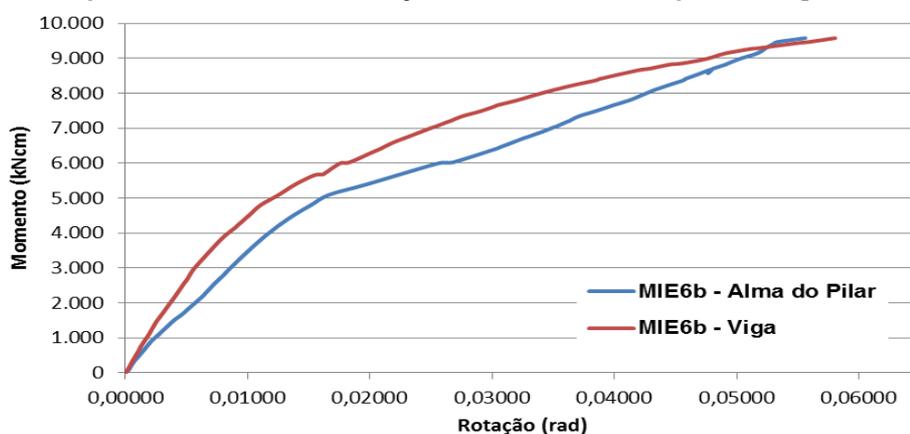


Figura 4.68 – Momento x Rotação – Alma do Pilar e Viga – Protótipo MIE6b

Nas figuras 4.69 e 4.70 são apresentadas as curvas momento-rotação comparativas dos resultados obtidos para os protótipos MIE6a e MIE6b considerando-se, respectivamente, a rotação da alma dos pilares e das vigas.

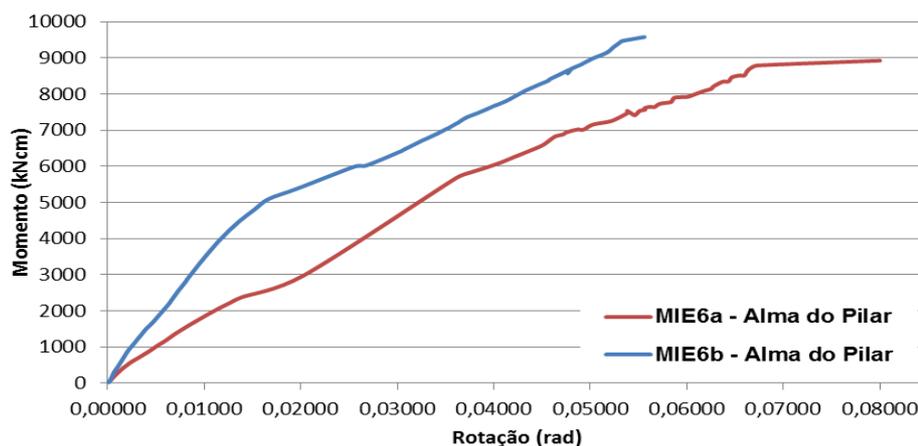


Figura 4.69 – Momento x Rotação – Alma do Pilar - Protótipos MIE6a e MIE6b

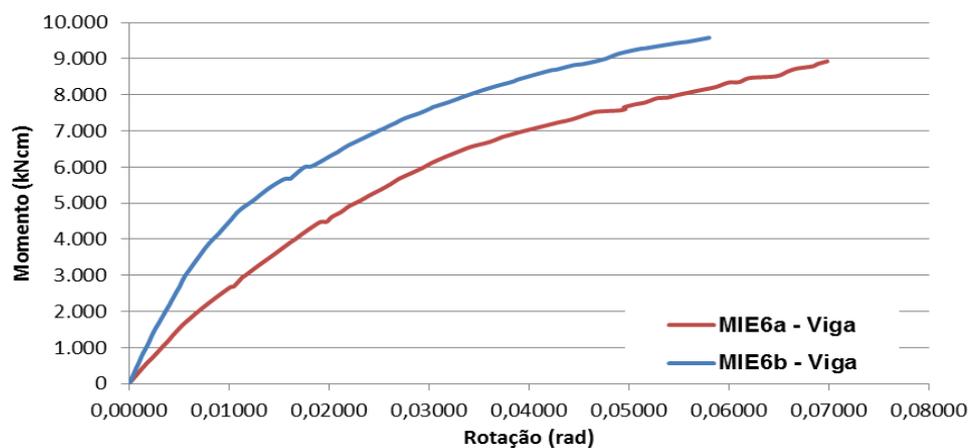


Figura 4.70 – Momento x Rotação – Viga – Protótipos MIE6a e MIE6b

Na tabela 4.6 são apresentados os valores obtidos para a rigidez inicial. Nesse caso, para ambos os ensaios, a rigidez inicial calculada a partir da deformação da alma do pilar resultou em valores 16% e 31,8% inferiores aos calculados a partir da deformação da viga, respectivamente para os protótipos MIE6a e MIE6b.

Tabela 4.6 - Rigidez inicial dos protótipos MIE6a e MIE6b (kN.cm/rad)

	Alma do Pilar	Viga
MIE6a	276.873	321.151
MIE6b	395.902	521.595

4.5.3.3 – Solicitações nas mesas da viga

Por intermédio dos resultados fornecidos pelos extensômetros 1 e 2 (mesa superior da viga) e 9 e 10 (mesa inferior da viga), são obtidas as curvas apresentadas nas figuras 4.71 e 4.72, relacionando os momentos fletores aplicados na ligação e as forças

nas mesas da viga, na seção transversal instrumentada, a título de comparação com os valores teoricamente previstos.

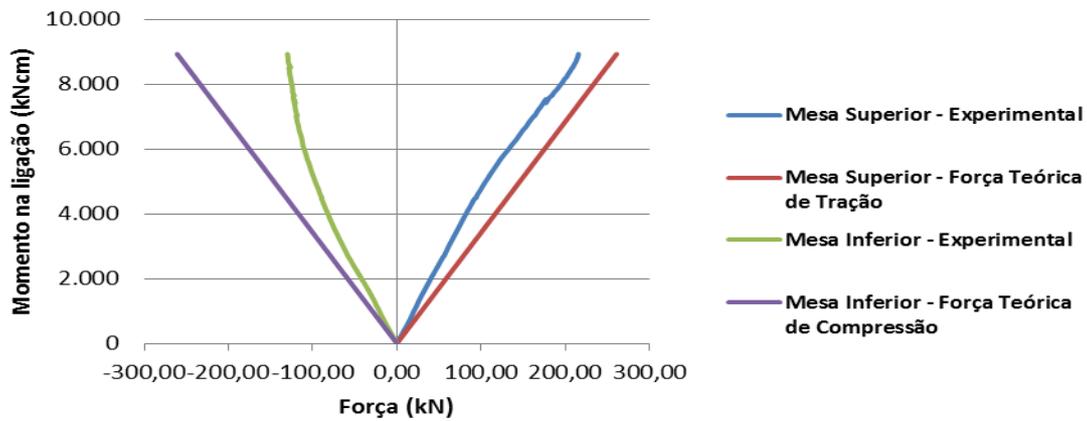


Figura 4.71 –Variação das forças de tração e compressão transmitidas pelas mesas da viga em função do momento na ligação (Protótipo MIE6a)

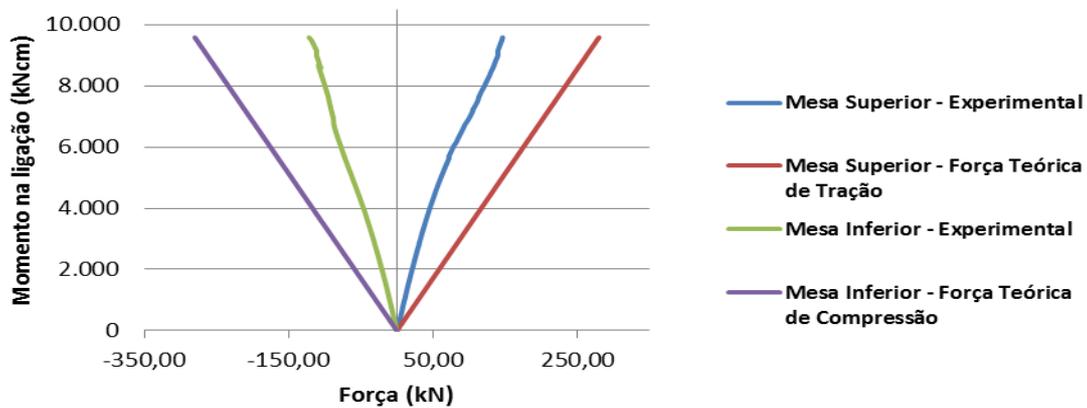


Figura 4.72 –Variação das forças de tração e compressão transmitidas pelas mesas da viga em função do momento na ligação (Protótipo MIE6b)

Diferentemente do caso dos protótipos da série AIE5, não foram observadas variações bruscas da relação entre os valores experimentais e teóricos, com variação, para o protótipo MIE6a, entre 0,68 e 0,84 (média de 0,76) na mesa superior e entre 0,50 e 0,74 (média de 0,62) na mesa inferior. Já para o protótipo MIE6b, essas relações variaram entre 0,36 e 0,53 (média de 0,44) na mesa superior e entre 0,34 e 0,45 (média de 0,47) na mesa inferior.

Como pode ser observado no gráfico apresentado na figura 4.73, a comparação entre os resultados obtidos para os protótipos MIE6a e MIE6b apresentam maior proximidade, considerando-se o que foi verificado para os protótipos AIE5a e AIE5b, mantendo-se porém, em cada protótipo, uma considerável diferença entre os valores observados experimentalmente e os teoricamente previstos.

Relativamente às forças de tração e de compressão transmitidas pelas mesas, observou-se neste grupo de protótipos relações variando 1,09 e 1,20 (protótipo MEI6a) e entre 0,97 e 1,11 (protótipo MIE6b).

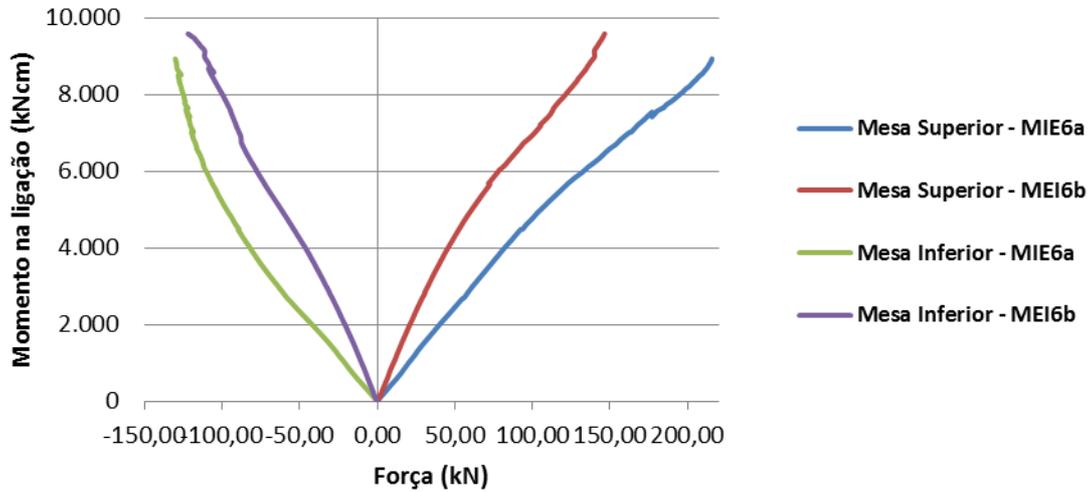


Figura 4.73 – Variação das forças de tração e compressão transmitidas pelas mesas da viga em função do momento na ligação (Protótipos MIE6a e MIE6b)

4.5.3.4 - Tensões na alma da viga

Os resultados fornecidos pelos extensômetros 14, 15 e 16 permitiram a elaboração das curvas apresentadas nas figuras 4.74 e 4.75, respectivamente para os protótipos MIE6a e MIE6b, para várias etapas de carregamento.

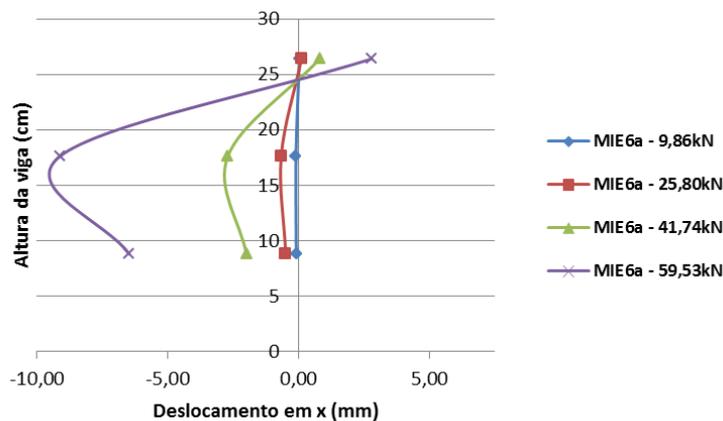


Figura 4.74 – Distribuições de tensões na alma da viga do protótipo MIE6a

Observe-se que a distribuição de tensões na alma da viga, possivelmente decorrente da menor esbeltez da alma do pilar, apresenta distribuição muito diferente daquela observada nos ensaios da série AIE5, com deslocamento para cima da linha neutra de tensões, a qual se situa mais próxima à mesa tracionada da viga em todos os estágios de carregamento dos protótipos MIE6a e MIE6b.

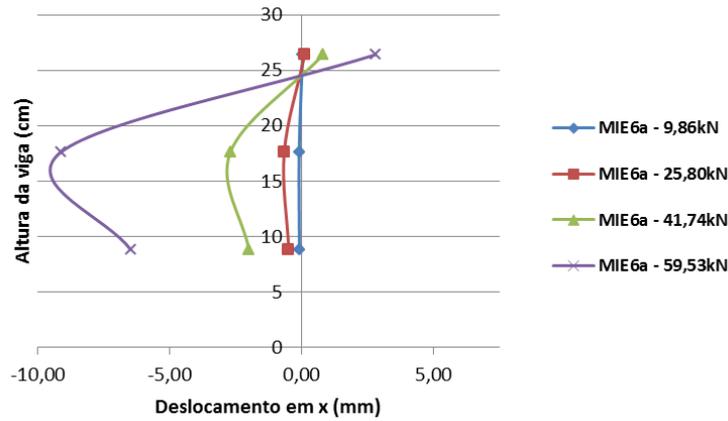


Figura 4.75 – Distribuições de tensões na alma da viga do protótipo MIE6b

4.5.3.5 – Tensões na Alma do Pilar

Nas figuras 4.76 e 4.77 são apresentados os gráficos que correlacionam o momento fletor na ligação com as tensões verticais (direção do eixo do pilar) e horizontais (direção perpendicular à alma da viga), obtidas a partir dos resultados fornecidos pelos extensômetros das rosetas 1 e 2, respectivamente, indicando-se também o nível de tensão correspondente à tensão limite de escoamento (f_y) nominal do material utilizado.

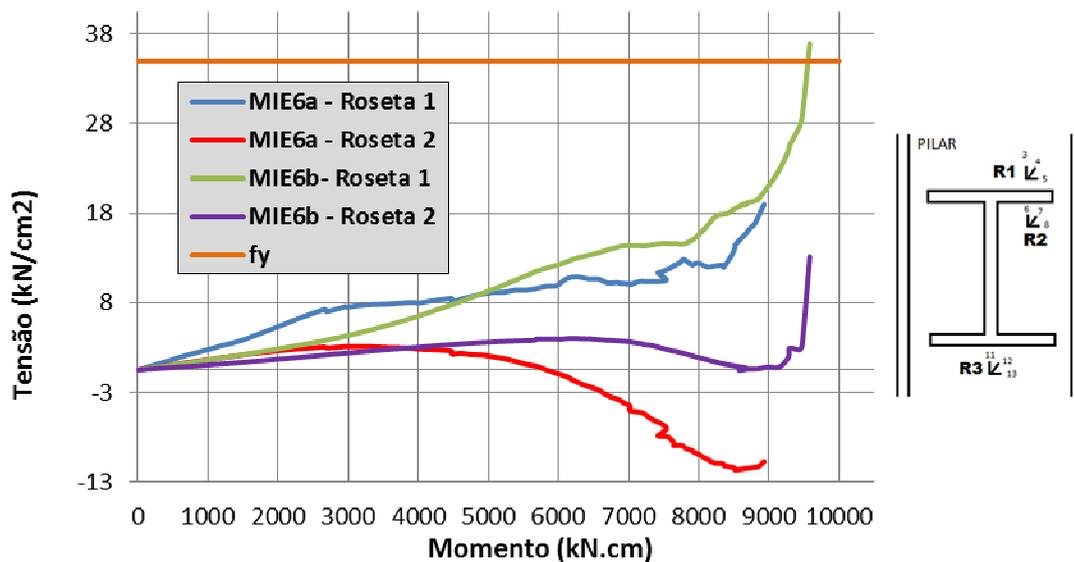


Figura 4.76 – Distribuições de tensões verticais na alma da viga dos protótipos MIE6a e MIE6b (Rosetas 1 e 2)

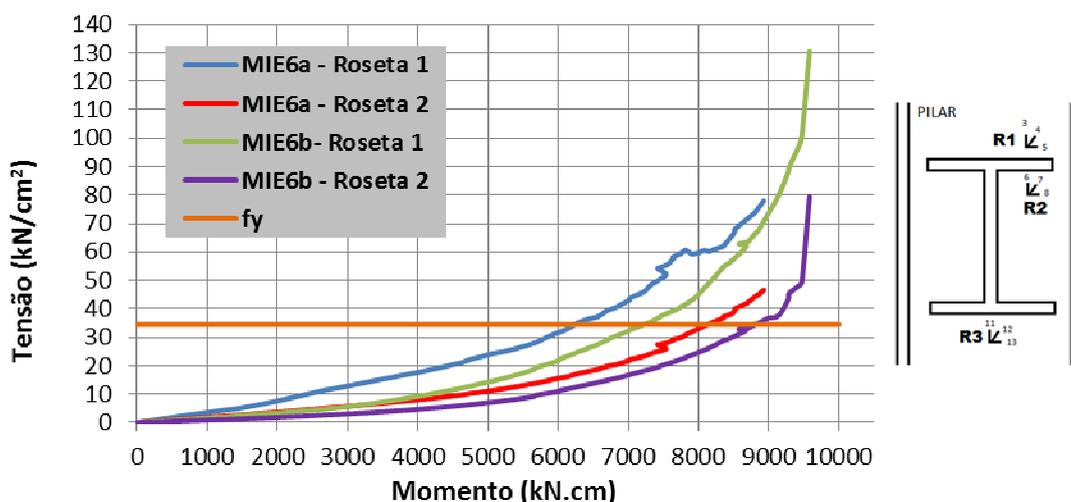


Figura 4.77 – Distribuições de tensões horizontais na alma da viga dos protótipos MIE6a e MIE6b (Rosetas 1 e 2)

Observa-se que, tanto para tensões horizontais quanto verticais, o comportamento é similar ao obtido nos protótipos da série AIE5, a despeito da dispersão verificada para as tensões verticais da roseta 2 do protótipo MIE6a (figura 4.76). Verifica-se que, novamente, as tensões no ponto correspondente à roseta 1 são maiores que as atingidas no ponto de instalação da roseta 2, em cada protótipo, obtendo-se tensões verticais superiores à tensão limite do escoamento do material apenas na roseta 1 do protótipo MIE6b, para o momento correspondente ao final do ensaio (9.582kN.cm), como observado na figura 4.76. Já para as tensões horizontais (figura 4.77) esse valor de referência foi superado para momentos correspondentes a 6.261kN.cm (roseta 1 – MIE6a), 7.196kN.cm (roseta 1 – MIE6b), 8.082kN.cm (roseta 2 – MIE6a) e 8.826kN.cm (roseta 2 – MIE6b).

Ressalte-se, porém, que os resultados apresentados na figura 4.78 demonstram que as tensões de Von Mises ultrapassam o valor da tensão nominal de escoamento do material para solicitações de aproximadamente 6.571kN.cm (roseta 1 – MIE6a), 7.630kN.cm (roseta 1 – MIE6b), 7.489kN.cm (roseta 2 – MIE6a) e 8.239kN.cm (roseta 2 – MIE6b). Portanto, para o ponto correspondente à roseta 1, a tensão de Von Mises ultrapassa f_y para solicitações apenas 4,9% e 6% superiores (respectivamente para os protótipos MIE6a e MIE6b) àquelas que correspondem ao escoamento na direção horizontal, considerando-se tais situações como de plastificação total da região de instalação da roseta 1.

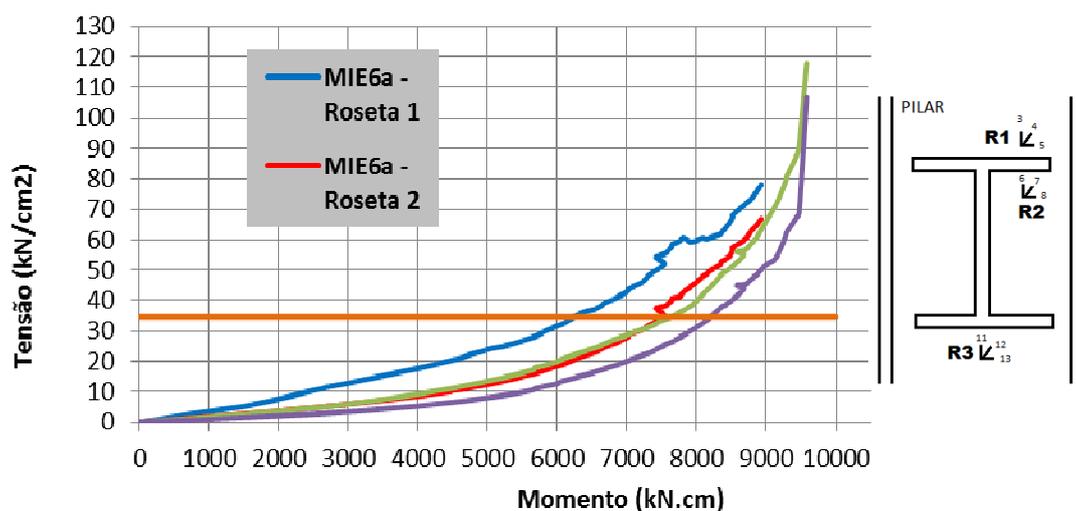


Figura 4.78 – Distribuições de tensões de Von Mises na alma da viga dos protótipos MIE6a e MIE6b (Rosetas 1 e 2)

Já para a roseta 2, respectivamente para os protótipos MIE6a e MIE6b, as solicitações correspondentes a valores da tensão de Von Mises (plastificação total da região correspondente) são 7,3% e 6,7% inferiores às correspondentes ao ponto de ultrapassagem da tensão limite de escoamento.

Considerando-se que, para os valores de solicitação destacados, a tensão atuante (horizontal, vertical ou de Von Mises) já era superior a f_y , pode-se considerar os menores valores como correspondentes a situações críticas de tensão nos pontos de instalação das rosetas 1 e 2.

Os resultados obtidos no ponto de instalação da roseta 3, respectivamente para tensões nas direções vertical e horizontal, são apresentados nas figuras 4.79 e 4.80, apresentando-se na figura 4.81 os resultados correspondentes às tensões de Von Mises.

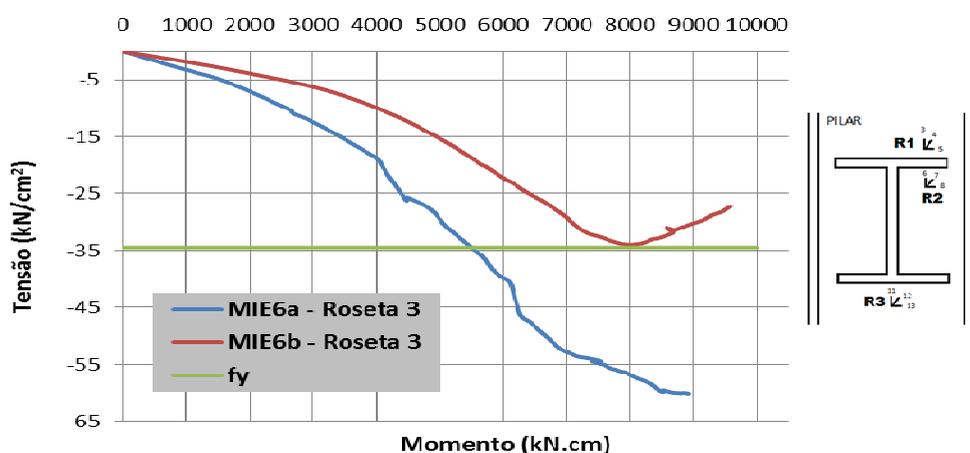


Figura 4.79 – Distribuições de tensões verticais na alma da viga dos protótipos MIE6a e MIE6b (Roseta 3)

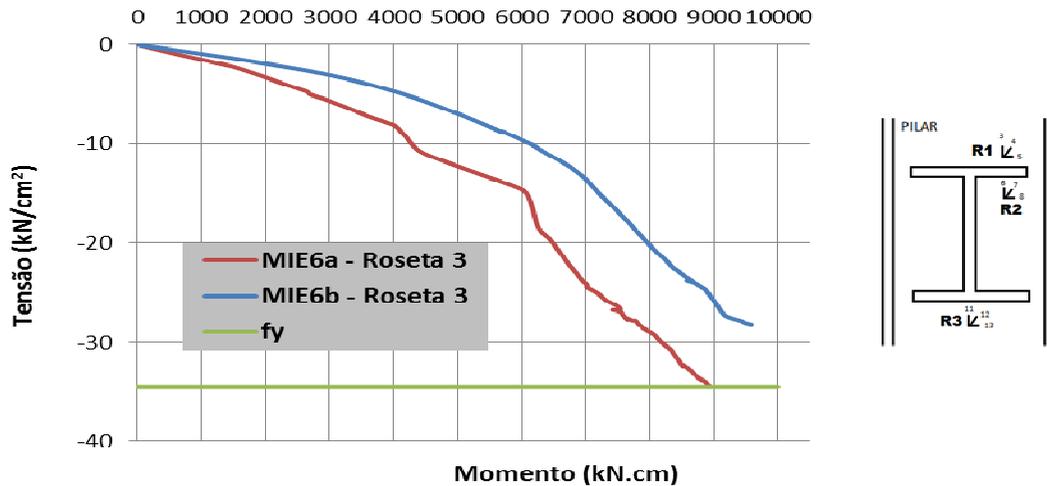


Figura 4.80 – Distribuições de tensões horizontais na alma da viga dos protótipos MIE6a e MIE6b (Roseta 3)

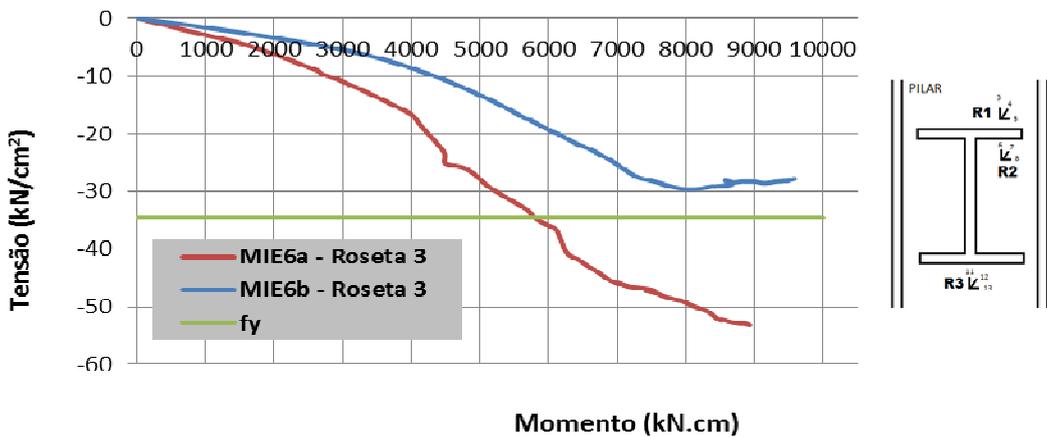


Figura 4.81 – Distribuições de tensões de Von Mises na alma da viga dos protótipos MIE6a e MIE6b (Roseta 3)

4.5.4 - Protótipo MIE2

O índice de esbeltez da alma do pilar igual a 22,77, classificado como médio, identifica dos protótipos MIE2, cuja montagem utilizou perfis W360x44 para a viga e W 360x122 para o pilar, cujas propriedades geométricas são apresentadas na tabela 4.3.

Os ensaios dos protótipos MIE2a e MIE2b, exatamente iguais, foram executados, finalizando-se o primeiro deles (MIE2a) pela observação de rompimento da solda da mesa superior da viga com a alma do pilar, em ambas as bordas da mesa da viga, para um carregamento de 87,87kN aplicado à extremidade da viga, correspondendo ao momento fletor de 13.181kN.cm na ligação (figura 4.82).

Tabela 4.3 - Propriedades geométricas dos perfis utilizados nos protótipos MIE2.

Coluna	h_c	36,3cm	Altura do pilar
	b_{fc}	25,7cm	Largura da mesa do pilar
	t_{wc}	1,30cm	Espessura da alma do pilar
	t_{fc}	2,17cm	Espessura da mesa do pilar
Viga	h_v	35,2cm	Altura da viga
	b_{fv}	17,1cm	Largura da mesa da viga
	t_{wv}	0,69cm	Espessura da alma da viga
	t_{fv}	0,98cm	Espessura da mesa da viga



Figura 4.82– Rompimento da solda no protótipo MIE2a

No ensaio do protótipo MIE2b, para carregamento de aproximadamente 64,0kN (momento fletor de 9.600kN.cm), observou-se o tombamento do LVDT 1 situado na extremidade da viga, decorrente do deslocamento das bases dos pórticos de apoio do aparato de ensaio. O deslocamento da base do pórtico PR1 (fixação do pilar do protótipo de ensaio) pode ser visualizado na figura 4.83, evidenciando a situação de finalização do ensaio por medida de segurança.



Figura 4.83 – Deslocamento da base do pórtico de reação principal no ensaio MIE2b

4.5.4.1 - Deslocamentos da Viga e da Alma do Pilar

A situação final da viga do protótipo MIE2a, com a indicação da posição inicial da mesma é apresentada na figura 4.84, indicando-se na figura 4.85, com maior aproximação, uma visualização, por comparação com as dimensões de uma caneta esferográfica comum, o deslocamento vertical final da extremidade da viga do protótipo MIE2b.



Figura 4.84 – Deformação final da viga do protótipo MIE2a



Figura 4.85 – Detalhe do deslocamento vertical final de extremidade da viga do protótipo MIE2b

Os gráficos obtidos a partir dos valores de deslocamentos apontados pelos LVDT's 1 a 4 indicam o mesmo comportamento para a viga em ambos os protótipos, também coerentes com o comportamento verificado nos protótipos anteriores (AIE5a, AIE5b, MIE6a e MIE6b).

Nas figuras 4.86 a 4.88 são apresentados os deslocamentos verticais obtidos para os protótipos MIE2a e MIE2b, para estágios progressivos de carregamento.

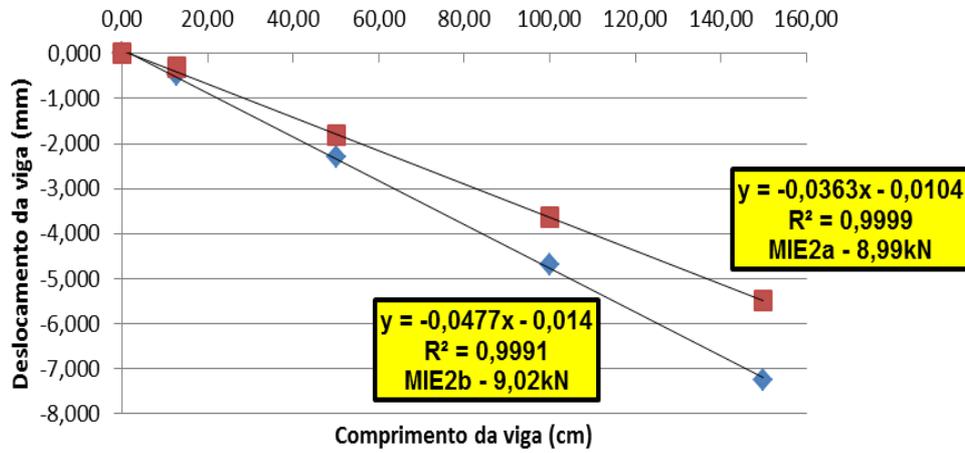


Figura 4.86 – Comportamento das vigas dos protótipos MIE2 (cargas de 8,99kN e 9,02kN)

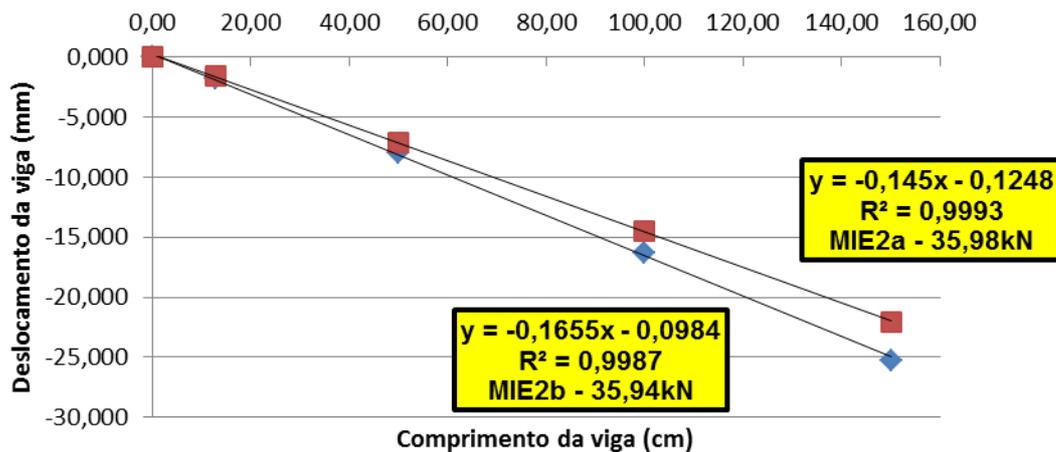


Figura 4.87 – Comportamento das vigas dos protótipos MIE2 (cargas de 35,98kN e 35,94,01kN)

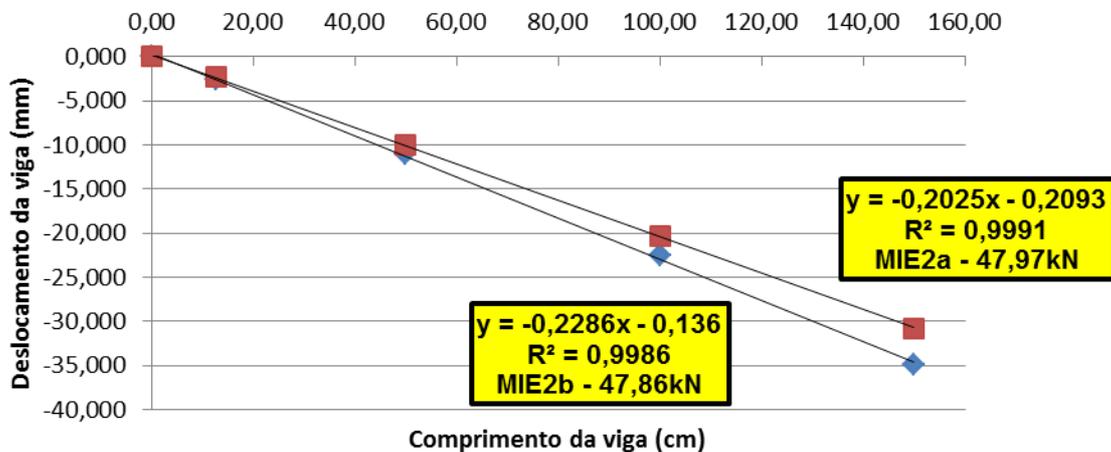


Figura 4.88 – Comportamento das vigas dos protótipos MIE2 (cargas de 47,97kN e 47,86kN)

Na figura 4.89, além dos resultados relativos aos carregamentos de 64,02kN e 63,99kN (respectivamente para os protótipos MIE2a e MIE2b), são apresentados também os deslocamentos da viga do protótipo MIE2a para carregamentos de 76,10kN e 87,87kN, este último correspondente à carga de finalização do ensaio.

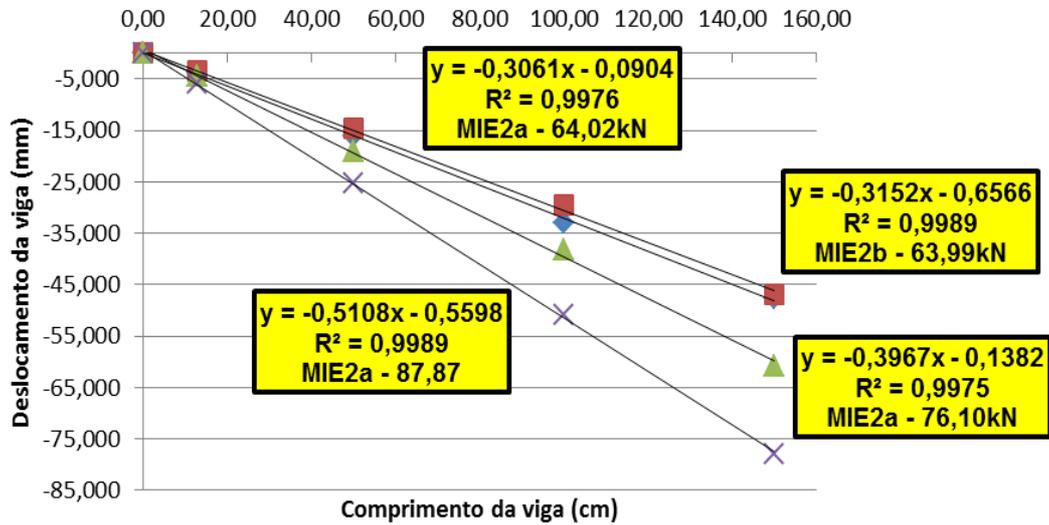


Figura 4.89 – Comportamento das vigas dos protótipos MIE2a (cargas de 64,02kN, 76,10kN e 87,87kN) e MIE2b (carga de 63,99kN)

Os gráficos apresentados permitem a mesma conclusão dos casos anteriores relativamente à praticamente ausência de flexão na viga, considerando-se que os fatores R^2 , correspondentes às linhas de tendência retilínea dos deslocamentos verticais, são superiores a 0,9975 em todos os casos.

O comportamento da alma do pilar, em termos dos deslocamentos horizontais (direção paralela ao eixo da viga) nos pontos instrumentados (LVDT's 5 a 8) é apresentado nas figuras 4.90 a 4.93, para as mesmas etapas de carregamento utilizadas nas figuras 4.86 a 4.89.

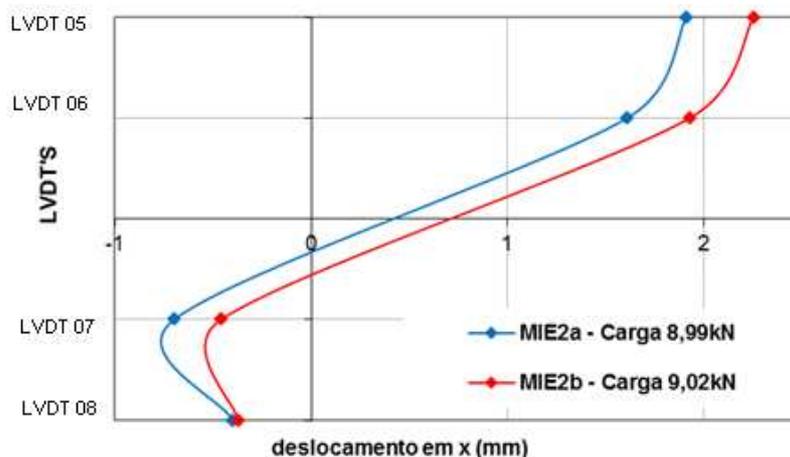


Figura 4.90– Deslocamentos das almas dos pilares para cargas de 8,99kN (MIE2a) e 9,02kN (MIE2b)

Observa-se que os resultados foram similares para os protótipos MIE2a e MIE2b, com valores inferiores no primeiro ensaio, exceto para etapas de carga mais altas, quando o protótipo MIE2a passou a apresentar deslocamentos da alma superiores aos do protótipo MIE2b, em todos os pontos (carga de aproximadamente 52,0kN).

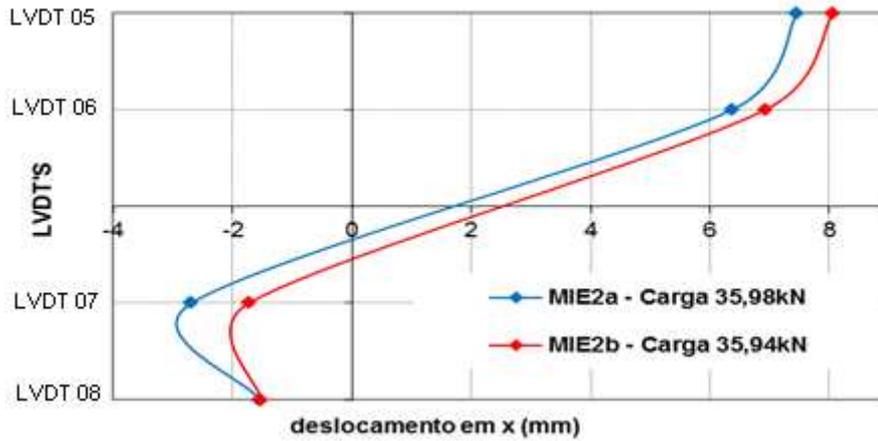


Figura 4.91 – Deslocamentos das almas dos pilares para cargas de 35,98kN (MIE2a) e 35,94kN (MIE2b)

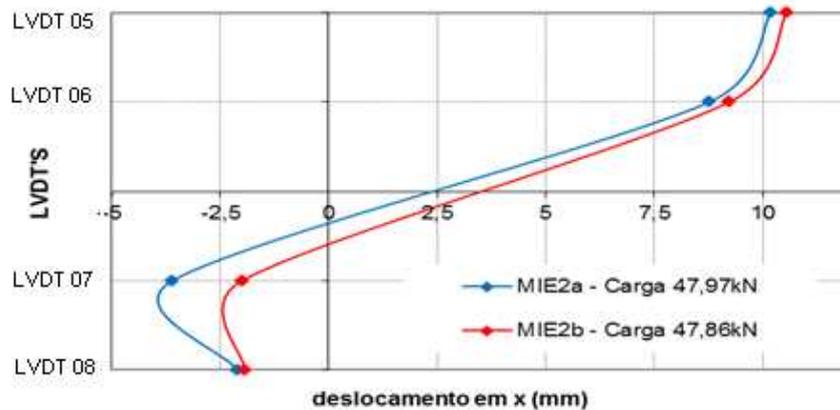


Figura 4.92 – Deslocamentos das almas dos pilares para cargas de 47,97kN (MIE2a) e 47,86kN (MIE2b)

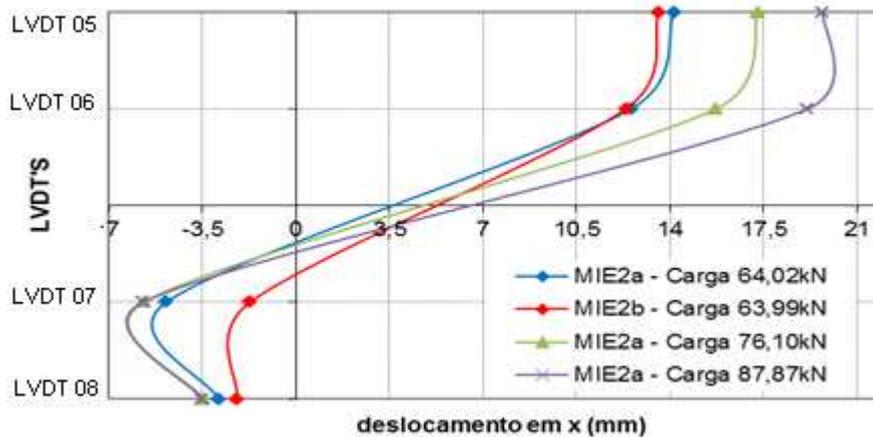


Figura 4.93 – Comportamento das vigas dos protótipos MIE2a (cargas de 64,02kN, 76,10kN e 87,87kN) e MIE2b (carga de 63,99kN)

Novamente, neste caso, os deslocamentos no ponto correspondente à mesa superior (LVDT 6) são maiores que os verificados no ponto correspondente à mesa inferior (LVDT 7), inclusive apresentando tendência de aumento dessa diferença à medida que aumenta a solicitação na ligação. O mesmo observa-se em relação aos pontos correspondentes à instalação dos LVDT's 5 e 8. Entretanto, diferentemente do observado no caso dos protótipos MIE6, não foram observadas situações de maior deslocamento no ponto correspondente ao LVDT 6, relativamente aos resultados fornecidos pelo LVDT 5, embora, a partir das cargas de 70,0kN (MIE2a) e 48kN (MIE2b), a diferença entre esses deslocamentos tenha apresentado uma tendência de queda com o aumento da solicitação. Já em termos da região próxima à alma inferior da viga, os deslocamentos apontados pelo LVDT 7 foram sempre superiores aos obtidos no LVDT 8 para o protótipo MIE2a. Isso, entretanto, não foi verificado no protótipo MIE2b, observando-se um crescimento da diferença entre os deslocamentos ("7" - "8") até carregamento aproximadamente igual a 32,0kN, com inversão do sinal da diferença a partir da carga de 52,0kN (deslocamentos maiores no ponto correspondente ao LVDT 8).

Considerando-se, como nos casos anteriores, a linearização dos deslocamentos da alma do pilar ao longo da altura da seção transversal da viga, as curvas apresentadas demonstram que o ponto da alma da viga que não sofre deslocamentos horizontais situa-se, em praticamente todo o histórico de carregamento, entre 6,5cm e 8cm abaixo da posição original do eixo da viga para o protótipo MIE2a, assumindo posições mais distantes a partir do carregamento aproximadamente igual a 72,0kN (valor muito próximo ao nível de solicitação correspondente à diminuição da diferença de deslocamentos horizontais na região da alma do pilar próxima à mesa superior da viga).

Para o protótipo MIE2b, o ponto de deslocamento horizontal nulo localiza-se entre 10cm e 12cm abaixo da posição original do eixo da viga para solicitações entre aproximadamente 34kN e 54kN (valores próximos aos apontados anteriormente para mudanças de deslocamentos nos pontos monitorados da alma da viga situados nas proximidades da mesa inferior da viga), com tendência de crescimento desta distância até o final do ensaio.

4.5.4.2 – Momento x Rotação

A exemplo do que foi observado nos ensaios do grupo MIE6, as curvas apresentadas relativas às variações momento-rotação para os protótipos MIE2a e MIE2b, respectivamente, demonstram que há diferenças entre os resultados obtidos através dos LVDT's 6 e 7 (rotação da alma do pilar) e pelos LVDT's 1 a 4 (rotação da viga). Além da possível influência da menor esbelteza da alma do pilar, em relação aos grupos AIE5 e MIE6, é possível admitir-se também a influência da inércia do pilar em relação ao seu eixo situado no plano médio da alma, bem como considerar-se que a rotação da alma do pilar foi calculada considerando-se os deslocamentos dos pontos correspondentes às mesas da viga, assumindo-se que tais deslocamentos horizontais fossem máximos nesses pontos, o que não corresponde à realidade, como comprovado, por exemplo, nas curvas apresentadas anteriormente. Outro fator a ser considerado é que, com a rotação da ligação, os pontos correspondentes aos planos médios das almas deslocam-se verticalmente enquanto os instrumentos de medida (LVDT's) permanecem fixos a estruturas de suporte independentes do protótipo.

Os resultados obtidos para as relações momento-rotação são novamente apresentados nas figuras 4.94 e 4.95, agora de modo a possibilitar a comparação entre os protótipos MIE2a e MIE2b, respectivamente para a rotação da alma dos pilares e para a rotação das vigas.

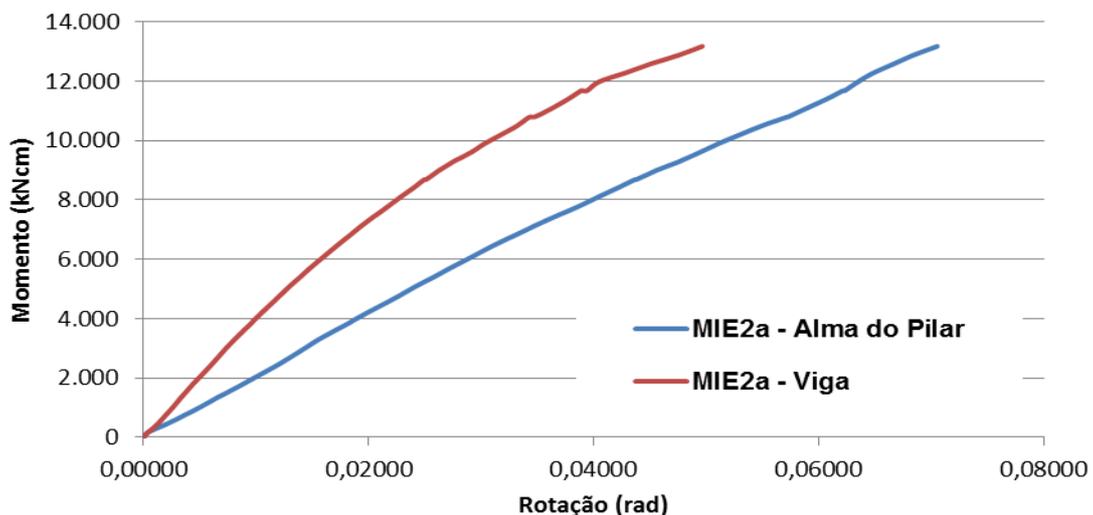


Figura 4.94 – Momento x Rotação – Alma do Pilar e Viga – Protótipo MIE2a

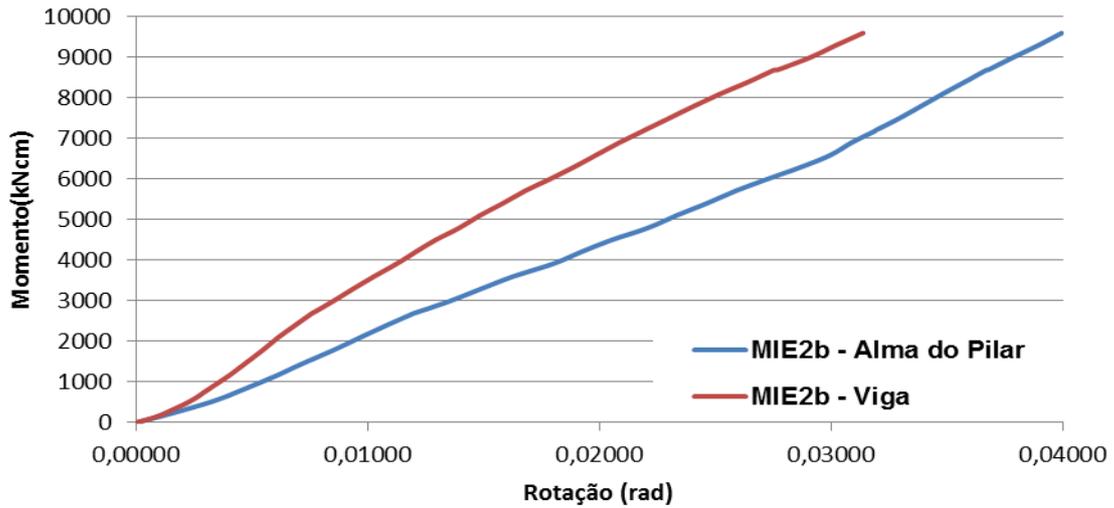


Figura 4.95– Momento x Rotação – Alma do Pilar e Viga – Protótipo MIE2b

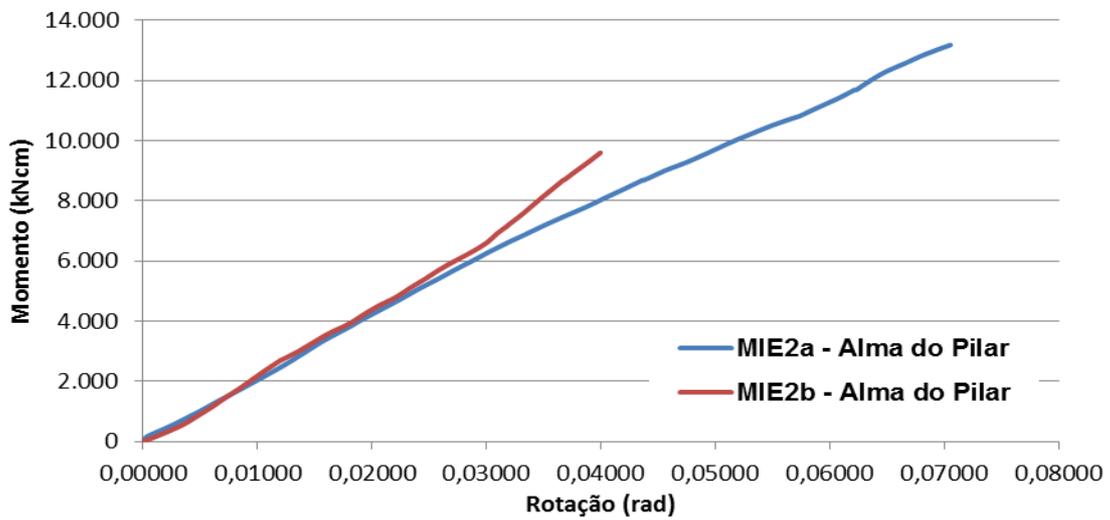


Figura 4.96 – Momento x Rotação – Alma do Pilar - Protótipos MIE2a e MIE2b

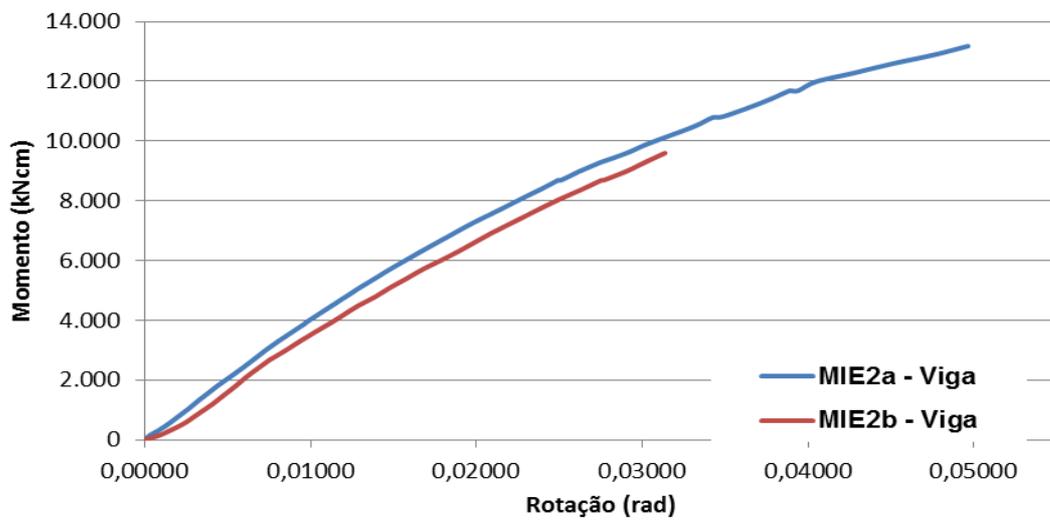


Figura 4.97– Momento x Rotação – Viga - Protótipos MIE2a e MIE2b

A discrepância observada na curva momento-rotação da alma do pilar MIE2b (figura 4.97), a partir da solicitação de aproximadamente 6.300kN.cm (carga de 42kN) pode ter sido provocada pelo início da instabilidade do pórtico principal de reação que, como já mencionado, provocou a finalização do ensaio na etapa de carga correspondente a momento fletor aproximadamente igual a 9.600kN.cm (carga de 64,0kN).

Os resultados obtidos para a rigidez inicial são apresentados na tabela 4.4. A diferença, já comentada, entre o comportamento da viga e da alma do pilar fica mais evidente com esses resultados, observando-se que os resultados da rigidez inicial medida pela rotação da viga são, respectivamente, 122,3% e 71,9% superiores aos obtidos pela rotação da alma do pilar. Entretanto, em ambos os casos, comparando-se os resultados obtidos para os protótipos MIE2a e MIE2b, foram obtidas diferenças menores que as verificadas no grupo MIE6.

Tabela 4.4 - Rigidez inicial dos protótipos MIE2a e MIE2b (kN.cm/rad)

	Alma do Pilar	Viga
MIE2a	192.596	428.577
MIE2b	225.018	387.052

4.5.4.3 – Solicitações nas mesas da viga

Adotando-se a média dos valores fornecidos pelos extensômetros situados em cada mesa foram obtidos os valores das tensões médias e das respectivas forças atuantes nas mesas e transmitidas para a alma do pilar, cujos resultados são apresentados nas figuras 4.98 e 4.99, em função dos momentos fletores aplicados respectivamente às ligações dos protótipos MIE2a e MIE2b. Também são apresentados os valores das forças teóricas transmitidas pelas mesas, considerando-se o momento fletor como um binário de braço de alavanca igual à distância entre os planos médios das mesas da viga.

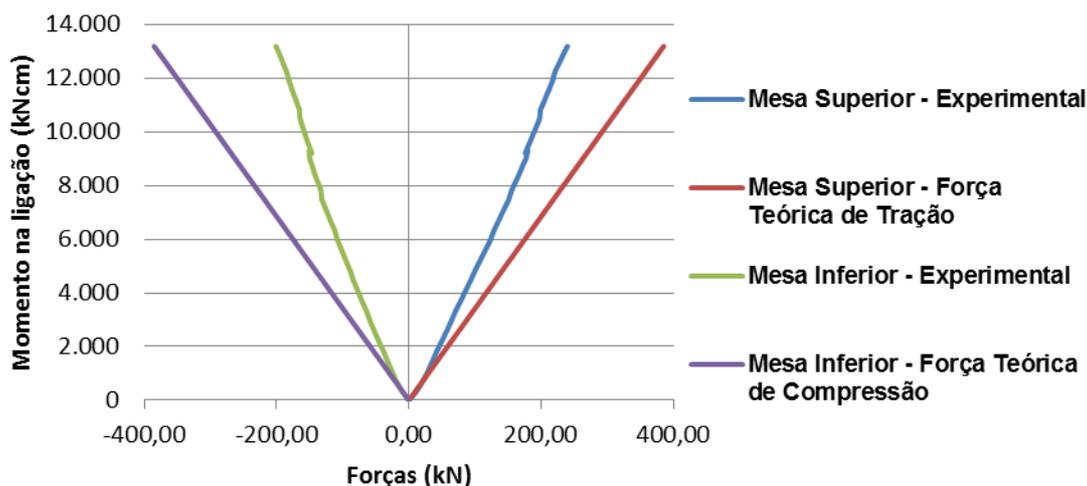


Figura 4.98 –Variação das forças de tração e compressão transmitidas pelas mesas da viga em função do momento na ligação (Protótipo MIE2a)

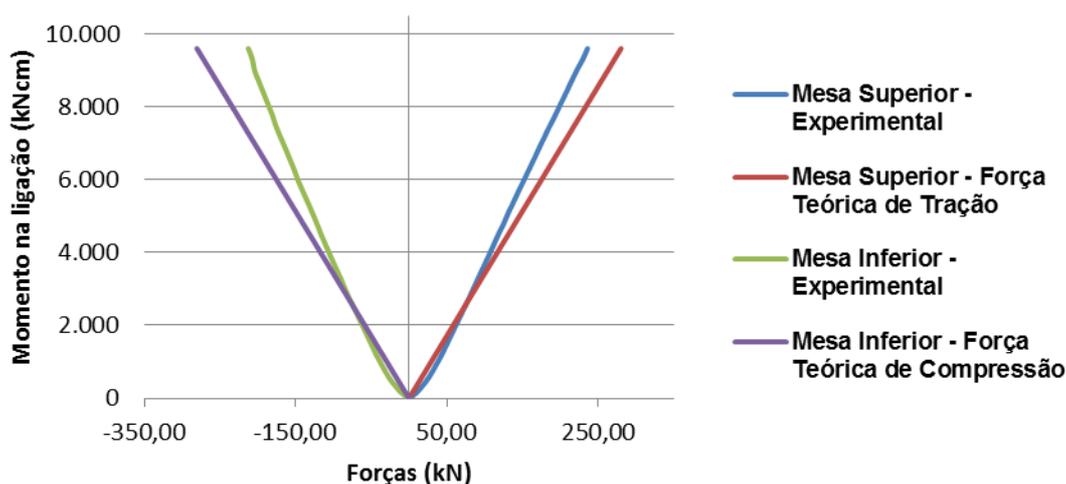


Figura 4.99 –Variação das forças de tração e compressão transmitidas pelas mesas da viga em função do momento na ligação (Protótipo MIE2b)

Em ambos os protótipos a variação da relação entre os valores transmitidos pela superior e inferior situou-se em uma faixa razoavelmente estreita, entre 1,2 e 1,09 para o protótipo MIE2a (valor médio igual a 1,15) e entre 1,11 e 0,97 para o protótipo MIE2b (média igual a 1,09). Observou-se, entretanto, que os resultados experimentais situaram-se entre 62% e 120% dos valores teóricos para a mesa superior do protótipo MIE2a e entre 84% e 120% para o protótipo MIE2b, também sendo considerada a mesa superior. Em termos da mesa inferior, essas faixas de variação foram de 52% - 110% e de 76% - 135%, respectivamente para os protótipos MIE2a e MIE2b.

Na figura 4.100 são apresentados, conjuntamente, os resultados experimentais obtidos para as forças transmitidas pelas mesas dos protótipos MIE2a e MIE2b.

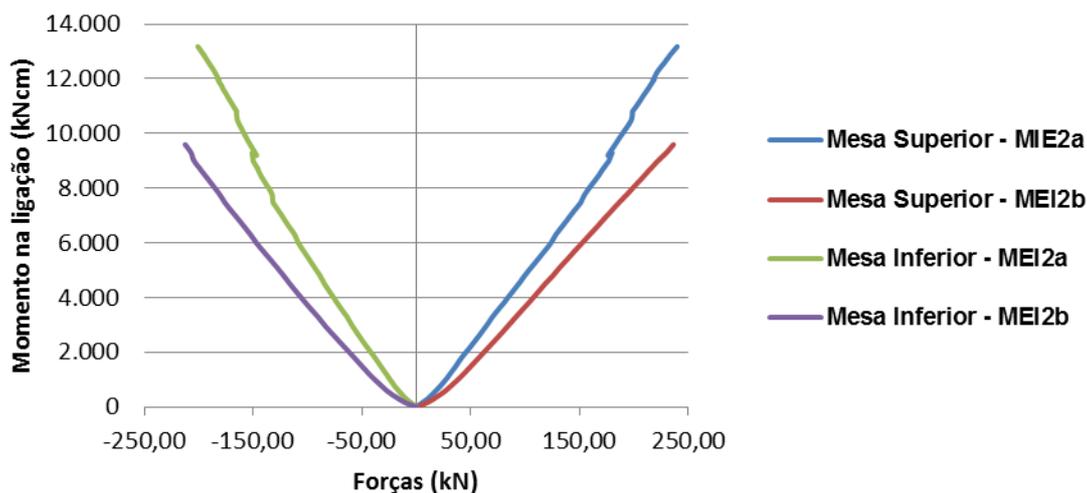


Figura 4.100 – Variação das forças de tração e compressão transmitidas pelas mesas da viga em função do momento na ligação (Protótipos MIE2a e MIE2b)

4.5.4.4 - Tensões na alma da viga

A partir dos extensômetros dispostos ao longo da altura da alma da viga foram obtidos os resultados apresentados nas figuras 4.101 e 4.102, respectivamente para os protótipos MIE2a e MIE2b, considerando-se as mesmas etapas de carregamento analisadas anteriormente.

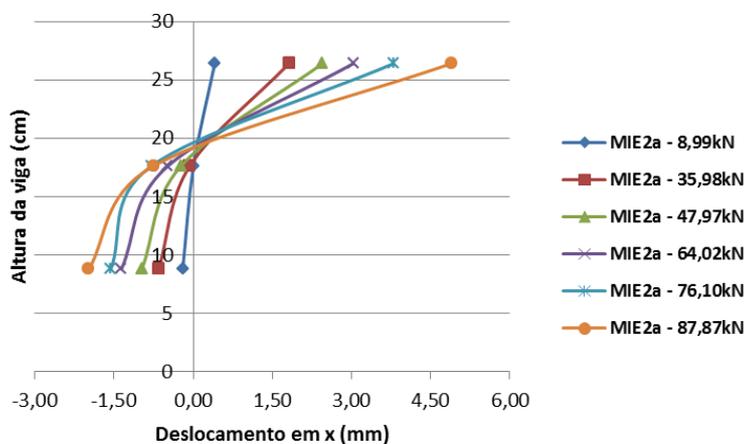


Figura 4.101 – Distribuições de tensões na alma da viga do protótipo MIE2a

Observou-se que, para o protótipo MIE2a, a posição da linha neutra de tensões sofreu variação ao longo das etapas de carregamento, chegando a situar-se 4,1cm abaixo da posição original do eixo da viga, mantendo-se em um valor médio de 3,64cm nas demais etapas analisadas. Já para o protótipo MIE2b, a linha neutra de tensões posicionou-se sempre acima da posição original do eixo da viga, com tendência de aproximação dessa posição com o crescimento da solicitação.

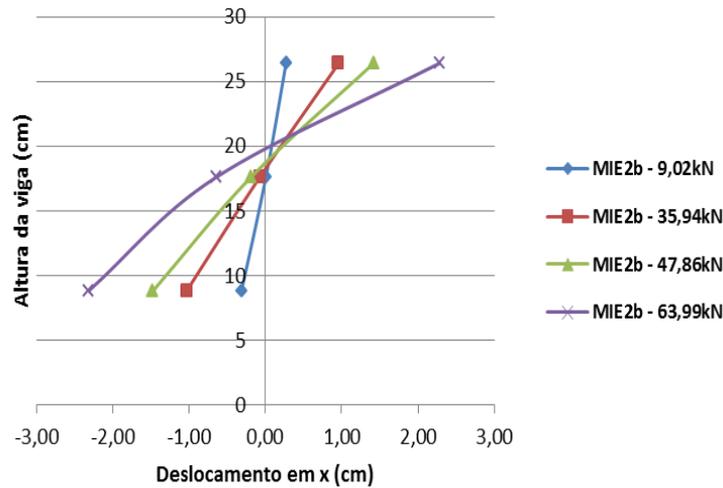


Figura 4.102– Distribuições de tensões na alma da viga do protótipo MIE2b

4.5.4.5 – Tensões na Alma do Pilar

Os gráficos referentes às correlações do momento fletor na ligação com as tensões verticais (direção do eixo do pilar) e horizontais (direção perpendicular à alma da viga) são apresentados nas figuras 4.103 e 4.104, nas quais também é apresentado o nível de tensão correspondente à tensão limite de escoamento (f_y) nominal do material utilizado.

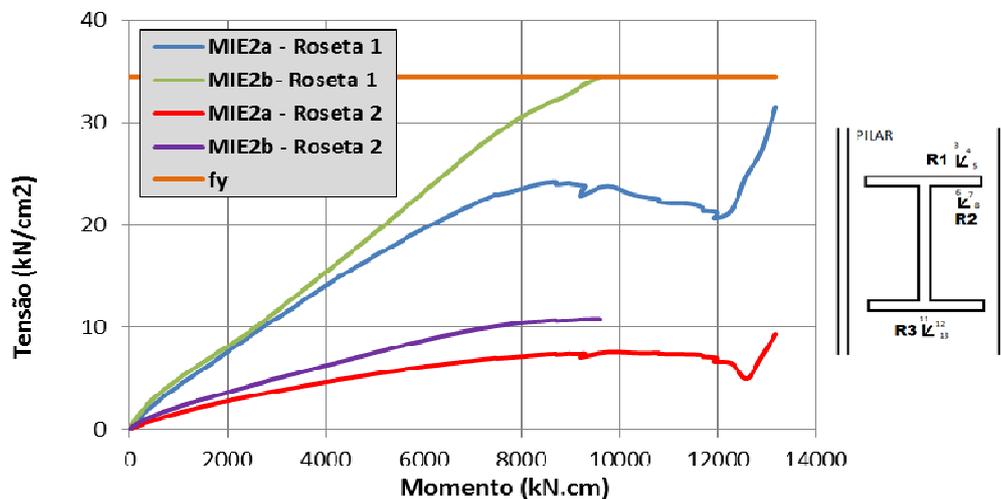


Figura 4.103– Tensões verticais na alma da viga dos protótipos MIE2a e MIE2b (Rosetas 1 e 2)

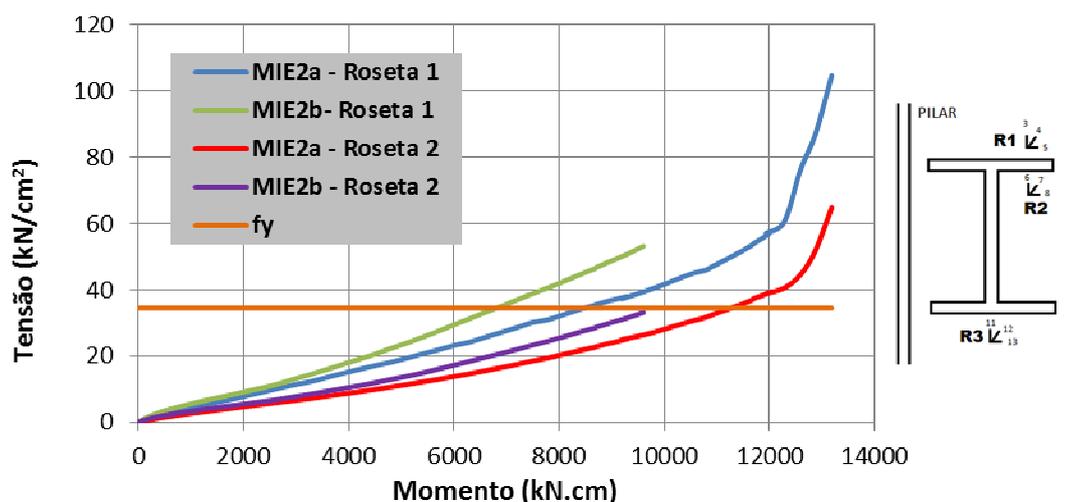


Figura 4.104 – Tensões horizontais na alma da viga dos protótipos MIE2a e MIE2b (Rosetas 1 e 2)

A análise dos resultados aponta valores de tensões verticais significativamente maiores na roseta 1, relativamente à roseta 2, mantendo-se essa situação para as tensões horizontais, embora com diferenças bastante menores. Entretanto, observa-se que são as tensões horizontais (direção perpendicular à alma da viga) as mais significativas em termos de solicitação na alma do pilar, uma vez que, no âmbito das etapas de carregamento dos dois ensaios, foram observadas tensões iguais ou superiores à tensão nominal de escoamento do material.

Em termos do critério de Von Mises, na figura 4.105 são apresentadas as curvas de variação da tensão crítica com o momento fletor nas ligações, observando-se que a tensão crítica foi atingida na roseta 1 para momentos aproximadamente iguais a 8.700kN.cm e 6.900kN.cm, respectivamente para os protótipos MIE2a e MIE2b.

Na roseta 2, a tensão crítica foi atingida para momento fletor de aproximadamente 11.400kN.cm para o protótipo MIE2a, atingindo 30,58kN/cm² (muito próximo de 34,5kN/cm²) ao final do ensaio do protótipo MIE2b (momento fletor de aproximadamente 9.600kN.cm).

Nas figuras 4.106 a 4.108 são apresentados os resultados obtidos por intermédio das medições referentes à roseta 3, respectivamente para as tensões verticais e horizontais.

Observa-se que tanto as tensões verticais quanto horizontais são de compressão, devido à deformação côncava dessa região, decorrente da transmissão de esforços de compressão perpendiculares ao plano da alma (região da mesa inferior da viga), notando-se que, individualmente, em ambas as direções e nos dois protótipos ensaiados,

as tensões chegam a superar a tensão nominal de escoamento do material antes do término do ensaio, com predominância das tensões verticais (superam $34,5\text{kN/cm}^2$ para momentos fletores na ligação inferiores aos que produzem este nível de sollicitação na direção horizontal).

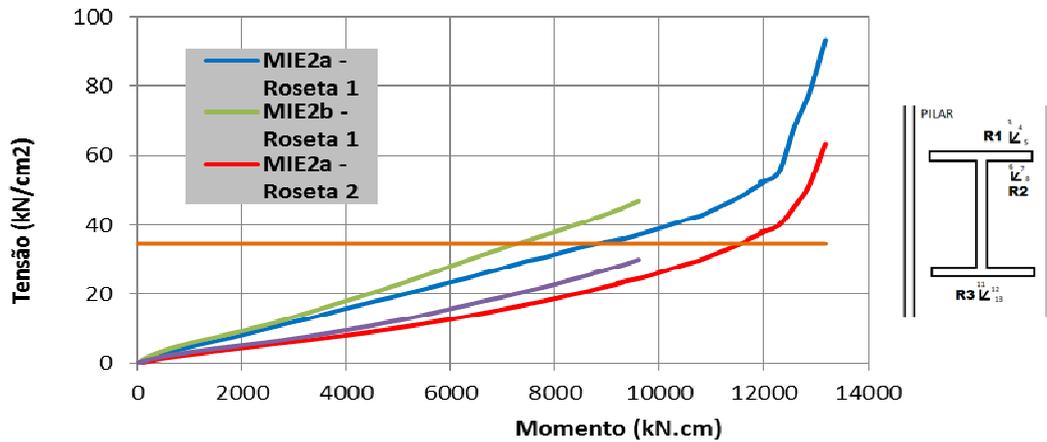


Figura 4.105 – Distribuições de tensões de Von Mises na alma da viga dos protótipos MIE2a e MIE2b (Rosetas 1 e 2)

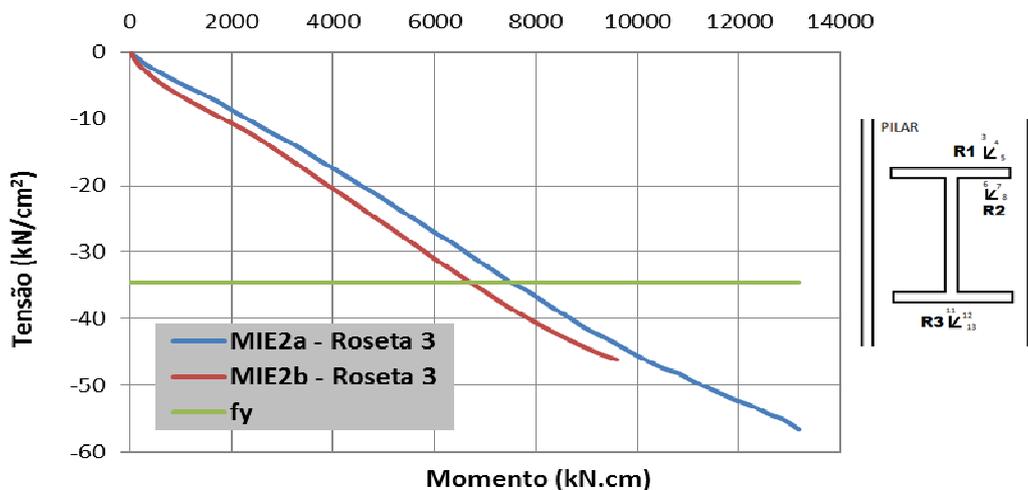


Figura 4.106 – Distribuições de tensões verticais na alma da viga dos protótipos MIE2a e MIE2b (Roseta 3)

As tensões de Von Mises para a região instrumentada pela roseta 3 são apresentadas na figura 4.82 (representadas com valores negativos por conveniência de comparação com as tensões horizontais e verticais apresentadas nas duas figuras anteriores), observando-se que as tensões críticas são atingidas para momentos fletores aproximadamente iguais a 8.400kN.cm e 7.400kN.cm , respectivamente para os protótipos MIE2a e MIE2b.

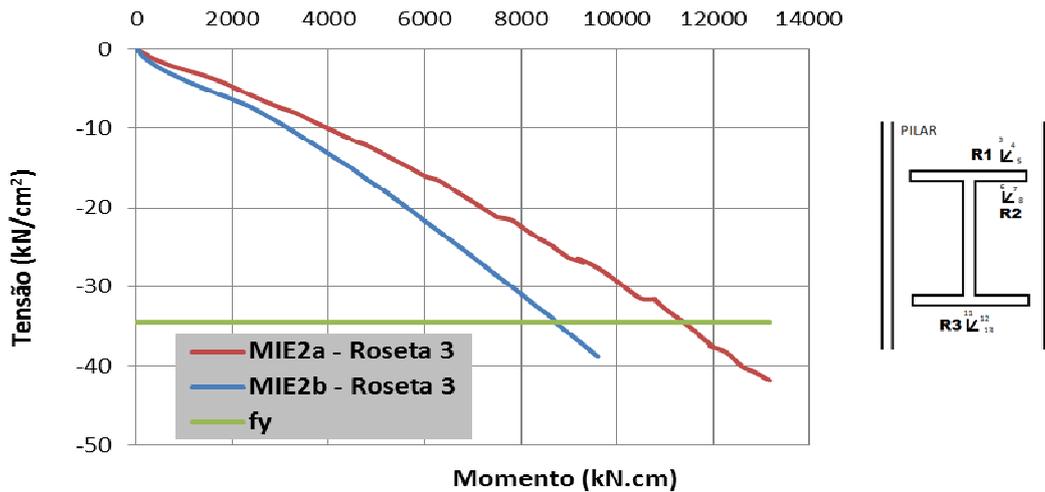


Figura 4.107 – Distribuições de tensões horizontais na alma da viga dos protótipos MIE2a e MIE2b (Roseta 3)

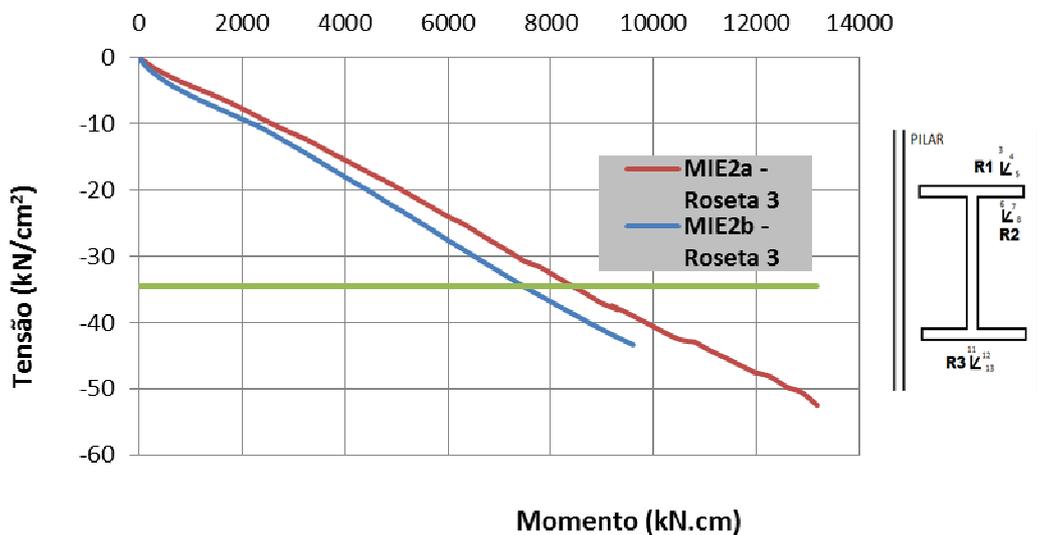


Figura 4.108 – Distribuições de tensões de Von Mises na alma da viga dos protótipos MIE2a e MIE2b (Roseta 3)

4.5.5 - Protótipo BIE2

Foi ensaiado apenas um modelo do grupo BIE2 (com índice de esbeltez igual a 16,43, considerado baixo), constituído por perfil W360x44 para a viga e HP310x110 para o pilar, cujas propriedades geométricas são apresentadas na tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Propriedades geométricas dos perfis utilizados nos protótipos BIE2

Coluna	h_c	30,8cm	Altura do perfil do pilar
	b_{fc}	31 cm	Largura da mesa do pilar
	t_{wc}	1,54cm	Espessura da alma do pilar
	t_{fc}	1,55cm	Espessura da mesa do pilar
Viga	h_v	35,2cm	Altura do perfil da viga
	b_{fv}	17,1cm	Largura da mesa da viga
	t_{wv}	0,69cm	Espessura da alma da viga
	t_{fv}	0,98cm	Espessura da mesa da viga

Para melhor acompanhamento do aparato de ensaio, com o intuito de observar a possível ocorrência do transtorno verificado no ensaio do modelo MIE2b, um novo defletômetro de controle foi instalado na base do pórtico de reação PR2, como indicado na figura 4.109.



Figura 4.109 – Defletômetro posicionado na base do Pórtico PR2 (Protótipo BIE2)

A despeito desses cuidados, durante a realização do ensaio foi observado que a extremidade da viga não estava deslocando-se verticalmente da forma esperada, apresentando rotação da seção transversal em torno do eixo longitudinal da viga, como observado na figura 4.110. Essa constatação, entretanto, ocorreu para carregamento da ordem de 87,95kN, correspondente ao momento fletor de 13.192kN.cm na ligação, etapa em que o ensaio foi encerrado.



Figura 4.110 – Rotação da seção transversal da extremidade da viga (Protótipo BIE2)

4.5.5.1 - Deslocamentos da Viga e da Alma do Pilar dos Protótipos AIE5

Ao final do ensaio, o protótipo apresentou 47,4mm de deslocamento vertical na extremidade da viga indicando-se, na figura 4.111, uma referência visual desse deslocamento em relação à posição original indicada pela linha branca.



Figura 4.111- Deslocamento final da extremidade da viga do protótipo BIE2

Nas figuras 4.112 e 4.113 são apresentados os gráficos relativos aos deslocamentos obtidos nos pontos instrumentados da viga (LVDT's 1 a 4) para várias etapas de carregamento, juntamente com as linhas de tendência desses resultados, novamente indicando uma alta correlação de deslocamento praticamente de corpo rígido da viga do protótipo.

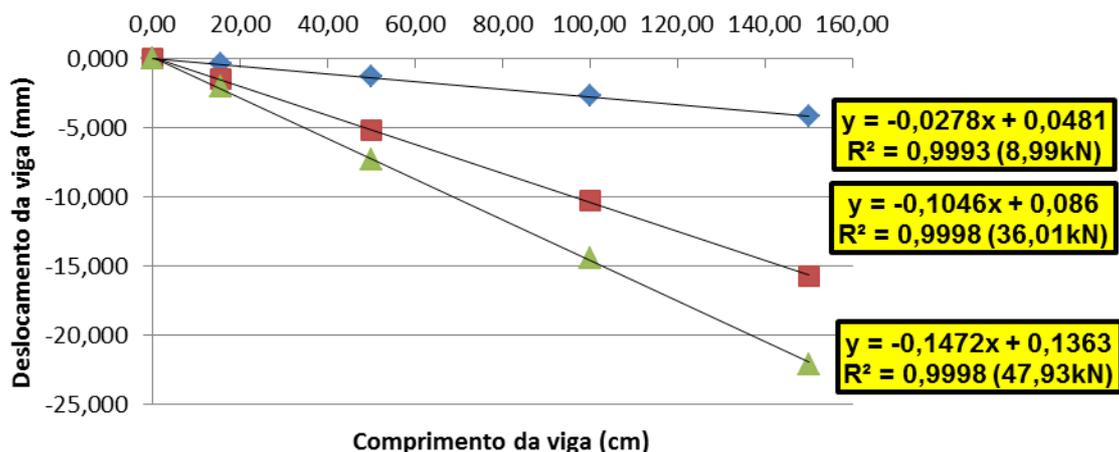


Figura 4.112- Comportamento das vigas dos protótipos BIE2 (Cargas: 8,99kN, 36,01kN e 47,93kN)

A partir dos resultados fornecidos pelos LVDT's 5, 6, 7 e 8, como nos casos anteriores, foram confeccionados os gráficos apresentados nas figuras 4.114 e 4.115, para as mesmas etapas de carga consideradas nas duas figuras anteriores.

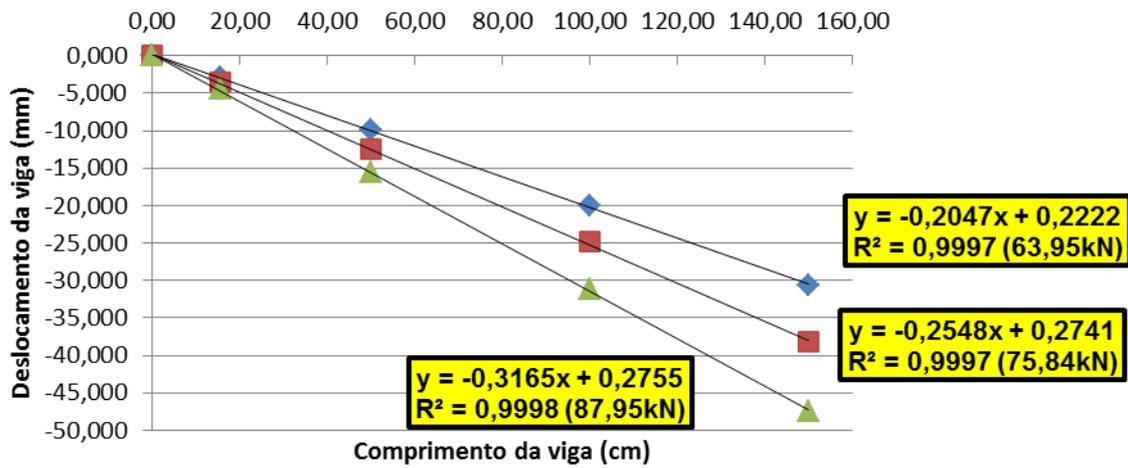


Figura 4.113 – Comportamento das vigas dos protótipos BIE2 (Cargas: 63,95kN, 75,84kN e 87,95kN)

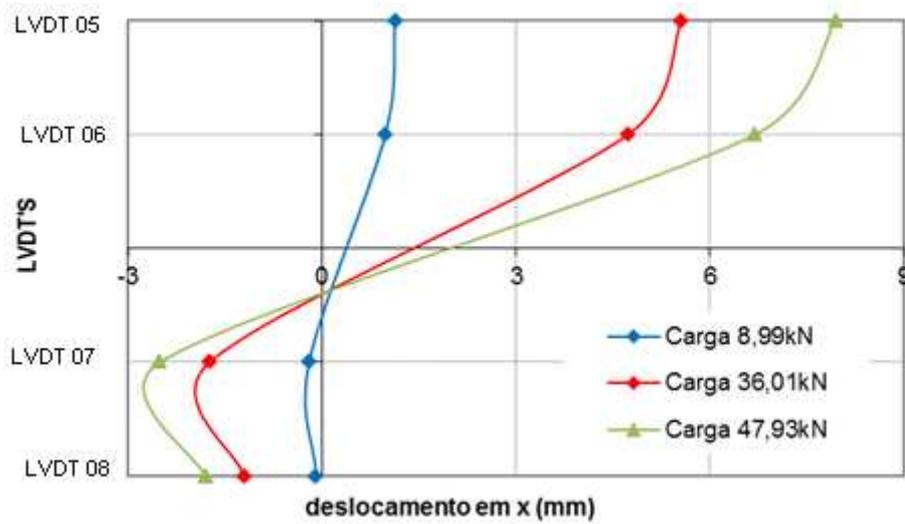


Figura 4.114 – Deslocamentos da alma do pilar do protótipo BIE2 (Cargas: 8,99kN, 36,10kN e 47,93kN)

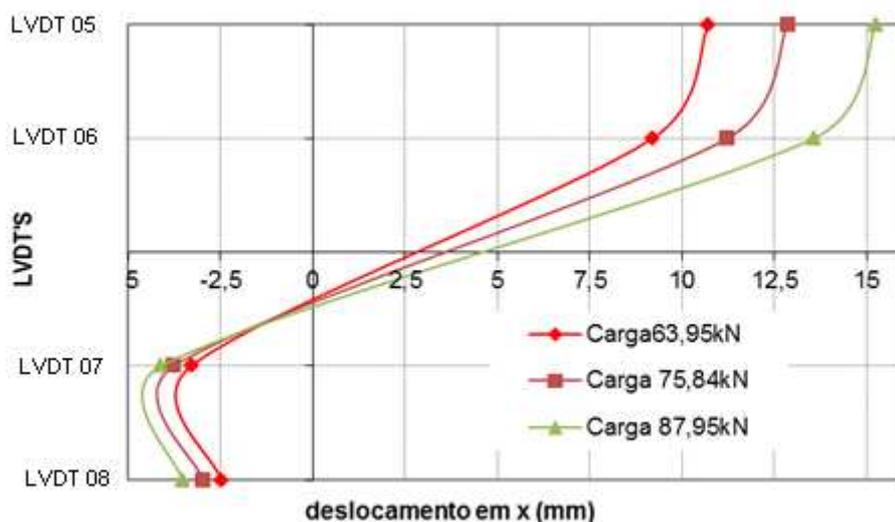


Figura 4.115 – Deslocamentos da alma do pilar do protótipo BIE2 (Cargas: 63,95kN, 75,84kN e 87,95kN)

Observa-se, novamente, assimetria de deslocamentos nos pontos correspondentes às mesas da viga, inclusive com deslocamentos no ponto correspondente ao LVDT 5 sempre maiores que os do ponto correspondente ao LVDT 6 (mesa superior da viga), relação inversa à verificada em relação aos LVDT's 7 e 8. Em outras palavras, o deslocamento máximo na região tracionada da ligação deve situar-se acima da posição do LVDT 5, enquanto na região tracionada o ponto de deslocamento horizontal máximo situa-se entre as posições de instalação dos LVDT's 7 e 8.

Na figura 4.115 pode ser observada a variação da posição, em relação à localização inicial do eixo da viga, do ponto da alma com deslocamento horizontal nulo, verificando-se que, para valores da carga aplicada à extremidade da viga entre 38kN e 56kN, o mencionado ponto situa-se a aproximadamente 8cm abaixo da posição original do eixo da viga, sendo esta distância aumentada com o acréscimo da sollicitação na ligação, chegando a 9,4cm ao final do ensaio.

4.5.5.2 – Momento x Rotação

As curvas momento-rotação obtidas no ensaio do protótipo BIE2 são apresentadas na figura 4.116, considerando-se a rotação da alma do pilar e da viga.

Uma consideração importante a ser feita é relativa à rigidez inicial da ligação. Observou-se que as rotações da alma e da viga apresentaram valores muito próximos

para algumas etapas iniciais de carregamento (até a solicitação de aproximadamente 450kN.cm), divergindo sensivelmente para etapas de maior solicitação.

Além disso, como ilustrado na figura 4.117 (ampliação do gráfico momento-rotação para solicitações até 3.000kN.cm) a curva momento-rotação passou a apresentar tangentes com inclinações maiores, correspondendo a maiores valores da rigidez da ligação, tanto medida em termos da rotação da alma do pilar quanto da viga da ligação.

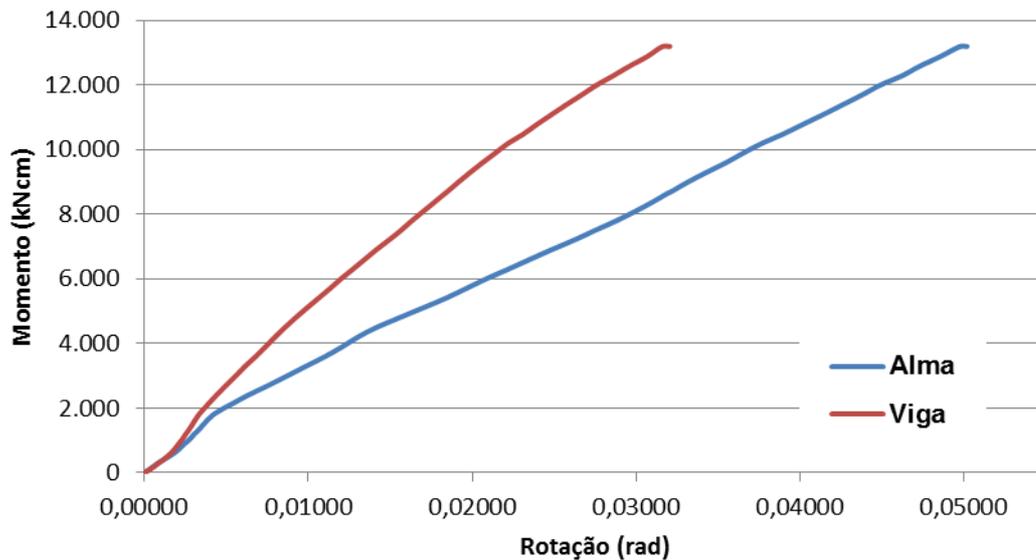


Figura 4.116 – Momento x Rotação – Alma do Pilar e Viga – Protótipo BIE2

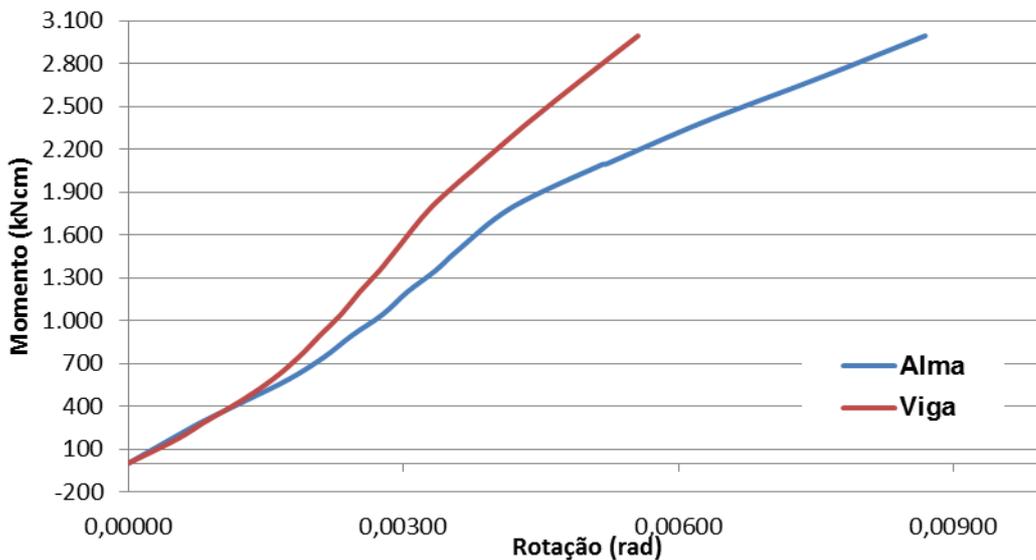


Figura 4.117– Ampliação da curva momento x rotação (Momento fletor $\leq 3.000\text{kN.cm}$ -Protótipo BIE2)

Desse modo, como ilustrado nas figuras 4.118 e 4.119, o ensaio do protótipo admite, para a rigidez calculada a partir do comportamento da alma do pilar, os valores 343.128kN.cm, considerando-se apenas as etapas iniciais de carregamento, e 495.028kN.cm quando são consideradas as etapas de carregamento entre 592kN.cm e

1793kN.cm. Já em termos do comportamento da viga, os valores são 356.099kN.cm e 698.091kN.cm, respectivamente.

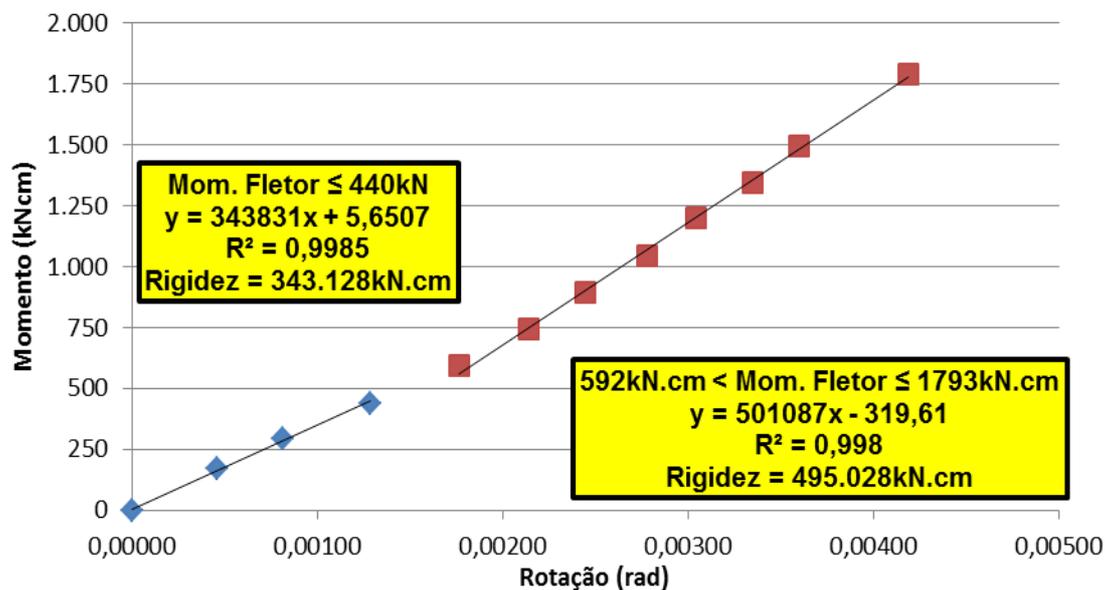


Figura 4.118 – Valores da rigidez da ligação (Alma do protótipo BIE2)

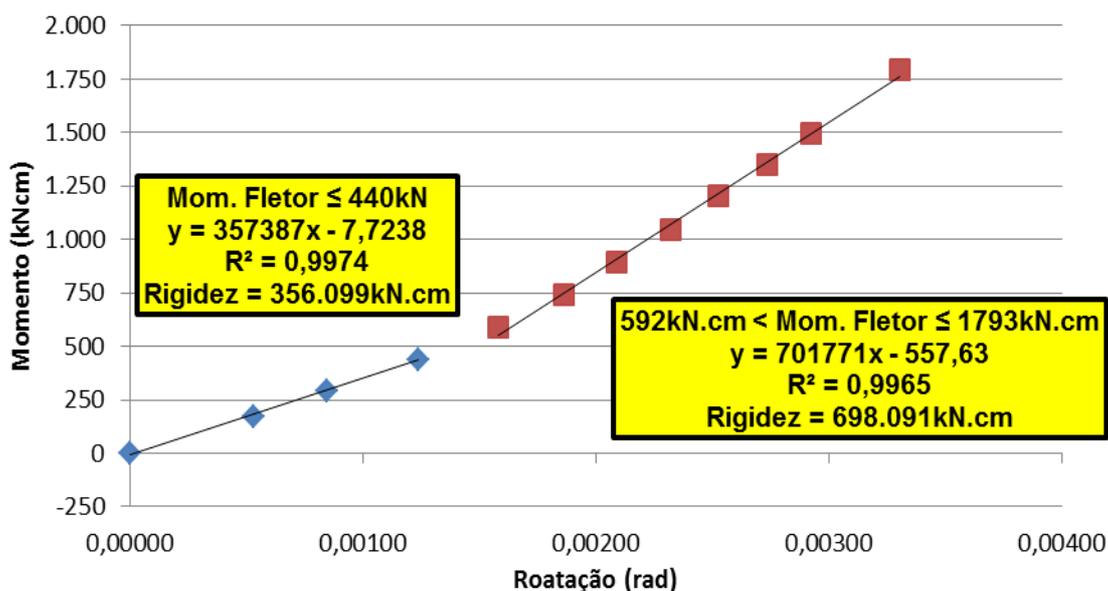


Figura 4.119– Valores da rigidez da ligação (Viga do protótipo BIE2)

4.5.5.3 – Solicitações nas mesas da viga

Pode-se considerar que, a partir dos resultados fornecidos pelos extensômetros posicionados nas mesas da viga, a transmissão dos esforços pela mesa superior e inferior foi praticamente a mesma, uma vez que a faixa de variação da relação entre esses valores situou-se entre 0,96 e 0,92, com valor médio igual a 0,94. Devido a esse fato, como constatado no gráfico apresentado na figura 4.120, os valores médios das

relações entre os valores experimentais e teóricos foram iguais a 0,95 e 1,01 respectivamente para as mesas superior e inferior da viga.

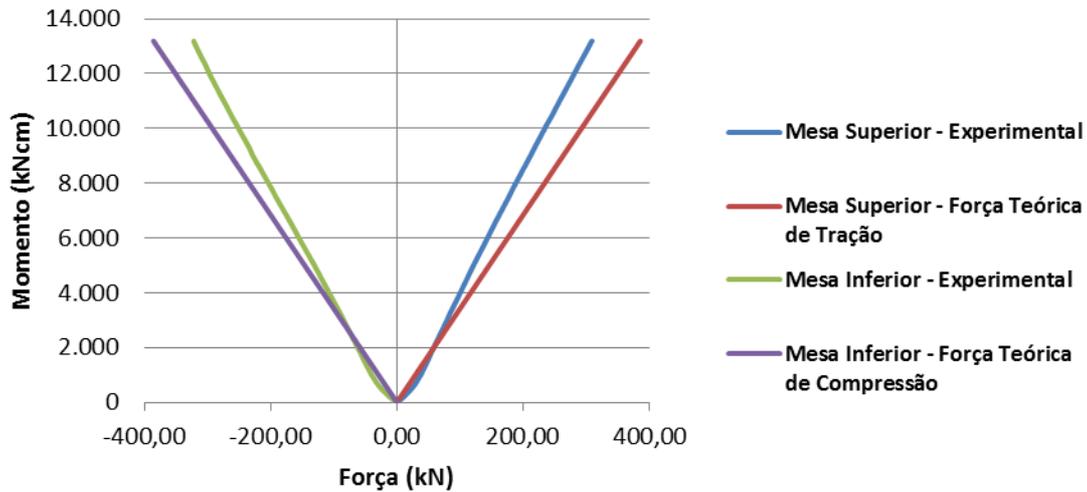


Figura 4.120– Variação das forças de tração e compressão transmitidas pelas mesas da viga em função do momento na ligação (Protótipo BIE2)

4.5.5.4 – Tensões na alma da viga

Os resultados fornecidos pelos extensômetros colocados ao longo da altura da alma da viga permitiram a obtenção das curvas apresentadas na figura 4.121, verificando-se que o ponto da alma com tensão nula situou-se sempre acima da posição original do eixo da viga, com valores crescentes com o aumento da sollicitação na ligação, chegando a situar-se 4,08cm acima dessa posição no último estágio de carregamento utilizado no ensaio (carga de 87,95kN).

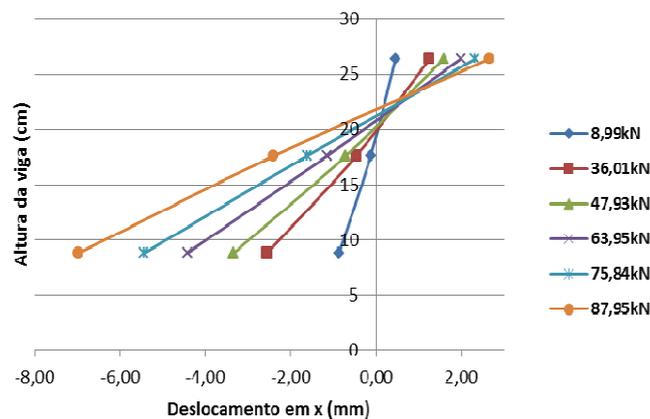


Figura 4.121– Distribuições de tensões na alma da viga do protótipo BIE2

4.5.5.5 – Tensões na Alma do Pilar

Apresentam-se, a seguir, os resultados obtidos através no ensaio do protótipo BIE2 através das rosetas instaladas na alma do pilar. Nas figuras 4.122 e 4.123 são apresentados os gráficos relativos à variação das tensões verticais e horizontais nos pontos respectivamente correspondentes às rosetas 1 e 2, enquanto as tensões de Von Mises são apresentadas na figura 4.124.

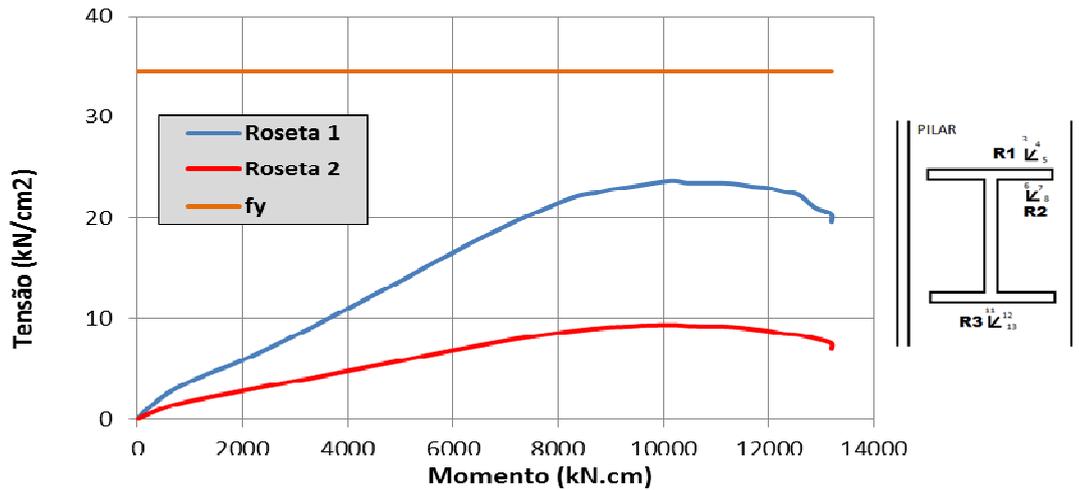


Figura 4.122– Tensões verticais na alma do pilar do protótipo BIE2 (Rosetas 1 e 2)

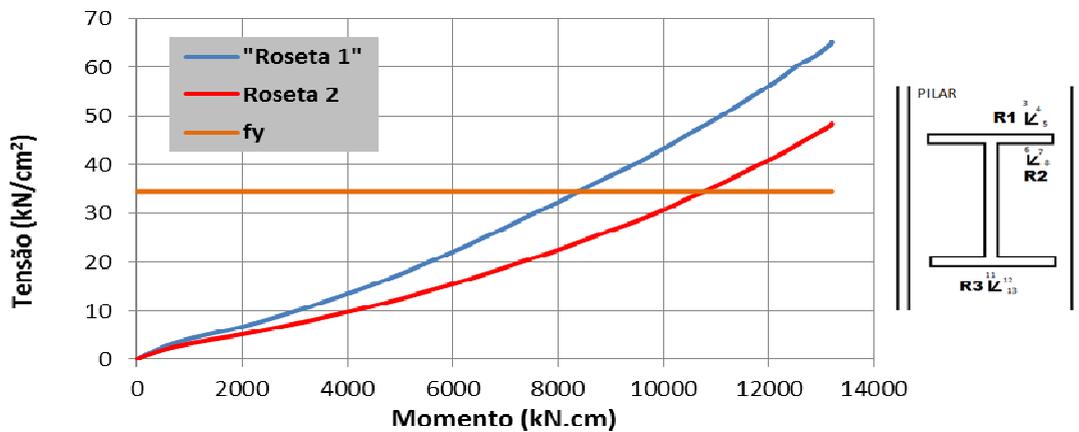


Figura 4.123 – Tensões horizontais na alma do pilar do protótipo BIE2 (Rosetas 1 e 2)

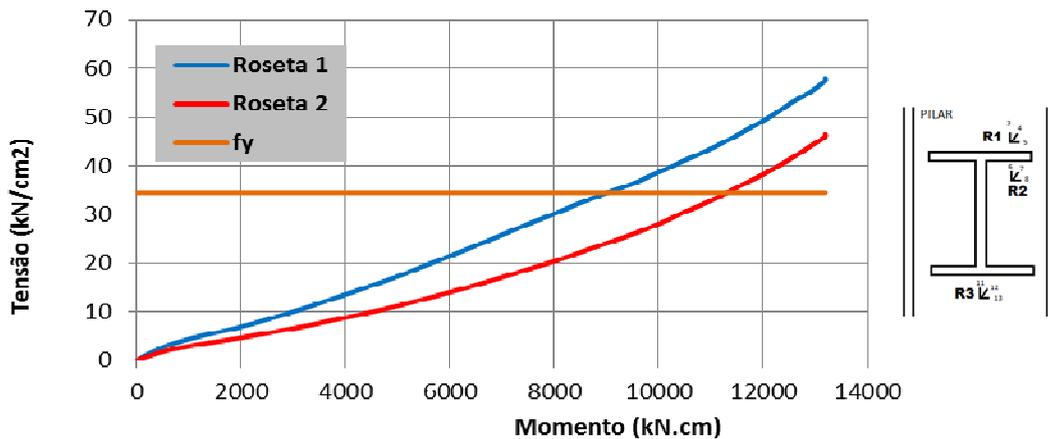


Figura 4.124– Tensões de Von Mises na alma do pilar do protótipo BIE2 (Rosetas 1 e 2)

Também nesse ensaio, a comparação entre os resultados mostra que tanto as tensões verticais quanto horizontais são superiores na roseta 1, assim como são mais significativas as tensões horizontais em ambos os casos, resultando em tensões de Von Mises iguais ou superiores à tensão nominal de escoamento do material para valores do momento fletor na ligação iguais a aproximadamente 9.000kN.cm e 11.100kN.cm, respectivamente para as rosetas 1 e 2.

Surpreendentemente, tendo-se em vista os resultados obtidos nos demais ensaios, os resultados obtidos no ponto de instalação da roseta 3 resultaram em tensões muito baixas nas direções horizontais e verticais, conduzindo a um valor máximo da tensão de Von Mises igual a 7,12kN/cm² (compressão na direção horizontal) como indicado na figura 4.125.

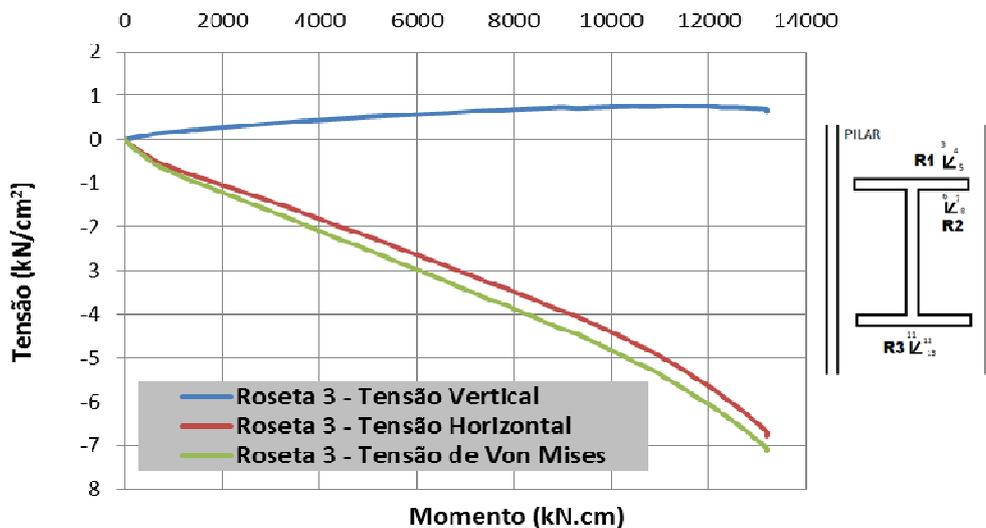


Figura 4.125 – Tensões na alma da viga do protótipo BIE2 (Roseta 3)

Esses resultados indicam que, no ponto de instalação da roseta 3 praticamente não ocorrem deformações no plano vertical (coincidente com o plano médio da espessura da alma da viga), com pequena deformação no plano horizontal paralelo às faces das mesas da viga.

VALORES TEÓRICOS E RESULTADOS NUMÉRICOS: COMPARAÇÕES

5.1 - Apresentação e Análise dos Valores Teóricos da Carga Crítica e da Rigidez Inicial

É importante observar que não foram considerados tensões residuais e imperfeições em nenhum dos modelos estudados. Na Tabela 5.1 são apresentados os resultados teóricos obtidos para os modelos analisados, correspondentes às cargas críticas relativas aos mecanismos local e global propostos por GOMES(1990) e ao mecanismo proposto por Blodgett (1982) e adaptado por Lima (1999).

Tabela 5.1 - Valores teóricos da carga crítica

Modelos Numéricos	Esbeltez	Carga Crítica (kN)					
		Mecanismo Local				Mecanismo Global	Blodgett/Lima
		Flexão	Puncionam.	Comb.	Combinado Corrigido		
BIE1	14,54	601,23	1.253,25	552,00	552,00	601,95	940,57
BIE2	16,43	471,06	1.109,19	437,56	437,56	474,21	735,13
BIE3	19,31	340,94	943,54	321,13	321,13	345,47	530,76
MIE1	21,26	281,40	857,10	267,63	267,63	286,46	437,54
MIE2	22,77	291,08	936,33	283,02	283,02	281,74	416,96
MIE3	23,21	235,99	785,08	225,79	225,79	240,86	366,45
MIE4	25,56	194,63	713,05	187,35	187,35	199,19	301,84
MIE5	25,96	223,76	821,09	218,79	218,79	217,16	323,77
MIE6	29,61	135,02	547,39	128,48	128,48	148,01	161,40
AIE1	31,49	152,11	677,04	149,70	149,700	148,10	202,85
AIE2	34,42	127,37	619,42	125,64	125,64	124,17	169,61
AIE3	39,75	103,20	569,00	102,25	102,25	99,19	130,79
AIE4	46,61	85,72	518,58	85,09	85,09	82,47	108,47
AIE5	45,51	78,70	496,98	78,18	78,18	75,73	99,59
AIE6	48,31	69,90	468,17	69,52	67,11	66,13	82,31
AIE7	50,84	123,65	684,24	123,17	120,23	109,42	162,89
AIE8	51,86	74,76	504,18	74,47	70,75	67,95	90,66
AIE9	54,14	55,62	417,75	55,42	53,15	52,48	65,38

Observa-se, de imediato, que apenas para os modelos AIE6 a AIE9 há variação da carga crítica para o mecanismo combinado (flexão e puncionamento) devido à correção em função do critério de Von Mises, com valores de k entre 0,950 e 0,976, correspondentes a reduções entre 2,4 e 5% em relação aos valores sem correção.

Observa-se, ainda, que o mecanismo combinado (flexão e puncionamento) corrigido é crítico para os modelos de baixa e média esbeltez, exceto para os modelos MIE2 e MIE5, ressalvando-se que a cargas críticas correspondentes ao mecanismo global, nesses casos, são apenas 0,45% e 0,75% menores que as correspondentes ao mecanismo combinado corrigido. Já para os modelos de alta esbeltez prevalece o mecanismo global, embora as diferenças variem entre 1,08% e 9,88%.

Por outro lado, constata-se que as cargas críticas referentes ao mecanismo global, para os modelos de baixa e média esbeltez - excluindo-se os já citados modelos MIE2 e MIE5 - são de 5,9% a 8,3% superiores às relativas ao mecanismo combinado corrigido, mas atingem 13,2% a mais no caso do modelo MIE6. Uma faixa de variação similar é obtida para os modelos de baixa rigidez (7,6% a 9%).

Considerando-se o conservadorismo dos modelos teóricos, principalmente em relação à não consideração da presença da alma da viga para efeito de definição da geometria da região de formação da charneira plástica, bem como a consideração de que as forças do binário correspondente ao momento fletor são transmitidas pelas mesas da viga, é razoável considerar, a princípio, que o mecanismo global proposto por GOMES(1990) seja considerado como crítico para os modelos analisados neste trabalho, uma vez que, quando superiores, as cargas críticas obtidas não ultrapassaram 1,1 vezes o valor correspondente ao mecanismo combinado de flexão e puncionamento.

Esta consideração é reforçada pelo fato de que o mecanismo local proposto por GOMES(1990) é baseado no comportamento de ligação com parafusos e, no caso de ligações soldadas, o mecanismo de colapso mais plausível é da forma indicada na figura 5.1.

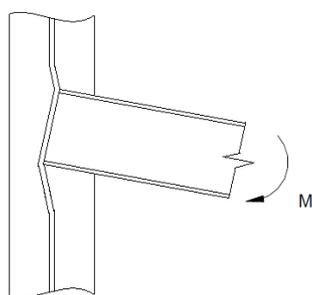


Figura 5.1 - Mecanismo global de colapso para ligações soldadas

A exceção a esta consideração é o modelo MIE6 que, em termos dos parâmetros utilizados para o cálculo da carga crítica, diferencia-se dos demais de sua classe, fundamentalmente por apresentar menor distância entre as faces internas das mesas do

pilar (correspondendo ao menor valor de $L = d - 1,5r$) que, associado ao menor valor de espessura da alma do pilar ($t_w = 7,6\text{mm}$), resulta em maior valor da esbeltez.

Portanto, pelo menos preliminarmente, é forçoso reconhecer que a capacidade resistente não está diretamente ligada somente ao valor da esbeltez, sendo necessária a análise mais aprofundada de outros parâmetros de influência. Nesse sentido, o máximo que se poderia constatar é que, como representado na figura 5.2, é possível estabelecer-se uma relação polinomial de 3ª ordem, com fator de correlação $R^2 = 0,9864$.

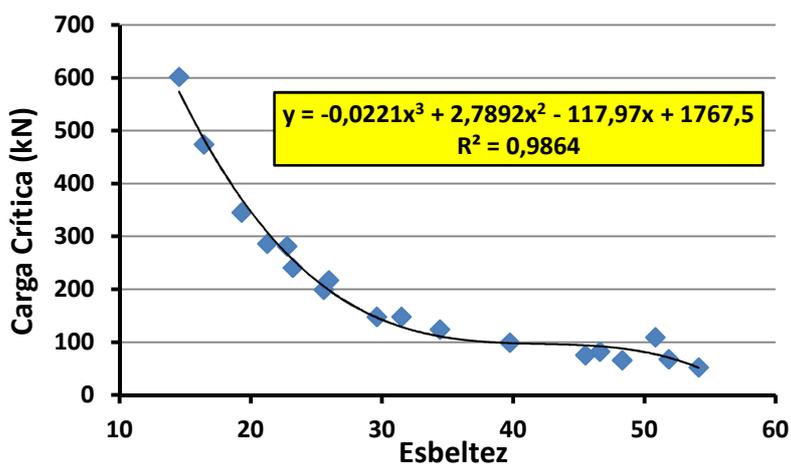


Figura 5.2 - Variação da carga crítica em função da esbeltez da alma do pilar

Uma correlação semelhante pode ser obtida para a variação da carga crítica com a espessura da alma do pilar, como apresentado na figura 5.3.

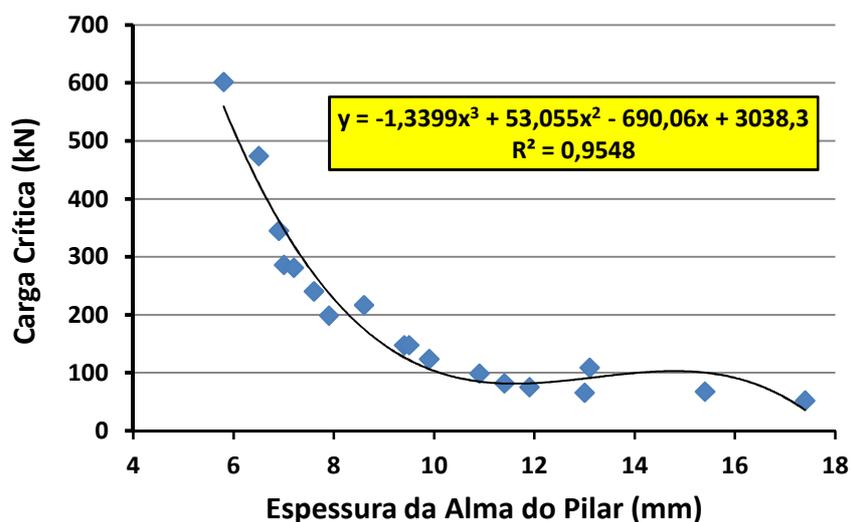


Figura 5.3 - Variação da carga crítica em função da espessura da alma do pilar

São analisados, a seguir, alguns casos de modelos com valores próximos em termos de esbeltez da alma do pilar, ressaltando-se os aspectos geométricos que podem

estar exercendo influência nos valores teóricos das cargas críticas e considerando-se, como mencionado, que o mecanismo global é crítico para todos os modelos.

a) MIE6 ($\lambda = 29,61$) x AIE1 ($\lambda = 31,49$)

Para esses modelos a esbeltez da alma do pilar apresenta crescimento de 6,35% e a carga crítica teórica sofre aumento de 0,06% (de 148,01kN para 148,10kN). Entretanto, como anteriormente comentado, observa-se que o valor de $L = d - 1,5r$ passa de 22,50 para 29,61 (aumento de 31,6%).

b) BIE3 ($\lambda = 19,31$) x MIE1 ($\lambda = 21,26$)

O crescimento da esbeltez da alma do pilar é de 10,1%, com redução da carga crítica teórica de 17,1%. Contrariamente ao caso anterior, os valores de $L = d - 1,5r$ são praticamente iguais (25,29 e 25,30).

c) MIE4 ($\lambda = 25,56$) x MIE5 ($\lambda = 25,96$)

Ocorre aumento de 9% da carga crítica, acréscimo de apenas 1,56% da esbeltez da alma do pilar e acréscimo de 16,99% dos valores de $L = d - 1,5r$.

d) BIE1 ($\lambda = 14,54$) x BIE2 ($\lambda = 16,43$)

Para esses modelos a esbeltez da alma do pilar apresenta crescimento de aproximadamente 13% e a carga crítica teórica é reduzida de 21,22%, embora os valores de $L = d - 1,5r$ sejam praticamente idênticos (25,31 e 25,30).

d) MIE2 ($\lambda = 22,77$) x MIE3 ($\lambda = 23,21$)

O crescimento da esbeltez da alma do pilar é de apenas 1,93%, com redução de aproximadamente 14,5%, tanto para a carga crítica (mecanismo global) quanto para os valores de $L = d - 1,5r$.

e) AIE7 ($\lambda = 50,84$) x AIE8 ($\lambda = 51,86$)

Com o aumento de apenas 2% na esbeltez da alma do pilar ocorre redução de 37,9% no valor da carga crítica, observando-se que os valores de $L = d - 1,5r$ sofreram redução de aproximadamente 24,88%.

Portanto, não há uma relação direta da variação da carga crítica com a variação da esbeltez da alma do pilar nem com a variação do correspondente valor de $L = d - 1,5r$, como explicitado nas figuras 5.4 e 5.5 para os seis pares de modelos analisados.

Restringindo-se a análise aos três pares de modelos com variação de esbeltez não superior a 2,0 (MIE2/MIE3, MIE4/MIE5 e AIE7/AIE8), observa-se (figura 5.6) que a variação da carga crítica em função da variação do parâmetro $L = d - 1,5r$ tende para uma reta, com fator de correlação $R^2 = 0,9225$.

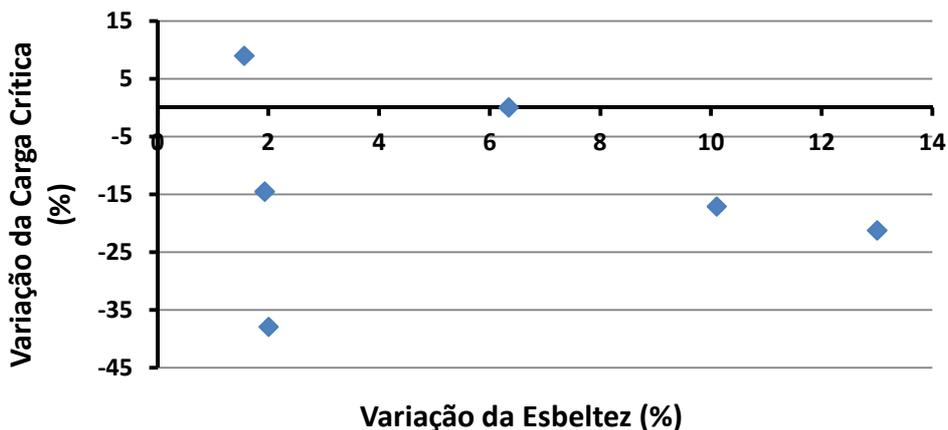


Figura 5.4 - Variação da carga crítica em função da variação da esbeltez (Comparação de modelos com valores próximos de esbeltez da alma do pilar)

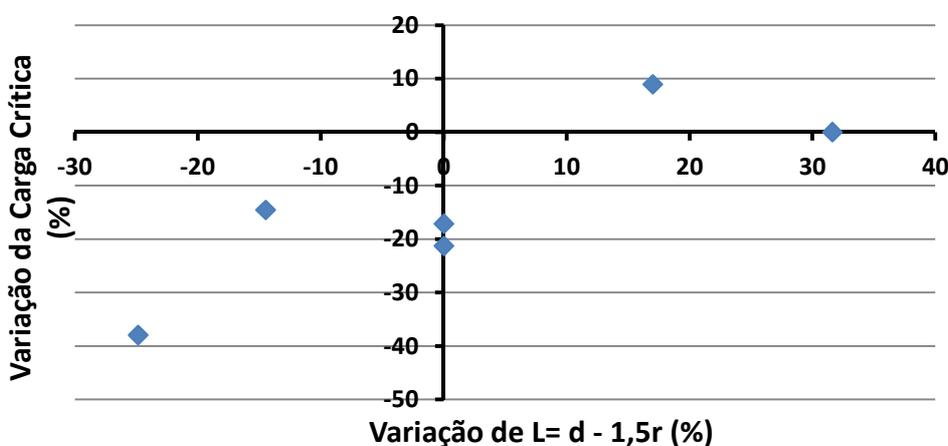


Figura 5.5 - Variação da carga crítica em função da variação do parâmetro ($L = d - 1,5r$) (Comparação de modelos com valores próximos de esbeltez da alma do pilar)

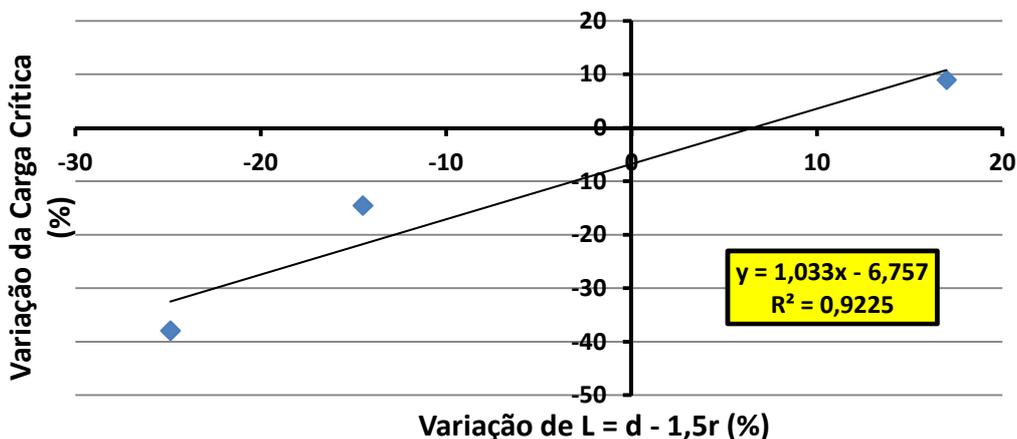


Figura 5.6 - Variação da carga crítica em função da variação do parâmetro " $L = d - 1,5r$ " (Comparação dos modelos MIE2/MIE3, MIE4/MIE5 e AIE7/AIE8)

Alternativamente, considerando-se que a maior parte dos modelos analisados pode ser agrupada segundo valores próximos do parâmetro $L = d - 1,5r$, é possível buscar-se o estabelecimento de comparações das variações (em porcentagem) da carga crítica em função da variação da esbeltez, obtendo-se os valores apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Variação da esbeltez e da carga crítica em função de $L = d - 1,5r$

Comparação de Modelos	Esbeltez (%)	Carga Crítica (%)
AIE1 (29,61) x AIE2 (29,60)	9,30	-16,16
AIE1 (29,61)xMIE2(29,59)	-27,69	90,23
AIE1 (29,61)xMIE5(29,61)	-17,56	46,63
AIE2 (29,60)xMIE2(29,59)	-37,00	126,89
AIE2 (29,60)xMIE5(29,61)	-24,58	74,88
AIE3 (31,40) x AIE4 (31,40)	17,26	-16,86
AIE3 (31,40) x AIE5 (31,41)	14,49	-23,65
AIE3 (31,40) x AIE6 (31,37)	21,53	-33,33
AIE3 (31,40) x AIE9 (31,40)	36,20	-47,10
AIE4 (31,40) x AIE5 (31,41)	-2,36	-8,16
AIE4 (31,40) x AIE6 (31,37)	3,65	-19,81
AIE4 (31,40) x AIE9 (31,40)	16,16	-36,37
AIE5 (31,41) x AIE6 (31,37)	6,15	-12,68
AIE5 (31,41) x AIE9 (31,40)	18,96	-30,71
AIE6 (31,37) x AIE9 (31,40)	12,07	-20,65
MIE3 (25,30)xMIE4(25,31)	9,19	-17,30
MIE3 (25,30)xBIE1(25,31)	-37,35	149,92
MIE3 (25,30)xBIE2(25,30)	-29,21	96,88
MIE3 (25,30)xBIE3(25,30)	-16,80	43,43
MIE4 (25,31)xBIE1(25,31)	-43,11	202,19
MIE4 (25,31)xBIE2(25,30)	-35,72	138,06
MIE4 (25,31)xBIE3(25,30)	-24,45	73,43
BIE1(25,31)XBIE2(25,30)	13,00	-21,22
BIE1(25,31)XBIE3(25,30)	32,81	-42,61
BIE2(25,30)XBIE3(25,30)	17,53	-27,15

Agrupando-se os resultados para valores comuns de $L = d - 1,5r$, foram obtidos os gráficos apresentados nas figuras 5.7 a 5.9, correspondentes aos resultados para $L \cong 25,3$; $L \cong 29,6$ e $L \cong 31,4$; com ajustes lineares, com fatores de correlação (R^2) respectivamente iguais a 0,9166; 0,9738 e 0,7875.

Na figura 5.10 é apresentado o gráfico geral dos resultados apresentados na Tabela 5.2, também com ajuste linear e fator de correlação $R^2 = 0,9094$.

Desse modo, pelo menos preliminarmente e para a situação específica dos modelos analisados, pode-se admitir uma razoável relação linear entre a variação da carga crítica com a variação da esbeltez da alma do pilar, ressaltando-se que os resultados apresentados não são afetados pela largura da mesa da viga, uma vez que o estudo abrangeu apenas modelos com $b = b_{fv} = 171\text{mm}$.

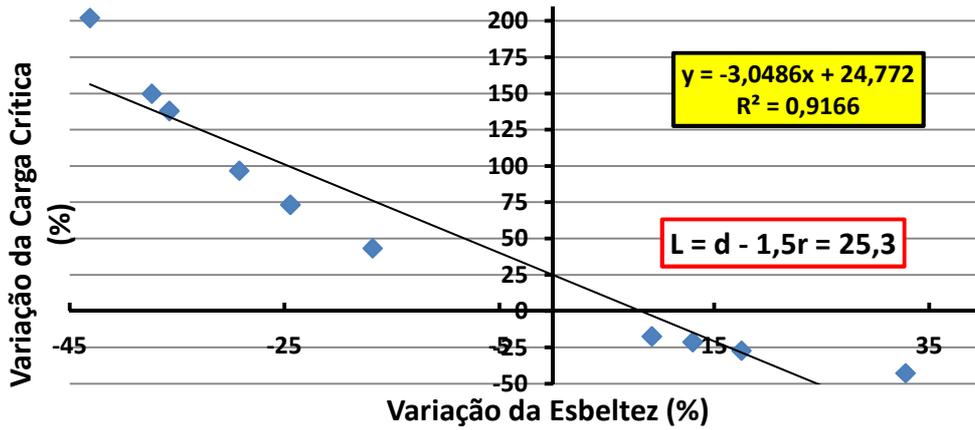


Figura 5.7 - Variação da carga crítica em função da variação da esbeltez ($L = 25,3$)

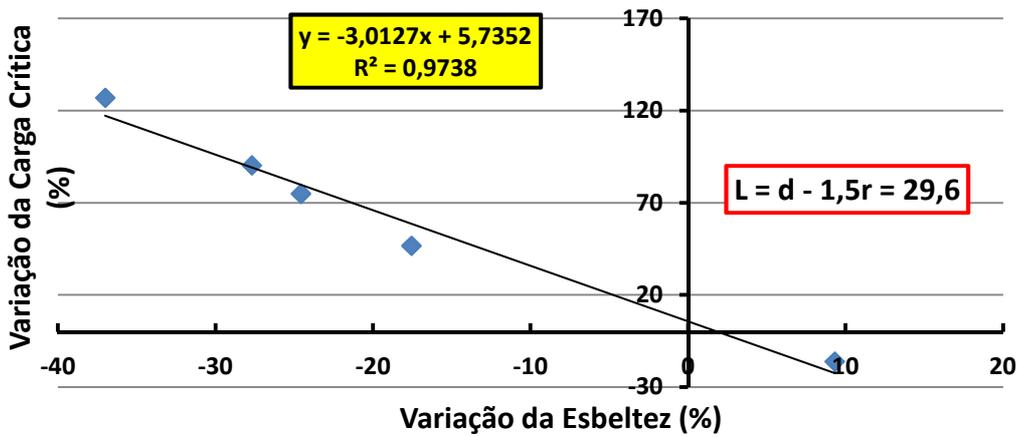


Figura 5.8 - Variação da carga crítica em função da variação da esbeltez ($L = 29,6$)

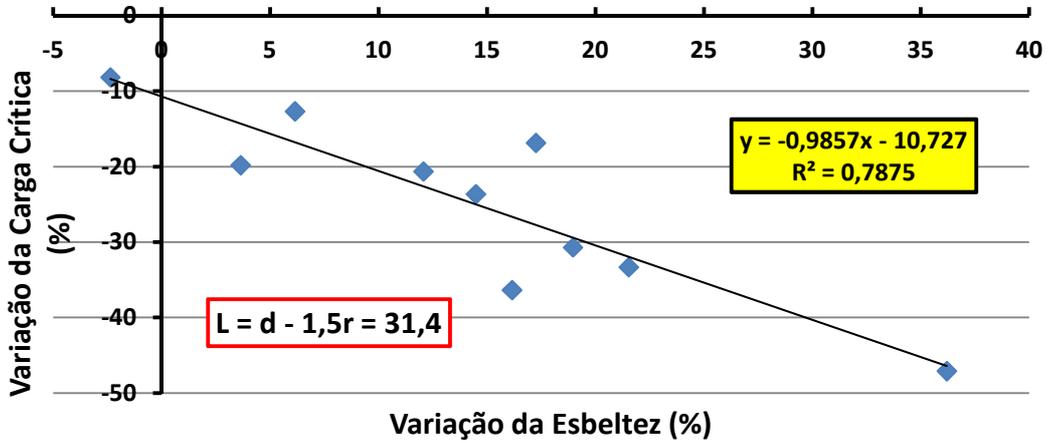


Figura 5.9 - Variação da carga crítica em função da variação da esbeltez ($L = 31,4$)

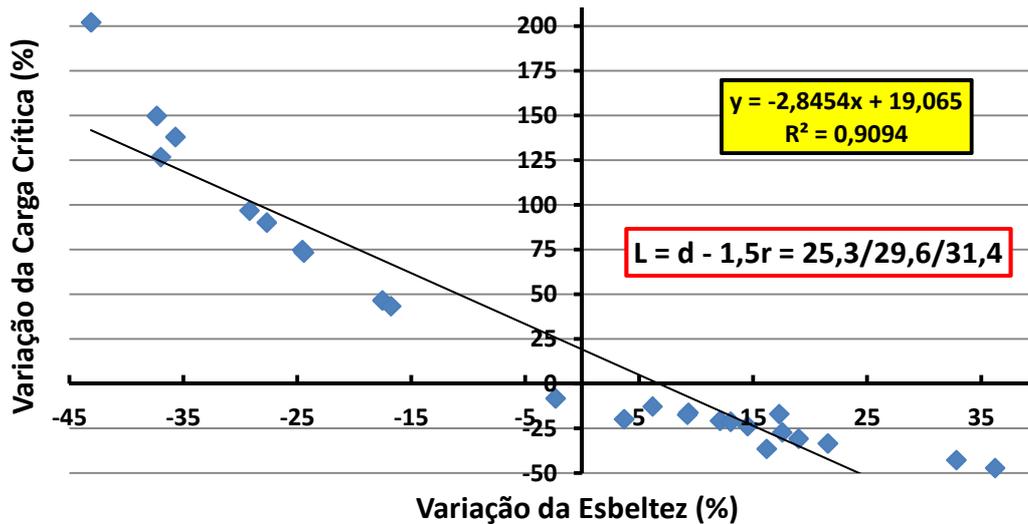


Figura 5.10 - Variação da carga crítica em função da variação da esbeltez ($L = 25,3; 29,6$ e $31,4$)

É importante ressaltar, ainda, que como afirmado por Lima (1999), a carga crítica teórica resultante da consideração do mecanismo proposto por Blodgett (1982) - considerando-se a condição de valor mínimo apresentada no Capítulo 2 -, é sempre maior que as cargas críticas obtidas pela consideração dos mecanismos local e global.

Nos casos estudados, foram observados valores entre 43,4% (modelo AIE7) e 14,8% (modelo MIE6) superiores às respectivas cargas de colapso decorrentes do mecanismo global.

Não obstante, como representado na figura 5.11, a variação da carga crítica com a esbeltez da alma do pilar é muito semelhante para o modelo de Blodgett/Lima e para o mecanismo global.

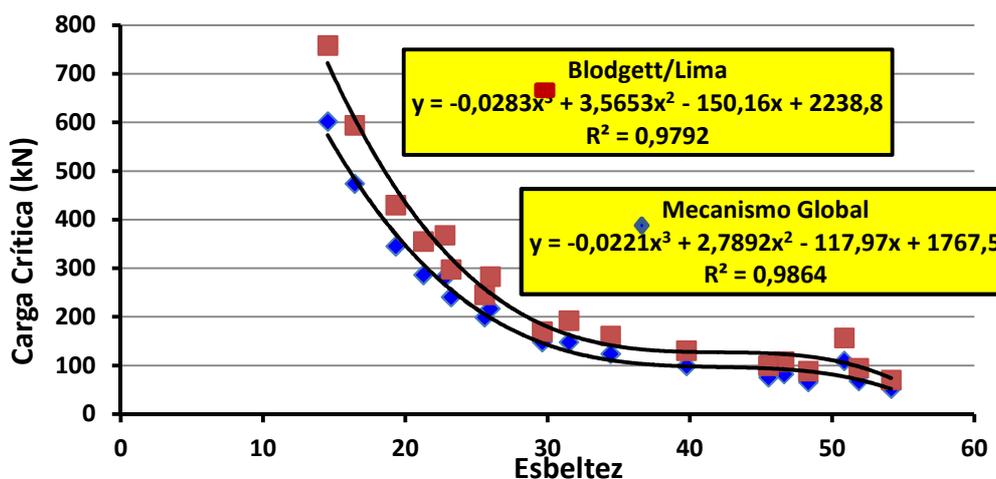


Figura 5.11 - Comparação da variação da carga crítica em função da variação da esbeltez (Blodgett/Lima e Mecanismo Global)

Os valores da rigidez inicial das ligações analisadas, calculados segundo as expressões propostas por Neves (1996, 2004) são apresentados no gráfico da figura

5.12, em função da esbeltez da alma do pilar. Nesse gráfico, a exemplo do que foi estabelecido para as cargas críticas, é indicado um ajuste por função polinomial de 3ª ordem, com fator de correlação $R^2 = 0,978$.

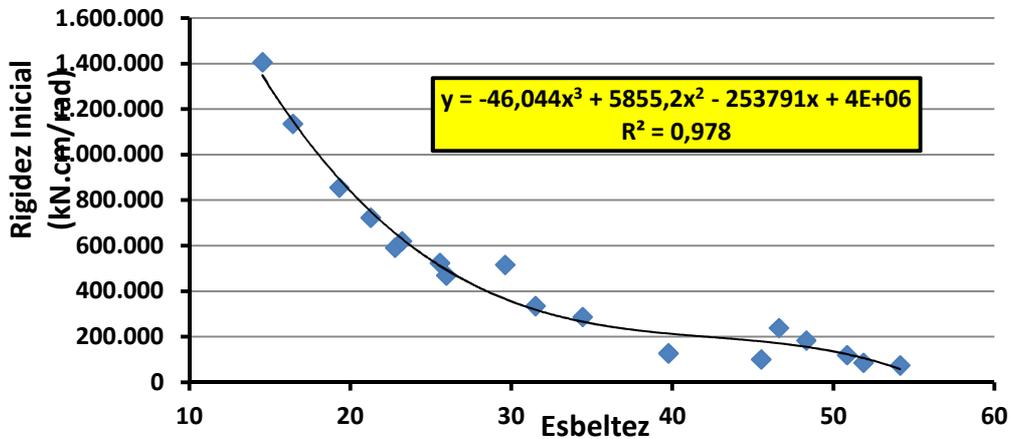


Figura 5.12 - Variação da rigidez inicial em função da esbeltez da alma do pilar

Analogamente, é apresentado na figura 5.13 o gráfico da variação da rigidez inicial em função da espessura da alma do pilar, juntamente com o ajuste também por polinômio de 3ª ordem.

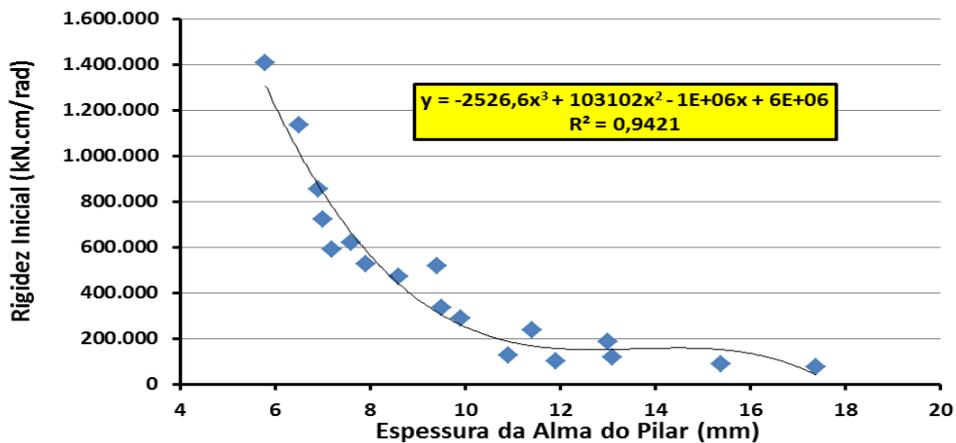


Figura 5.13 - Variação da rigidez inicial em função da espessura da alma do pilar

Adotando-se procedimento semelhante ao adotado para a análise dos resultados relativos às cargas críticas, as variações da rigidez inicial, da esbeltez da alma do pilar e do parâmetro λ são apresentados na tabela 5.3 para os mesmos pares de modelos anteriormente escolhidos.

Tabela 5.3 - Variações da rigidez inicial, da esbeltez e de " $L = d - 1,5r$ "
(Comparação de modelos com valores próximos de esbeltez da alma do pilar)

Modelos	Esbeltez (%)	Rigidez (%)	$L-1,5r$ (%)
MIE4/MIE5	1,56	-10,40	17,00
MIE2/MIE3	1,93	4,96	-14,53
MIE6/AIE1	6,35	-35,08	31,56
BIE3/MIE1	10,10	-15,48	0,00
BIE1/BIE2	13,00	-19,24	0,00

Observa-se, portanto, que o crescimento percentual da esbeltez (valores positivos na tabela 5.3), não necessariamente origina crescimento ou diminuição da rigidez inicial, o mesmo acontecendo quando a variação dessa propriedade das ligações é comparada com a variação de " $L - d - 1,5r$ ".

Portanto, novamente, verifica-se a inexistência de relações simples entre as variações da rigidez inicial em função da variação da esbeltez da alma do pilar ou do correspondente valor de $L = d - 1,5r$, como pode ser observado nas figuras 5.14 e 5.15.

Assim, novamente restringindo-se a análise aos três pares de modelos com variação de esbeltez não superior a 2,0 (MIE2/MIE3, MIE4/MIE5 e AIE7/AIE8), observa-se (figura 5.16) que a variação da rigidez inicial em função da variação do parâmetro $L = d - 1,5r$ não pode ser ajustada linearmente.

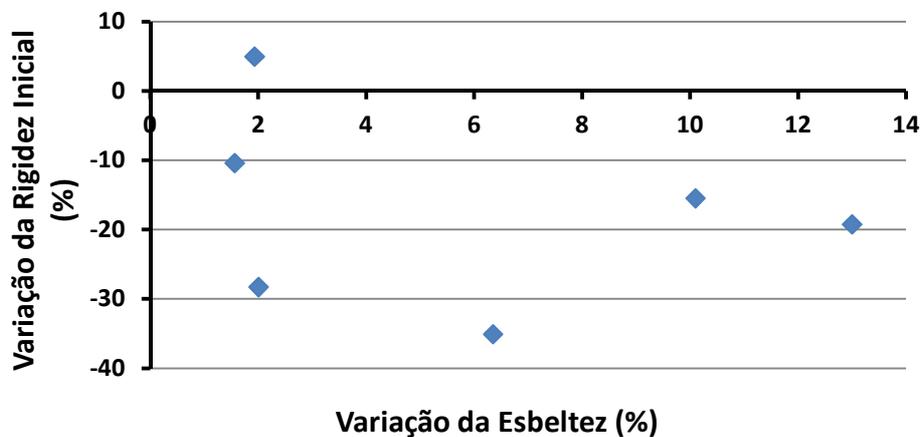
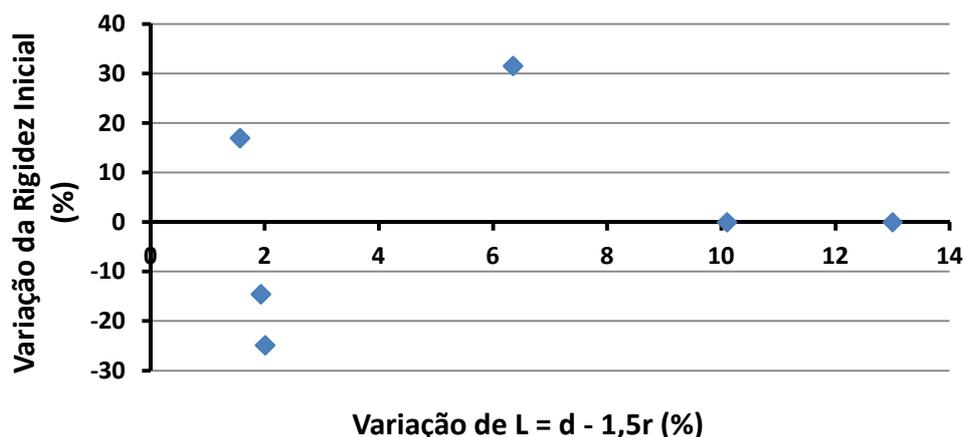
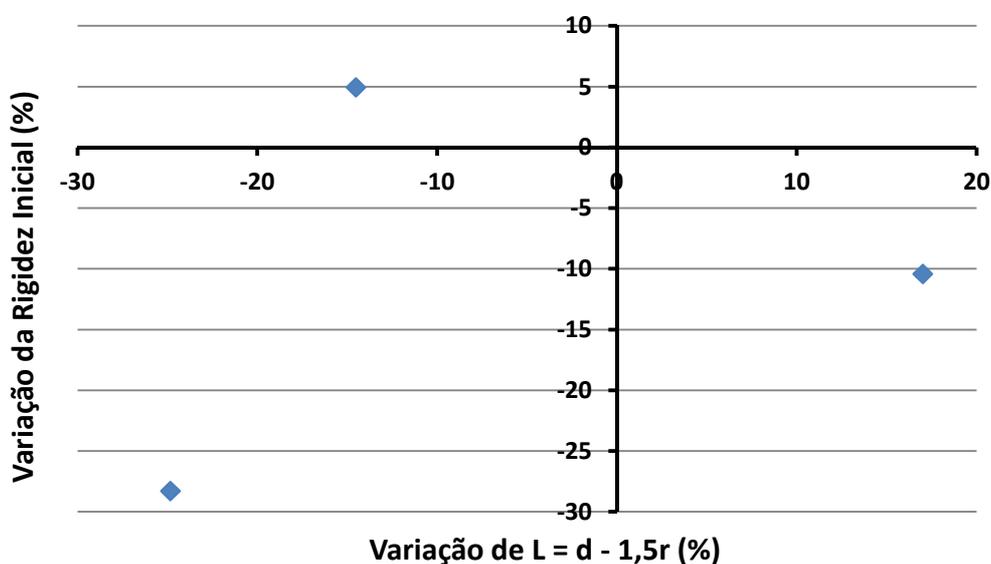


Figura 5.14 - Variação da rigidez inicial em função da variação da esbeltez (Comparação de modelos com valores próximos de esbeltez da alma do pilar)



Variação de L = d - 1,5r (%)
 Figura 5.15 - Variação da rigidez inicial em função de "L = d - 1,5r"
 (Comparação de modelos com valores próximos de esbeltez da alma do pilar)



Variação de L = d - 1,5r (%)
 Figura 5.16 - Variação da carga crítica em função da variação do parâmetro "L = d - 1,5r"
 (Comparação dos modelos MIE2/MIE3, MIE4/MIE5 e AIE7/AIE8)

Buscando-se o estabelecimento de comparações das variações (em porcentagem) da rigidez inicial em função da variação da esbeltez, são apresentados na Tabela 5.4 os resultados obtidos para grupos de modelos que apresentam proximidade dos valores do parâmetro $L = d - 1,5r$.

Agrupando-se os resultados para valores comuns de $L = d - 1,5r$, foram obtidos os gráficos apresentados nas figuras 5.17 e 5.18, correspondentes aos resultados para $L \cong 25,3$ e $L \cong 29,6$ com ajustes lineares apresentando fatores de correlação (R^2) respectivamente iguais a 0,9285 e 0,9598.

Contrariamente à análise dos valores teóricos das cargas críticas relativas ao mecanismo global, a variação da rigidez inicial para os modelos com $L \cong 31,4$ não resultou em possibilidade de ajuste de qualquer natureza (figura 5.19).

Dessa forma, considerando-se somente os valores inferiores a 31, é possível correlacionar-se os resultados (figura 5.20) por intermédio de uma função polinomial de 2ª ordem, obtendo-se um valor muito alto do fator de correlação ($R^2 = 0,9913$).

Tabela 5.4 - Variação da esbelteza e da rigidez inicial em função de $L = d - 1,5r$

Comparação de Modelos	Esbelteza (%)	Rigidez Inicial (%)
AIE1 (29,61) x AIE2 (29,60)	9,30	-14,41
AIE1 (29,61)xMIE2(29,59)	-27,69	76,37
AIE1 (29,61)xMIE5(29,61)	-17,56	40,16
AIE2 (29,60)xMIE2(29,59)	-37,00	106,08
AIE2 (29,60)xMIE5(29,61)	-24,58	63,76
AIE3 (31,40) x AIE4 (31,40)	17,26	87,77
AIE3 (31,40) x AIE5 (31,41)	14,49	-21,09
AIE3 (31,40) x AIE6 (31,37)	21,53	44,28
AIE3 (31,40) x AIE9 (31,40)	36,20	-41,77
AIE4 (31,40) x AIE5 (31,41)	-2,36	-57,98
AIE4 (31,40) x AIE6 (31,37)	3,65	-23,11
AIE4 (31,40) x AIE9 (31,40)	16,16	-68,99
AIE5 (31,41) x AIE6 (31,37)	6,15	82,96
AIE5 (31,41) x AIE9 (31,40)	18,96	-26,21
AIE6 (31,37) x AIE9 (31,40)	12,07	-59,67
MIE3 (25,30)xMIE4(25,31)	9,19	-15,50
MIE3 (25,30)xBIE1(25,31)	-37,35	126,71
MIE3 (25,30)xBIE2(25,30)	-29,21	83,09
MIE3 (25,30)xBIE3(25,30)	-16,80	37,95
MIE4 (25,31)xBIE1(25,31)	-43,11	168,29
MIE4 (25,31)xBIE2(25,30)	-35,72	116,67
MIE4 (25,31)xBIE3(25,30)	-24,45	63,25
BIE1(25,31)XBIE2(25,30)	13,00	-19,24
BIE1(25,31)XBIE3(25,30)	32,81	-39,15
BIE2(25,30)XBIE3(25,30)	17,53	-24,65

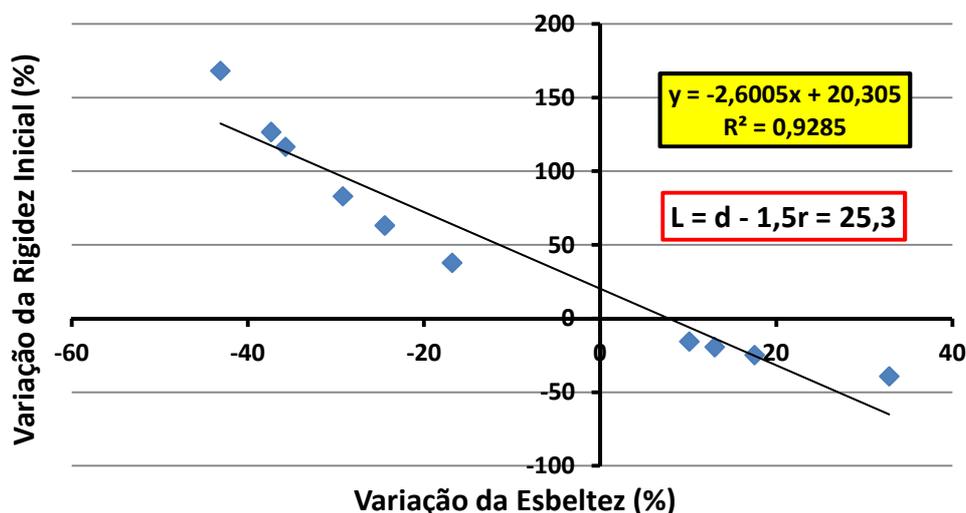


Figura 5.17 - Variação da rigidez inicial em função da variação da esbelteza ($L = 25,3$)

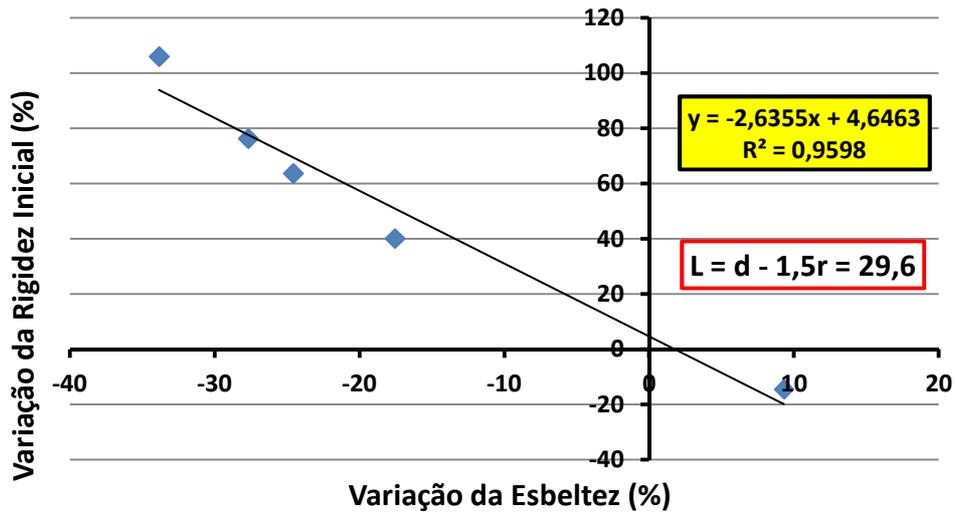


Figura 5.18 - Variação da rigidez inicial em função da variação da esbeltez ($L = 29,6$)

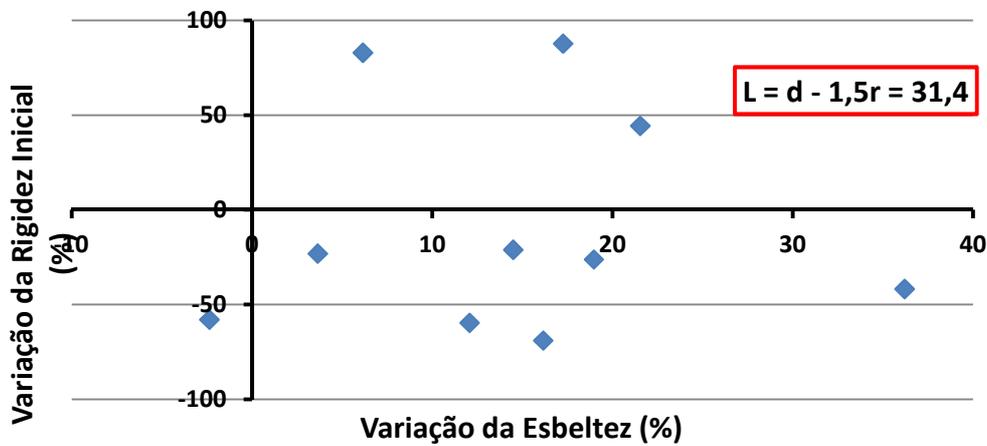


Figura 5.19 - Variação da rigidez inicial em função da variação da esbeltez ($L = 31,4$)

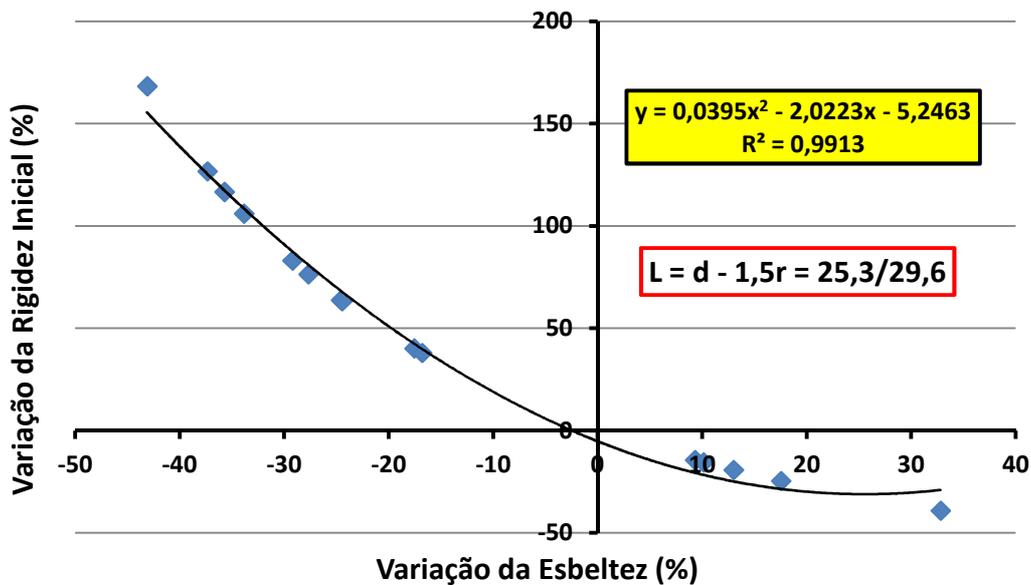


Figura 5.20 - Variação da carga crítica em função da variação da esbeltez ($L = 25,3$ e $31,4$)

5.2 - Comparações entre Valores Teóricos e Resultados da Análise Numérica

5.2.1 – Considerações Iniciais

Anteriormente aos estudos comparativos entre valores teóricos e resultados da análise numérica é importante mostrar que os modelos estudados, divididos em três classes (baixo, médio e alto índice de esbeltez), quando submetidos a carregamentos um carregamentos na análise numérica, atingiram cargas máximas numéricas estabelecidas em função da falta de convergência, segundo os critérios do método de Newton-Raphson. Nas figuras 5.21 e 5.22 apresentam as representações gráficas das tensões de Von Mises nas almas dos pilares dos modelos de alta esbeltez (AIE1 a AIE9) correspondentes às cargas últimas obtidas na análise numérica, indicando-se também os valores das correspondentes solicitações nas mesas da viga nessa situação.

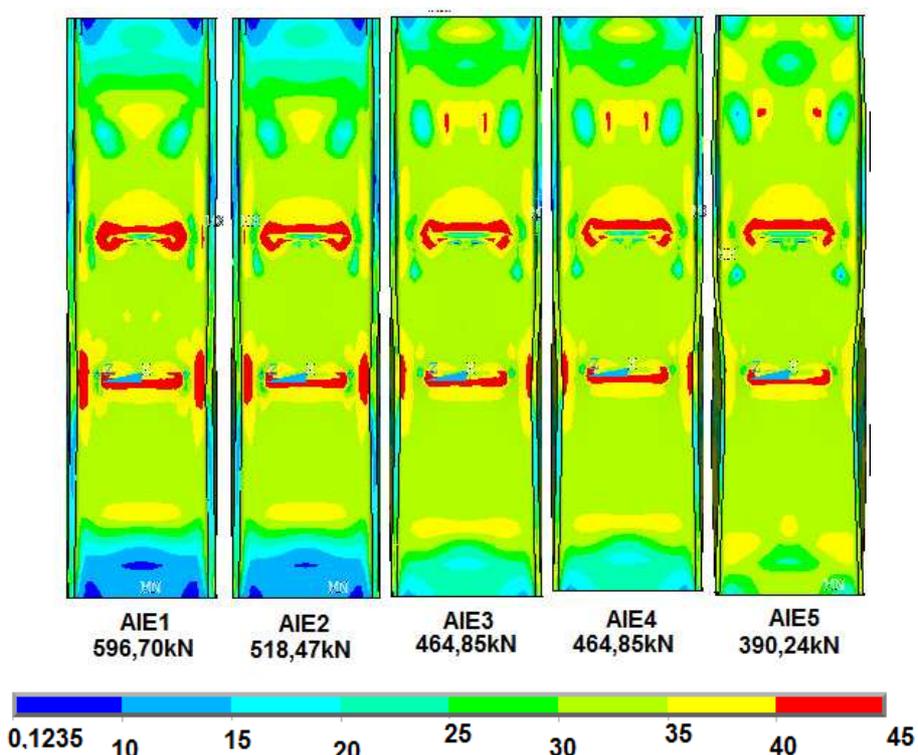


Figura 5.21 – Tensões de Von Mises (kN/cm^2) na alma do pilar dos modelos numéricos de alto índice de esbeltez (AIE1 a AIE5) e correspondentes solicitações nas mesas da viga para carga última da análise numérica

Observa-se que, para todos os modelos dessa classe, foram atingidos valores de tensão superiores ao valor da tensão nominal de escoamento do material ($f_y = 34,5kN/cm^2$) em várias regiões, caracterizando situações não adequadas para a análise da capacidade resistente do elemento considerado.

Adicionalmente, verifica-se que, para os AIE1 e AIE7, foram atingidos valores de sollicitação superiores aos que teoricamente resultariam em plastificação total das mesas da viga (578,15kN).

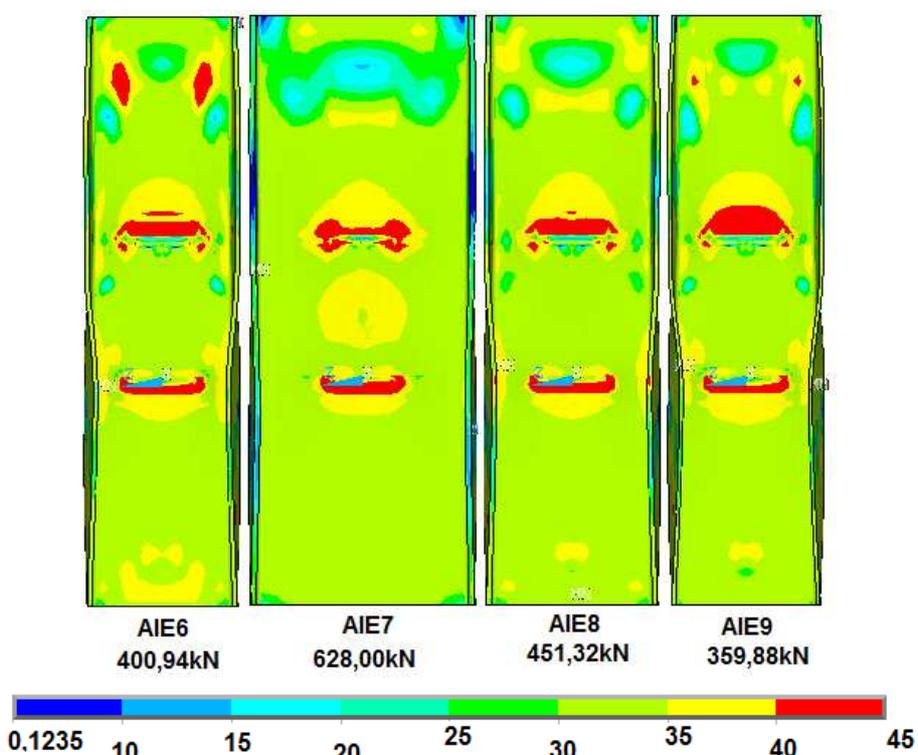


Figura 5.22 – Tensões de Von Mises (kN/cm^2) na alma do pilar dos modelos numéricos de alto índice de esbeltez (AIE6 a AIE9) e correspondentes sollicitações nas mesas da viga para carga última da análise numérica

As mesmas situações, relativamente aos modelos de médio índice de esbeltez, são apresentadas na figura 5.23, observando-se muitas regiões com altas concentrações de tensões de Von Mises com valores superiores à tensão nominal de escoamento do material, tanto nas proximidades das mesas da viga quanto em regiões correspondentes às ligações entre a alma e mesas do pilar, em pontos também correspondentes à localização das mesas da viga.

Nesse caso, é muito importante ressaltar-se que todos os modelos, exceto o modelo MIE6, atingiram valores de sollicitação superiores a 578,15kN (força correspondente à plastificação total das mesas da viga).

Já para os modelos de baixo índice de esbeltez, observou-se uma sensível diferença entre os comportamentos da alma do pilar nas regiões tracionada e comprimida, exceção feita ao modelo BIE3 que apresentou pequenas regiões com tensões iguais ou superiores a $40kN/cm^2$ localizadas nas extremidades da mesa inferior da viga, além de uma região de consideráveis dimensões situada acima da mesa superior da viga (figura 5.24).

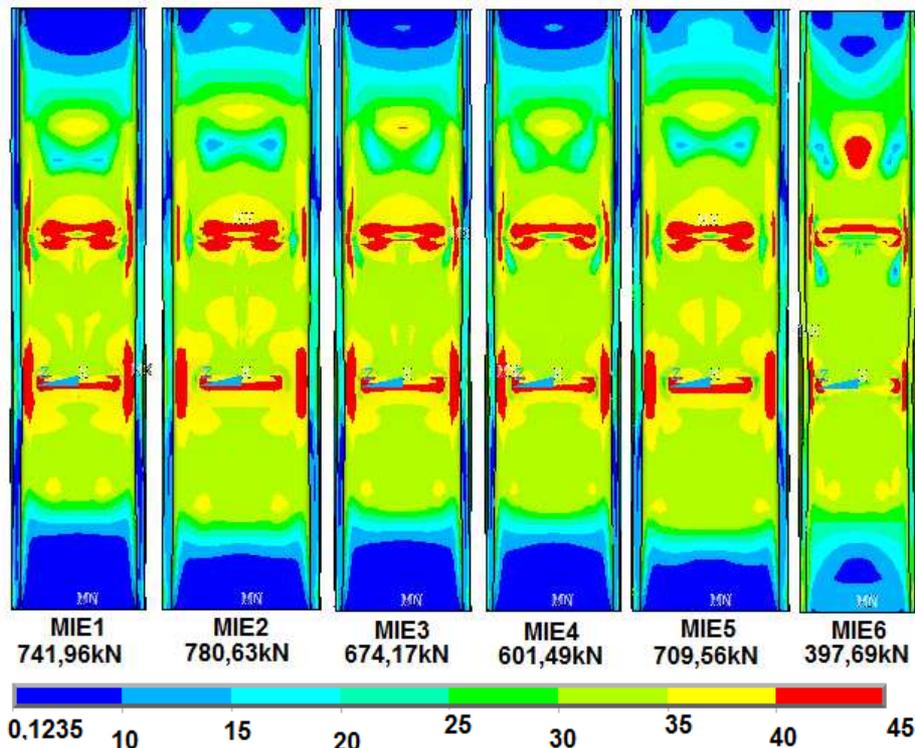


Figura 5.23 – Tensões de Von Mises (kN/cm^2) na alma do pilar dos modelos numéricos de médio índice de esbeltez e correspondentes solicitações nas mesas da viga para carga última da análise numérica

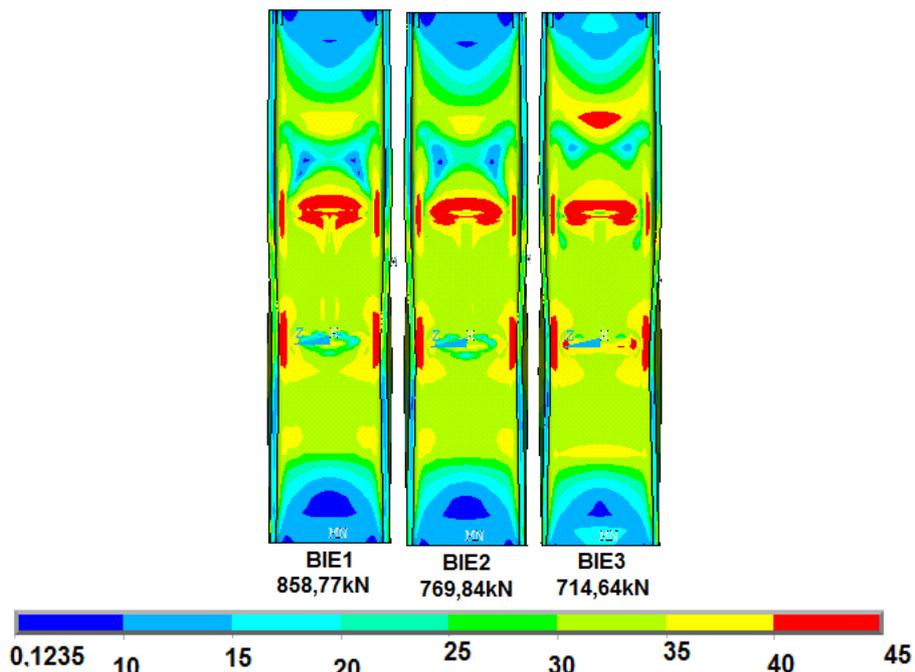


Figura 5.24 – Tensões de Von Mises (kN/cm^2) na alma do pilar dos modelos numéricos de baixo índice de esbeltez e correspondentes solicitações nas mesas da viga para carga última da análise numérica

Também para os modelos de baixa esbeltez foram observadas concentrações de tensões de valor elevado em regiões próximas às mesas do pilar. Além disso, para todos os modelos a solicitação nas mesas da viga foi superior a 578,15kN.

5.2.2 - Capacidade Resistente da Alma do Pilar

O modelo de GOMES(1990), apresentado no Capítulo 2, possibilita o cálculo da capacidade resistente da alma do pilar, em termos da máxima força transmitida pelas mesas da viga, cujos valores são apresentados na tabela 5.5 para os modelos de ligação analisados.

Tabela 5.5 – Cargas últimas de plastificação da alma do pilar (GOMES(1990))

Classe	Modelos	Esbeltez	$F_{pl,GOMES(1990)}$ (kN)
Classe 3	AIE1	31,49	148,10
	AIE2	34,42	124,17
	AIE3	39,75	99,19
	AIE4	43,61	82,47
	AIE5	45,51	75,73
	AIE6	48,31	66,13
	AIE7	50,84	109,42
	AIE8	51,86	67,95
	AIE9	54,14	52,48
Classe 2	MIE1	21,26	286,46
	MIE2	22,77	281,74
	MIE3	23,21	240,86
	MIE4	25,56	199,19
	MIE5	25,96	217,16
	MIE6	29,61	148,01
Classe 1	BIE1	14,54	601,95
	BIE2	16,43	474,21
	BIE3	19,31	345,47

Comparando-se os valores apresentados na tabela 5.5 com as representações gráficas das tensões de Von Mises obtidas na análise numérica para solicitações nas mesas da viga correspondentes (figuras 5.25 a 5.27), observa-se inicialmente, a existência de várias regiões, com distribuição bastante difusa, nas quais as tensões são iguais ou superiores a $34,5\text{kN/cm}^2$ (tensão nominal de escoamento do material).

Entretanto, pelo menos visualmente, pode-se reconhecer um certo padrão de comportamento em termos da variação de regiões com diferentes níveis de tensões de Von Mises em função do aumento da esbeltez da alma do pilar. Assim, observa-se que há uma tendência de ampliação das áreas de regiões localizadas junto à alma da viga, aproximadamente próximas do ponto correspondente ao eixo da mesma. Além disso, as regiões com tensões mais altas (iguais ou superiores a 35kN/cm^2) apresentam tendência de, progressivamente em função do aumento da esbeltez da alma, localizarem-se mais próximas às regiões correspondentes às mesas da viga.

Essa tendência é mais clara nos modelos com alta e média esbelteza da alma do pilar, com a exceção do modelo MIE6.

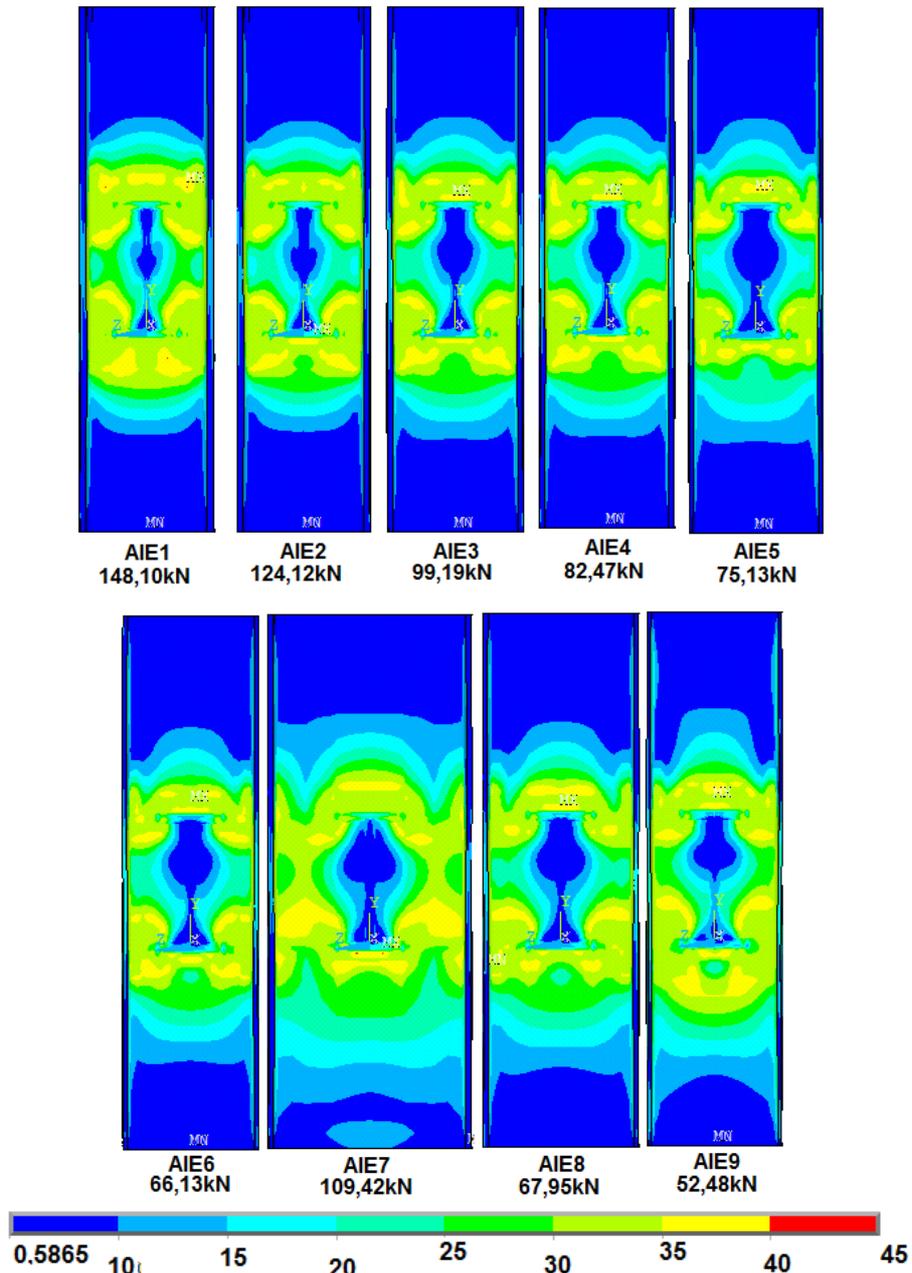


Figura 5.25 – Tensões de Von Mises (kN/cm^2) na alma do pilar dos modelos numéricos de alto índice de esbelteza para solicitações nas mesas da viga correspondentes às cargas últimas previstas por GOMES(1990)

Entretanto, para os modelos das classes 2 e 3 (respectivamente médio e alto índice de esbelteza), não são observadas regiões com concentrações de tensões características de formação de charneiras plásticas do tipo previsto por GOMES(1990), embora nos modelos MIE2 e MIE3 já apareçam diminutos pontos (em vermelho na figura 5.26) com tensões iguais ou superiores a $40kN/cm^2$.

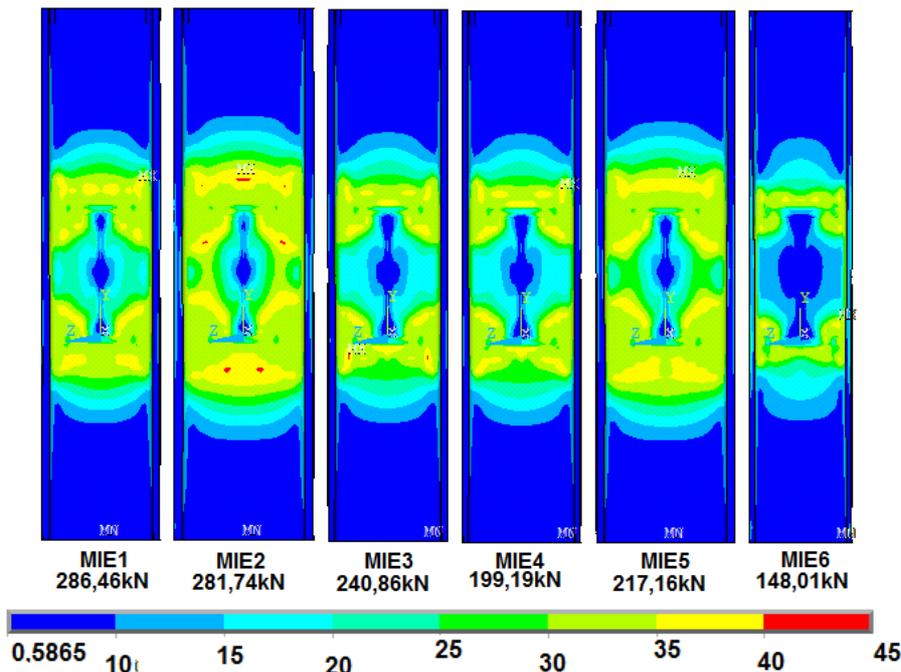


Figura 5.26 – Tensões de Von Mises (kN/cm^2) na alma do pilar dos modelos numéricos de médio índice de esbeltez para solicitações nas mesas da viga correspondentes às cargas últimas previstas por GOMES(1990)

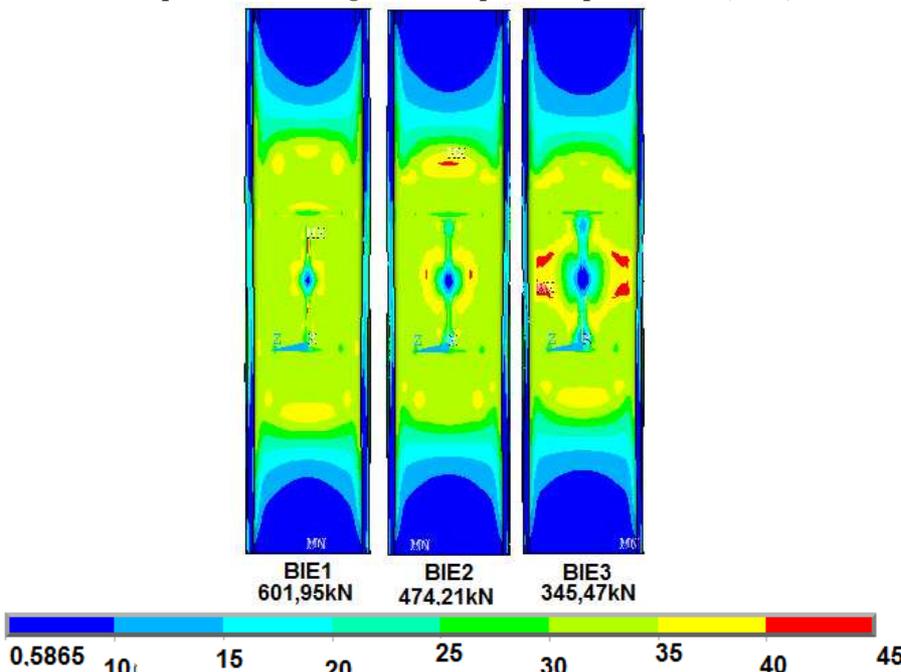


Figura 5.27 – Tensões de Von Mises (kN/cm^2) na alma do pilar dos modelos numéricos de baixo índice de esbeltez para solicitações nas mesas da viga correspondentes às cargas últimas previstas por GOMES(1990)

Os comportamentos observados para os modelos das classes 2 e 3, porém, como observado na figura 5.27, não foram verificados nos modelos da classe 1 (baixo índice de esbeltez), nos quais as regiões com baixa concentração de tensões de Von Mises são muito pequenas (embora com o mesmo tipo de localização próxima ao ponto correspondente ao eixo longitudinal da viga), mas com tensões iguais ou superiores a

35kN/cm² em regiões localizadas nas proximidades da alma da viga e, principalmente, em regiões acima e abaixo das mesas.

Além disso, o modelo BIE2 apresentou pequenas regiões com tensões iguais ou superiores a 40kN/cm², inclusive acima da mesa tracionada da viga, enquanto no modelo BIE3 essas regiões situaram-se em pontos internos às mesas da viga, mas mais próximos das ligações da alma com as mesas do pilar, em ambas as regiões tracionada e comprimida da alma do pilar.

Na tentativa de estabelecer-se correlações entre os resultados obtidos na análise numérica com os valores obtidos mediante a aplicação do modelo de GOMES(1990), foram pesquisadas situações em que houvesse uma concentração de tensões de Von Mises nas regiões correspondentes à mesa superior da viga dos modelos, com configuração geométrica semelhante à da charneira plástica (figuras 5.28 a 5.31), obtendo-se as correspondentes forças transmitidas pela mesa da viga (F_{pl} - Análise Numérica).

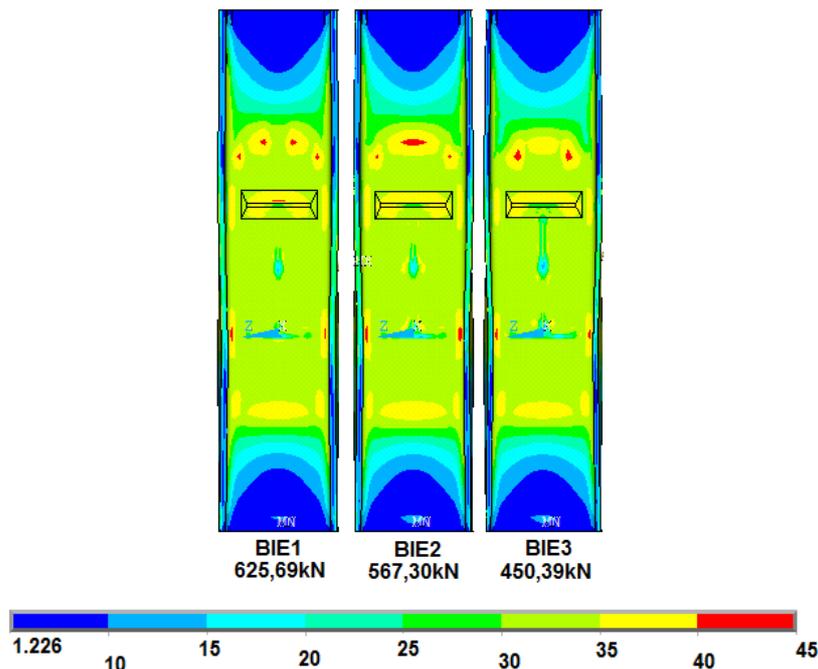


Figura 5.28 – Charneiras plásticas (Distribuição das tensões de Von Mises) - Modelos BIE

É importante ressaltar que, com exceção do modelo AIE7, todos os modelos apresentam pequenas regiões com tensões de Von Mises iguais ou superiores a 45kN/cm² nas situações consideradas nas figuras 5.28 a 5.31, consideradas a princípio não suficientes para caracterizar uma condição crítica de colapso.

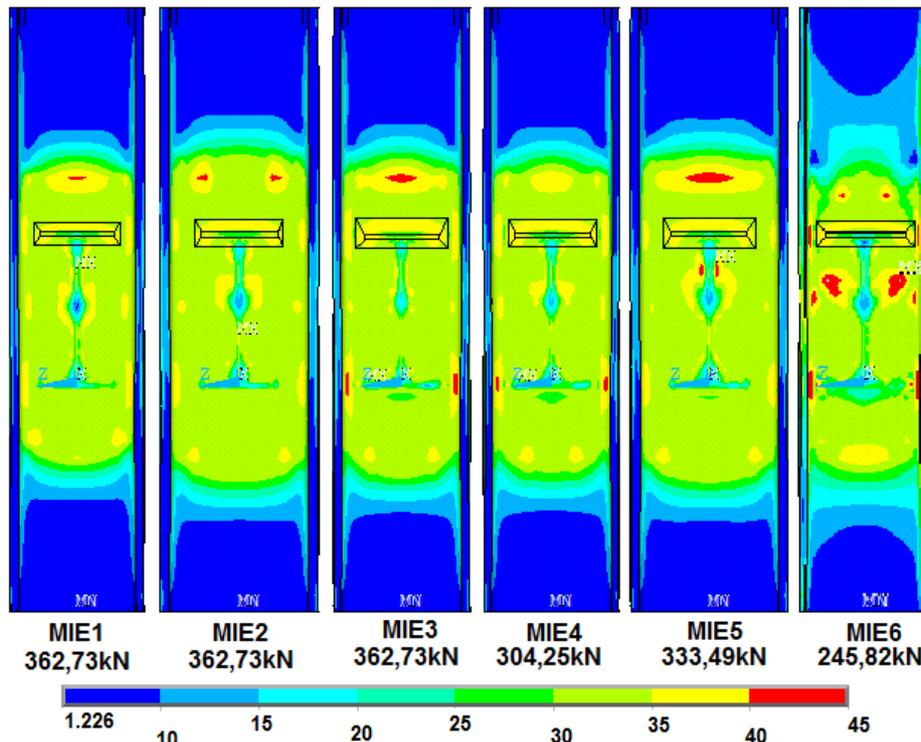


Figura 5.29 – Charneiras plásticas (Distribuição das tensões de Von Mises) - Modelos MIE

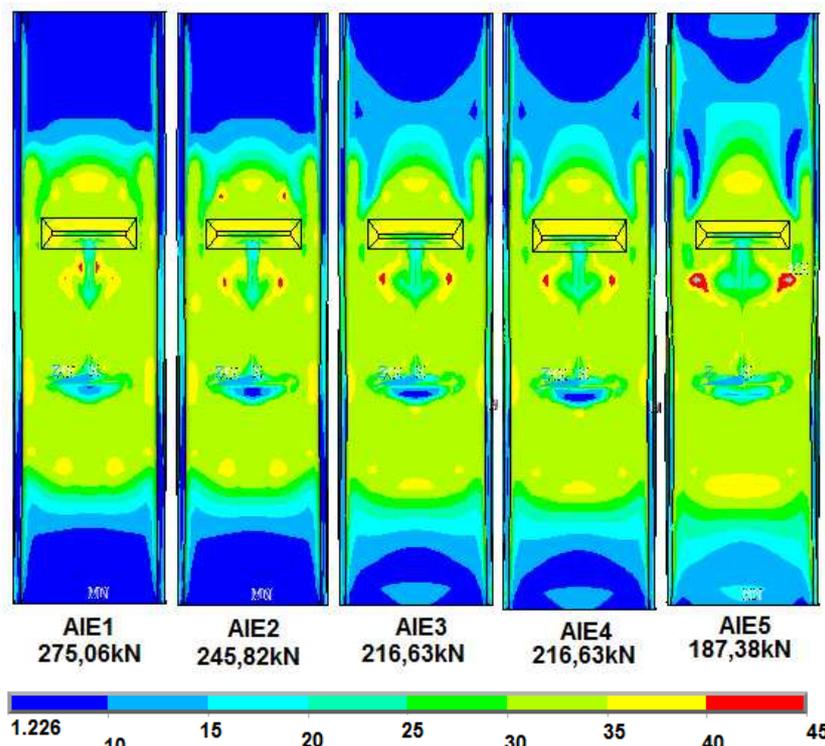


Figura 5.30 – Charneiras plásticas (Distribuição das tensões de Von Mises) - Modelos AIE1 a AIE5

Para as situações escolhidas como críticas medidas as dimensões das regiões de plastificação e, a partir delas, foram obtidos os valores das forças correspondentes (F_{pl} - Blodgett/Lima), de acordo com a metodologia sugerida por Blodgett(1982) e adaptada por Lima (1999). Os valores de F_{pl} - Análise Numérica e F_{pl} - Blodgett/Lima são

apresentados na tabela 5.6 para todos os modelos analisados, não podendo deixar de ser mencionado que, em nenhum caso, a região delimitada pelas linhas de charneira plástica estendeu-se às proximidades da ligação entre a alma e as mesas do pilar, apresentando larguras máximas inferiores à dimensão L_w .

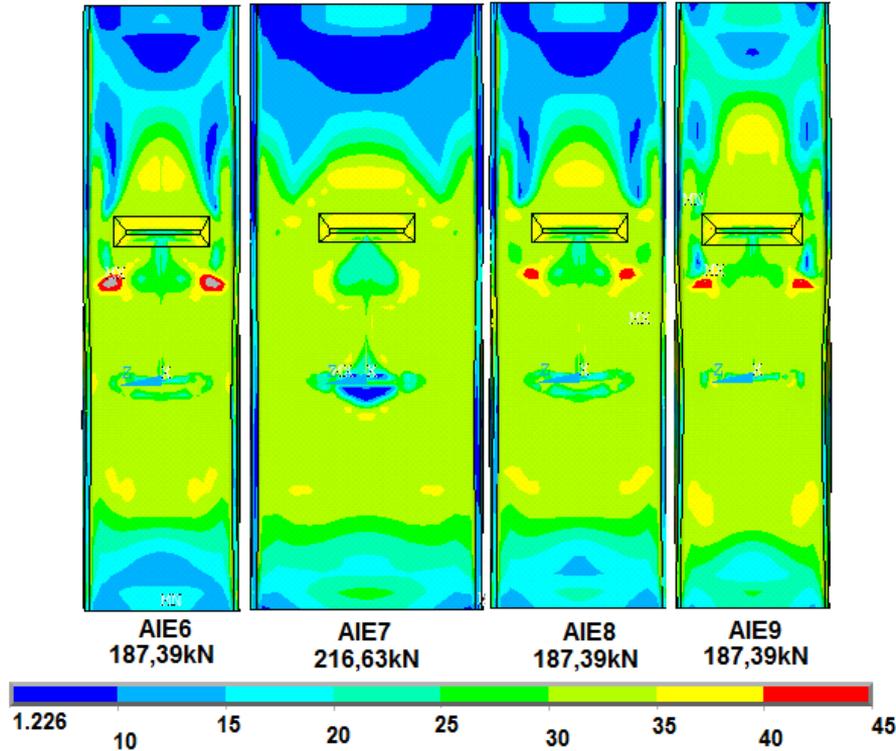


Figura 5.31 – Charneiras plásticas (Distribuição das tensões de Von Mises) - Modelos AIE6 a AIE9

Tabela 5.6 – Valores das forças aplicadas na alma dos pilares através das mesas que gerou a formação das charneiras de plastificação

Classe	Modelos	F_{pl} - Análise Numérica (kN)	F_{pl} - Blodgett/Lima (kN)
Classe 3	AIE1	275,06	481,63
	AIE2	245,82	302,09
	AIE3	216,63	249,77
	AIE4	216,63	190,05
	AIE5	187,39	189,25
	AIE6	187,39	174,23
	AIE7	216,63	439,59
	AIE8	187,39	204,06
	AIE9	187,39	125,46
Classe 2	MIE1	362,73	647,07
	MIE2	362,73	760,77
	MIE3	362,73	506,94
	MIE4	304,25	371,53
	MIE5	333,49	425,46
	MIE6	245,82	303,98
Classe 1	BIE1	625,69	1.218,79
	BIE2	567,30	949,84
	BIE3	450,39	765,87

Além disso, observa-se que apenas os modelos AIE4, AIE6 e AIE9 apresentaram valores de F_{pl} (Blodgett/Lima) inferiores aos correspondentes valores obtidos na análise numérica, enquanto o modelo BIE1 apresentou valor de F_{pl} na análise numérica superior à força de plastificação total da viga.

Desse modo, com base nos resultados da análise numérica, é razoável admitir-se que o modelo de GOMES(1990) resulta em valores bastante conservadores da capacidade resistente da alma do pilar. Portanto, supondo-se que, no âmbito dos modelos analisados neste trabalho, os resultados numéricos sejam mais condizentes com o comportamento da alma do pilar, pode-se estabelecer uma relação - entre esses valores e os valores teóricos - que conduz a um ajuste linear (figura 5.32) associado a um fator de correlação ($R^2 = 0,987$) que pode ser considerado muito bom.

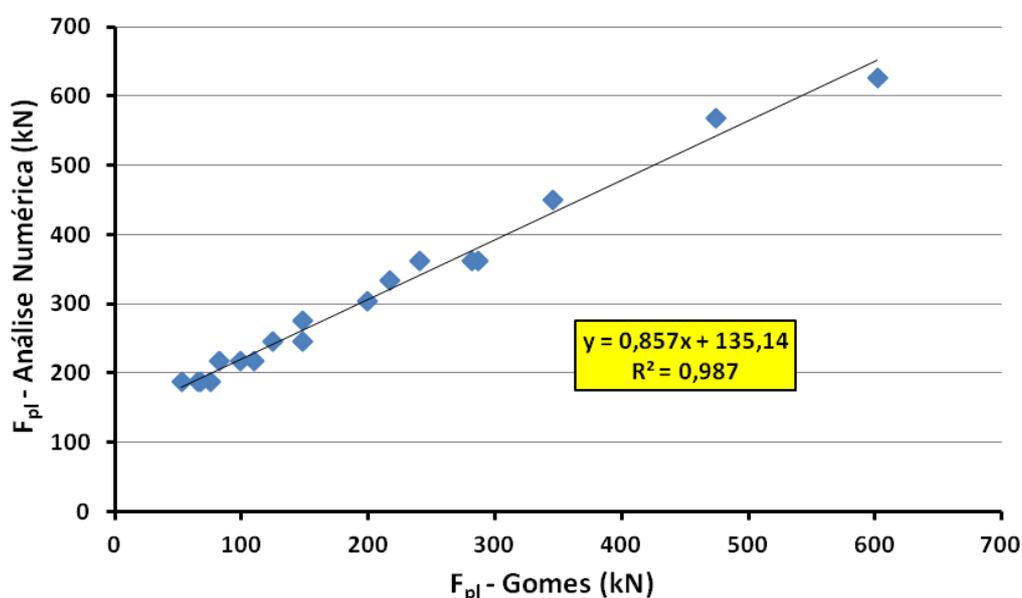


Figura 5.32 - Correlação linear entre os valores de F_{pl} teóricos e numéricos para consideração de formação de charneiras plásticas

Em outras palavras, os valores obtidos na análise numérica poderiam ser obtidos, com razoável aproximação, adotando-se os valores teóricos como a variável "x" da equação de ajuste apresentada na figura 5.32.

5.2.3 – Rigidez Inicial e Comportamento Momento - Rotação

São apresentados na tabela 5.7 os valores teóricos da rigidez inicial dos modelos analisados neste trabalho, juntamente com os valores obtidos na análise numérica, constatando-se que os valores teóricos são inferiores aos obtidos na análise numérica para todos os modelos exceto para os modelos AIE4, AIE6 e AIE5.

Tabela 5.7 – Rigidez inicial (kN.cm/rad): Valores teóricos e obtidos na análise numérica

Modelos	Esbeltez	Valor Teórico Neves(1996/2004)	Análise Numérica
BIE1	14,54	1.406.028	1.751.246
BIE2	16,43	1.135.518	1.363.553
BIE3	19,31	855.574	1.009.162
MIE1	21,26	723.169	1.207.227
MIE2	22,77	590.912	831.726
MIE3	23,21	620.196	922.446
MIE4	25,56	524.076	735.164
MIE5	25,96	469.576	642.506
MIE6	29,61	516.060	574.694
AIE1	31,49	335.039	395.265
AIE2	34,42	286.744	326.538
AIE3	39,75	127.053	201.465
AIE4	43,61	238.572	159.156
AIE5	45,51	100.259	129.927
AIE6	48,31	183.433	113.926
AIE7	50,84	119.155	103.421
AIE8	51,86	85.465	90.031
AIE9	54,14	73.983	79.664

A comparação entre resultados teóricos e resultantes da análise numérica, portanto, possibilita o estabelecimento de correlações diretas razoavelmente satisfatórias (figura 5.33). Entretanto, quando considerados por classes, ressalvando-se a disponibilidade de apenas três pares de resultados na classe 1 (baixo índice de esbeltez), a correlação linear para a classe 3 (AIE) não é tão satisfatória (fator de correlação $R^2 = 0,7721$), como observado na figura 5.34.

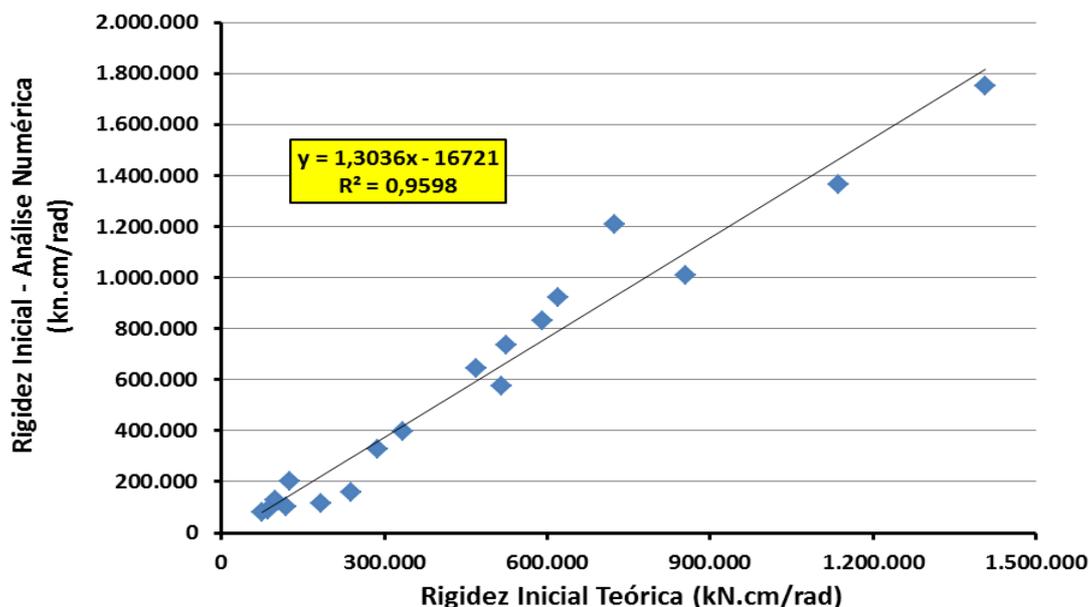


Figura 5.33 - Rigidez inicial teórica x numérica (Ajuste linear para todos os modelos)

Os modelos com valores teóricos superiores aos obtidos na análise numérica não apresentam, aparentemente, nenhuma propriedade geométrica que, individual e

particularmente, seja diferenciada em relação aos demais modelos. As exceções são quanto ao valor de $L - b = 31,2\text{cm}$ no modelo AIE7, bastante superior ao dos demais e quanto ao valor do menor momento de inércia do pilar do modelo AIE4 (igual a 375cm^4) bastante inferior ao dos demais.

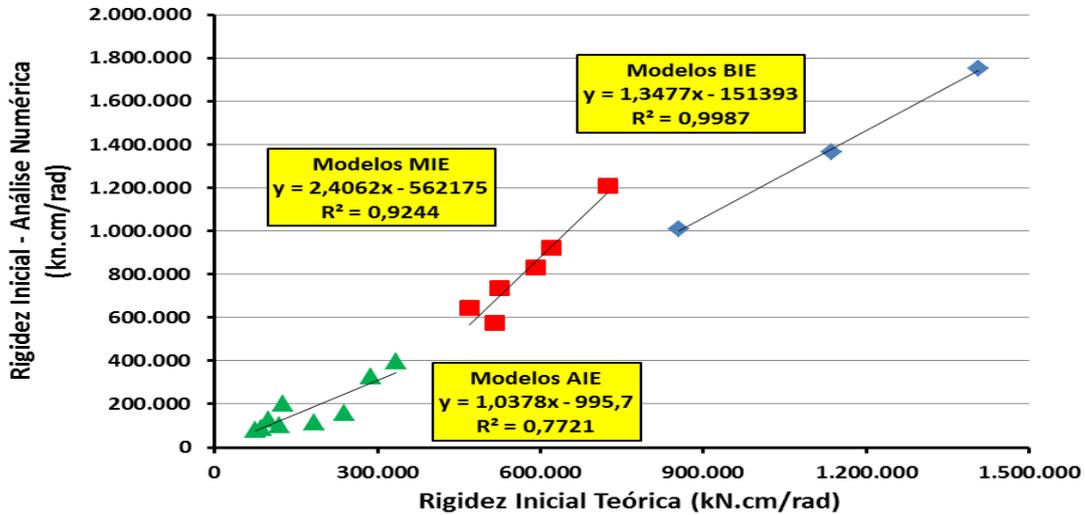


Figura 5.34 - Rigidez inicial teórica x numérica (Ajustes lineares por classe de esbeltez da alma do pilar)

Separando-se os resultados por grupos de modelos com mesma faixa de valores de $L - b$ são obtidas correlações razoavelmente mais satisfatórias que as relacionadas às classes, como apresentado nas figuras 5.35 e 5.36, ressaltando-se que nesta última figura não foram utilizados os valores correspondentes ao modelo AIE7, uma vez que nesse caso o valor de $L - b = 31,2$ é muito superior aos dos demais modelos (entre 12,5cm e 19,2cm).

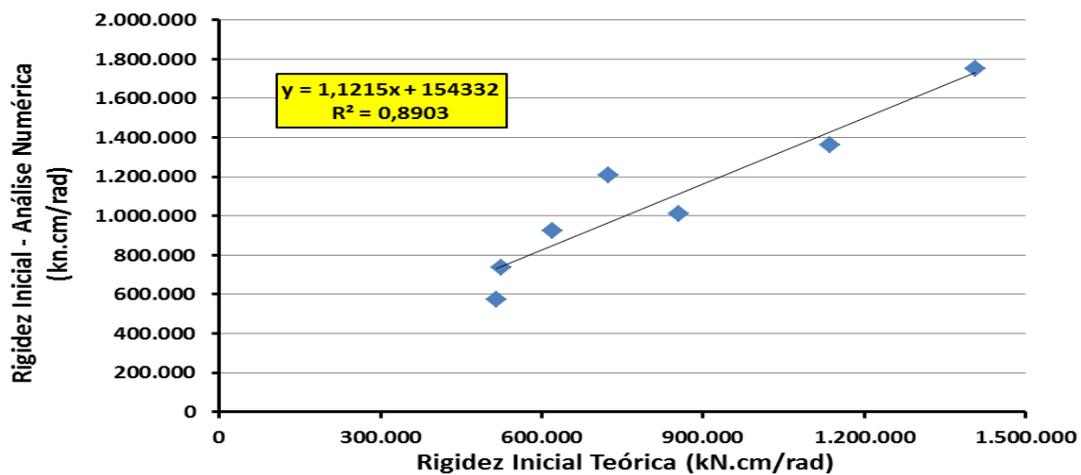


Figura 5.35 - Rigidez inicial teórica x numérica (Modelos com $L - b = 8,20$ e $5,4$)

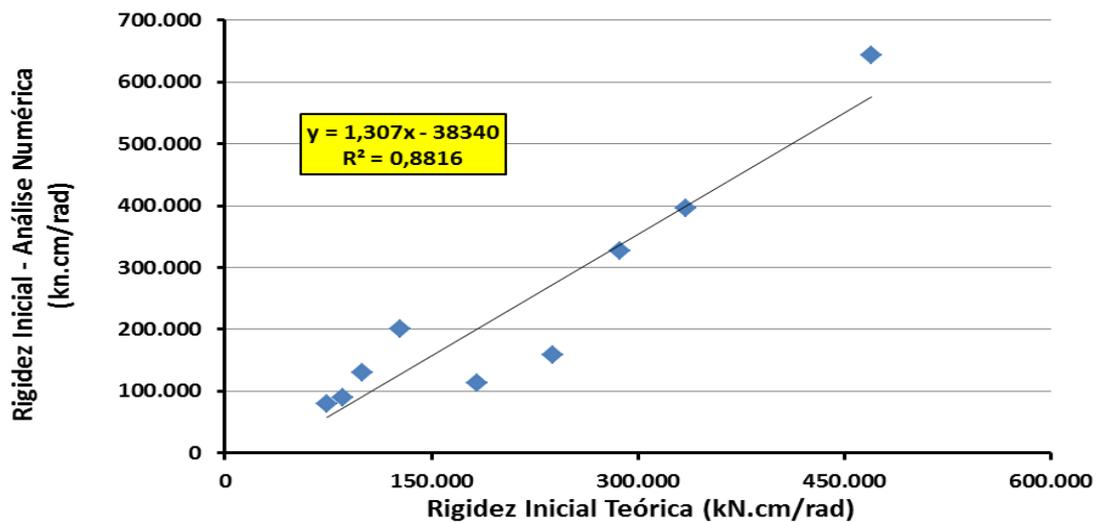


Figura 5.36 - Rigidez inicial teórica x numérica
(Modelos com $L - b = 12,5; 14,3$ e $19,2$)

Uma vez que o modelo teórico de determinação da rigidez inicial leva em consideração somente aspectos relacionados à alma do pilar, a constatação referente ao valor de $L - b$ (correspondente a menores distâncias entre as extremidades laterais das mesas da viga e as faces internas das mesas dos pilares) implica em considerar-se que este parâmetro esteja influenciando o comportamento da ligação, permitindo que a inércia I_z da seção transversal do pilar (flexão em relação ao plano coincidente com o plano médio da alma do mesmo) contribua para o enrijecimento inicial da ligação.

A análise da capacidade rotacional das ligações pode ser feita por intermédio dos valores obtidos, via análise numérica, para o deslocamento da extremidade da viga, uma vez que, como já mencionado, a rotação da ligação, nos casos estudados, mostrou-se praticamente dependente apenas da alma do pilar.

Assim, de acordo com a NBR8800 (ABNT, 2008), o deslocamento da extremidade de uma viga em balanço, com 150cm de comprimento, deve ser no máximo igual a $L/350 = 0,857$ cm, onde L é tomado como duas vezes o comprimento real da viga em balanço, ou seja $L = 300$ cm, resultando em flecha máxima de 0,857cm.

Para analisar o comportamento rotacional das ligações, são apresentados na tabela 5.8 os valores obtidos para o deslocamento vertical da extremidade livre da viga, considerando-se as situações de solicitação definidas pela plastificação da alma do pilar considerando-se os binários obtidos segundo o modelos de GOMES(1990) e de Blodgett (1982)/Lima (1999), respectivamente designados por F_{pl} (GOMES(1990)) e F_{pl} (Blodgett/Lima).

Tabela 5.8 – Deslocamentos verticais (cm) da extremidade das vigas obtidos na análise numérica

Classe	Modelos	F_{pl} (Blodgett/Lima)	F_{pl} (GOMES(1990))
Classe 3	AIE1	-22,73	-3,95
	AIE2	-14,45	-3,63
	AIE3	-13,94	-4,02
	AIE4	-10,34	-2,24
	AIE5	-12,76	-3,89
	AIE6	-11,58	-4,57
	AIE7	-28,21	-5,93
	AIE8	-13,84	-5,12
	AIE9	-11,21	-3,24
Classe 2	MIE1	-6,22	-2,43
	MIE2	-11,25	-3,43
	MIE3	-6,21	-3,15
	MIE4	-25,36	-2,39
	MIE5	-32,08	-3,41
	MIE6	-18,05	-3,40
Classe 1	BIE1	-10,14	-7,15
	BIE2	-21,91	-6,02
	BIE3	-13,02	-4,11

Observa-se, portanto, que os deslocamentos, em ambos os casos, são muito superiores ao valor máximo admitido pela NBR8800 (ABNT, 2008). Dessa forma, para os modelos analisados neste trabalho, a condição crítica é sempre definida por esta limitação, sendo possível verificar-se na análise numérica qual a sollicitação (tabela 5.9), em cada um dos modelos, em termos da força aplicada na mesa (F_{mesa}) e do momento que sollicita a ligação ($M_{\text{ligação}}$), correspondente ao deslocamento vertical de 0,857cm da extremidade das vigas.

Tabela 5.9 – Forças atuantes nas mesas da viga e momentos na ligação para deslocamento vertical de L/350 (NBR8800) da extremidade das vigas

Classes	Modelos	F_{mesa} (kN)	$M_{\text{ligação}}$ (kN.cm)
Classe 3	AIE1	70,50	2.413
	AIE2	70,50	2.413
	AIE3	41,28	1.413
	AIE4	41,28	1.413
	AIE5	41,28	1.413
	AIE6	16,80	575
	AIE7	16,80	575
	AIE8	16,80	575
	AIE9	16,80	575
Classe 2	MIE1	216,61	7.412
	MIE2	187,39	6.412
	MIE3	128,95	4.413
	MIE4	158,17	5.413
	MIE5	128,95	4.413
	MIE6	128,95	4.413
Classe 1	BIE1	99,72	3.412
	BIE2	99,72	3.412
	BIE3	99,72	3.412

Os valores obtidos possibilitam, como apresentado na figura 5.37, uma correlação bastante satisfatória entre a esbeltez e o momento que atua nas ligações, considerando-se o deslocamento vertical da extremidade da viga igual a 0,857cm, por intermédio de uma função exponencial, válida entretanto apenas para os modelos das classes 2 e 3, uma vez que os resultados obtidos para os modelos da classe 1 não foram afetados pela esbeltez.

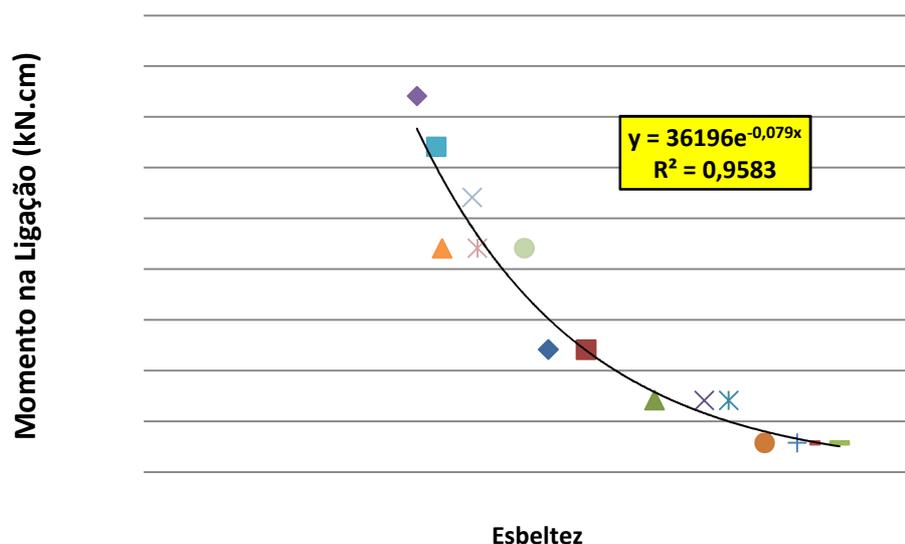


Figura 5.37 - Momento na Ligação x Esbeltez (Modelos das classes 2 e 3) para deslocamentos da extremidade da viga igual a 0,857cm

RESULTADOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS NUMÉRICOS: COMPARAÇÕES

6.1 – Considerações Iniciais

Este capítulo tem como objetivo avaliar o grau de representatividade dos modelos numéricos tratados neste trabalho, comparando-os com os resultados da análise experimental.

6.2 – Modelo AIE5

6.2.1 - Deslocamentos da Viga

No modelo numérico, o deslocamento vertical da extremidade da viga, considerando-se a plastificação da alma indicada pelo mecanismo de Blodgett(1982)/Lima(1999) foi de 12,76cm, enquanto nos ensaios experimentais foram obtidos valores de 10,8cm e 12,1cm, respectivamente para os ensaios AIE5a e AIE5b.

Na figura 6.1 são apresentados os deslocamentos obtidos na análise numérica da viga do modelo AIE5, juntamente com os deslocamentos obtidos na análise experimental dos protótipos AIE5a e AIE5b.

Observa-se que o ensaio AIE5b apresentou valores de deslocamentos verticais da viga mais próximos aos obtidos no modelo numérico, inclusive com valor final de carregamento bastante próximo ao correspondente à plastificação da alma do pilar, segundo o modelo adotado. Adicionalmente, constatou-se que o comportamento da viga, tanto na análise numérica quanto experimental, praticamente não apresentou dependência dos níveis de solicitação, sofrendo deslocamentos verticais com variação linear ao longo do comprimento.

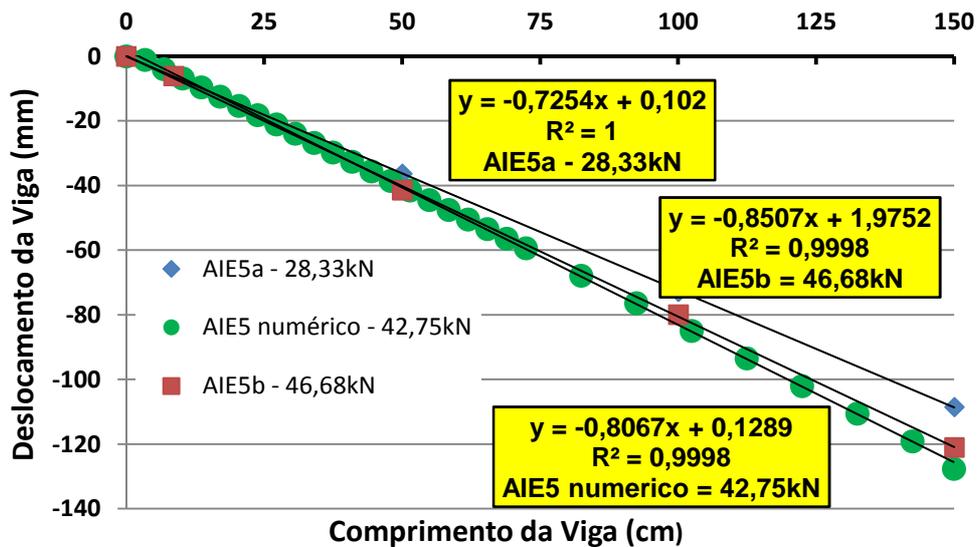


Figura 6.1 – Deslocamentos verticais das vigas dos protótipos AIE5 e do modelo numérico AIE5.

6.2.2 – Deslocamentos da Alma do Pilar

Para a análise do comportamento da alma do pilar foram utilizados os resultados de deslocamento indicados pelos LVDT's 5, 6, 7 e 8, posicionados na parte posterior da alma do pilar. Já nos modelos numéricos, foram coletados os deslocamentos exatamente nos pontos de instalação dos LVDT's dos ensaios.

Os resultados obtidos demonstram comportamento similar para as deformações das almas dos protótipos AIE5a e AIE5b. Já para o modelo numérico AIE5, para a carga de plastificação 42,75kN o deslocamento da alma do pilar se deu de forma simétrica porém com deslocamentos muito menores do que nos protótipos AIE5a e AIE5b. O gráfico de deslocamentos das alma do pilar dos protótipos AIE5a e AIE5b, assim como o deslocamento obtido pelo modelo numérico é apresentado na figura 6.2.

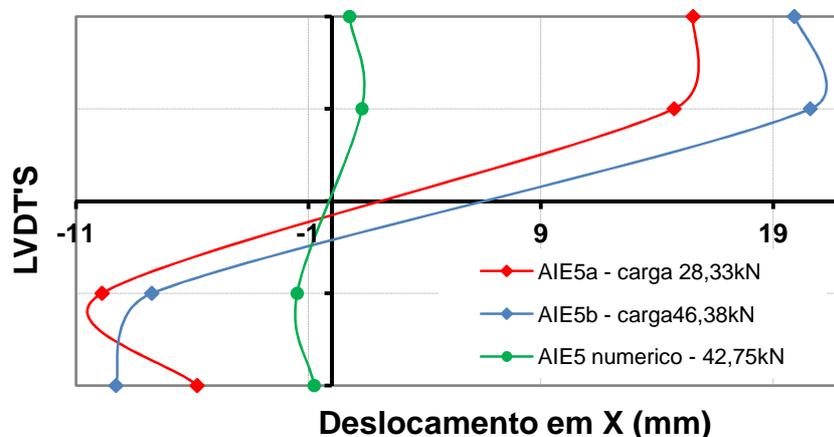


Figura 6.2 – AIE5: Deslocamentos das almas dos pilares para as cargas finais de ensaio e de plastificação do modelo numérico.

6.2.3 – Momento x Rotação

Os gráficos momento x rotação dos protótipos AIE5a e AIE5b foram obtidos conforme descrito anteriormente e comparados com o momento x rotação obtido para o modelo numérico também descrito anteriormente.

Nas figuras 6.3 e 6.4 são apresentadas as curvas momento-rotação comparativas dos resultados obtidos para os protótipos AIE5a e AIE5b com os resultados do modelo numérico AIE5 considerando-se, respectivamente, a rotação da alma dos pilares e das vigas. Observa-se que as curvas momento-rotação obtidas com os resultados da análise numérica podem ser consideradas, em ambos os casos, como razoavelmente representativas da média dos resultados experimentais.

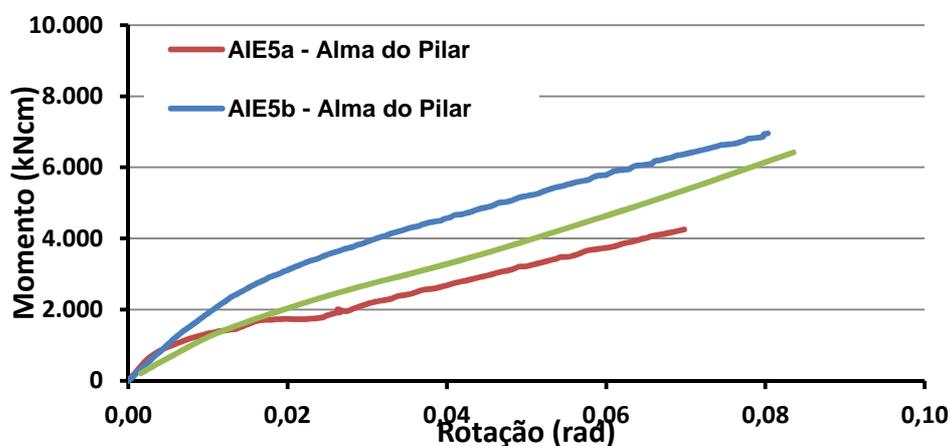


Figura 6.3 – AIE5: Curvas Momento x Rotação da alma do pilar

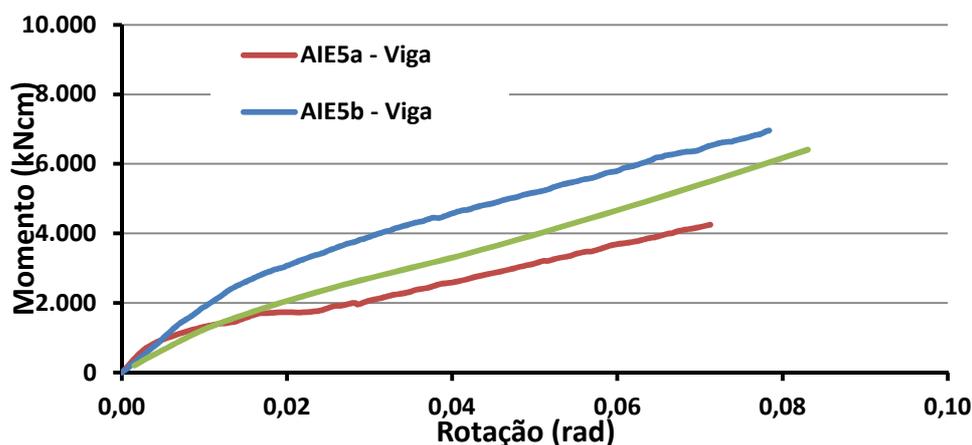


Figura 6.4 – AIE5: Curvas Momento x Rotação da viga

Entretanto, analisando-se os resultados obtidos para a rigidez inicial (tabela 6.1), observa-se que os resultados da análise numérica são inferiores aos obtidos nos ensaios,

com reduções de 46,4% e 44,6%, respectivamente aos valores médios obtidos para a alma do pilar e para a viga dos protótipos ensaiados.

Tabela 6.1 - AIE5: Rigidez inicial (kN.cm/rad)

	Alma do Pilar	Viga
AIE5a	238.544	237.852
AIE5b	220.689	204.505
AIE5 numérico	129.297	129.926

6.2.4 – Solicitações nas mesas da viga

Para obtenção das solicitações nas mesas da viga dos modelos numéricos, foram coletados os resultados de tensão nos pontos instrumentados por extensômetros nos protótipos AIE5a e AIE5b. Esses valores, multiplicados pela área de cada mesa da viga, são correspondentes aos valores obtidos nos ensaios, como descrito no Capítulo 4, ou seja, calculando-se as médias dos valores de deformação específica em cada extensômetro, multiplicando-se esses valores pelo módulo de elasticidade do material e, posteriormente, pela área das mesas para obtenção das forças que as mesas da viga transmitem à alma do pilar.

Os valores das forças transmitidas pelas mesas, em função dos momentos aplicados às ligações, são apresentados nas figuras 6.5 e 6.6, respectivamente para os protótipos AIE5a e AIE5b, juntamente com os valores teóricos, obtidos pela divisão do momento fletor pela distância entre os planos médios das mesas da viga.

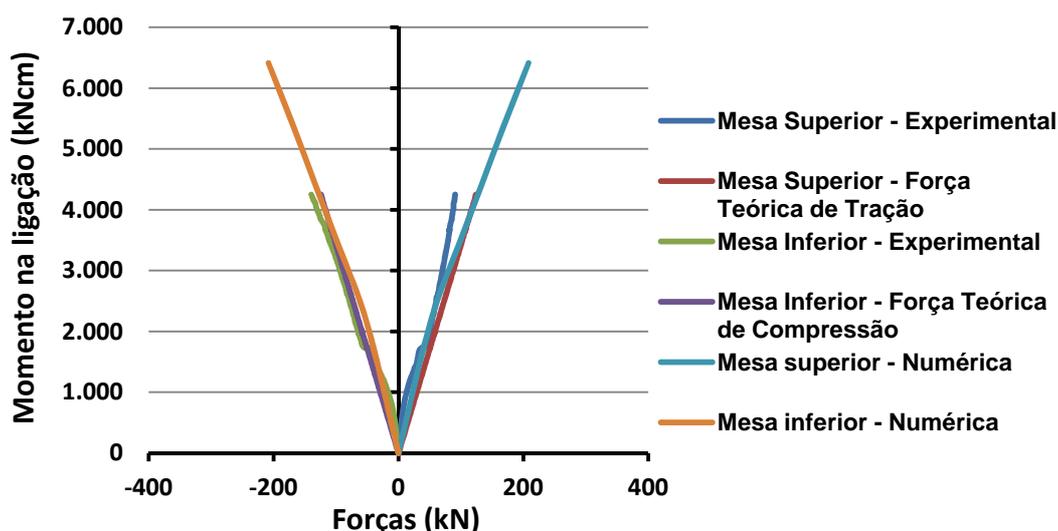


Figura 6.5 – Variação das forças de tração e compressão transmitidas pelas mesas da viga em função do momento na ligação (Protótipos AIE5a e Modelo numérico AIE5)

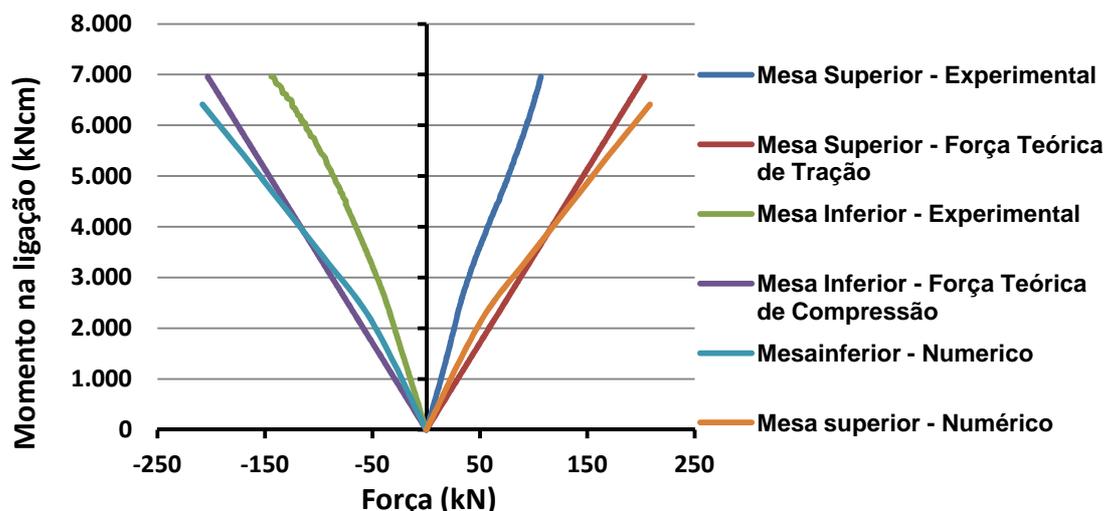


Figura 6.6 – Variação das forças de tração e compressão transmitidas pelas mesas da viga em função do momento na ligação (Protótipos AIE5b e Modelo numérico AIE5)

É importante ressaltar que houve uma razoável concordância entre os valores obtidos no ensaio do protótipo AIE5a, embora isso não tenha sido observado no protótipo AIE5b, mesmo para os estágios iniciais de carregamento.

6.2.5.– Tensões na alma da viga

Como já mencionado anteriormente, para analisar as solicitações na alma da viga foram utilizados os resultados fornecidos pelos extensômetros 14, 15 e 16, posicionados na alma da viga dos protótipos, obtendo-se na análise numérica os resultados correspondentes a esses pontos. Assim, nas figuras 6.7 a 6.9 são mostrados os comportamentos da alma da viga, respectivamente para o protótipos AIE5a e AIE5b e para o modelo numérico AIE5, para diferentes valores de forças aplicadas na extremidade livre da viga.

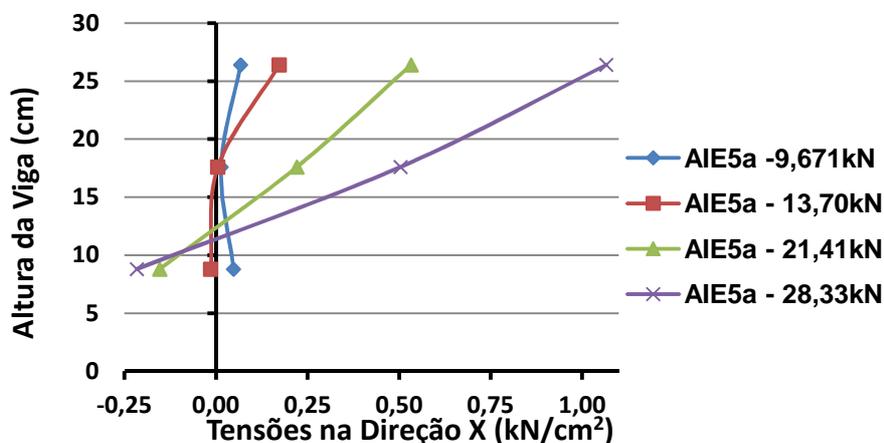


Figura 6.7 – Variação das tensões longitudinais na alma da viga (Protótipo AIE5a)

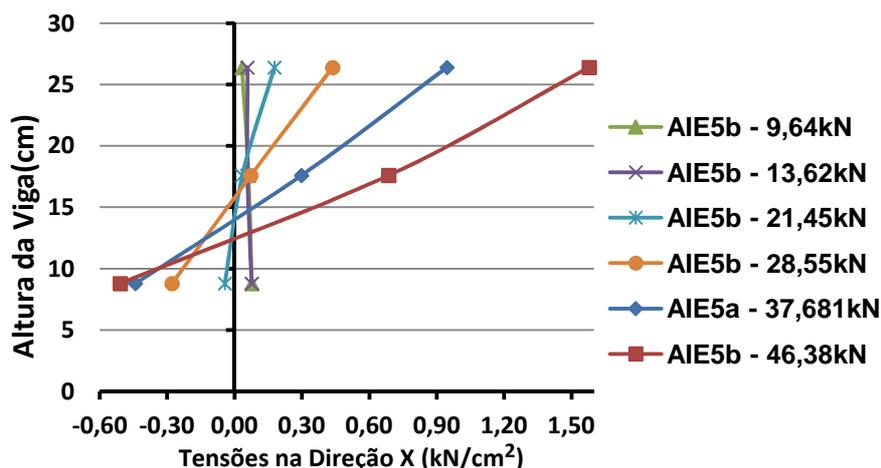


Figura 6.8 – Variação das tensões longitudinais na alma da viga (Protótipo AIE5b)

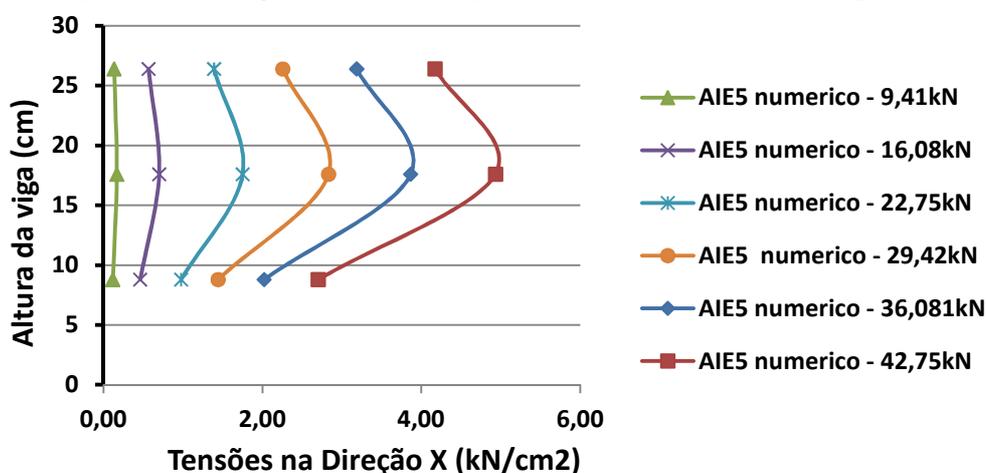


Figura 6.9 – Variação das tensões longitudinais na alma da viga (Modelo numérico AIE5)

Constata-se, portanto, que as distribuições de tensões na análise numérica são sensivelmente diferentes das obtidas nos ensaios, com valores bastante superiores e, inclusive, sem a caracterização de tensões de compressão em situações de carregamento mais elevado.

6.2.6.– Tensões na Alma do Pilar

Para a comparação dos resultados das análises experimental e numérica são utilizadas as tensões de Von Mises, como apresentado na figura 6.10 para as rosetas 1 e 2, indicando-se também a tensão nominal de escoamento do material. Observa-se que, para a roseta 1 (situada acima da mesa tracionada da viga), os resultados da análise numérica variam de forma semelhante à variação verificada nos ensaios, porém alcançam o valor de $34,5\text{kN/cm}^2$ para um valor intermediário do momento solicitante

(aproximadamente 2.400kN.cm), relativamente aos valores obtidos nos ensaios (1.700kN.cm e 2.800kN.cm, respectivamente para os protótipos AIE5a e AIE5b).

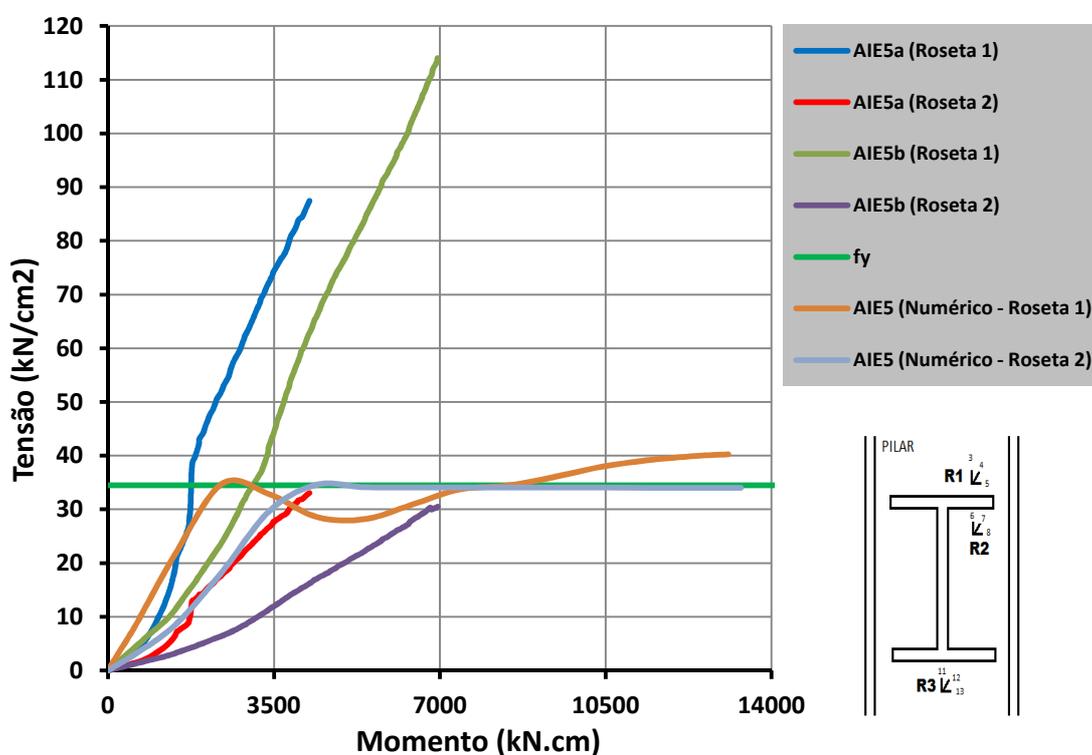


Figura 6.10 – Tensões de Von Mises na alma do pilar dos protótipos AIE5a e AIE5b e do modelo numérico AIE5 (Rosetas 1 e 2).

Já para a roseta 2, os resultados numéricos foram bastante próximos aos obtidos no ensaio do protótipo AIE5a, atingindo-se a tensão nominal de escoamento do material para momento solicitante de aproximadamente 4.400kN.cm, superior ao valor final do mencionado ensaio.

A grande diferença, portanto, ocorreu para o comportamento das tensões de Von Mises na roseta 1, observando-se uma pequena redução na análise numérica para momentos na faixa entre 2.400kN.cm e 8.400kN.cm, com retomada de crescimento a partir desse ponto, enquanto nos ensaios a tensão de Von Mises foi sempre crescente.

É importante ressaltar, ainda, que, embora fora da faixa de carregamento obtida nos ensaios, as tensões de Von Mises na roseta 2 mostraram-se praticamente constantes, na análise numérica a partir do momento solicitante igual a 4.400kN.cm.

Na roseta 3 os resultados obtidos na análise experimental diferiram sensivelmente dos obtidos na análise numérica (figura 6.11), uma vez que, nessa última, as tensões cresceram para momentos solicitantes até aproximadamente 2.000kN.cm e 4.100kN.cm (respectivamente para os protótipos AIE5a e AIE5b), enquanto na análise

numérica o crescimento foi praticamente linear até o valor de aproximadamente 2.400kN.cm, correspondente a tensão aproximadamente igual à tensão nominal de escoamento do material, mantendo-se praticamente constante até o final da análise.

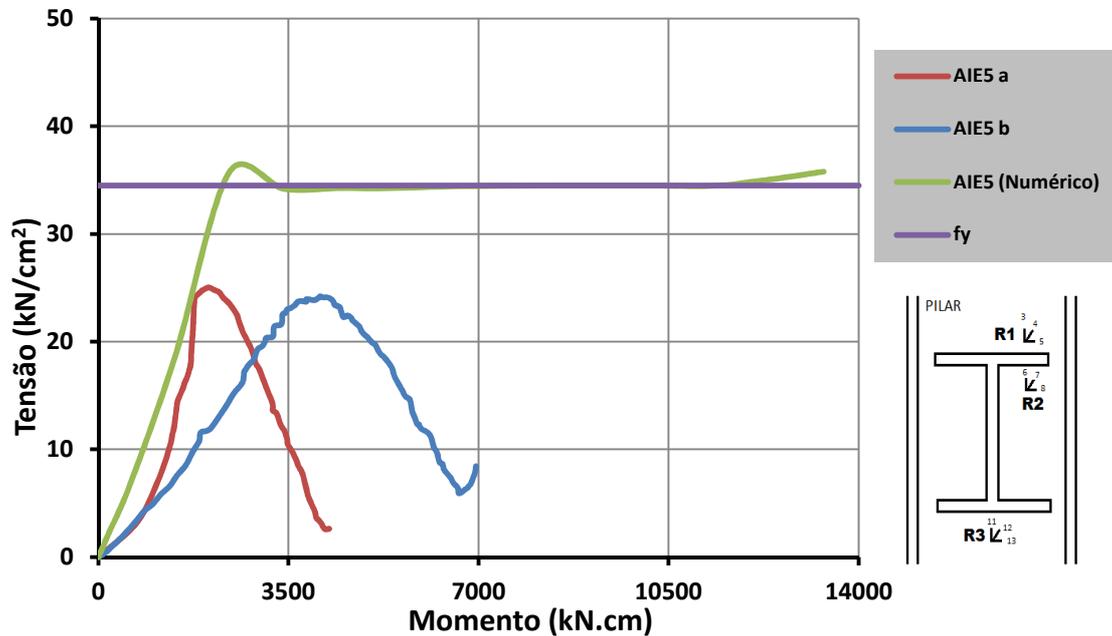


Figura 6.11 – Tensões de Von Mises na alma do pilar dos protótipos AIE5a e AIE5b e do modelo numérico AIE5 (Roseta 3).

6.3 – Modelo MIE2

6.3.1 - Deslocamentos da Viga e da Alma do Pilar

Para a situação caracterizada pela plastificação da alma indicada pelo mecanismo de Blodgett(1982)/Lima(1999), a extremidade da viga no modelo numérico MIE2 deslocou-se 8,13cm verticalmente, enquanto nos ensaios experimentais foram verificados deslocamentos de 4,76 cm e 7,8 cm, respectivamente para os protótipos MIE2b e MIE2a.

Os deslocamentos finais da viga do modelo MIE2 são apresentados na figura 6.12, juntamente com os deslocamentos obtidos nos ensaios dos protótipos MIE2a e MIE2b.

Além da verificação da variação praticamente linear ao longo do comprimento da viga, tanto na análise experimental quanto numérica, constata-se que os

deslocamentos obtidos no ensaio do protótipo MIE2a mostram-se muito próximos dos apresentados no modelo numérico correspondente, inclusive em termos do carregamento aplicado.

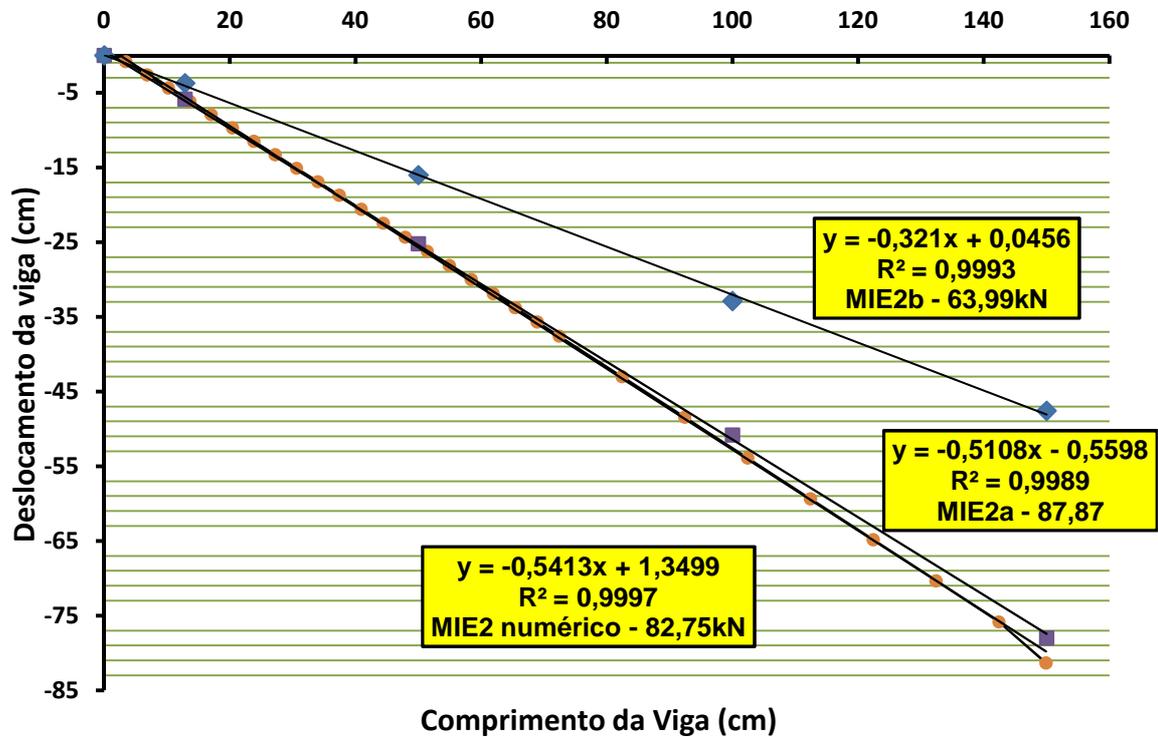


Figura 6.12 – Deslocamentos verticais das vigas dos protótipos MIE2 e do modelo numérico MIE2.

6.3.2 - Deslocamentos da Alma do Pilar

Os resultados referentes aos deslocamentos horizontais da alma do pilar são apresentados na figura 6.13, para os mesmos carregamentos considerados no item anterior, ou seja, carregamento final da análise experimental e carregamentos correspondentes à plastificação da alma indicada pelo mecanismo de Blodgett(1982)/Lima(1999) na análise numérica.

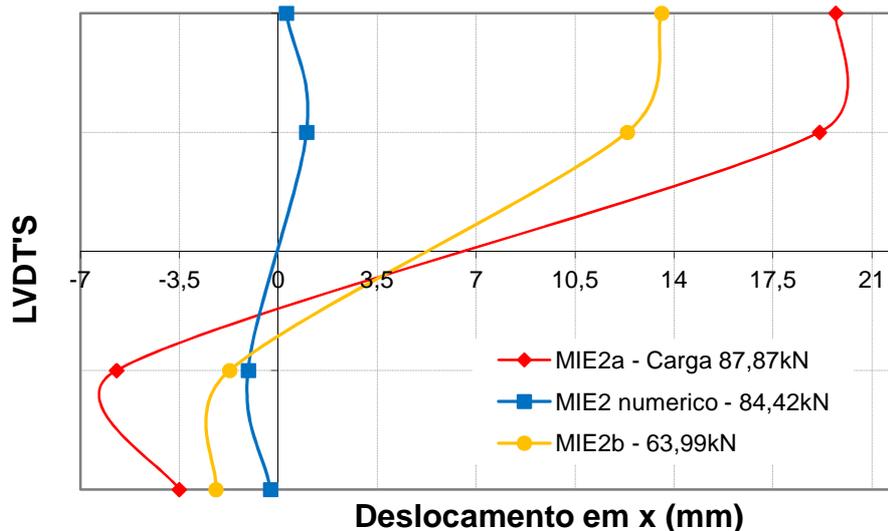


Figura 6.13 – MIE2: Deslocamentos das almas dos pilares para as cargas finais de ensaio e de plastificação do modelo numérico.

Embora os resultados obtidos na análise experimental sejam coerentes para os protótipos MIE2a e MIE2b, considerando-se os carregamentos aplicados, observa-se que na análise numérica, mesmo com carregamento muito próximo ao do protótipo MIE2a, os deslocamentos foram muito menores, observando-se ainda uma razoável simetria acima e abaixo da linha neutra teórica da viga.

6.3.3 - Momento x Rotação

A comparação das curvas momento rotação obtidas a partir dos deslocamentos horizontais da alma do pilar e dos deslocamentos verticais da viga são apresentados nas figuras 6.14 e 6.15, respectivamente.

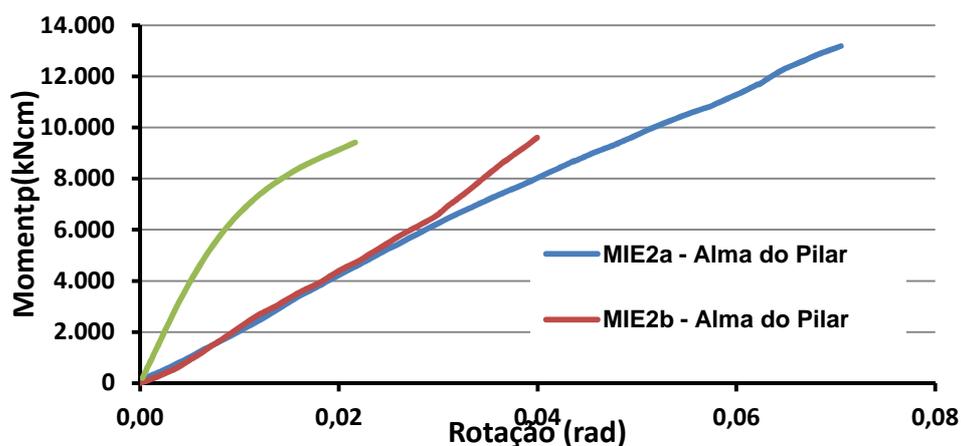


Figura 6.14 – MIE2: Curvas Momento x Rotação da alma do pilar

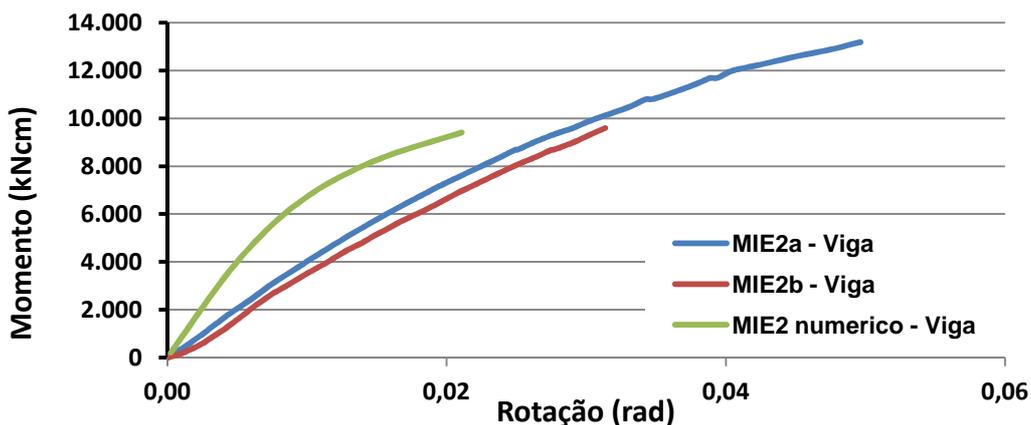


Figura 6.15 – MIE2: Curvas Momento x Rotação da viga

Os resultados obtidos para a rigidez inicial são apresentados na tabela 6.2. A diferença, já comentada, entre o comportamento da viga e da alma do pilar fica mais evidente com esses resultados, observando-se que na análise experimental a rigidez inicial medida pela rotação da viga mostra-se, respectivamente para os modelos MIE2a e MIE2b, 122,3% e 71,9% superior à rigidez inicial obtida pela rotação da alma do pilar. Já para o modelo numérico MIE2, a diferença entre os valores de rigidez inicial é de apenas 3%, porém bastante superior aos valores para obtidos nos ensaios dos protótipos MIE2a e MIE2b.

Tabela 6.2 - MIE2: Rigidez inicial (kN.cm/rad)

	Alma do Pilar	Viga
MIE2a	192.596	428.577
MIE2b	225.018	387.052
AIE5 numérico	831.726	813.810

6.3.4 - Solicitações nas mesas da viga

Nas figuras 6.16 e 6.17 são apresentadas, respectivamente para os protótipos MIE2a e MIE2b, as comparações das curvas teóricas de transmissão do momento fletor pelas mesas com as obtidas nas análises numérica e experimental.

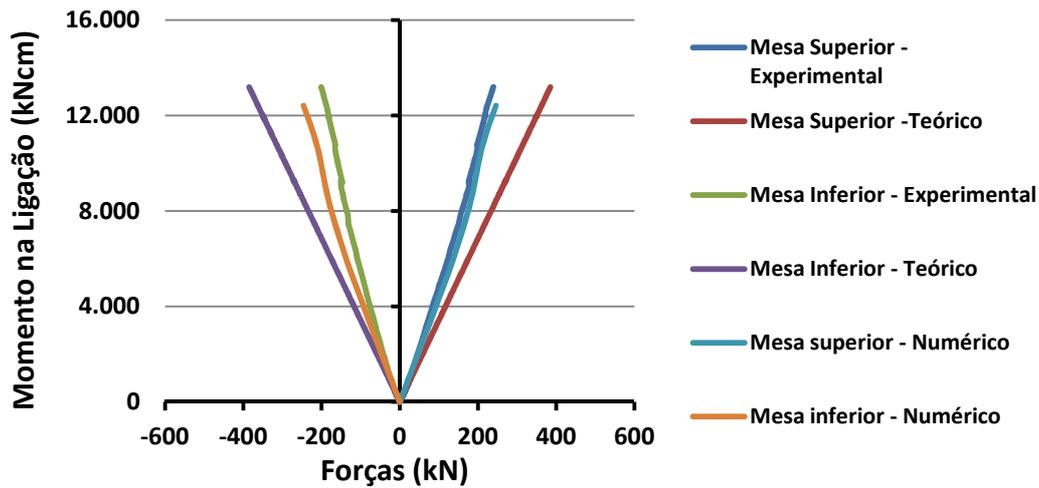


Figura 6.16 – Variação das forças de tração e compressão transmitidas pelas mesas da viga em função do momento na ligação (Protótipos MIE2a e Modelo numérico MIE2)

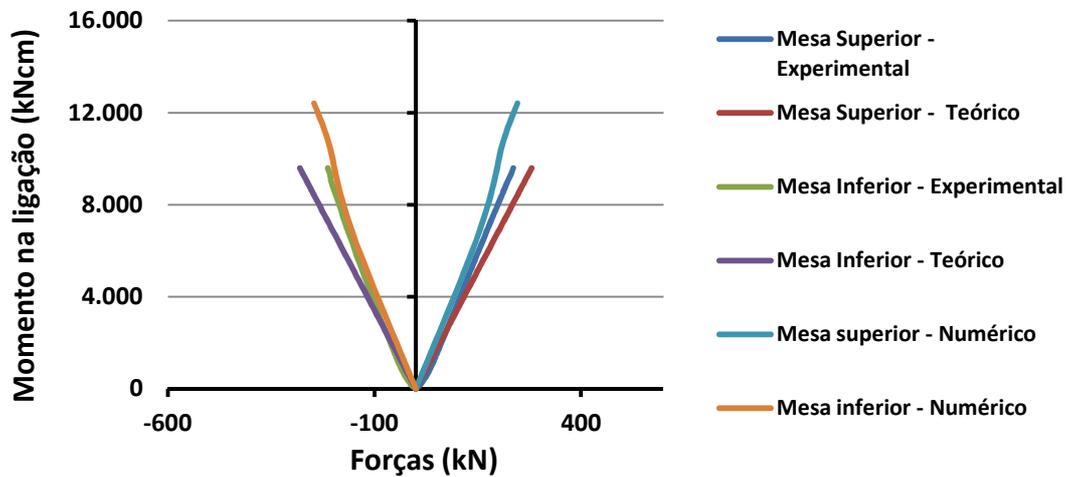


Figura 6.17 – Variação das forças de tração e compressão transmitidas pelas mesas da viga em função do momento na ligação (Protótipos MIE2b e Modelo numérico MIE2)

Os resultados experimentais e numéricos são razoavelmente próximos, tanto para o protótipo MIE2a quanto para o MIE2b mas, em ambos os casos, os valores teoricamente previstos para a transmissão dos esforços pelas mesas são superiores, confirmando-se o conservadorismo de tal consideração, devido à flexibilidade da alma do pilar.

6.3.5 – Tensões na alma da viga

Nas figuras 6.18 a 6.20 são apresentadas, respectivamente para os protótipos MIE2a e MIE2b e para o modelo numérico MIE2, as tensões obtidas na alma da viga, para diferentes valores da carga aplicada à extremidade da viga.

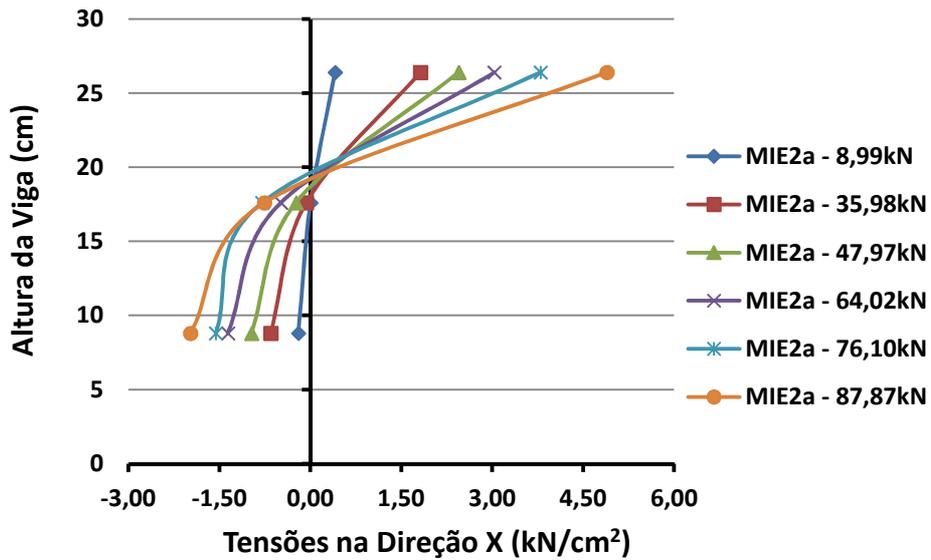


Figura 6.18 – Variação das tensões na alma da viga (Protótipo MIE2a)

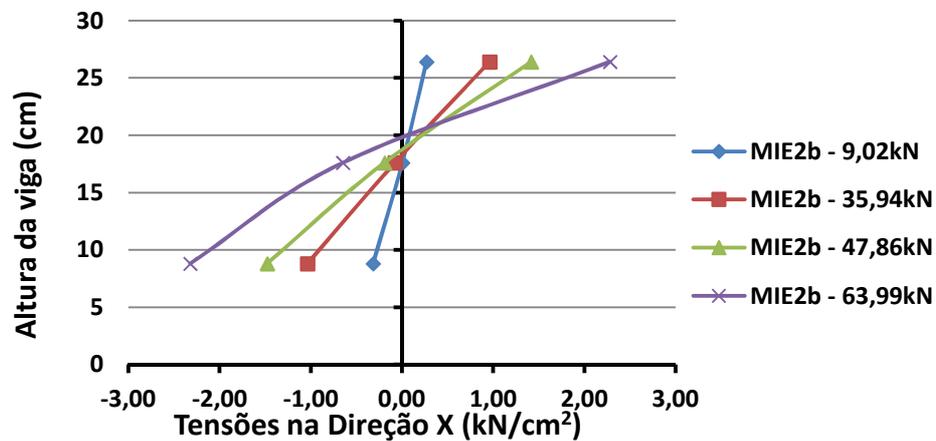


Figura 6.19 – Variação das tensões na alma da viga (Protótipo MIE2b)

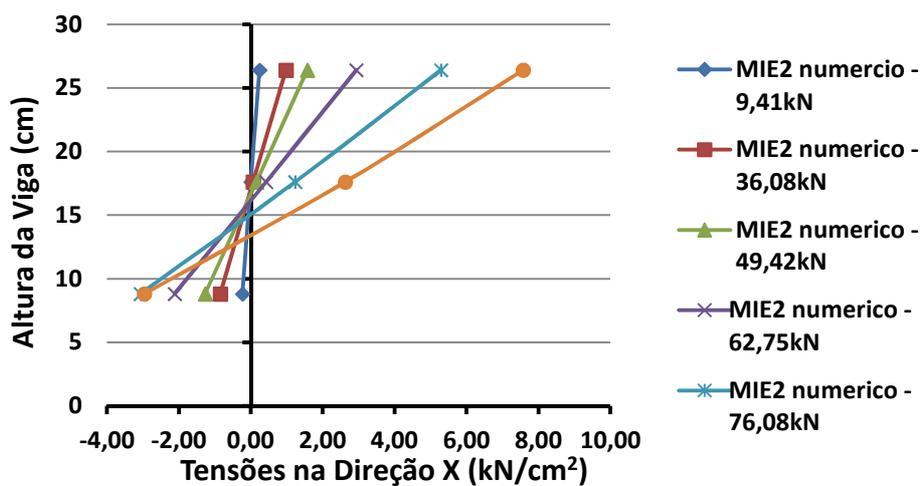


Figura 6.20 – Variação das tensões na alma da viga (Modelo numérico MIE2)

Ao contrário do que foi observado no caso da classe 3 (alto índice de esbelteza), os resultados numéricos apresentaram-se com uma certa coerência na forma de variação, quando comparados com os resultados obtidos na análise experimental, embora com valores superiores (especialmente nas proximidades da mesa tracionada da viga) e apresentando uma maior variação da posição do ponto correspondente a tensões nulas na direção X.

6.3.6 – Tensões na Alma do Pilar

Em termos do critério das tensões de Von Mises, na figura 6.21 são apresentadas as curvas de variação da tensão crítica com o momento fletor nas ligações, observando-se que a tensão crítica foi atingida na roseta 1 para momentos aproximadamente iguais a 8.700kN.cm e 6.900kN.cm, respectivamente para os protótipos MIE2a e MIE2b.

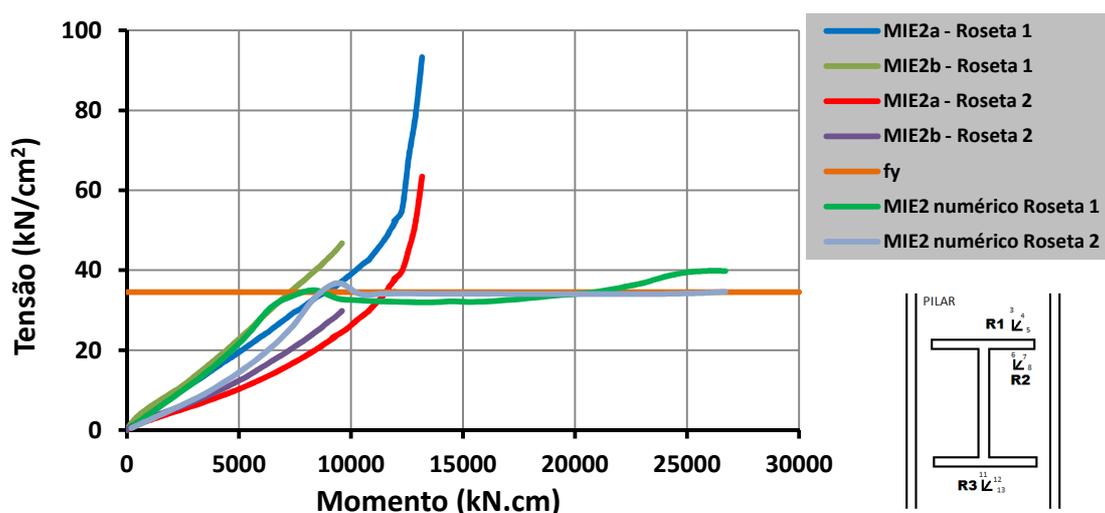


Figura 6.21 – Tensões de Von Mises na alma do pilar dos protótipos MIE2a e MIE2b e do modelo numérico MIE2 (Rosetas 1 e 2)

Na roseta 2 a tensão crítica foi atingida para momento fletor de aproximadamente 11.400kN.cm para o protótipo MIE2a, atingindo 30,58kN/cm² (muito próximo de 34,5kN/cm²) ao final do ensaio do protótipo MIE2b (momento fletor de aproximadamente 9.600kN.cm).

Em relação ao modelo numérico MIE2, tanto na região da roseta 1 quanto 2, observa-se uma razoável correspondência com os valores obtidos experimentalmente no protótipo MIE2b e, como no caso anterior, uma tendência de estabilização das tensões

em valores próximos à tensão nominal de escoamento do material para etapas correspondentes às maiores solicitações.

As tensões de Von Mises para a região instrumentada pela roseta 3 são apresentadas na figura 6.22, observando-se que as tensões críticas são atingidas para momentos fletores aproximadamente iguais a 8.400kN.cm e 7.400kN.cm, respectivamente para os protótipos MIE2a e MIE2b. Já as para o modelo numérico MIE2, o valor da tensão nominal de escoamento foi atingido para o momento fletor d3e aproximadamente 7500kN.cm, mantendo-se praticamente constantes para valores superiores, mas com razoável aproximação dos valores experimentais nas etapas iniciais de carregamento.

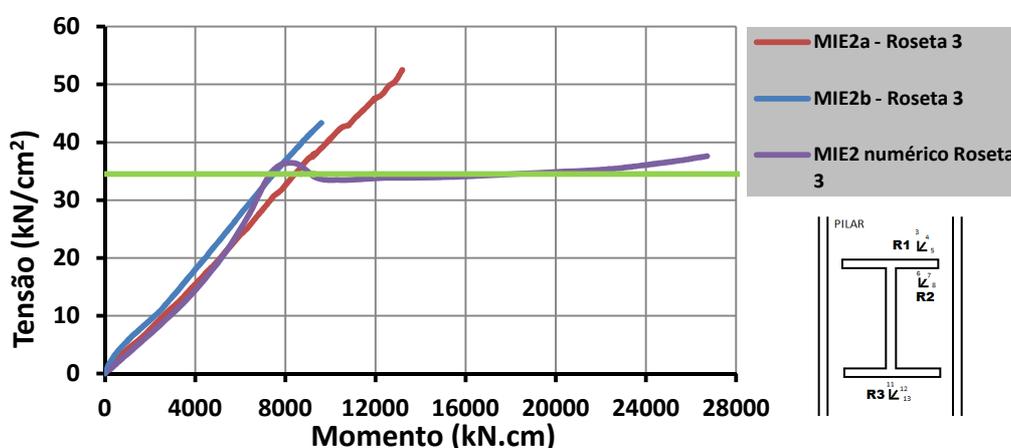


Figura 6.22 – Tensões de Von Mises na alma do pilar dos protótipos MIE2a e MIE2b e do modelo numérico MIE2 (Roseta 3)

6.4 – Modelo MIE6

6.4.1 - Deslocamentos da Viga e da Alma do Pilar

No modelo numérico, a situação de plastificação da alma indicada pelo mecanismo de Blodgett(1982)/Lima(1999) resultou em deslocamento vertical da extremidade da viga igual a 8,67cm, enquanto nos ensaios experimentais esse deslocamento foi de 11,46cm e 9,23cm, respectivamente nos ensaios MIE6b e MIE6a respectivamente.

Portanto, além de confirmar-se a situação de variação praticamente linear ao longo da viga, como demonstrado na figura 6.23, os resultados numéricos aproximaram-se bastante dos obtidos no ensaio do protótipo MIE6b.

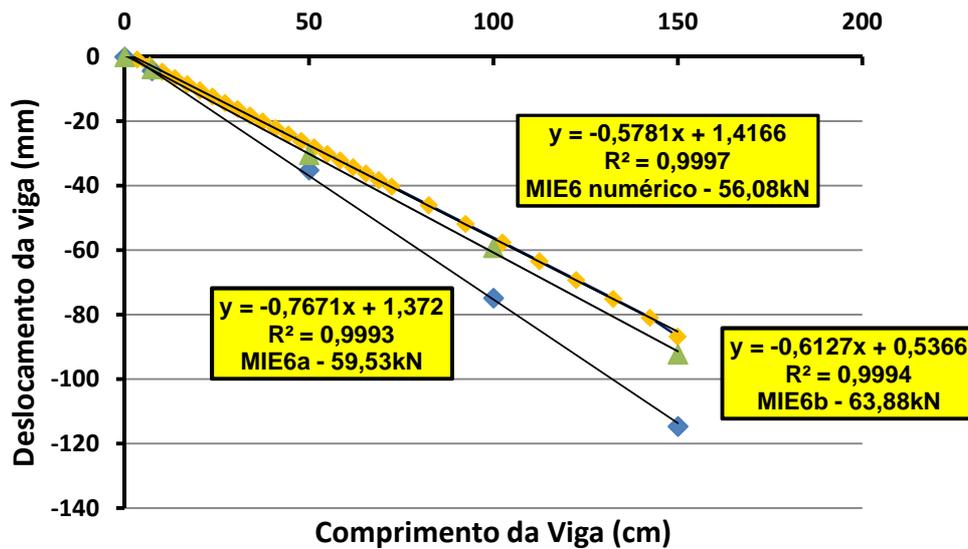


Figura 6.23 – Deslocamentos verticais das vigas dos protótipos MIE6 e do modelo numérico MIE6.

6.4.2– Deslocamentos da Alma do Pilar

Os resultados obtidos (figura 6.24) demonstram comportamento similar para as deformações das almas dos protótipos MIE6a e MIE6b.

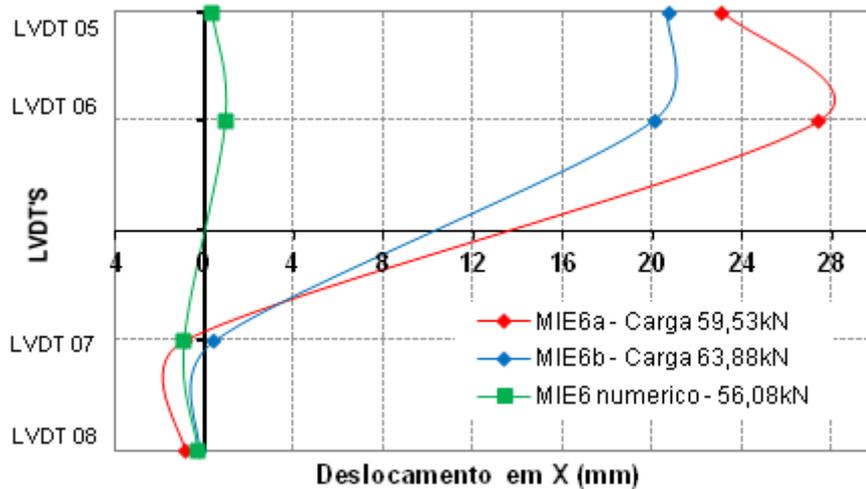


Figura 6.24 – Deslocamentos das almas dos pilares para as cargas finais de ensaio e de plastificação do modelo numérico.

Entretanto, observa-se que para o modelo MIE6 (análise numérica) os deslocamentos foram, novamente, sensivelmente menores (mesmo considerando-se carregamento inferior ao do protótipo MIE6b) e sem variação da posição do ponto de deslocamento nulo na direção X.

6.4.3 – Momento x Rotação

Os gráficos momento x rotação dos protótipos MIE6a e MIE6b e do modelo MIE6 são apresentados nas figuras 6.25 e 6.26, respectivamente para a alma do pilar e para a viga.

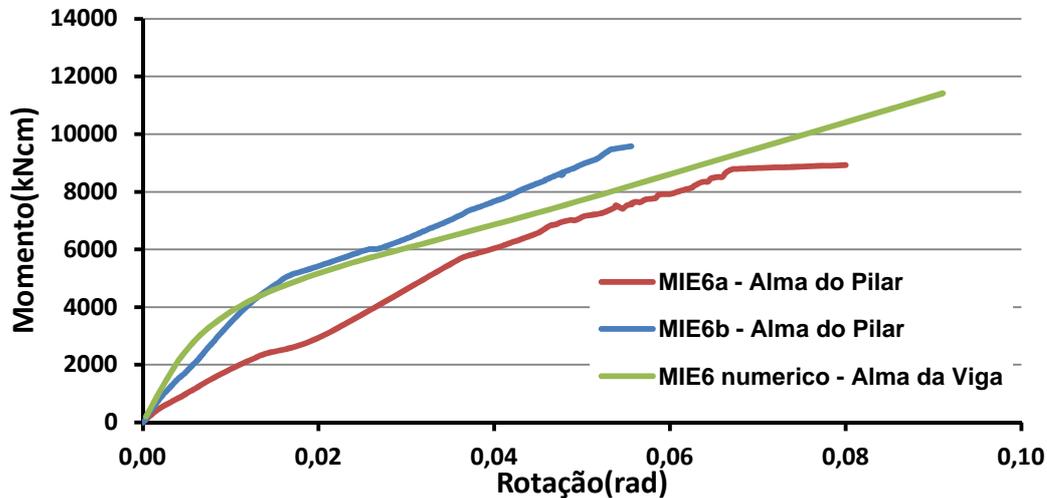


Figura 6.25 - Comportamento Momento x Rotação da alma do pilar dos protótipos MIE6a e MIE6b e do modelo numérico MIE6

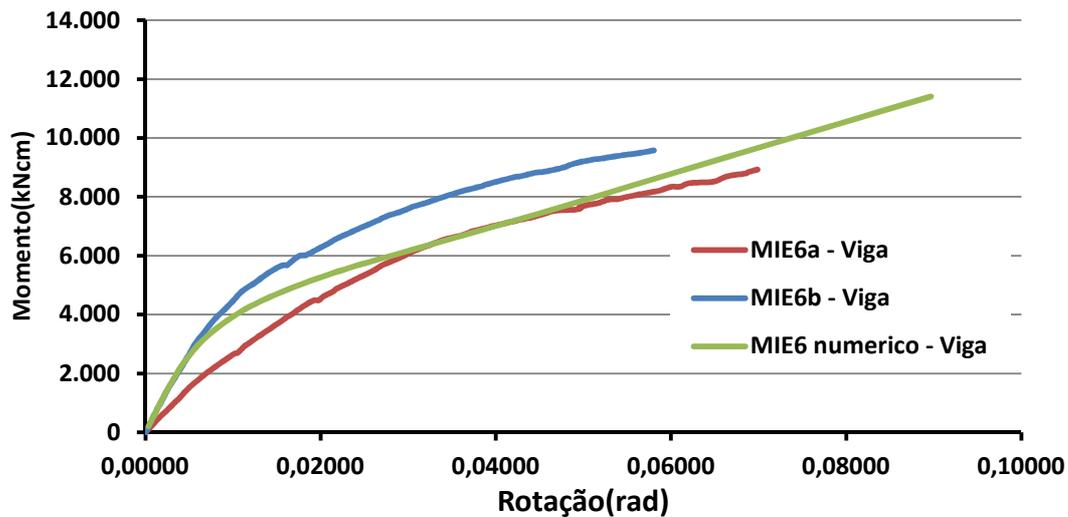


Figura 6.26 - Comportamento Momento x Rotação da viga dos protótipos MIE6a e MIE6b e do modelo numérico MIE6

Das figuras anteriores, juntamente com os resultados obtidos para a rigidez inicial (tabela 6.3), constata-se que há uma boa correspondência entre os resultados da análise numérica e os do protótipo MIE6b, especialmente em termos da rotação da viga, embora as rotações no modelo numérico passem a apresentar valores maiores a partir do ponto correspondente ao momento fletor aproximadamente igual a 2.400kN.cm.

Tabela 6.3 - MIE6: Rigidez inicial (kN.cm/rad)

	Alma do Pilar	Viga
MIE6a	276.873	321.151
MIE6b	395.902	521.595
AIE5 numérico	574.693	546.357

6.4.4 – Solicitações nas mesas da viga

A principal constatação relativa á transmissão dos esforços pelas mesas da viga, neste caso é que os resultados obtidos na análise numérica apresentaram valores superiores aos valores teóricos para a mesa inferior, atingindo, para a mesa superior, a exemplo de ambas as mesas do protótipo MIE6a, valores iguais aos teóricos para solicitações superiores a 8.000kN.cm.

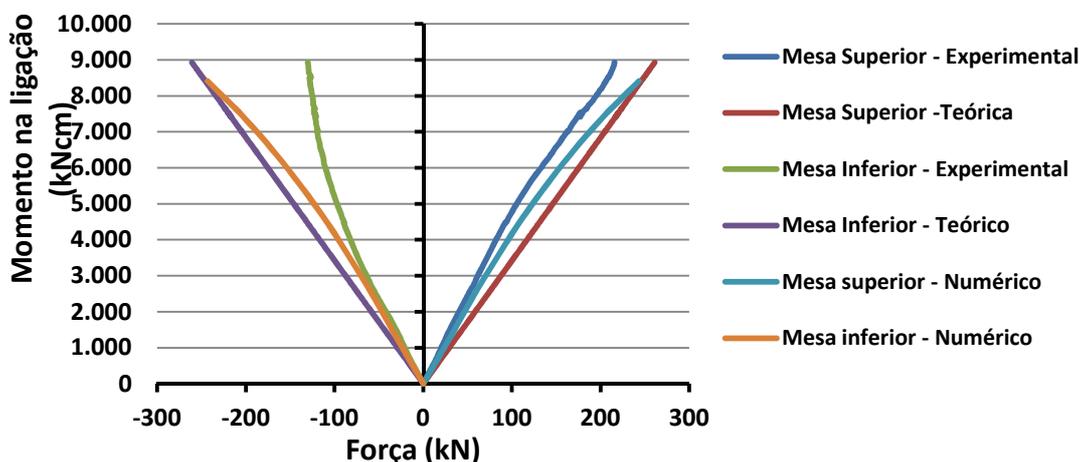


Figura 6.27 – Variação das forças de tração e compressão transmitidas pelas mesas da viga em função do momento na ligação (Protótipos MIE6a e Modelo numérico MIE6)

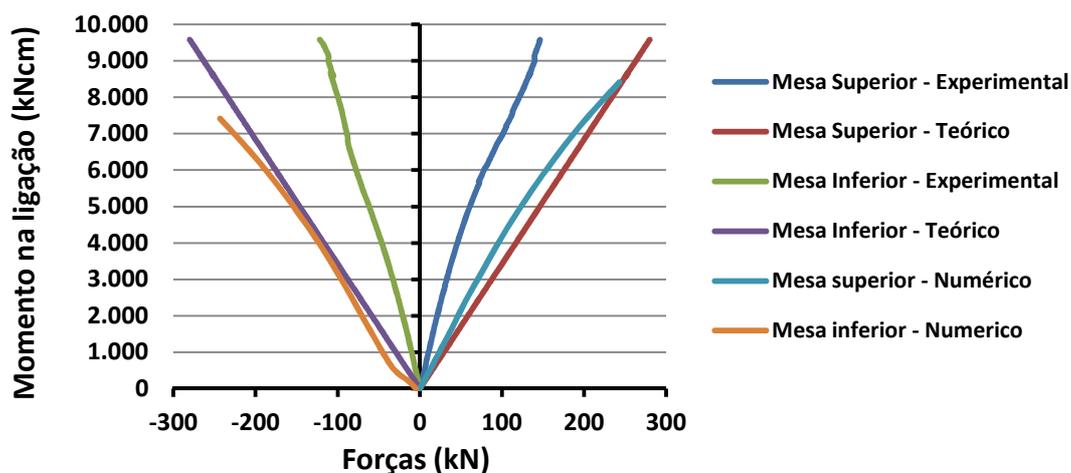


Figura 6.28 –Variação das forças de tração e compressão transmitidas pelas mesas da viga em função do momento na ligação (Protótipos MIE6b e Modelo numérico MIE6)

Os resultados dos ensaios, porém, foram sempre inferiores aos da análise numérica e também aos obtidos pelo modelo teórico.

6.4.5.– Tensões na alma da viga

As figuras de 6.29 a 6.31 apresentam, para diferentes níveis de sollicitação, as variações das tensões longitudinais na alma da viga, respectivamente para os protótipos MIE6a e MIE6b e para o modelo numérico MIE6.

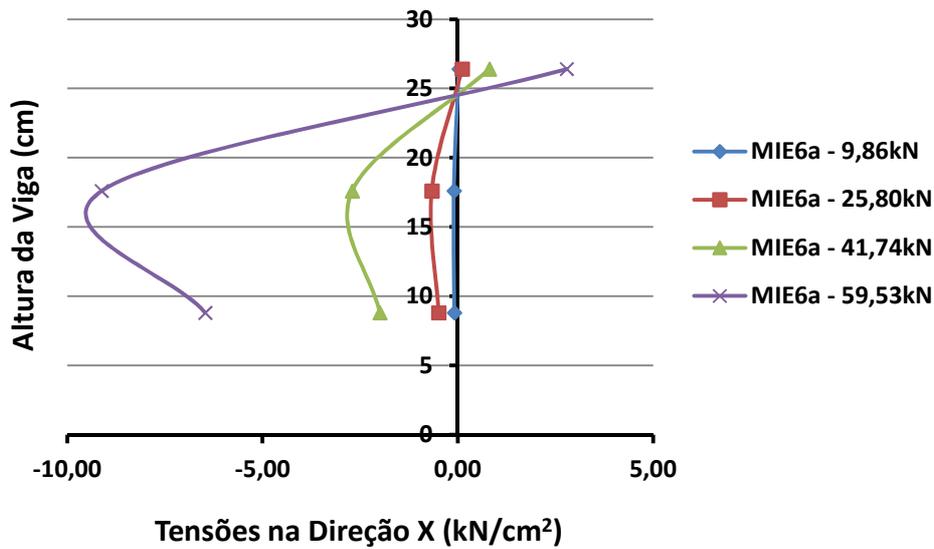


Figura 6.29 – Variação das tensões na alma da viga (Protótipo MIE6a)

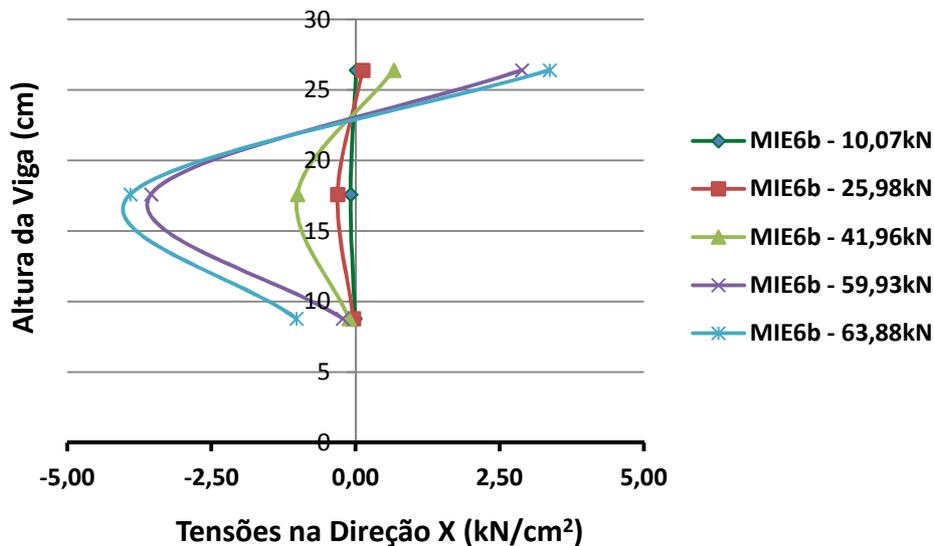


Figura 6.30 – Variação das tensões na alma da viga (Protótipo MIE6b)

Embora os ensaios tenham apresentado tensões de compressão na alma da viga, em regiões próximas à mesa inferior (tanto para o protótipo MIE6a e MIE6b) para todas

as etapas de carregamento, isso somente foi verificado na análise numérica para as etapas iniciais, obtendo-se tensões de tração, decorrentes da particular forma de deformação da alma do pilar, para a solicitação final da análise (90,73kN).

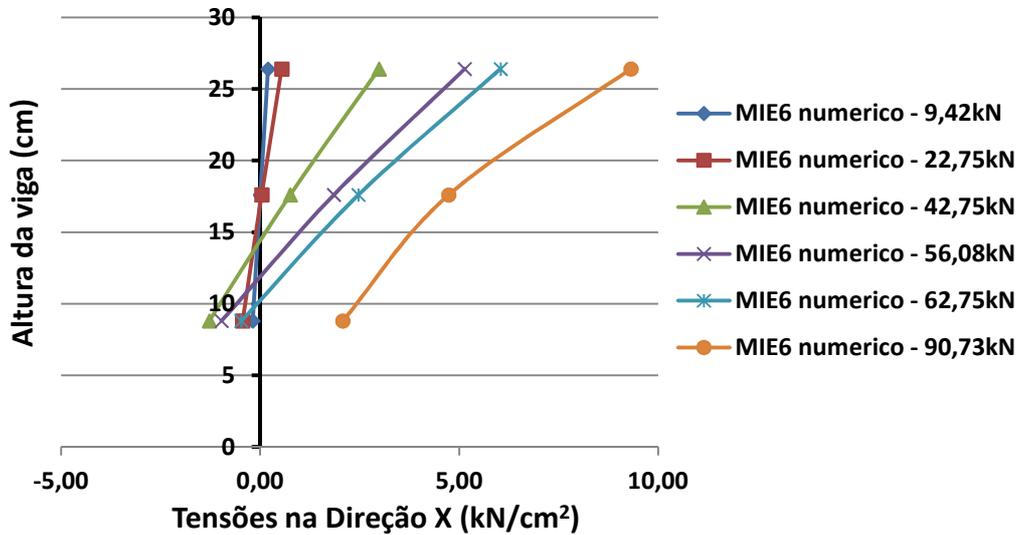


Figura 6.31 – Variação das tensões na alma da viga (Modelo numérico MIE6)

6.4.6 – Tensões na Alma do Pilar

Os resultados apresentados na figura 6.32 demonstram que as tensões de Von Mises ultrapassam o valor da tensão nominal de escoamento do material para solicitações de aproximadamente 6.500kN.cm (roseta 1 – MIE6a), 7.630kN.cm (roseta 1 – MIE6b), 7.500kN.cm (roseta 2 – MIE6a) e 8.200kN.cm (roseta 2 – MIE6b).

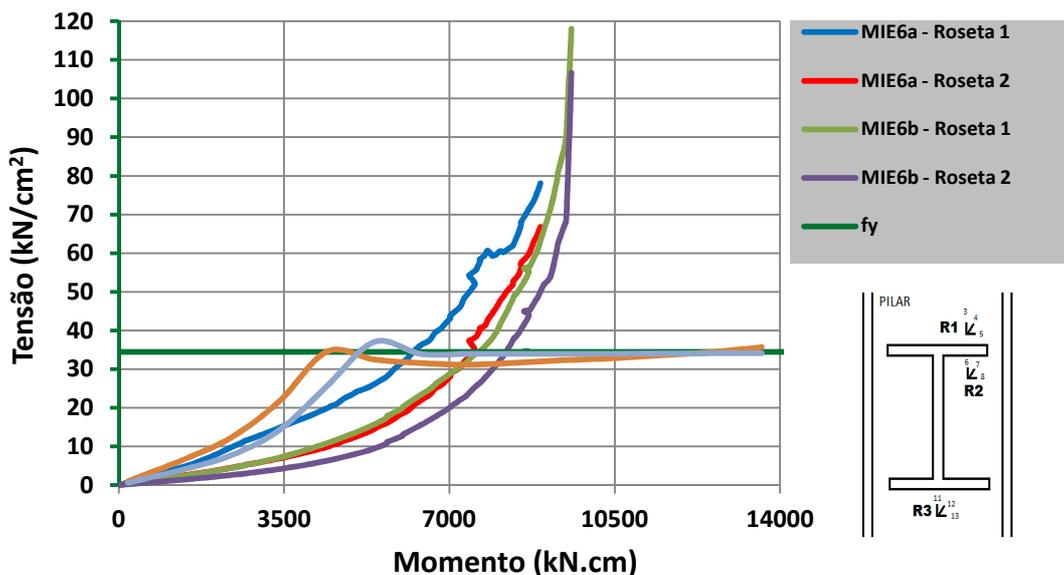


Figura 6.32 – Tensões de Von Mises na alma do pilar dos protótipos MIE6a e MIE6b do modelo numérico MIE6 (Rosetas 1 e 2)

Na análise numérica, porém, o modelo MIE6 apresentou tensões de Von Mises que atingiram esse parâmetro de comparação para momento fletor aproximadamente igual a 4.400kN.cm (roseta 1) e 5.000kN.cm, com pequenas variações a partir desses pontos até o carregamento correspondente ao final da análise.

A variação das tensões de Von Mises obtidos no ponto de instalação da roseta 3 são apresentadas na figura 6.33, observando-se uma razoável aproximação dos valores da análise numérica com os obtidos no ensaio do protótipo MIE6a, nas etapas iniciais de carregamento, mas com valor igual ao da tensão nominal de escoamento do material para momento fletor aproximadamente igual a 5.000kN.cm, enquanto na análise experimental esse valor foi atingido para a sollicitação de aproximadamente 5.800kN.cm.

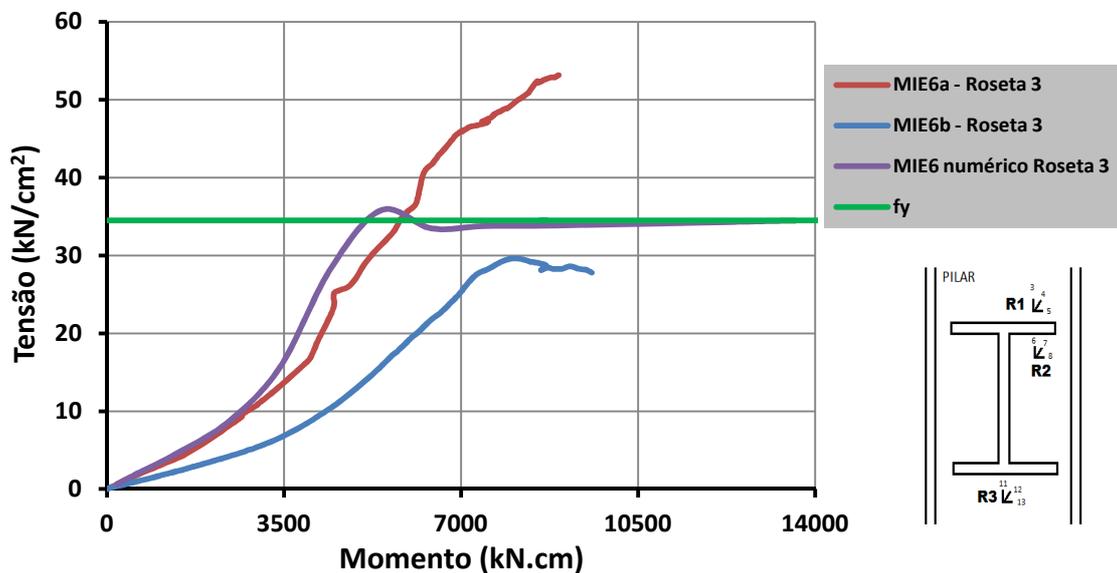


Figura 6.33 – Tensões de Von Mises na alma do pilar dos protótipos MIE6a e MIE6b e do modelo numérico MIE6 (Roseta 3)

6.5 – Modelo BIE2

6.5.1 - Deslocamentos da Viga e da Alma do Pilar

A exemplo dos demais casos, tanto na análise numérica quanto experimental, como observado na figura 6.34, os deslocamentos ao longo do comprimento da viga apresentaram variação linear.

No modelo numérico, o deslocamento da extremidade da viga - carga de 89,41kN correspondente à plastificação da alma indicada pelo mecanismo de

Blodgett(1982)/Lima(1999) - foi de 2,88cm, enquanto ao final do ensaio o protótipo BIE2 apresentou deslocamento de 4,74cm (carga de 87,95kN).

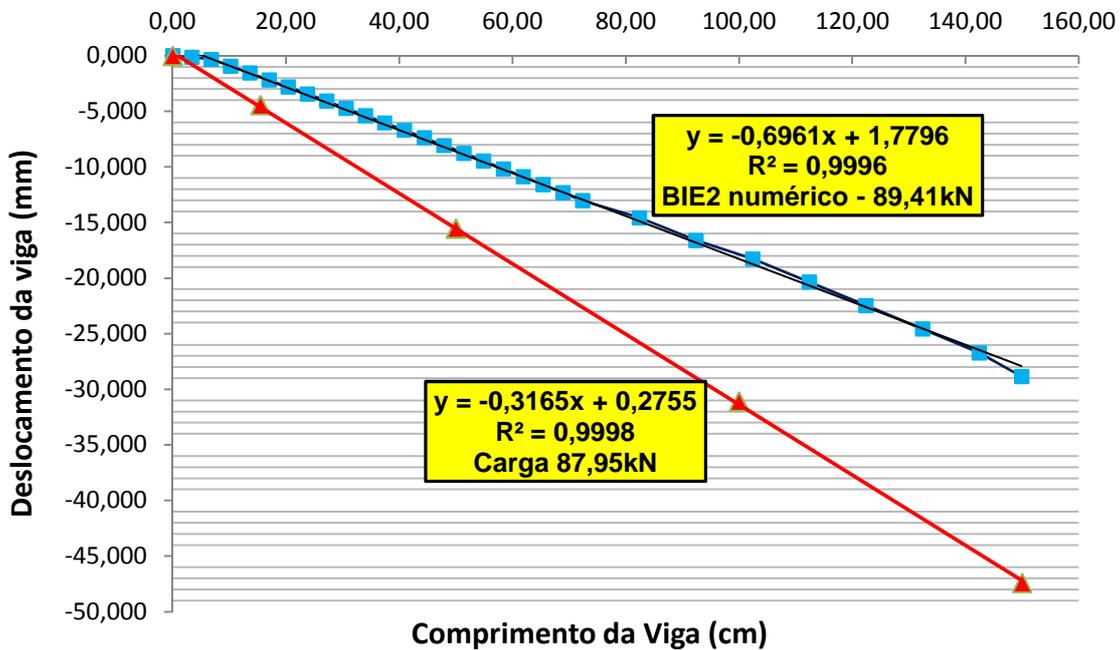


Figura 6.34 – Deslocamentos verticais das vigas dos protótipos BIE2 e do modelo numérico BIE2.

6.5.2 – Deslocamentos da Alma do Pilar

Na figura 6.35 observa-se que os resultados dos deslocamentos da alma do pilar, também nesse caso, são muito maiores na análise numérica (carga de 89,41kN) que os obtidos para a carga final do ensaio do protótipo MIE2 (carga de 87,95kN), verificando-se, novamente, que a análise numérica não apresenta deslocamento no centróide da seção da viga.

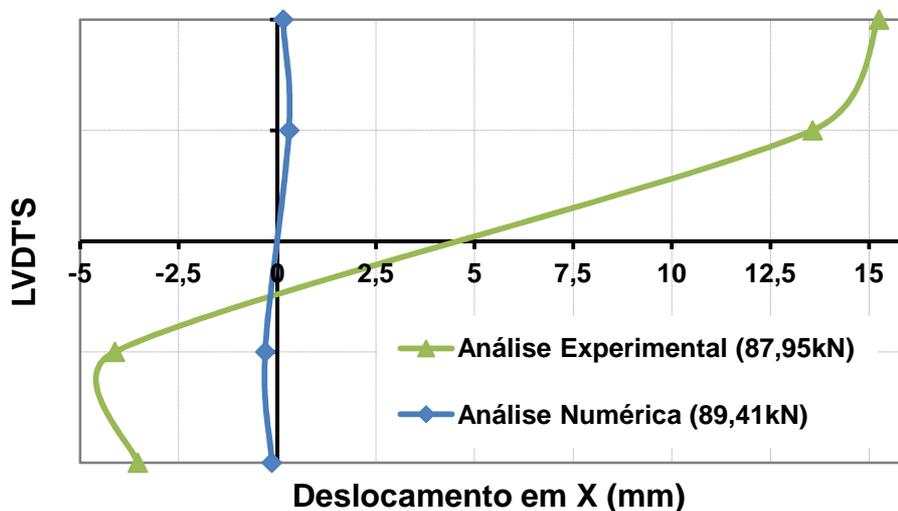


Figura 6.35 – Deslocamentos da alma do pilar para a carga final de ensaio e de plastificação do modelo numérico

6.5.3 – Momento x Rotação

Como observado nas figuras 6.36 e 6.37, juntamente com os valores apresentados na tabela 6.4, as análises numérica e experimental apresentaram nesse caso a maior disparidade de resultados quanto ao comportamento momento - rotação e aos valores da rigidez inicial.

Ressalte-se, porém que os valores da rigidez inicial calculados a partir dos deslocamentos da alma do pilar e da viga, tanto na análise numérica quanto na experimental, apresentaram variações muito próximas (3,4% e 3,8%, respectivamente).

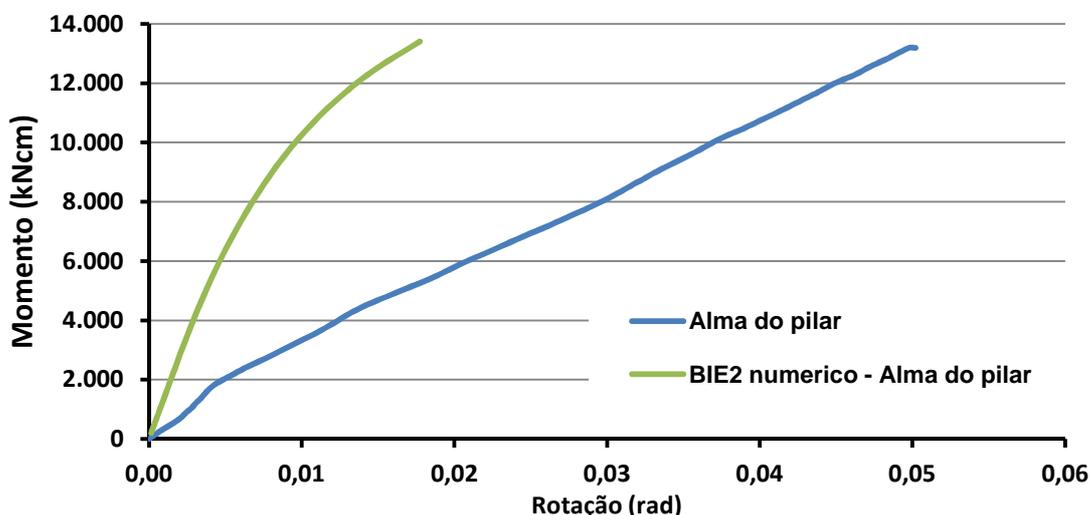


Figura 6.36 – Comportamento Momento x Rotação da alma do pilar do protótipo e do modelo numérico BIE2

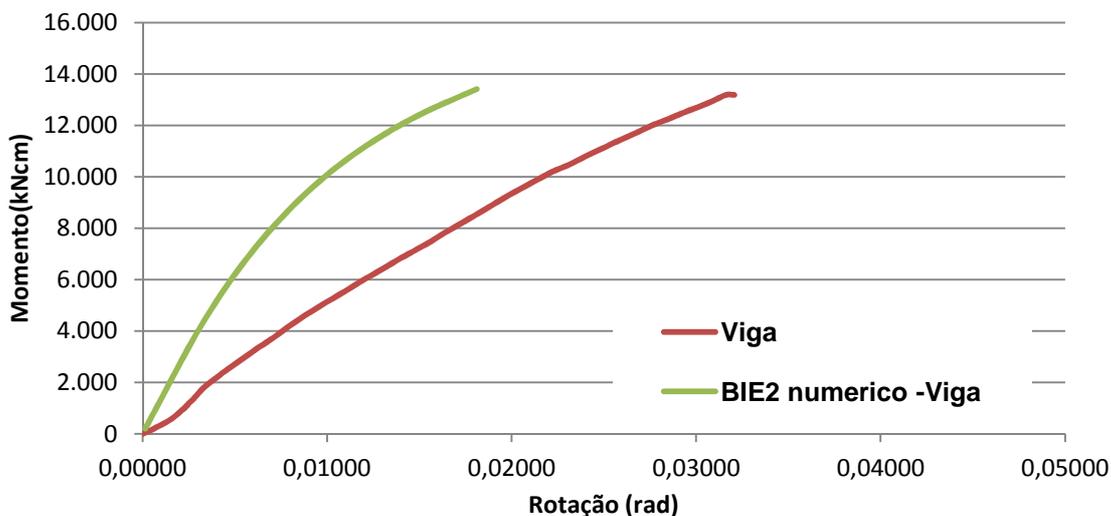


Figura 6.37 – Comportamento Momento x Rotação da viga do protótipo e do modelo numérico BIE2

Tabela 6.4 - BIE2: Rigidez inicial (kN.cm/rad)

	Alma do Pilar	Viga
BIE2	343.128	356.099
BIE2 numérico	1.398.843	1.351.434

6.5.4 – Solicitações nas mesas da viga

As forças transmitidas pelas mesas da viga (figura 6.38) apresentaram valores muito próximos nas análises experimental e numérica, porém superiores aos correspondentes valores teóricos obtidos pela divisão do valor do momento fletor pela distância entre os planos médios das mesas da viga.

Entretanto, devido ao baixo índice de esbeltez da alma do pilar, a variação do valor das forças transmitidas foi praticamente linear em função do momento fletor solicitante.

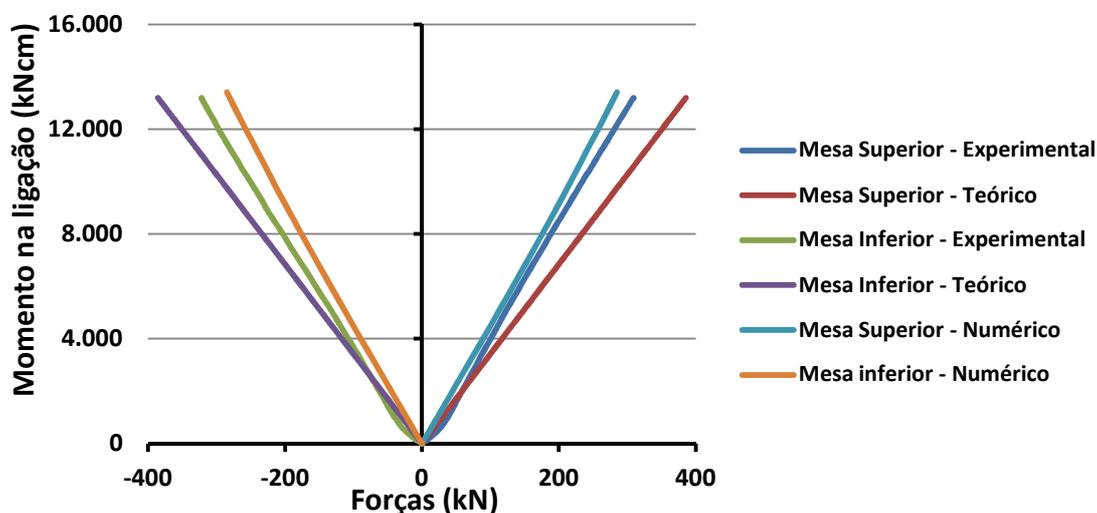


Figura 6.38 – Variação das forças de tração e compressão transmitidas pelas mesas da viga em função do momento na ligação (Protótipos BIE2 e Modelo numérico BIE2)

6.5.5.– Tensões na alma da viga

Embora tenha sido observados deslocamentos do ponto com tensão longitudinal nula (em relação ao eixo da viga) no ensaio do protótipo BIE2 (figura 6.39) e isso não

tenha ocorrido na análise numérica correspondente (figura 6.40), coerentemente com os resultados obtidos para a transmissão de forças pelas mesas, o comportamento global de tensões na alma da viga foi similar.

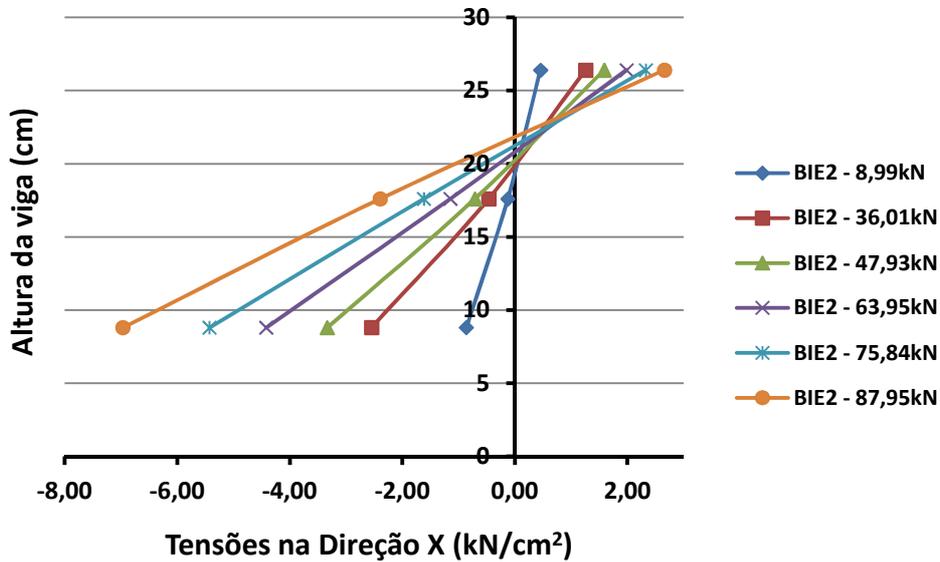


Figura 6.39 – Variação das tensões na alma da viga (Protótipo BIE2)

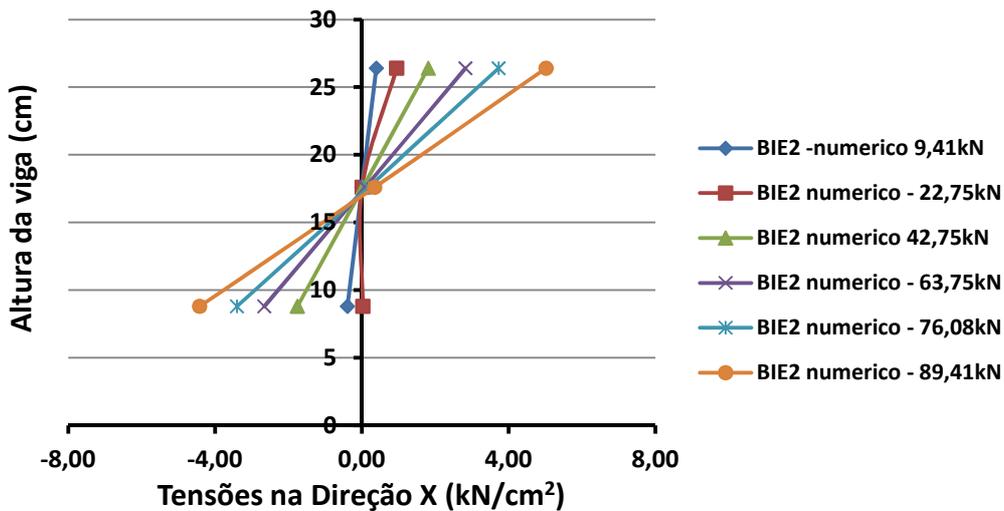


Figura 6.40 – Variação das tensões na alma da viga (Modelo numérico BIE2)

6.5.6 – Tensões na Alma do Pilar

As tensões de Von Mises obtidas nas análises numérica e experimental, nos pontos de instalação das rosetas 1 e 2 são apresentadas na figura 6.41, observando-se comportamento muito próximos até o valor correspondente à tensão nominal de escoamento do material, tanto na roseta 1 quanto na roseta 2.

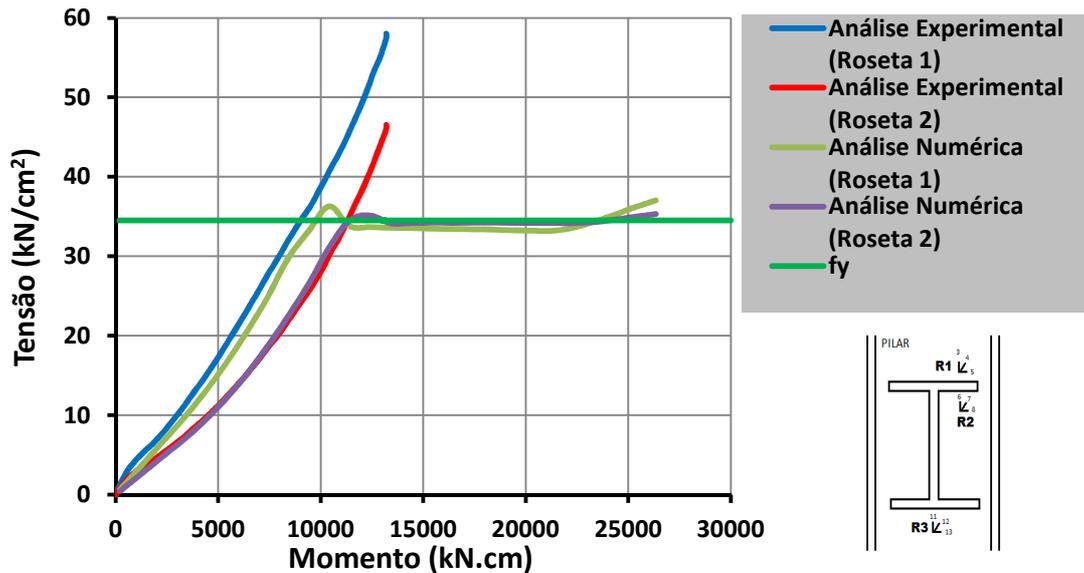


Figura 6.41 – Tensões de Von Mises na alma da viga do protótipo e do modelo numérico BIE2 (Rosetas 1 e 2)

Surpreendentemente, tendo-se em vista os resultados obtidos nos demais ensaios, os resultados obtidos no ponto de instalação da roseta 3 (figura 6.42) resultaram em tensões muito baixas, conduzindo a um valor aproximadamente igual a $4,80\text{kN/cm}^2$ para momento fletor de aproximadamente 10.000kN.cm na análise experimental, enquanto, para essa mesma sollicitação, a análise numérica indicava tensão aproximadamente igual á tensão nominal de escoamento do material.

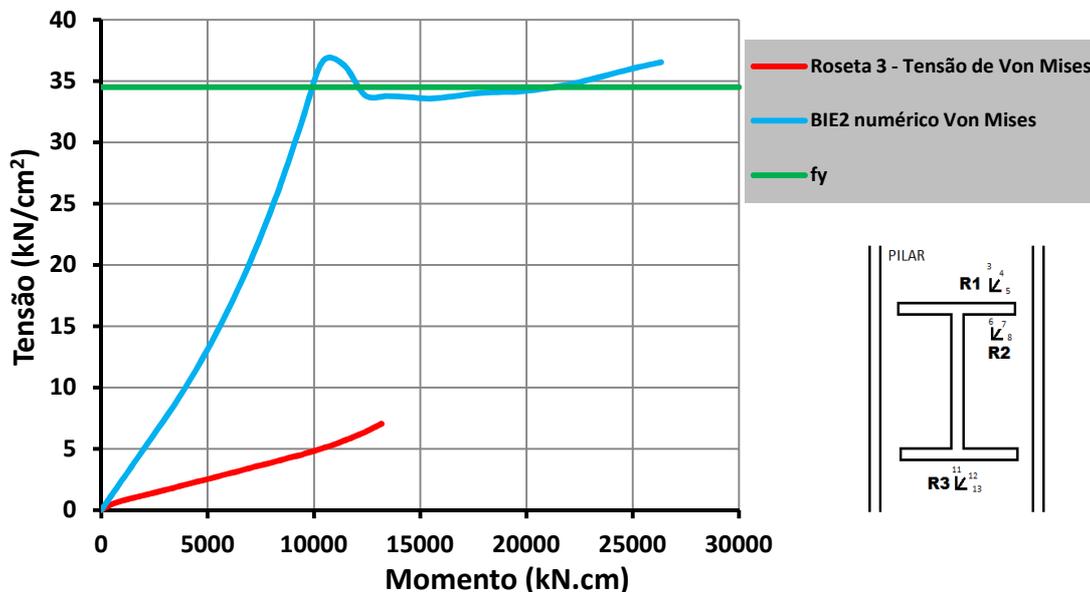


Figura 6.42 – Tensões de Von Mises na alma da viga do protótipo e do modelo numérico BIE2 (Roseta 3)

6.6 - Considerações Adicionais

A análise experimental realizada no presente trabalho teve amplitude limitada por razões econômicas e não possibilitou o estabelecimento de estudos de validação de todos os aspectos da análise numérica efetuada, especialmente no que diz respeito à rigidez inicial das ligações..

Apesar disso, em muitos aspectos (como no caso da transmissão dos esforços pelas mesas das vigas), mostrou-se bastante coerente com o comportamento global e possibilitou uma série de comparações e observações que contribuirão para o desenvolvimento de novos estudos do tipo de ligação aqui considerado.

Além disso, é necessário ressaltar-se que a geometria dos protótipos e modelos numéricos adotados revelou algumas particularidades que não devem e não podem ser objeto de extrapolação, uma vez que o comportamento das vigas em balanço não exerceu considerável influência no comportamento das ligações, como é razoável admitir-se no caso de configurações, mais frequentes na prática, em que as vigas terão ambas as extremidades ligadas às almas dos pilares.

VALORES TEÓRICOS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS: COMPARAÇÕES

São apresentadas e comentadas, neste capítulo, algumas comparações relativas a valores teóricos e seus correspondentes resultados obtidos na análise experimental, com vistas à avaliação de alguns fatores considerados nos modelos teóricos.

7.1 – Rigidez Inicial

A rigidez inicial das ligações segundo o eixo de menor inércia do pilar pode ser obtida, como anteriormente demonstrado, por intermédio do modelo desenvolvido por Neves (1996). Na análise experimental, por sua vez, também é possível obter-se o valor da rigidez inicial, segundo o procedimento apresentado no Capítulo 4, a partir da curva momento x rotação. Na tabela 7.1 são apresentados os valores da rigidez inicial obtidos segundo as duas metodologias.

Tabela 7.1 – Rigidez inicial (kN.cm/rad): Valores teóricos e obtidos experimentalmente

Protótipos	Valores Experimentais			Valores Teóricos
	Alma do Pilar	Viga	Média	
AIE5a	238.544	237.852	238.198	100.259
AIE5b	220.689	204.505	212.597	
MIE2a	192.596	428.577		590.912
MIE2b	225.018	387.052		
MIE6a	276.873	321.151		516.060
MIE6b	395.902	521.595		
BIE2	343.128	356.099	349.614	1.135.518

Como já comentado, os valores da rigidez inicial obtidos na análise experimental, calculados pela rotação da alma do pilar e pela rotação da viga, mostraram-se bastante próximos para os modelos das classes de alta e de baixa esbeltez ensaiados, apresentando diferenças mais significativas para os modelos da classe de média esbeltez.

Considerando-se que são poucos os resultados experimentais disponíveis e ainda que, para os modelos da classe de média esbeltez, foi verificada uma razoável dispersão de resultados experimentais, é conveniente adotar-se procedimentos distintos para a comparação dos resultados teóricos e experimentais.

Desse modo, para os modelos das classes de alta e baixa esbelteza, adotando-se a média entre os valores obtidos para a rigidez inicial a partir da rotação da alma e da rotação da viga, constata-se que o valor teórico para o modelo AIE5 é menor que os valores experimentais dos protótipos AIE5a e AIE5b (respectivamente 57,9% e 52,8%), mas são bastantes superiores (224,8%) no caso do modelo de baixa esbelteza.

Para os modelos da classe 2 (MIE2 e MIE6), as variações da rigidez inicial obtidas a partir da rotação da alma do pilar e da rotação da viga apresentaram variações muito grandes, inclusive para os ensaios realizados com protótipos de mesmas rigidez da alma do pilar (pares MIE2a/MIE2b e MIE6a e MIE6b).

Como já comentado no Capítulo 4, esse comportamento nas etapas iniciais de carregamento (faixa que interessa à determinação da rigidez inicial) deveu-se, fundamentalmente, ao comportamento da diferenciado da alma do pilar, acima e abaixo das mesas da viga, resultando em valores menores para a rigidez inicial medida pelos deslocamentos horizontais da alma do pilar.

Entretanto, considerando-se que, nos modelos ensaiados observou-se que a viga praticamente não sofreu flexão, pode ser admitida como mais representativa a rigidez inicial obtida a partir dos deslocamentos verticais da viga. Assim, considerando-se os valores médios da rigidez inicial obtidos nos ensaios de cada protótipo, constata-se que os valores teóricos são 44,9% e 22,5% maiores que os considerados experimentalmente, respectivamente para os protótipos MIE2 e MIE6.

Para a análise dessas diferenças, inicialmente é preciso considerar que Neves (2004) estabeleceu que a expressão da rigidez inicial seria válida para $10 \leq \mu = L/t_{wc} \leq 50$, $0,08 \leq \beta = b/L \leq 0,75$ e $0,05 \leq \alpha = c/L \leq 0,2$. Neste estudo, entretanto, os protótipos analisados experimentalmente apenas atendem às condições referentes aos parâmetros μ e β , situando-se o parâmetro α , como indicado na tabela 7.2, fora da faixa indicada.

Tabela 7.2 – Parâmetros α , β e μ dos protótipos analisados experimentalmente

Protótipos	α	β	μ
AIE5a	0,021	0,53	46,96
MIE2a	0,023	0,56	23,38
MIE6a	0,029	0,73	31,05
BIE2	0,026	0,65	16,95

Observa-se que a imposição dos limites de α são muito complicados para o caso de ligações em que a viga é soldada diretamente na alma do pilar, uma vez que representa a razão entre a espessura da mesa da viga e a altura da alma do pilar. Assim,

nos casos estudados, para que fosse respeitado o limite inferior da faixa de variação desse parâmetro, considerando-se os perfis adotados para os pilares, a espessura da mesa da viga deveria variar de 1,15cm a 1,6cm. Portanto, considerando-se esse aspecto, é natural que os resultados sejam divergentes, embora a variação de α não traduza, diretamente, a variação do valor da rigidez inicial.

Já em relação ao parâmetro μ , a maior discrepância entre os valores teóricos e experimentais foi obtido para o valor mínimo (igual a 16,95 para o protótipo BIE2), com valor teórico inferior ao experimental quando $\mu = 46,96$. Deve ser ressaltado que Neves (2004) aponta a grande sensibilidade da rigidez inicial à dimensão a ser considerada na alma do pilar, recomendando (como utilizado neste estudo) que seja tomada como $L = d + r$, sendo d a altura efetiva da alma do pilar e r o raio de concordância da alma com a mesa. Desse modo, constata-se que os valores de d/r variam de 0,038 (AIE5) a 0,061 (BIE2), caracterizando, novamente, os extremos de discrepâncias entre os valores teóricos e experimentais da rigidez inicial.

Neves (2004) informa que o modelo proposto para a determinação da rigidez inicial conduz a resultados superestimados para valores elevados de β , inclusive apresentando uma nova expressão para a determinação da largura efetiva a ser considerada quando $\beta \geq 0,7$. Os resultados obtidos, porém, não confirmam plenamente essa hipótese, uma vez que, para o modelo MIE6 (máximo valor de β), o valor teórico foi 22,5% superior ao estimado experimentalmente, enquanto para o modelo BIE2, com menor valor de β , a diferença foi de 224,8%.

Não pode ser deixado de mencionar, ainda, que o modelo teórico foi inicialmente desenvolvido por Neves (1996) considerando impedida a rotação relativa entre a alma e a mesa do pilar e, em seguida, analisada a situação de não impedimento dessa rotação. Entretanto, essas considerações foram feitas de modo indireto, considerando-se restrições impostas às mesas do pilar. Os resultados obtidos no presente trabalho, porém, permitem inferir que as tanto a capacidade resistente da alma do pilar quanto a rigidez inicial dependem do "grau de engastamento" existente na ligação alma/mesa do pilar, bem como do valor de $L - b$. Assim, observando-se as relações entre as espessuras da alma e da mesa dos pilares, verifica-se uma variação entre 0,58 (MIE6) e 0,99 (BIE2), suficiente para produzir efeitos significativos no comportamento da ligação, inclusive quanto à influência da inércia do pilar segundo o eixo coincidente com o plano médio da alma.

7.2 - Deslocamentos da extremidade das vigas

De acordo com o Anexo C da NBR 8800 (ABNT, 2008), o deslocamento vertical máximo para vigas de piso deve ser de $L/350$, sendo L o dobro do comprimento do balanço. Assim, para o caso dos protótipos analisados, $L = 2 \times 150\text{cm} = 300\text{cm}$ e o deslocamento vertical máximo é $300/350 \approx 0,86\text{cm}$. Na tabela 7.3 são apresentados os valores obtidos e os correspondentes carregamentos finais dos ensaios.

Tabela 7.3 – Carregamentos finais e correspondentes deslocamentos da extremidade da viga dos protótipos

Protótipos	Deslocamento vertical (cm)	Carga aplicada (kN)
AIE5a	10,80	28,33
AIE5b	12,10	46,38
MIE2a	7,80	87,87
MIE2b	4,76	63,99
MIE6a	11,46	59,53
MIE6b	9,23	63,88
BIE2	4,74	87,95

Os ensaios, portanto, apresentaram valores de deslocamento da extremidade da viga muito superiores aos prescritos como máximos, observando-se, porém, que os carregamentos finais também foram superiores aos correspondentes à capacidade crítica da alma do pilar e, em alguns casos também à capacidade resistente da viga, como apontado nos capítulos anteriores. Assim, considerando-se esta condição como crítica para este tipo de ligação, verifica-se que as cargas correspondentes a deslocamentos verticais iguais a $0,86\text{cm}$ foram muito baixas para os protótipos ensaiados, como atestam os resultados apresentados na tabela 7.4 em termos de carga aplicada e correspondente momento fletor na ligação para a leitura do LVDT 1 (posicionado na extremidade da viga dos protótipos) imediatamente superior a $0,86\text{cm}$.

Os valores obtidos experimentalmente são muito baixos, menores inclusive que os obtidos na análise numérica para a mesma imposição de deslocamento da extremidade da viga (vide tabela 5.9). Assim, a possibilidade de utilização desse tipo de ligação para vigas em balanço torna-se bastante restritiva, sendo recomendável, em caso de real necessidade, a adoção de soluções de enrijecimento da ligação, considerando-se que, para ligações teoricamente rígidas, os valores máximo ($21,99\text{kN}$) e mínimo ($7,43\text{kN}$) das cargas aplicadas indicadas na tabela 7.4 resultariam em deslocamentos verticais de $0,10\text{cm}$ e $0,03\text{cm}$, respectivamente.

Tabela 7.4 – Carga aplicada e momento fletor para deslocamentos de extremidade imediatamente superiores a $L/350$

Protótipos	Deslocamento vertical (cm)	Carga aplicada (kN)	Momento fletor (kN.cm)
AIE5a	1,07	7,43	1.114
AIE5b	0,91	7,68	1.152
MIE2a	0,95	15,98	2.397
MIE2b	0,89	11,99	1.799
MIE6a	0,91	11,81	1.772
MIE6b	0,88	19,93	2.989
BIE2	0,91	21,99	3.299

7.3 – Tensões na alma do pilar

Na tabela 7.5 são reproduzidos os valores teóricos das cargas críticas dos protótipos ensaiados, já apresentados na tabela 5.1 para todos os modelos integrantes deste trabalho, ressaltando-se que tais valores referem-se às forças transmitidas pelas mesas da viga, cuja capacidade resistente é de 578,15kN. Apresentam-se, também, os valores obtidos na análise experimental que, teoricamente, seriam transmitidos pelas mesas da viga para a última etapa de carregamento de cada ensaio.

Tabela 7.5 - Valores da carga transmitida pelas mesas nos protótipos ensaiados

Protótipos	Esbeltez	Mecanismo Global	Blodgett/Lima	Experimental
BIE2	16,43	474,21	735,13	385,52
MIE2a	22,77	281,74	416,96	385,17
MIE2b				280,49
MIE6a	29,61	148,01	161,40	260,94
MIE6b				280,01
AIE5a	45,51	75,73	99,59	124,18
AIE5b				203,30

Portanto, exceto para os modelos da classe 1 (baixo índice de esbeltez), as cargas teoricamente transmitidas pelas mesas da viga, ao final dos ensaios, foram superiores às previstas pelo mecanismo global do modelo de GOMES(1990), podendo ser considerados iguais no caso do modelo MIE2b. Já em relação ao mecanismo de plastificação proposto por Blodgett (1982)/Lima (1999), os resultados experimentais foram inferiores para os modelos BIE2, MIE2a e MIE2b.

Desse modo, considerando-se que em nenhum dos modelos a capacidade resistente das mesas da viga foi ultrapassada, é viável analisar a variação das tensões de Von Mises, em função do momento fletor aplicado às ligações dos protótipos analisados, tendo-se como referência os momentos críticos fornecidos pelos modelos

teóricos utilizados neste trabalho. Desse modo, nas figuras 7.1 a 7.4 são rerepresentados os gráficos das tensões de Von Mises obtidas experimentalmente nas rosetas 1 e 2, respectivamente para os protótipos das classes 1 a 3, juntamente com as indicações dos momentos fletores teóricos críticos, cujos valores foram obtidos multiplicando-se as cargas críticas teóricas (tabela 7.5) pela distância entre os planos médios das mesas da viga (igual a 34,22cm em todos os protótipos).

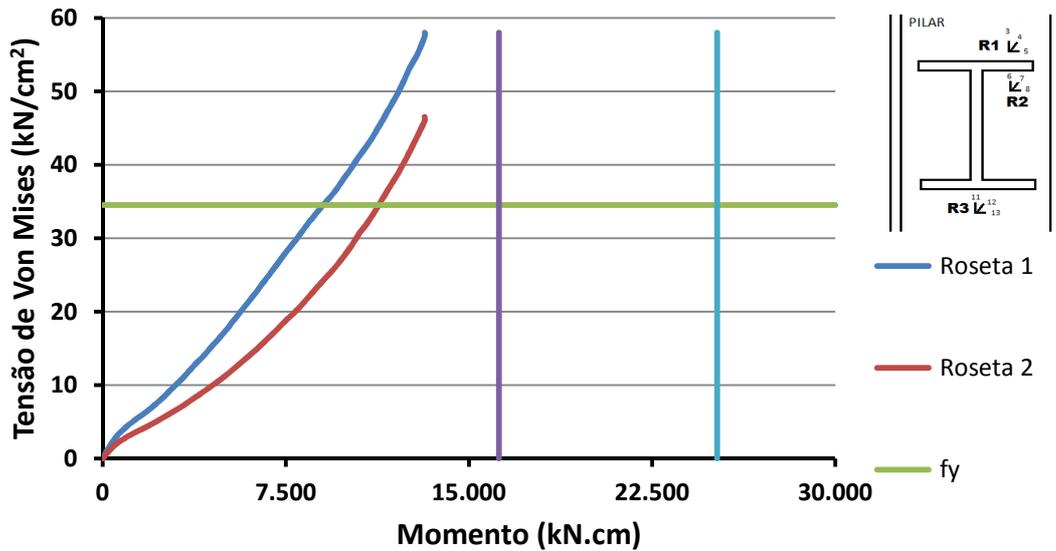


Figura 7.1 – Tensões de Von Mises na alma do pilar (Protótipo BIE2 - Rosetas 1 e 2)

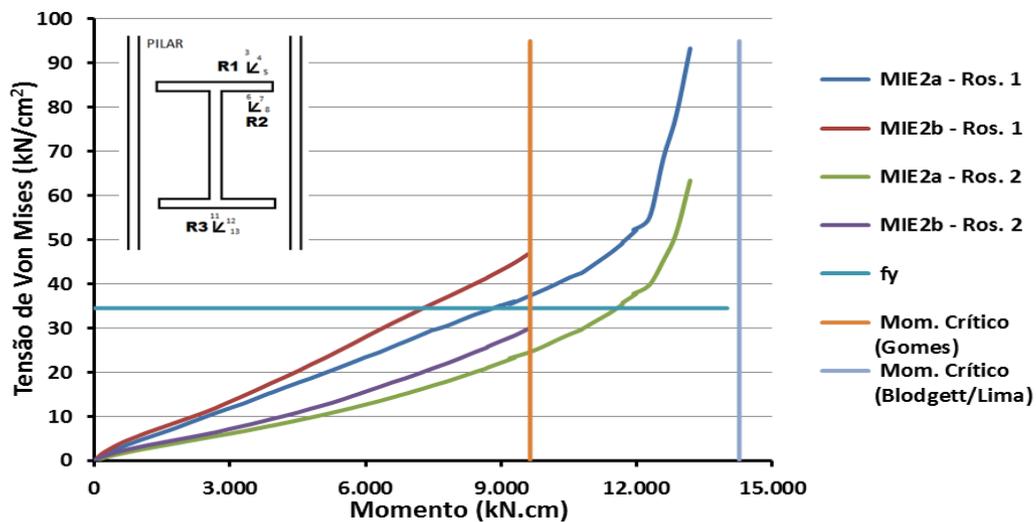


Figura 7.2 – Tensões de Von Mises na alma do pilar (Protótipos MIE2a e MIE2b - Rosetas 1 e 2)

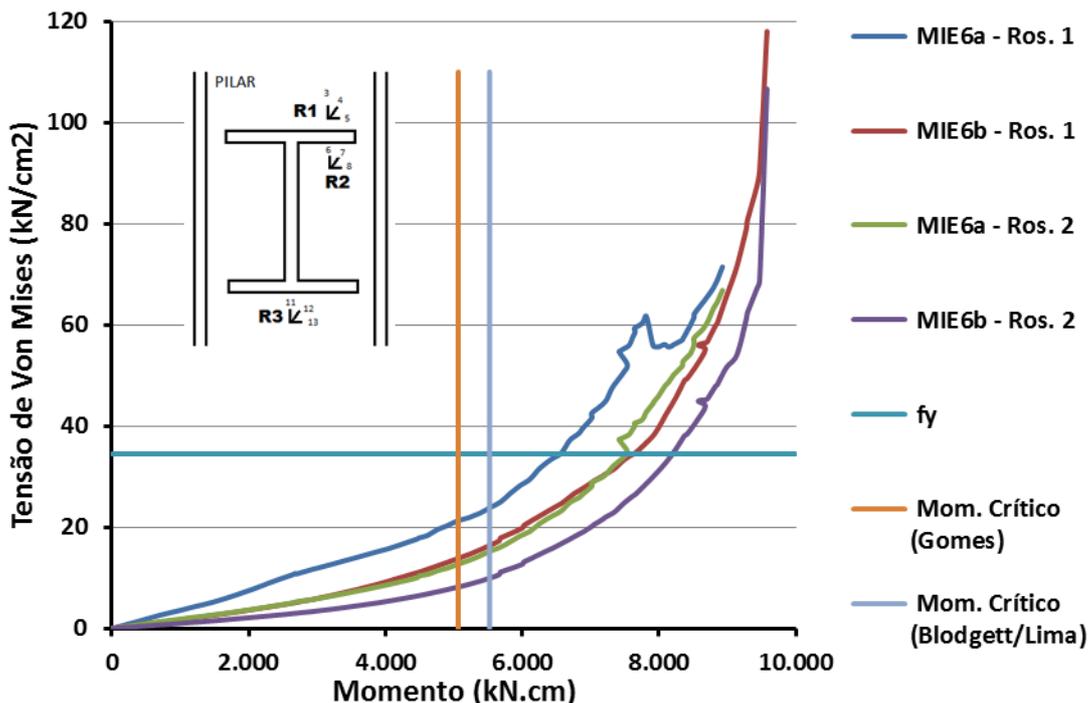


Figura 7.3 – Tensões de Von Mises na alma do pilar (Protótipos MIE6a e MIE6b - Rosetas 1 e 2)

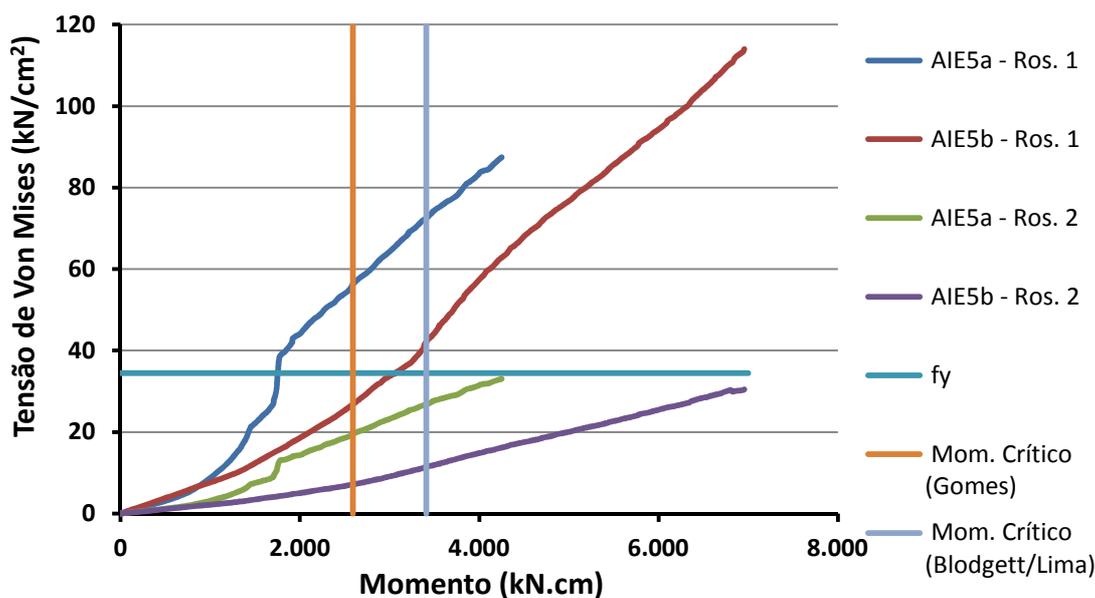


Figura 7.4 – Tensões de Von Mises na alma do pilar (Protótipos AIE5a e AIE5b - Rosetas 1 e 2)

Verifica-se que são bastante distintas as situações dos protótipos das diferentes classes, em especial para o protótipo BIE2, que apresenta tensões de Von Mises iguais e superiores à tensão nominal de escoamento do material para momentos fletores bastante inferiores aos valores previstos pelos modelos teóricos adotados com parâmetro de comparação. Nesse caso, a tensão de 34,5kN/cm é atingida nas rosetas 1 e 2 para solicitações de aproximadamente 9.000kN/cm e 11.300kN/cm, respectivamente, enquanto os momentos críticos teóricos atingem valores de 16.227kN/cm

(GOMES(1990) e 25.156kn/cm (Blodgett/1982, Lima/1999). Portanto, considerando-se que as rosetas 1 e 2 estão posicionadas no interior do contorno teoricamente previsto para o desenvolvimento das charneiras plásticas e que o ensaio foi finalizado para uma solicitação de 13.192kN/cm², as tensões obtidas experimentalmente parecem indicar que os modelos conduzem a resultados não adequados, ou seja, aparentemente superestimando a capacidade resistente da alma com baixo índice de rigidez.

Para os modelos da classe 2 (MIE2 e MIE6), os comportamentos obtidos guardaram certo grau de correspondência com a esbeltez da alma da viga, porém com uma indicação bastante forte de conservadorismo do modelo de GOMES(1990) para os protótipos MIE6a e MIE6b, para os quais as tensões de Von Mises foram superiores à tensão nominal de escoamento do material para solicitações sensivelmente superiores às obtidas por intermédio dos modelos teóricos.

Essa tendência, porém, não foi mantida para os protótipos da classe 3 (AIE5a e AIE5b), com maior esbeltez entre os protótipos ensaiados, cujo comportamento assemelhou-se mais ao dos protótipos MIE2a e MIE2b. Coincidentemente ou não, como apontado no item 7.1, os modelos MIE2 e AIE5 apresentam valores muito próximos (respectivamente 0,56 e 0,53) para o parâmetro $\beta = b / L$.

CONCLUSÕES

A ideia principal deste trabalho foi estudar o comportamento de uma ligação soldada na direção de menor inércia do pilar. Para isto foram desenvolvidos modelos numéricos em elementos finitos onde foram implementadas e simuladas as condições reais, dentro do possível, para que este modelo representasse o modelo experimental estudado. Estes modelos consistiam em ligações viga x pilar na direção de menor inércia do pilar, nos quais foi utilizado um perfil único para as vigas, variando-se a seção transversal do pilar em cada modelo, dividindo-se os modelos em grupos de três classes, de acordo com a esbeltez da alma do pilar. Essas classes foram estudadas e os resultados obtidos tanto numericamente como experimentalmente foram confrontados com os modelos teóricos já estabelecidos para este tipo de ligação, de modo a analisar-se, entre outros aspectos a capacidade resistente da alma do pilar e a rigidez inicial das ligações. Além disso, foi possível estudar-se o comportamento estrutural deste tipo de ligação, avaliando-se a curva momento x rotação, as deformações, os possíveis modos de ruína e as condições de plastificação dos elementos da ligação.

Quando analisadas as cargas críticas relativas aos mecanismos local e global proposto por GOMES (1990) e ao mecanismo proposto por Blodgett (1982) e adaptado por LIMA (1999) foi possível observar o conservadorismo dos modelos teóricos, principalmente em relação à não consideração da presença da alma da viga para efeito de definição da geometria da região de formação da charneira plástica, bem como em termos da forma de transmissão, pelas mesas da viga, das forças oriundas do binário correspondente ao momento fletor solicitante na ligação.

Observou-se que é razoável considerar, a princípio, que o mecanismo global proposto por Gomes (1990) seja considerado como crítico para os modelos analisados neste trabalho, uma vez que, quando superiores, as cargas críticas obtidas não ultrapassaram 1,1 vezes o valor correspondente ao mecanismo combinado de flexão e puncionamento. Entretanto, nos modelos numéricos foi constatado um padrão de comportamento em termos da variação de regiões com diferentes níveis de tensões de Von Mises, em função do aumento da esbeltez da alma do pilar. Assim, observou-se uma tendência de ampliação das áreas de regiões localizadas junto à alma da viga,

aproximadamente próximas do ponto correspondente ao eixo da mesma. Além disso, as regiões com tensões mais altas apresentaram tendência de, progressivamente em função do aumento da esbeltez da alma, localizarem-se mais próximas às regiões correspondentes às mesas da viga. Para os modelos das classes 2 e 3 (respectivamente médio e alto índice de esbeltez) não foram observadas regiões com concentrações de tensões características de formação de charneiras plásticas do tipo previsto por Gomes, embora para alguns modelos tenham sido verificadas minúsculas regiões com tensões iguais ou superiores à tensão nominal de escoamento do material.

Na tentativa do estabelecimento de correlações entre os resultados obtidos na análise numérica com os valores obtidos mediante a aplicação do modelo de Gomes (1990), foram pesquisadas situações em que houvesse uma concentração de tensões de Von Mises nas regiões correspondentes à mesa superior da viga dos modelos, com configuração geométrica semelhante à da charneira plástica, sendo constatada a existência de pequenas regiões com tensões de Von Mises iguais ou superiores a 45kN/cm^2 nas situações consideradas, a princípio não suficientes para caracterizar uma condição crítica de colapso. Desse modo, com base nos resultados da análise numérica, é razoável admitir-se que o modelo de Gomes (1990) resulta em valores bastante conservadores da capacidade resistente da alma do pilar.

Com relação à determinação de rigidez inicial, as variações entre os resultados teóricos e numéricos, não possibilitaram o estabelecimento de correlações diretas razoavelmente satisfatórias, nem mesmo para o agrupamento de modelos de mesma classe, exceto para os modelos da classe 1 (baixo índice de esbeltez), ressalvando-se a disponibilidade de apenas três pares de resultados experimentais nesta classe. Uma vez que o modelo teórico de determinação da rigidez inicial leva em consideração somente aspectos relacionados à alma do pilar, a constatação referente ao valor de $L - b$ (correspondente a menores distâncias entre as extremidades laterais das mesas da viga e as faces internas das mesas dos pilares) implica em considerar-se que este parâmetro esteja influenciando o comportamento da ligação, permitindo que a inércia I_z da seção transversal do pilar (flexão em relação ao plano coincidente com o plano médio da alma do mesmo) contribua para o enrijecimento inicial da ligação. Outro parâmetro que também se mostrou importante para o comportamento da rigidez da ligação foi a consideração da rigidez imposta pelas mesas do pilar, que nos modelos analisados variaram conforme os perfis dos pilares estudados.

Em prosseguimento a este trabalho, recomenda-se, para uma análise mais apurada do comportamento deste tipo de ligação, que sejam realizados novos estudos numéricos e experimentais com o objetivo de:

- i) analisar a influência das dimensões da seção transversal da viga (especialmente altura e dimensões da mesa da viga);
- ii) analisar a influência das dimensões das mesas do pilar (especialmente a espessura);
- iii) verificar a influência do comportamento à flexão da viga em uma configuração de ligação em que ambas as extremidades da viga estejam conectadas à alma de pilares;
- iv) analisar a influência da presença de vigas conectadas a uma ou a ambas as mesas do pilar e também o efeito no comportamento proporcionado pela presença de enrijecedor(es) posicionados na alma do pilar, na face oposta à qual está soldada a viga;
- v) comparar o comportamento global de ligações soldadas com os decorrentes de outros tipos de conexão viga-pilar, tais como os dotados de chapas de topo ou cantoneira(s) de alma.

Assim, associados a calibrações dos modelos analíticos, estas proposições podem constituir-se em importante ferramenta para a análise e dimensionamento de ligações do tipo estudado neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION (1980). Manual of steel construction. 8.ed. Chicago.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2008). NBR 8800 – Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios. ABNT, Rio de Janeiro.

BATHO, C.; BATHEMAN, E.H. (1934). Investigations on bolts and bolted joints. London, Steel Structures Research Committee, 2nd Report.

BEEDLE, L.S.;CHRISTOPHER, R. (1964). Tests of steel moment connections. AISC Engineering Journal, v.1, n.4, p.116-125, October.

BESSA, W. O. (2004). Análise Numérica Tridimensional de Ligações Viga-Coluna com Chapa de Topo na Direção do Eixo de Menor Inércia do Pilar. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFOP, Ouro Preto.

BESSA, W. O. (2005). A 3D Analysis of Minor-axis Steel Beam-to-column End Plate Connections. Proceedings of the EuroSteel. Maastricht, The Netherlands.

BLODGETT, W. OMER, (1982). Design os Welded Structure. The James F. Lincoln Ar Welding Foundation.

CHEN, W.F.; PATEL, K. V. (1981). Static behavior of beam-to-column moment connections. Journal of Structural Division, v.107, n.ST9, p.1815-1838,September.

CHEN, W.F.; LUI, E.M. (1988a). Static flange moment connections. Journal of Constructional Steel Research, v.10, p.39-88.

EUROCODE 3 (1992). Design of steel structures: Part 1.1 - General rules and rules for buildings.

EUROCODE 3 (1993). Design of steel structures: Part 1.1 - General rules and rules for buildings - Revised Annex J: Joints in building frames.

EUROCODE 3, Part 1.8 (2005). Design of Joints. Draft 2, prEN1993, European Committee for Standardisation.

GOMES, F. C. T. (1990). Etat Limite Ultime de la Résistance de L'âme d'une Colonne dans un Assemblage Semi-Rigide d'axe Faible. Rapport Interne n° 203, MSM – Université de Liège, 72p.

GOMES, F. C. T. and JASPART J. P. (1994). Experimental Research of Minor-Axis Joints. Comparison with Theoretical Predictions. COST C1 WG2 Meeting, Doc. COST c1/wd2/94-13, Coimbra.

GOMES, F. C. T.; JASPART, J. P. and MAQUOI, R. (1996). Moment Capacity of Beam-to-Column Minor-Axis Joints. Proceedings of the IABSE International Colloquium on Semi-Rigid Structural Connections, Istanbul, Turkey, p. 319–26., in Eth-Honggerberg, Zurich, Switzerland.

HOTES, S. L. S. (2006). Capacidade Resistente da Alma de Pilares em Ligações com Chapa de Topo na Direção do Eixo de Menor Inércia do Pilar. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFOP, Ouro Preto.

HUANG, J.S.; CHEN, W.F.; BEEDLE, L.S. (1973). Behavior and design of steel beamto-

column moment connections. *Welding Research Council Bulletin*, n.188, p.1-23, October.

JOHNSON, L.G. (1959). Tests on welded connections between I-section beams and stanchions. *British Welding Journal*, p.38-46, January.

LIMA, L. R. O. (1999). Avaliação de Ligações Viga-Coluna em Estruturas de Aço Submetidas à Flexão no Eixo de Menor Inércia. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-RIO.

LIMA, L. R. O.; VELLASCO, P. C. G. S. and ANDRADE, S. A. L. (1999). Bolted Semi-Rigid Connections to the Column Minor-Axis. *Proceedings of the Second European Conference on Steel Structures, Eurosteel '99*, Czech Technical University in Prague, p. 473–86, Prague.

LIONBERGER, S.R.; WEAVER, W. (1969). Dynamic response of frames with nonrigid connections. *Journal of Engineering Mechanical Division*, v.95, n.EM1, p.95-114.

LUI, E.M.; CHEN, W.F. (1986). Analysis and behavior of flexibly jointed frames. *Engineering Structures*, v.8, n.2, p.107-118.

MAGGI, Y. I. (2000). Análise Numérica, via M.E.F., do Comportamento de Ligações Parafusadas Viga-Coluna com Chapa de Topo. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP.

MAGGI, Y. I. and GONÇALVES, R. M. (2003). Assessment on the use of FEM Modeling for the Analysis of Steel Bolted Connections. *XIV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering – CILAMCE*, Ouro Preto, Brazil.

MAGGI, Y. I. (2004). Análise do Comportamento Estrutural de Ligações Parafusadas Viga-Pilar com Chapa de Topo Estendida. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP.

NBR-8800 (2008). Dimensionamento e Construção de Estruturas de Aço em Edifícios. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro

NEVES, L. F. C. (1996). Nós Semi-Rígidos em Estruturas Metálicas: Avaliação da Rigidez em Configurações de Eixo Fraco. Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.

NEVES, L. F. C. (2004). Comportamento Monotónico e Cíclico de Ligações de Eixo Fraco e Tubulares em Estruturas Metálicas e Mistas Aço-Betão. Tese de Doutorado, Universidade de Coimbra, Portugal.

PARFITT JR, J.; CHEN, W.F. (1976). Tests of welded steel beam-to-column moment connections. *Journal of Structural Division*, v.102, n.ST1, p.189- 202, January.

QUEIROZ, G. (1992). Estudo do comportamento e sistematização do projeto de ligações rígidas entre perfis I com almas coplanares. Belo Horizonte. 159p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais.

QUEIROZ, G. (1995). Análise experimental de ligações soldadas. Belo Horizonte. 285p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais.

REGEC, J.E.; HUANG, J.S.; CHEN, W.F. (1973). Test of a fully-welded beam-to-column connection. *Welding Research Council Bulletin*, n.188, p.24-35, October.

REIS, S. L. F. (2011). Análise Teórica – Experimental de Ligações Metálicas Soldadas entre Coluna em Perfil Tubular Circular e Viga em Perfil de Seção Transversal “I”. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFOP, Ouro Preto.

RIBEIRO, L. F. L. (1998). Estudo do Comportamento Estrutural de Ligações Parafusadas Viga-Coluna com Chapa de Topo: Análise Teórico-Experimental. Dissertação de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP.

ROMANO, V. P. (2001). Dimensionamento de Ligações Viga-Coluna com Chapa de Topo: Modelo do Eurocode 3. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP.

ROMSTAD, K.M.; SUBRAMANIAN, C.V. (1970). Analysis of frames with partial connection rigidity. *Journal of Structural Division*, v.96, n.ST11, .22832300, November.

SILVA, M. C. (2007). Capacidade Resistente da Alma de Pilares em Ligações com Chapa de Topo Curta na Direção do Eixo de Menor Inércia do Pilar. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFOP, Ouro Preto.

TARPY, T.S.; CARDINAL, J.W. (1981). Behavior of semi-rigid beam-to column end plate connections. In: HOWLETT, J.H.; JENKINS, W.M.; STAINSBY, R., ed. Joints in structural steelwork. London, Pentech Press. p.2.3-2.25.

WILSON, W.M.; MOORE, H.F. (1917). Tests to determine the rigidity of riveted joints of steel structures. Urbana, IL, University of Illinois, Engineering Experiment Station, Bulletin n.104.

WITTEVEEN, J. et al. (1982). Welded and bolted beam-to-column connections. Journal of Structural Division, v.108, n.ST2, p.433-455, February.