



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - ESCOLA DE MINAS
ESCOLA DE MINAS**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**



**ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE PERFIS FORMADOS A FRIO COM
PERFURAÇÕES**

VINÍCIUS DE OLIVEIRA FARIA

ORIENTADORA: Prof^ª. Dr^ª. Arlene Maria Cunha Sarmanho

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Flávio Teixeira de Souza

Ouro Preto, maio de 2016

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - ESCOLA DE MINAS
ESCOLA DE MINAS**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE PERFIS FORMADOS A FRIO COM
PERFURAÇÕES**

VINÍCIUS DE OLIVEIRA FARIA

ORIENTADORA: Prof^a. Dr^a. Arlene Maria Cunha Sarmanho

COORIENTADOR: Prof. Dr. Flávio Teixeira de Souza

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

Ouro Preto, maio de 2016.

F224a

Faria, Vinícius de Oliveira.

Análise de estabilidade de perfis formados a frio com perfurações
[manuscrito] / Vinícius de Oliveira Faria. - 2016.

xi, 94f.f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientadora: Profa. Dra. Arlene Maria Cunha Sarmanho.

Coorientador: Prof. Dr. Flávio Teixeira de Souza.

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

Área de Concentração: Construção Metálica.

1. Estruturas metálicas. 2. Método dos elementos finitos. 3. Flambagem (Mecânica). I. Sarmanho, Arlene Maria Cunha. II. Souza, Flávio Teixeira de. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.


CDU: 624.014

ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE PERFIS FORMADOS A FRIO COM PERFURAÇÕES

AUTOR: VINICIUS DE OLIVEIRA FARIA

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 18 de maio de 2016, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:


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


Prof. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima, D. Sc. – UERJ


Prof. Francisco de Assis das Neves, D. Sc. - UFOP


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

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e toda minha família por simplificarem os problemas encontrados.

Aos meus irmãos André e Ana Carolina pelo incentivo e preocupação.

A orientadora Arlene pelas oportunidades e confiança em toda a minha trajetória acadêmica. Ao meu grande amigo/orientador Flávio pela paciência e conselhos de vida.

A Equipe do conceituado Laboratório de Estruturas – UFOP pelo suporte técnico e ajuda neste trabalho. Em especial: Daniel, Gabriel, Lucas, Ana Amélia, Juliano, João e Dequinha.

Aos amigos Bruna, Davidson, Igor, Liniker, Renato e Vanessa que, mesmo de longe, torceram pela conclusão desta etapa.

A Empresa Águia Sistemas, pela doação dos protótipos.

A CAPES, pela ajuda financeira.

Agradeço por fim a Universidade Federal de Ouro Preto e Escola de Minas pelo acolhimento e formação profissional.

Se pela força da distância você se ausenta, pela força que há na saudade
você voltará. (MELO, 2016).

RESUMO

Os sistemas de armazenagem industrial são estruturas utilizadas para armazenar produtos manufaturados, conhecidos também como *racks*, fabricados em perfis formados a frio com perfurações ao longo do comprimento. Há poucos estudos que consideram a magnitude do furo, disposição e forma dos mesmos, bem como a influência destes na capacidade resistente dos elementos. O objetivo deste trabalho foi avaliar os modos de instabilidade local e distorcional, considerando a influência dos furos no comportamento estrutural do perfil por meio de análises numéricas e experimentais. O estudo numérico foi realizado em elementos finitos via programa ANSYS e calibrado pela Teoria Generalizada de Vigas através do software GBTul. A maior divergência verificada foi de 4% entre as modelagens. O programa experimental foi composto por 18 ensaios sob carregamento axial centrado com o objetivo de medir os deslocamentos associados aos modos de flambagem local e distorcional. A carga última e os modos de colapso numéricos foram obtidos e comparados com os resultados experimentais, indicando a viabilidade na avaliação do comportamento pós crítico dos protótipos. A uniformidade nos resultados foi verificada, com pequena dispersão ocasionada por fatores de experimento. A existência dos furos acarreta em redução da carga última das colunas com a identificação do modo local somente entre as perfurações. Porém, esse último não influenciou na capacidade resistente das mesmas, predominando em todos os casos, o modo distorcional. Este novo modo de instabilidade difere da flambagem local e foi abordado neste trabalho como modo localizado de placa. A fim de se observar o desenvolvimento do mesmo, foi realizado um estudo paramétrico com variações de furos a partir de uma chapa plana e perfil tipo rack. Para os modelos, cujo comprimento médio dos furos é superior a 50% da largura da alma, o modo local inicia-se na região destes ocorrendo uma acentuada redução da carga crítica em relação às perfurações menores.

Palavras-chave: Estruturas metálicas, Instabilidade estrutural, Perfis formados a frio, Modo distorcional, Racks.

ABSTRACT

Industrial Storage Systems, usually called racks, are structures usually built using cold formed perforated steel uprights, called "rack sections". There are just a few studies that consider holes parameters such as size, shape and distribution along upright length in the behavior and resistance of sections. The main target of this research is to evaluate the occurrence of local and distortional buckling modes in rack sections, by numerical and experimental analysis. Numerical analysis was carried out by finite element software ANSYS, and the Generalized Beam Theory (GBT) by software GBTul was used as a reference to columns without holes, and the divergence of results were less to 4%. Experimental analysis was carried out by 18 tests under axial loading and the occurrence of local and distortional modes and the ultimate resistance were obtained. These results were compared to numerical ones, and the good agreement between them indicate the validity of numerical analysis to evaluate the post buckling behavior of rack uprights even with some dispersions between numerical and experimental results due to experimental imperfections. The holes induce some reduction in the ultimate load and, for relatively large perforations it can occur a buckling mode concentrated in perforated region despite the distortional buckling mode prevailing in terms of ultimate resistance. The new observed mode was called "Localized Plate Buckling", and was analyzed by a parametric study in order to evaluate its occurrence. It was observed that holes with length bigger than 50% to plate width induce the "Localized Plate Buckling" and a reduction in buckling load bigger than the reduction observed to perforations smaller than 50% to plate width.

Keywords: Steel structures, Structural instability, Cold formed steel, Distortional mode, Racks.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Perfis mais utilizados em PFF: (a) Perfil U enrijecido;(b) Perfil caixa; (c) Perfil rack ou garrafa	1
Figura 1.2 - Sistema de armazenagem industrial FONTE: Águia (2013)	2
Figura 1.3 - Elementos da seção transversal do perfil rack ou garrafa	3
Figura 1.4 - Flambagem local em seções tipo rack e U enrijecido.....	3
Figura 1.5 - Exemplos de flambagem distorcional da seção transversal na compressão e flexão simples:(a) U enrijecido sob compressão uniforme; (b) U enrijecido sob flexão;	4
Figura 2.1 - Dimensões do protótipo (mm): (a) Ao longo do comprimento; (b) Seção transversal	11
Figura 2.2 - Protótipos utilizados nas análises numérica e experimental.....	11
Figura 2.3 - Equipamento utilizado para aplicação de carga nos protótipos.....	12
Figura 2.4 - Montagem experimental	13
Figura 2.5 - Montagem da região inferior do engaste (Corte A-A).....	14
Figura 2.6 - Montagem da região superior do engaste (Corte B-B)	15
Figura 2.7 - Chapa de engaste superior.....	15
Figura 2.8 - Chapa de engaste inferior.....	16
Figura 2.9 - Equipamento de solda	16
Figura 2.10 - Preparação dos protótipos: (a) Marcação na superfície da chapa; (b) Ajustes do perfil na marcação	17
Figura 2.11 - Execução da solda na extremidade do perfil.....	18
Figura 2.12 - Processo de alinhamento das chapas com a prensa: (a) Marcação na prensa; (b) Marcação na chapa de engaste inferior	18
Figura 2.13 - Chapa inferior de engaste posicionada no prato da máquina de ensaios com detalhes do alinhamento para o carregamento centrado	19
Figura 2.14 - Alinhamento da chapa de apoio inferior com a chapa de engaste inferior: (a) Região da alma; (b) Região dos flanges	19
Figura 2.15 - Extremidade de engaste superior	21
Figura 2.16 - Extremidade de engaste inferior	21
Figura 2.17 - Instrumentação do protótipo CC-F60-CP2 com os LVDT's posicionados: (a) Região da alma; (b) Região dos flanges	23
Figura 2.18 - Sistema de aquisição de dados	23
Figura 2.19 - Ferramentas utilizadas no levantamento de imperfeições.....	24

Figura 3.1 - Modelo criado no GBTUL: (a) Seção transversal; (b) Modelo em três dimensões	26
Figura 3.2 - Elemento utilizado na análise numérica: SHELL181	27
Figura 3.3 - Elemento SOLID45.....	27
Figura 3.4 - Comparação entre cargas críticas para modelos sem perfurações (GBTUL e ANSYS)	28
Figura 3.5 - Distribuição da malha nos elementos do perfil: (a) Visualização da malha em todo perfil; (b) Distribuição da malha na chapa de extremidade e região dos furos	28
Figura 3.6 - Simulação do efeito solda: (a) Vista geral do perfil com a região da solda; (b) Região de acoplamento do perfil com a chapa de extremidade	29
Figura 3.7 - Restrições de deslocamentos: (a) Vista geral do perfil com a região restringida; (b) Chapa de extremidade com os nós restritos.....	30
Figura 3.8 - Acoplamento dos nós de extremidade: (a) Vista geral do perfil com as regiões acopladas; (b) Chapa de extremidade com os nós acoplados	30
Figura 3.9 - Aplicação das condições de contorno no modelo numérico: (a) Aplicação do carregamento; (b) Todas as condições de contorno	31
Figura 3.10 - Diagrama tensão x deformação	33
Figura 4.1 - Interação das análises numérica e experimental	35
Figura 4.2 - Nomenclatura da seção transversal para coleta dos dados de imperfeições	36
Figura 4.3 - Modos de flambagem do protótipo CC-SFS-CP2: (a) Primeiro modo com $P_{CR} = 82,7$ kN; (b) Segundo modo com $P_{CR} = 83,7$ kN.....	37
Figura 4.4 - Deslocamentos na alma do protótipo CC-SFS-CP2.....	38
Figura 4.5 - Comparação experimental e numérica do protótipo CC-SFS-CP2 (alma).....	38
Figura 4.6 - Deslocamentos nos flanges do protótipo CC-SFS-CP2	39
Figura 4.7 - Comparação experimental e numérica do protótipo CC-SFS-CP2 (flanges)	39
Figura 4.8 - Modos de flambagem do protótipo CC-F60-CP2: (a) Primeiro modo com $P_{CR} = 54,5$ kN; (b) Segundo modo com $P_{CR} = 54,6$ kN.....	40
Figura 4.9 - Deslocamentos na alma do protótipo CC-F60-CP2	41
Figura 4.10 - Comparação experimental e numérica do protótipo CC-F60-CP2 (alma).....	41
Figura 4.11 - Deslocamentos nos flanges do protótipo CC-F60-CP2.....	42
Figura 4.12 - Comparação experimental e numérica do protótipo CC-F60-CP2 (flanges)	42
Figura 4.13 - Modos de flambagem do protótipo CC-F80-CP2: (a) Primeiro modo com $P_{CR} = 37,8$ kN; (b) Segundo modo com $P_{CR} = 38,6$ kN; (c) Terceiro modo com $P_{CR} = 39,5$ kN	43
Figura 4.14 - Deslocamentos na alma do protótipo CC-F80-CP2	44
Figura 4.15 - Comparação experimental e numérica do protótipo CC-F80-CP2 (alma).....	44
Figura 4.16 - Deslocamentos nos flanges do protótipo CC-F80-CP2.....	45
Figura 4.17 - Comparação experimental e numérica do protótipo CC-F80-CP2 (flanges)	45

Figura 4.18 - Modos de flambagem do protótipo CM-SFS-CP1: (a) Primeiro modo com $P_{CR} = 78,6$ kN; (b) Segundo modo com $P_{CR} = 79,4$ kN.....	46
Figura 4.19 - Deslocamentos nos flanges do protótipo CM-SFS-CP1	47
Figura 4.20 - Comparação experimental e numérica do protótipo	48
Figura 4.21 - Deslocamentos na alma do protótipo CM-SFS-CP1	48
Figura 4.22 - Modos de flambagem do protótipo CM-F60-CP2: (a) Primeiro modo com $P_{CR} = 54,0$ kN; (b) Segundo modo com $P_{CR} = 54,4$ kN; (c) Terceiro modo com $P_{CR} = 54,6$ kN	49
Figura 4.23 - Deslocamentos nos flanges do protótipo CM-F60-CP2.....	50
Figura 4.24 - Comparação experimental e numérica do protótipo	51
Figura 4.25 - Amplitudes na alma do protótipo CM-F60-CP2 (mm).....	51
Figura 4.26 - Modos de flambagem do protótipo CM-F80-CP1: (a) Primeiro modo com $P_{CR} = 37,5$ kN; (b) Segundo modo com $P_{CR} = 38,3$ kN.....	52
Figura 4.27 - Amplitudes na alma do protótipo CM-F80-CP1	53
Figura 4.28 - Comparação experimental e numérica do protótipo CM-F80-CP1 (alma)	53
Figura 4.29 - Deslocamentos nos flanges do protótipo CM-F80-CP1.....	54
Figura 4.30 - Comparação experimental e numérica do protótipo CM-F80-CP1 (flanges) ...	54
Figura 4.31 - Dimensões da seção transversal (mm): (a) Placa; (b) Perfil rack.....	57
Figura 4.32 - Geometria dos modelos (mm): (a) Placa; (b) Perfil rack.....	58
Figura 4.33 - Condições de contorno implementadas no modelo de elementos finitos para placa: (a) Condição biapoiada das paredes da alma; (b) Restrição de deslocamento para impedir o deslocamento de corpo rígido; (c) Acoplamento das rotações; (d) Aplicação do carregamento unitário; (e) Todas as condições de contorno aplicadas	60
Figura 4.34 - Condições de contorno implementadas no modelo de elementos finitos para rack: (a) Restrições de deslocamentos nas direções perpendiculares ao eixo da coluna; (b) Restrição de deslocamento para impedir o deslocamento de corpo rígido; (c) Acoplamento das rotações; (d) Aplicação do carregamento unitário; (e) Todas as condições de contorno aplicadas	61
Figura 4.35 - Carga crítica de flambagem em função do comprimento do furo para placa...	62
Figura 4.36 - Carga crítica de flambagem em função do comprimento do furo para perfil rack	64
Figura A.1 - Deslocamentos na alma do protótipo CC-SFS-CP1	73
Figura A.2 - Comparação experimental e numérica do protótipo CC-SFS-CP1 (alma)	73
Figura A.3 - Deslocamentos nos flanges do protótipo CC-SFS-CP1.....	74
Figura A.4 - Comparação experimental e numérica do protótipo CC-SFS-CP1 (flanges).....	74
Figura A.5 - Deslocamentos na alma do protótipo CC-SFS-CP3	75
Figura A.6 - Comparação experimental e numérica do protótipo CC-SFS-CP3 (alma)	75
Figura A.7 - Deslocamentos nos flanges do protótipo CC-SFS-CP3.....	76

Figura A.8 - Comparação experimental e numérica do protótipo CC-SFS-CP3 (flanges).....	76
Figura A.9 - Deslocamentos na alma do protótipo CC-F60-CP1	77
Figura A.10 - Comparação experimental e numérica do protótipo CF-F60-CP1 (alma).....	77
Figura A.11 - Deslocamentos nos flanges do protótipo CC-F60-CP1.....	78
Figura A.12 - Comparação experimental e numérica do protótipo CF-F60-CP1 (flanges)....	78
Figura A.13 - Deslocamentos na alma do protótipo CC-F60-CP3	79
Figura A.14 - Comparação experimental e numérica do protótipo CC-F60-CP3 (alma)	79
Figura A.15 - Deslocamentos nos flanges do protótipo CC-F60-CP3.....	80
Figura A.16 - Comparação experimental e numérica do protótipo CC-F60-CP3 (flanges) ...	80
Figura A.17 - Deslocamentos na alma do protótipo CC-F80-CP1	81
Figura A.18 - Comparação experimental e numérica do protótipo CC-F80-CP1 (alma)	81
Figura A.19 - Deslocamentos nos flanges do protótipo CC-F80-CP1.....	82
Figura A.20 - Comparação experimental e numérica do protótipo CC-F80-CP1 (flanges) ...	82
Figura A.21 - Deslocamentos na alma do protótipo CC-F80-CP3	83
Figura A.22 - Comparação experimental e numérica do protótipo CC-F80-CP3 (alma)	83
Figura A.23 - Deslocamentos nos flanges do protótipo CC-F80-CP3.....	84
Figura A.24 - Comparação experimental e numérica do protótipo CC-F80-CP3 (flanges) ...	84
Figura A.25 - Deslocamentos nos flanges do protótipo CM-SFS-CP3	85
Figura A.26 - Comparação experimental e numérica do protótipo.....	86
Figura A.27- Deslocamentos na alma do protótipo CM-SFS-CP3.....	86
Figura A.28 - Deslocamentos nos flanges do protótipo CM-F60-CP1	87
Figura A.29 - Comparação experimental e numérica do protótipo.....	88
Figura A.30 - Amplitudes na alma do protótipo CM-F60-CP1 (mm)	88
Figura A.31 - Deslocamentos nos flanges do protótipo CM-F60-CP3	89
Figura A.32 - Comparação experimental e numérica do protótipo.....	90
Figura A.33 - Amplitudes na alma do protótipo CM-F60-CP3 (mm)	90
Figura A.34 - Amplitudes na alma do protótipo CM-F80-CP2.....	91
Figura A.35 - Comparação experimental e numérica do protótipo CM-F80-CP2 (alma).....	91
Figura A.36 - Deslocamentos nos flanges do protótipo CM-F80-CP2	92
Figura A.37 - Comparação experimental e numérica do protótipo CM-F80-CP2 (flanges) ...	92
Figura A.38 - Amplitudes na alma do protótipo CM-F80-CP3.....	93
Figura A.39 - Comparação experimental e numérica do protótipo CM-F80-CP3 (alma).....	93
Figura A.40 - Deslocamentos nos flanges do protótipo CM-F80-CP3	94
Figura A.41 - Comparação experimental e numérica do protótipo CM-F80-CP3 (flanges) ...	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Identificação dos protótipos ($t = 1,5 \text{ mm}$)	10
Tabela 2.2 - Características do aço utilizado	12
Tabela 2.3 - Elementos utilizados para fixação das chapas de engaste, apoio e prensa	20
Tabela 2.4 - Instrumentação dos perfis	22
Tabela 4.1 - Levantamento de imperfeições da seção transversal nos protótipos ensaiados	36
Tabela 4.2 - Comparação entre as cargas últimas ensaiadas e simuladas	55
Tabela 4.3 - Modos de flambagem induzidos e amplitude de imperfeição	56
Tabela 4.4 - Tipologias de furos localizadas no elemento da alma	58
Tabela 4.5 - Modos de instabilidade para o elemento placa considerando a relação h_f/b_w	62
Tabela 4.6 - Resultados das cargas críticas para perfil placa	63
Tabela 4.7 - Modos de instabilidade para o perfil rack considerando a relação h_f/b_w	64

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Perfis formados a frio	1
1.2 Sistemas de armazenagem industrial	2
1.3 Flambagem local e distorcional	3
1.4 Revisão bibliográfica	5
1.5 Objetivos	8
1.6 Justificativa	8
1.7 Metodologia	9
1.8 Estrutura da dissertação.....	9
2 PROGRAMA EXPERIMENTAL	10
2.1 Geometria e identificação dos protótipos	10
2.2 Propriedades mecânicas do material	12
2.3 Montagem experimental	12
2.3.1 Projeto e fabricação das chapas	14
2.3.2 Preparação dos protótipos.....	16
2.3.3 Alinhamento dos protótipos	18
2.4 Instrumentação e aquisição de dados	21
2.5 Levantamento das imperfeições geométricas	24
3 ANÁLISE NUMÉRICA	25
3.1 Teoria Generalizada de Viga (GBT) - Software GBTUL	25
3.2 Análise por meio de elementos finitos de casca.....	26
3.2.1 Tipos de elementos	26
3.2.2 Refinamento da malha.....	27
3.2.3 Condições de contorno.....	29
3.2.4 Análise de estabilidade.....	31
3.2.5 Análise não linear	32
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	35
4.1 Levantamento de imperfeições geométricas	36
4.2 Série CC-SFS.....	37
4.3 Série CC-F60	40
4.4 Série CC-F80	43

4.5 Série CM-SFS	46
4.6 Série CM-F60	49
4.7 Série CM-F80	52
4.8 Considerações sobre as comparações entre os resultados numéricos e experimentais	55
4.9 Análise da estabilidade de elementos perfurados	56
4.9.1 Modelo de elementos finitos	59
4.9.2 Resultados das análises em elementos finitos	61
4.9.2.1 Placa.....	61
4.9.2.2 Seção tipo rack.....	63
4.9.3 Considerações sobre o estudo	64
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
REFERÊNCIAS.....	69
APÊNDICE.....	72

1 INTRODUÇÃO

1.1 Perfis formados a frio

Os perfis formados a frio (PFF) são obtidos a partir de dobragem, em temperatura ambiente, de chapas. Tal processo permite a fabricação de variados perfis de seção aberta com grande emprego na construção civil, substituindo, em muitos casos com vantagens, os perfis laminados a quente. Desta forma, são geralmente utilizadas chapas finas de aço para a sua produção, conforme especificado em norma (NBR 14762:2010, 2010). A ideia principal do uso dos PFF é a simplicidade de sua produção, manuseio e transporte. Dentre as diversas seções mais comuns em perfis formados a frio, tem-se por exemplo o U enrijecido, caixa e a seção tipo rack ou garrafa. Estas seções estão apresentadas na Figura 1.1.

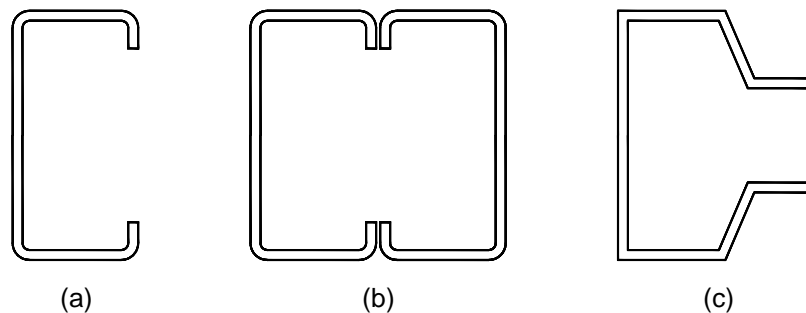


Figura 1.1 - Perfis mais utilizados em PFF:
(a) Perfil U enrijecido; (b) Perfil caixa; (c) Perfil rack ou garrafa

O dimensionamento de estruturas compostas por PFF apresenta certas particularidades em relação aos perfis laminados e soldados. Como consequência da alta relação largura-espessura de suas paredes, os PFF estão suscetíveis aos fenômenos de instabilidade tais como: flambagem local, distorcional e global. O presente trabalho analisa a influência da flambagem local e distorcional na capacidade resistente de perfis tipo rack com perfurações ao longo de seus comprimentos e submetidos à compressão centrada.

1.2 Sistemas de armazenagem industrial

Os sistemas de armazenagem industrial são estruturas utilizadas para armazenar produtos manufaturados e são conhecidos também como *racks*. Variam de pequenas estantes carregadas manualmente até estruturas de mais de 30m de altura com carregamento automatizado (GODLEY, 1991). São fabricados em perfis formados a frio com perfurações ao longo do elemento.

A escolha do tipo de sistema de armazenagem industrial é decisiva para se obter um melhor aproveitamento do espaço e permitir o fácil acesso às cargas armazenadas. Estes sistemas estão sujeitos ao desenvolvimento de fenômenos de instabilidade, tal como a flambagem local das paredes que compõem sua seção. Além disso, pelo fato das colunas possuírem perfurações ao longo do comprimento que visam a montagem através de ligações encaixadas e/ou parafusadas, e devido à sua elevada esbeltez, a estabilidade destes sistemas é afetada. A Figura 1.2 retrata exemplos de sistemas de armazenagem industrial.



Figura 1.2 - Sistema de armazenagem industrial
FONTE: Águia (2013)

A seção rack ou garrafa, cuja nomenclatura dos componentes é apresentada na Figura 1.3, é uma seção aberta apresentando perfurações de configurações diversas ao longo de seu comprimento. Os flanges de ligação permitem a fixação do sistema de contraventamento diretamente no perfil, facilitando a montagem dos racks. No entanto, a existência destas perfurações modifica o comportamento e a capacidade resistente da estrutura, motivando diversos estudos nesta avaliação (FREITAS ET AL. 2010, 2013).

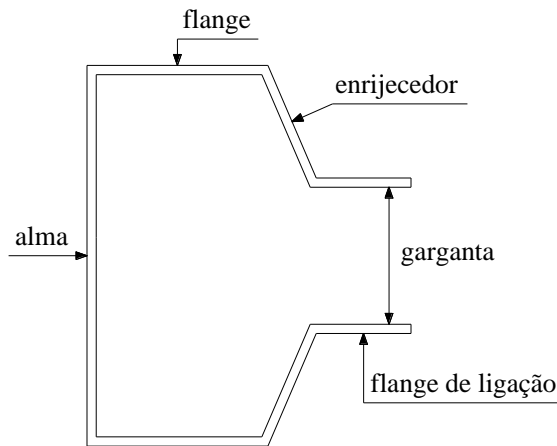


Figura 1.3 - Elementos da seção transversal do perfil rack ou garrafa

Neste trabalho serão avaliados o comportamento e o esforço resistente de perfis do tipo rack submetidos à compressão com perfurações retangulares nas almas, com ênfase na ocorrência da flambagem local e distorcional do elemento da seção (detalhes dos furos no item 2.1). Mesmo não sendo usuais, essas perfurações foram escolhidas em função da disponibilidade de material para ensaio e com o objetivo de estabelecer uma forma comportada da estrutura para calibrar o modelo numérico, avaliando a influência dos furos nos modos e na capacidade resistente do perfil.

1.3 Flambagem local e distorcional

A flambagem é um fenômeno que ocorre em elementos esbeltos com perda de estabilidade. O modo local de placa (MLP) é caracterizado pela ausência de deslocamentos das bordas comuns a seção transversal com deslocamentos laterais na forma senoidal. A Figura 1.4 apresenta o modo local de placa para seções tipo rack e U enrijecido.

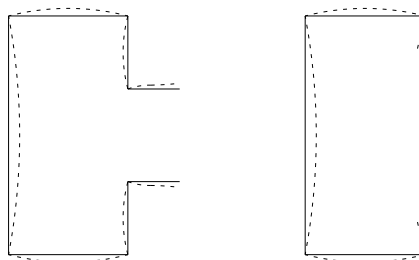


Figura 1.4 - Flambagem local em seções tipo rack e U enrijecido

O comportamento pós flambagem pode ser considerado pelo método da largura efetiva a partir do cálculo das larguras efetivas dos elementos (WINTER, 1947) ou com base no método da seção efetiva (BATISTA, 2009) a partir do cálculo das propriedades geométricas efetivas da seção transversal das barras. Outra alternativa de análise seria o Método da Resistência Direta (SCHAFFER, 2002). Esses métodos são abordados pela NBR 14762 (NBR 14762:10, 2010).

O modo distorcional é caracterizado pela distorção da geometria original da seção. A Figura 1.5 apresenta as condições de flambagem distorcional em PFF.

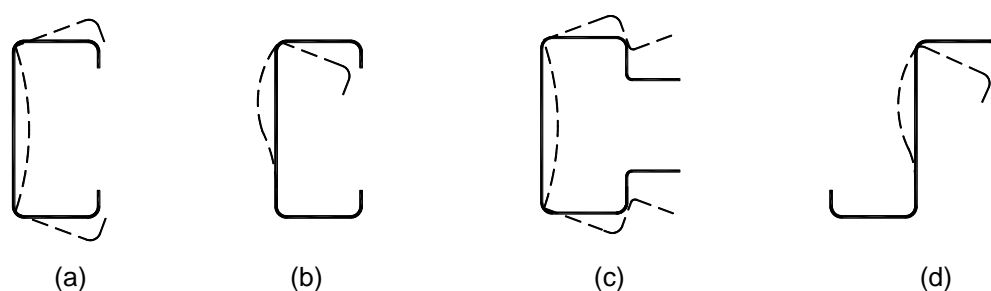


Figura 1.5 - Exemplos de flambagem distorcional da seção transversal na compressão e flexão simples: (a) U enrijecido sob compressão uniforme; (b) U enrijecido sob flexão; (c) Seção tipo rack sob compressão uniforme; (d) Z enrijecido sob flexão
FONTE: NBR 14762 (2010)

Diferentemente da flambagem local, onde a posição dos vértices das arestas é conservada, a distorção conduz ao deslocamento de pelo menos um desses vértices. A flambagem distorcional pode ser prevista pelo método da seção efetiva ou com base no Método da Resistência Direta, conforme anexo C da NBR 14762.

As cargas críticas de flambagem local ou distorcional de perfis de aço podem ser obtidas, por exemplo, através de análise de estabilidade elástica com o auxílio de programas computacionais (GBTUL e ANSYS) ou equações baseadas nos resultados de análises paramétricas. Os resultados da análise computacional permitem a identificação dos modos de flambagem e estados de tensões associados.

Além dos modos de instabilidade local e distorcional, têm-se a flambagem global, por flexão ou flexo-torção. Estes modos, dependendo do comprimento e tipo do perfil, podem ocorrer isoladamente ou em interação, o que acrescenta dificuldades na análise numérica e na previsão do comportamento do elemento estrutural. Neste trabalho serão considerados os modos local, distorcional e a possível interação entre eles. A seguir tem-se algumas das principais pesquisas em PFF considerando os modos de instabilidade estudados nesta dissertação.

1.4 Revisão bibliográfica

Sarmanho (1991) realizou um estudo teórico-experimental do comportamento pós-crítico de perfis de chapa dobrada com paredes esbeltas, sob o efeito de flambagem local. A análise experimental foi composta por três protótipos com seção U enrijecido submetidos à compressão centrada. Os resultados experimentais foram comparados ao estudo teórico, baseado no método da largura efetiva, propondo-se uma formulação geral que descrevesse o comportamento pós-crítico até a ruína dos perfis. Esta equação polinomial foi aplicada em estudos numéricos, via programa de elementos finitos, e confrontada com especificações existentes em normas de projeto. A formulação proposta é mais adequada do que aquelas contidas em normas de projeto e melhor representa o comportamento das paredes esbeltas em estudo.

Vazquez (2002) realizou um estudo teórico-experimental de perfis de chapa dobrada do tipo “rack” com variações nas dimensões da seção transversal e comprimento. Destacam-se os fenômenos de flambagem local, distorcional e global com objetivo de identificar principalmente a flambagem por torção. A primeira etapa foi constituída por estudos paramétricos para definir as geometrias e comprimentos dos protótipos. Em seguida os ensaios experimentais foram realizados e, por fim, comparados com os resultados teóricos (carga última) na tentativa de desenvolver métodos de projeto para tais perfis.

Schaffer (2002) apresentou os modos de flambagem comuns em perfis formados a frio (local, distorcional e global) e os problemas em determinar corretamente cada um deles, baseando-se nas normas de dimensionamento que consideram equações analíticas para isto. Observou-se que geralmente existe inconsistência entre os resultados analíticos e experimentais. Por exemplo, especificações para colunas de aço formadas a frio não fornecem uma verificação clara para flambagem distorcional. Desta forma, um novo método é proposto para: incorporar explicitamente os modos, reduzir a necessidade de cálculos de largura efetiva e/ou propriedade efetiva, evitar erros sistemáticos e fornecer um procedimento para o dimensionamento baseando-se na estabilidade elástica das seções.

Schaffer e Yu (2006) realizaram ensaios em laboratório com perfis formados a frio do tipo U enrijecido e zeta sem contenções laterais. Os modos de instabilidade atuantes neste sistema são: local, distorcional ou flambagem lateral por torção. Porém, devido à escassez de dados experimentais, os autores analisaram o problema

da flambagem distorcional para obter a capacidade resistente do elemento. As características da análise foram definidas para estabelecer o modo de falha por distorção e restringir a flambagem lateral por torção na medida do possível. A partir dos resultados, observou-se que a flambagem distorcional acarreta grande redução da resistência quando comparada à flambagem local. Os resultados obtidos foram ainda utilizados para a verificação da validade de prescrições de diversas normas para o caso.

Souza *et al.* (2006) analisaram o comportamento de perfis de aço formados a frio, de seções do tipo U enrijecido com enrijecedores intermediários na alma, submetidos à compressão axial. Os perfis considerados na pesquisa foram seções usuais em colunas (montantes) no sistema Light Steel Frame. O estudo baseou-se em análises numéricas através do Método dos Elementos Finitos, onde foram obtidas as cargas críticas e os respectivos modos de flambagem elástica das seções e avaliações do comportamento pós-flambagem, através do software comercial ANSYS.

Lecce e Rasmussen (2006a, 2006b) avaliaram a ocorrência do modo distorcional em seções formadas a frio compostas em aço inoxidável quando submetidas à compressão. Foram realizadas análises experimentais e numéricas de colunas curtas e médias. Um total de 19 protótipos foram ensaiados e o modo distorcional identificado como falha. A tensão última foi maior quando comparada com a região de proporcionalidade, sendo influenciada pela não-linearidade do material (mais evidente para seções com enrijecedores intermediários). Os resultados numéricos mostraram que a não-linearidade do material e as propriedades dos enrijecedores delimitam a carga última da seção. A partir destes resultados foram analisadas as prescrições de norma correntes e a eficiência da utilização de aço inoxidável neste tipo de estrutura.

Camotim *et al.* (2007) realizaram um estudo numérico sobre o comportamento elástico e elástico-plástico de perfis do tipo U enrijecido, visando a interação entre os modos de flambagem local e distorcional. A fim de investigar esses comportamentos, foi adotado um modelo biapoiado via método dos elementos finitos com auxílio do software ABAQUS. A modelagem para simulação dos perfis foi definida a partir de elementos de casca (S4 – notação software ABACUS) com introdução de diferentes níveis de imperfeições geométricas. Os resultados mostraram que, no estágio avançado pós-crítico, todas as trajetórias de equilíbrio convergiram para duas curvas com predominância do acoplamento distorcional. As imperfeições iniciais para

indução do fenômeno local reproduzem uma queda repentina na configuração deformada do modelo, semelhante ao modo local com 3 meias ondas. A indução distorcional é mais crítica quando relacionada à resistência da coluna.

Casafont *et al.* (2009) apresentam um procedimento de análise que permite calcular a carga crítica distorcional em perfis formados a frio com paredes finas e seção transversal aberta. O cálculo foi baseado em elementos finitos com aplicação de restrições, visando o desacoplamento dos modos de deformação por flambagem. Na primeira etapa utilizou-se a análise de Teoria Generalizada de Vigas (GBT) para deduzir as restrições a serem utilizadas no modelo de elementos finitos (MEF). O objetivo era forçar o elemento a flambar na análise GBT restringindo os graus de liberdade na malha. Em seguida, as cargas críticas foram determinadas com a análise linear de flambagem via MEF. Estas cargas são bastante precisas se comparadas com aquelas obtidas via GBT. A principal contribuição do trabalho foi aplicar os conceitos utilizados nas análises GBT e CFMS (faixas finitas) em elementos finitos, visando o modo distorcional de flambagem.

Silva (2011) realizou um estudo teórico-experimental de colunas curtas perfuradas sob carregamento centrado, com uma análise da influência das perfurações no seu comportamento local. Os resultados experimentais foram analisados por modelos numéricos utilizando elementos finitos (software ANSYS). A comparação dos resultados numéricos e experimentais indicaram boa correlação em termos de cargas de flambagem e comportamento das colunas. Os estudos realizados por Faria *et al.* (2014) complementaram as análises e permitiram a calibração e expansão do modelo para verificar a influência das diferentes configurações de furos na estabilidade de chapas biapoiadas sob compressão.

Casafont *et al.* (2011) realizaram um estudo analítico, numérico e experimental em colunas curtas tipo rack com perfurações, submetidas à compressão. O foco principal, considerando os comprimentos adotados, foi avaliar o modo de instabilidade local e determinar o centro geométrico e área efetivos devido a influência dos furos. O método analítico foi aplicado considerando a Normas Europeias; um método tradicional que envolve a determinação da largura efetiva para cada parte da seção; o numérico, através da aplicação de elementos finitos via software ANSYS e a análise experimental, com vinte séries de protótipos sendo cada série composta de cinco protótipos devidamente instrumentados. Os resultados de ambos os métodos, quando

comparados com os valores experimentais, apresentaram boa correlação e provaram ser boas ferramentas na fase de projeto e otimização.

Souza (2013) realizou um estudo teórico-experimental, em perfis tipo "rack" sob compressão centrada, para avaliar a ocorrência dos modos de instabilidade local, distorcional, global e possível interação entre os mesmos. Os perfis utilizados possuem perfurações ao longo do comprimento e o carregamento é aplicado através de rótulas (caracterizando a condição de apoio nas extremidades). As análises numéricas empregaram a utilização do software ANSYS e GBTUL. Os resultados experimentais e os numéricos apresentaram uma boa correlação.

Estes trabalhos são importantes para fundamentar e desenvolver as análises numérica e experimental de perfis formados a frio. Os modos de instabilidade, em função dos estudos realizados na literatura, foram previstos e identificados neste trabalho.

1.5 Objetivos

Este trabalho tem o objetivo de avaliar a influência do modo de flambagem local e distorcional, em perfis leves tipo rack, considerando coluna com perfurações ao longo de seus comprimentos.

Como objetivos específicos tem-se: a validação de modelo numérico em elementos finitos por meio de software comercial (ANSYS); desenvolvimento de programa experimental eficiente para validação das análises numéricas; e determinação da influência dos furos na capacidade resistente dos perfis.

1.6 Justificativa

As avaliações numérica e experimental tornam-se importantes instrumentos na determinação da carga de flambagem do modo local e distorcional. Os estudos da influência dos modos de flambagem na capacidade resistente considerando placas e seções sem perfurações são conhecidos e utilizados em normas de projeto. No entanto, em seções com perfurações há poucos estudos que consideram a magnitude do furo, disposição e forma dos mesmos, bem como sua influência na capacidade resistente dos elementos. Os estudos de Freitas *et al.* (2013, 2014) são referências para o desenvolvimento deste trabalho, que visa avaliar a influência do modo de

flambagem local e distorcional em seções tipo rack com e sem a presença de furos. As avaliações visam uma contribuição para as análises que consideram a presença dos furos e também para o desenvolvimento futuro de prescrições normativas na área.

1.7 Metodologia

A primeira etapa foi constituída de análise numérica linear com o objetivo de determinar os modos de flambagem e cargas críticas associadas. O modelo computacional foi desenvolvido em elementos finitos via software ANSYS.

Em um segundo momento, foi realizado o estudo experimental em perfis tipo rack sob compressão centrada. A instrumentação e ensaios dos protótipos foram estabelecidos a partir dos resultados da primeira etapa, sendo obtidos a carga última e os modos de colapso.

Por fim, foi realizada a análise numérica não linear dos protótipos ensaiados com indução das imperfeições geométricas por meio de um coeficiente (metade da espessura) que simulou as irregularidades levantadas em função de observações visuais realizadas durante os ensaios.

Foram obtidos a carga última e os modos de colapso numéricos, sendo esses comparados com resultados experimentais.

A partir dessas análises foi avaliada a influência das perfurações no comportamento das colunas.

1.8 Estrutura da dissertação

No capítulo 2 é apresentado o programa experimental, com a descrição dos procedimentos.

No capítulo 3 são apresentados os procedimentos numéricos utilizados, com destaque para o desenvolvimento do procedimento via método dos elementos finitos. Apresentam-se neste capítulo os modelos utilizados nas análises linear e não linear.

No capítulo 4 os resultados numéricos são comparados aos resultados experimentais, a fim de calibrar a eficiência do modelo. Também é apresentado um estudo paramétrico com variações de furos a partir de uma chapa plana e perfil rack.

O capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas com este estudo e as sugestões para a continuidade da pesquisa.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este capítulo descreve o programa experimental desenvolvido, sendo os ensaios realizados no Laboratório de Estruturas Professor Altamiro Tibiriçá Dias do Departamento de Engenharia Civil - DECIV/EM/UFOP.

Foram realizados 18 ensaios em colunas curtas e médias sob carregamento axial centrado, sendo 3 ensaios para cada geometria apresentada na Figura 2.2. O objetivo foi a obtenção da carga máxima aplicada, bem como a medição dos deslocamentos associados aos modos de flambagem local e distorcional em função de um carregamento crescente aplicado.

A seguir tem-se a descrição dos protótipos quanto à geometria e as propriedades mecânicas, a descrição dos equipamentos e instrumentação utilizados nos ensaios e, em seguida, é apresentada a metodologia empregada.

2.1 Geometria e identificação dos protótipos

Para facilitar a identificação dos protótipos, foi definida uma nomenclatura associada ao comprimento da coluna, existência ou não de perfurações e suas dimensões, e em seguida o número do ensaio realizado conforme Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Identificação dos protótipos (t = 1,5 mm)

Descrição: XX-WWW-CPN	
XX	<ul style="list-style-type: none"> Coluna curta: CC Coluna média: CM
WWW	<ul style="list-style-type: none"> Perfil sem a presença de furos: SFS Perfil com furos de 60% da base: F60 Perfil com furos de 80% da base: F80
	<ul style="list-style-type: none"> Corpo de prova 1: CP1 Corpo de prova 1: CP2 Corpo de prova 1: CP3

Os protótipos foram fabricados com perfurações retangulares ao longo da altura da estrutura. A localização das perfurações, bem como o comprimento total da coluna foram obtidos a partir de análises preliminares (SOUZA, 2013), onde foi considerada a possibilidade de interação entre os modos local e distorcional. A Figura 2.1 apresenta as medidas fixas e variáveis do protótipo ao longo do comprimento e seção transversal.

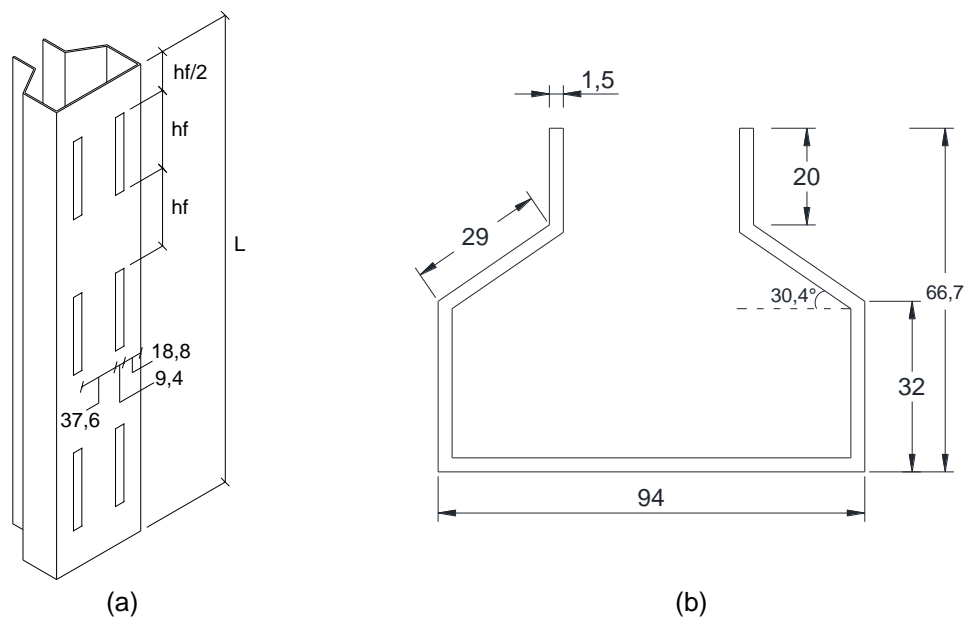


Figura 2.1 - Dimensões do protótipo (mm): (a) Ao longo do comprimento; (b) Seção transversal

Para o modelo com perfurações, foi definida a largura do furo igual a 10% da largura da alma (9,4mm) e altura “hf” igual a 60 ou 80% da mesma (56,4 e 75,2mm). As dimensões variáveis da Figura 2.1 (L e hf) são descritas na Figura 2.2.

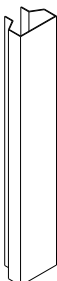


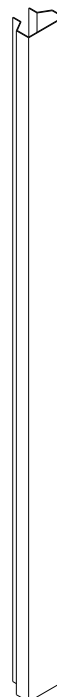


					
CC-SFS	CC-F60	CC-F80	CM-SFS	CM-F60	CM-F80
L = 601,6mm	L = 564mm	L = 601,6mm	L = 1504mm	L = 1579,2mm	L = 752mm
hf = 0mm	hf = 56,4mm	hf = 75,2mm	hf = 0mm	hf = 56,4mm	hf = 75,2mm

Figura 2.2 - Protótipos utilizados nas análises numérica e experimental

2.2 Propriedades mecânicas do material

Foram realizados ensaios de tração para obter a tensão limite de escoamento “ f_y ”, o alongamento residual após a ruptura “ ΔL ” e a tensão limite de resistência à tração “ f_u ”, conforme especificações indicadas pela NBR 6892 (NBR ISO 6892, 2002). A Tabela 2.2 apresenta os valores de cada parâmetro do aço SAE e a média encontrada. Esta última foi utilizada em toda a análise numérica.

Tabela 2.2 - Características do aço utilizado

Corpo de prova	f_y (MPa)	f_u (MPa)	ΔL (%)
CP1	235,4	401,04	27,5
CP2	217,7	378,12	29,5
CP3	213,4	335,26	28,5
CP4	221,4	382,81	30,5
Média	222	379	29

2.3 Montagem experimental

Os ensaios experimentais foram realizados no Laboratório de Estruturas Altamiro Tibiriçá Dias da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). O equipamento utilizado para aplicação de carregamento centrado foi a prensa servo-hidráulica (fabricante - INSTRON SATEC 5569) com capacidade de 2 MN de tração e compressão (Figura 2.3). A montagem detalhada é apresentada na Figura 2.4.



Figura 2.3 - Equipamento utilizado para aplicação de carga nos protótipos
 FONTE: Instron (2008)

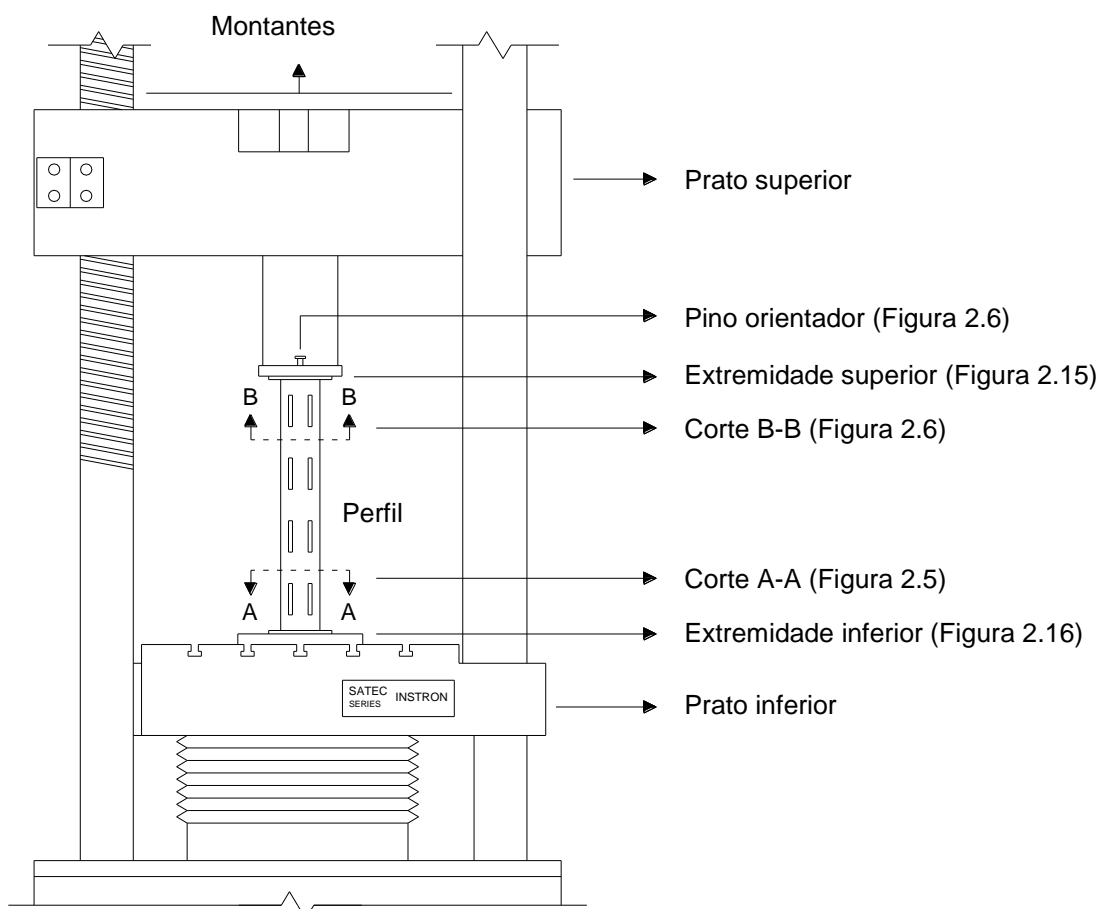


Figura 2.4 - Montagem experimental

Nos ensaios, os perfis foram posicionados entre chapas fixadas por parafusos, com o objetivo de garantir a verticalidade da carga aplicada e estabelecer a condição de engaste (item 2.3.1). Para impedir o empenamento da seção e facilitar a fixação, foram soldadas nas extremidades dos protótipos chapas de 8,0 mm de espessura, conforme item 2.3.2. A aplicação das cargas no centro de gravidade da seção foi estabelecida através do alinhamento geométrico entre o perfil e a prensa (Item 2.3.3). Os ensaios foram realizados com controle de deslocamento (0,1mm/min), conforme estudos realizados em Souza (2013), Freitas *et al.* (2013; 2014) e Silva (2011).

Nos itens seguintes tem-se a descrição das chapas de apoio e das chapas nas extremidades dos protótipos.

2.3.1 Projeto e fabricação das chapas

Para estabelecer a condição de engastamento foram projetadas duas chapas de apoio para fixação na máquina de ensaio e duas chapas soldadas na extremidade de cada protótipo. As primeiras possuem dimensões de 300x250x25,5 mm (chapa de engaste superior) e 200x200x25,5 mm (chapa de engaste inferior). As demais (chapa de apoio superior e inferior) possuem dimensões de 150x150x8 mm, soldadas a cada protótipo (item 2.3.2) e fixadas às anteriores por parafusos visando manter a centralização da carga aplicada. As chapas não possibilitaram deformações para o carregamento aplicado e garantiram a condição de engaste desejada.

As perfurações na chapa de engaste inferior, com diâmetro de 15 mm, foram utilizadas para fixar a mesma com o prato inferior da prensa e também com a chapa de apoio inferior (8 furos no total). Próximos à essa região tem-se 4 furos de 22 mm já existentes. Uma abertura de 20 mm foi feita na região central das chapas para monitorar o alinhamento do carregamento (mais detalhes no item 2.3.3). A Figura 2.5 apresenta a montagem da região inferior do engaste com todos os detalhes mencionados acima.

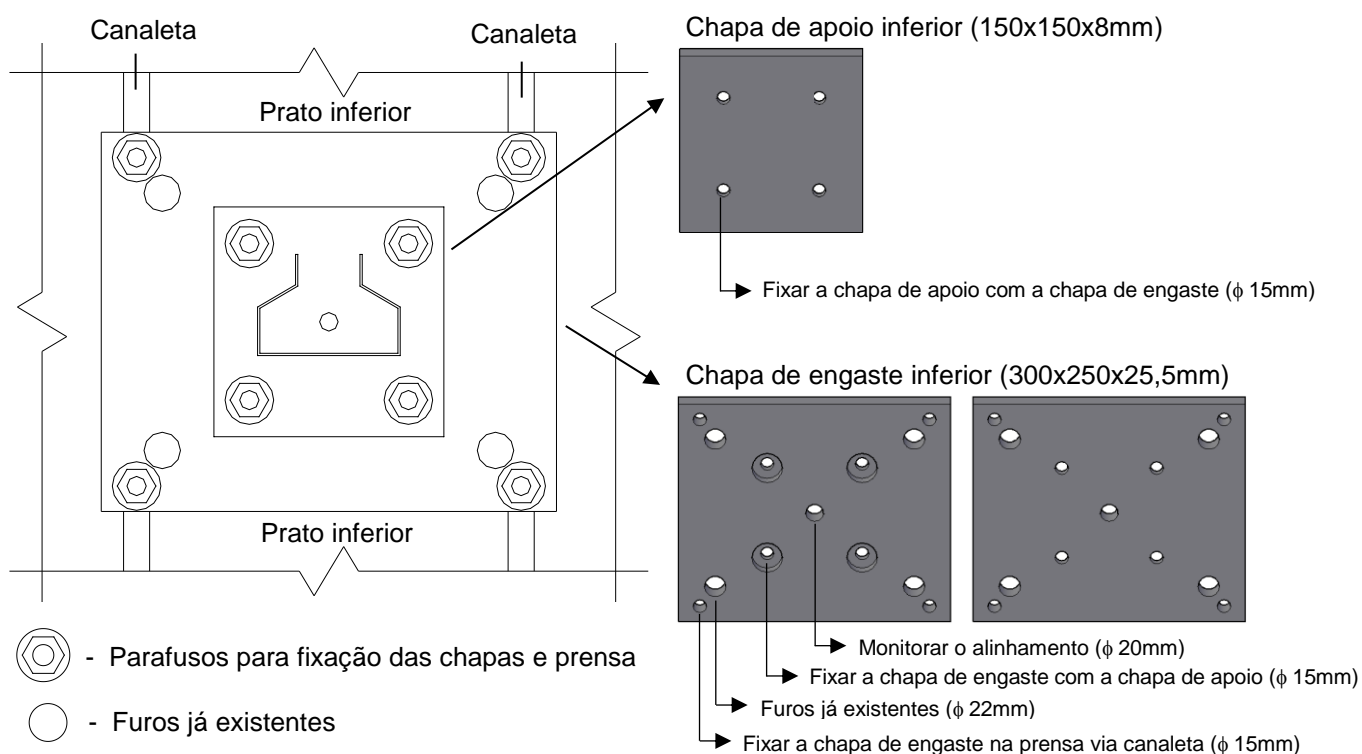


Figura 2.5 - Montagem da região inferior do engaste (Corte A-A)

As características da região superior do engaste são similares às anteriores. As 4 perfurações com diâmetro de 15 mm na chapa de engaste superior foram utilizadas para fixar a mesma com a chapa de apoio superior. Um quinto furo, com diâmetro de 16 mm, foi feito na região central para acoplá-la ao prato superior da prensa por meio de um pino orientador. A Figura 2.6 apresenta a montagem da região superior do engaste.

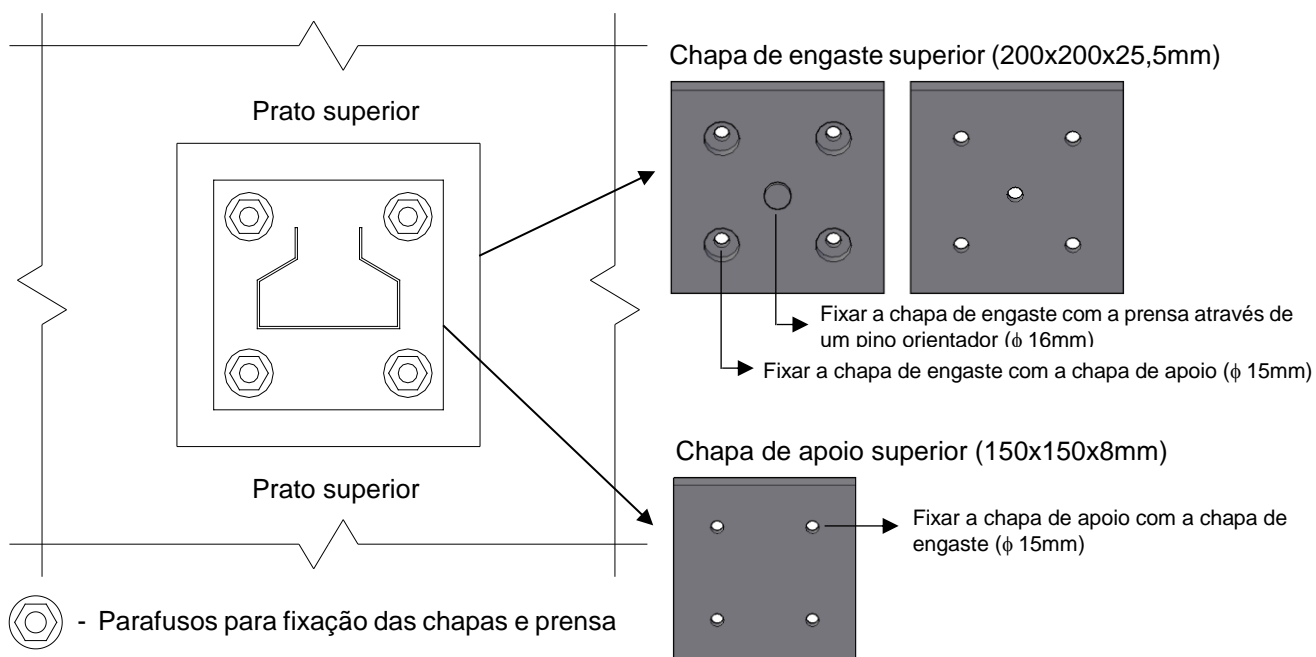


Figura 2.6 - Montagem da região superior do engaste (Corte B-B)

Os furos foram executados em tornearia conforme dimensões de projeto. A Figura 2.7 e a Figura 2.8 apresentam as chapas fabricadas, com os elementos para fixação nos perfis metálicos e na prensa.



Figura 2.7 - Chapa de engaste superior

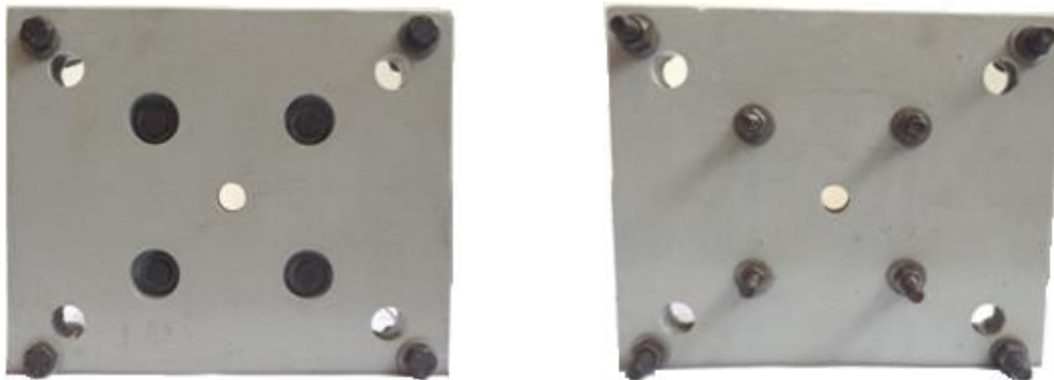


Figura 2.8 - Chapa de engaste inferior

As configurações de extremidades engastadas com empenamento impedido são estabelecidas em função das condições de extremidade apresentadas neste item e através da soldagem das chapas nos perfis, conforme abordado a seguir.

2.3.2 Preparação dos protótipos

Para fixação dos protótipos nas chapas de apoio inferior e superior, e garantir as condições de contorno previstas, foi necessário utilizar o processo de soldagem. O equipamento utilizado para a solda foi a Smashweld 257 – EASB (Figura 2.9).

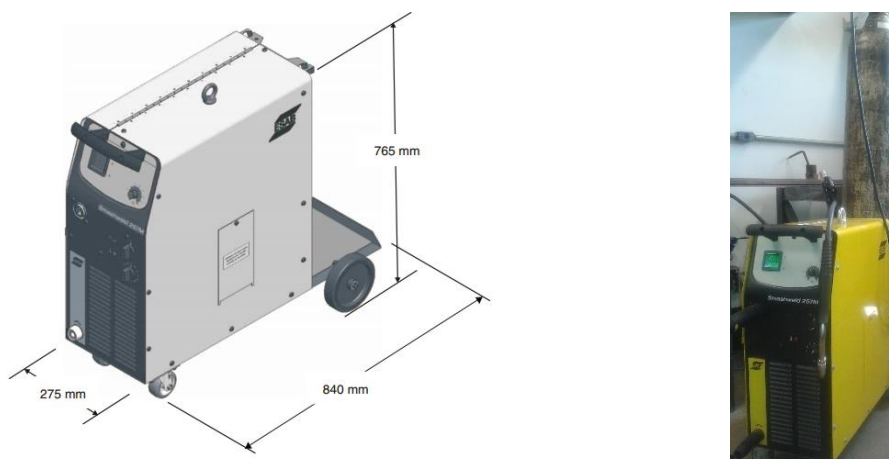


Figura 2.9 - Equipamento de solda
FONTE: ESAB (2009)

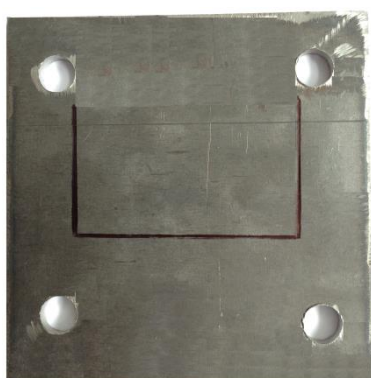
Trata-se de um conjunto semiautomático para soldagem MIG/MAG que reúne uma fonte de energia com característica de tensão constante, alimentador de arame e plataforma para o cilindro do gás de proteção com alimentação automática. Possui recursos de solda contínua, ponto ou intermitente, permite a soldagem com arames sólidos de aço carbono, aços inoxidáveis e outros. O gás de proteção utilizado foi o

Stargold #C25 da Empresa White Martins (composto por 75% de Ar e 25% de CO₂). A especialidade desse gás está relacionada à soldagem de aço carbono de qualquer espessura em curto circuito através de arame tubular.

O procedimento de soldagem das chapas em cada extremidade dos protótipos foi do tipo intermitente (com intervalo de 0 a 2,5 segundos conforme parâmetros do fabricante). Essa escolha foi fundamentada no tipo de ensaio realizado e magnitude dos esforços aplicados na região da solda.

Para que a chapa soldada fosse corretamente posicionada e alinhada de modo a garantir a posição do carregamento durante o ensaio, a seguinte metodologia foi utilizada:

- Determinação do centróide da seção: A partir das coordenadas da linha média de cada seção transversal dos protótipos, inseridas no software AUTOCAD, obteve-se os eixos principais de inércia e a posição do centróide;
- Marcação na superfície da chapa, por meio de pincel, dos flanges e alma do protótipo, considerando coincidentes as posições dos centróides da seção e da chapa conforme Figura 2.10 (a);
- Os perfis foram ajustados manualmente para coincidirem com a marcação realizada na chapa, conforme apresentado na Figura 2.10 (b);



(a)



(b)

Figura 2.10 - Preparação dos protótipos: (a) Marcação na superfície da chapa; (b) Ajustes do perfil na marcação

- O processo de soldagem foi realizado, inicialmente, com pontos de solda nos vértices da seção transversal. Em seguida, o ponto médio da alma foi ponteadado para garantir a fixação do perfil, conforme apresentado na Figura 2.11.

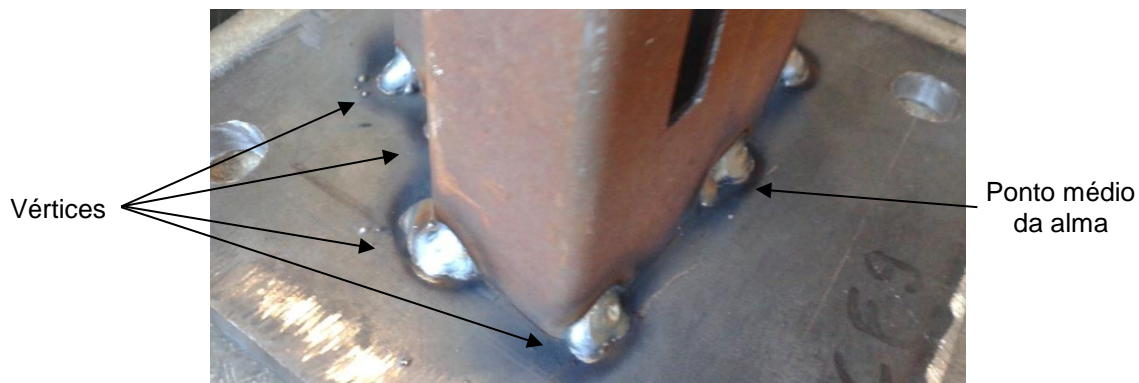


Figura 2.11 - Execução da solda na extremidade do perfil

2.3.3 Alinhamento dos protótipos

Após a soldagem das chapas de apoio no perfil, o alinhamento com a prensa foi realizado manualmente de modo a garantir a centralização do carregamento. Assim, o processo para coincidir os centros de gravidade de todos os elementos é descrito a seguir:

- O primeiro passo foi efetuar a marcação no prato inferior da prensa, conforme Figura 2.12 (a). O equipamento já apresentava uma perfuração em sua região central que indica o eixo de carga da máquina;
- O centro geométrico da chapa de engaste inferior foi obtido e marcado na superfície da mesma, conforme Figura 2.12 (b);

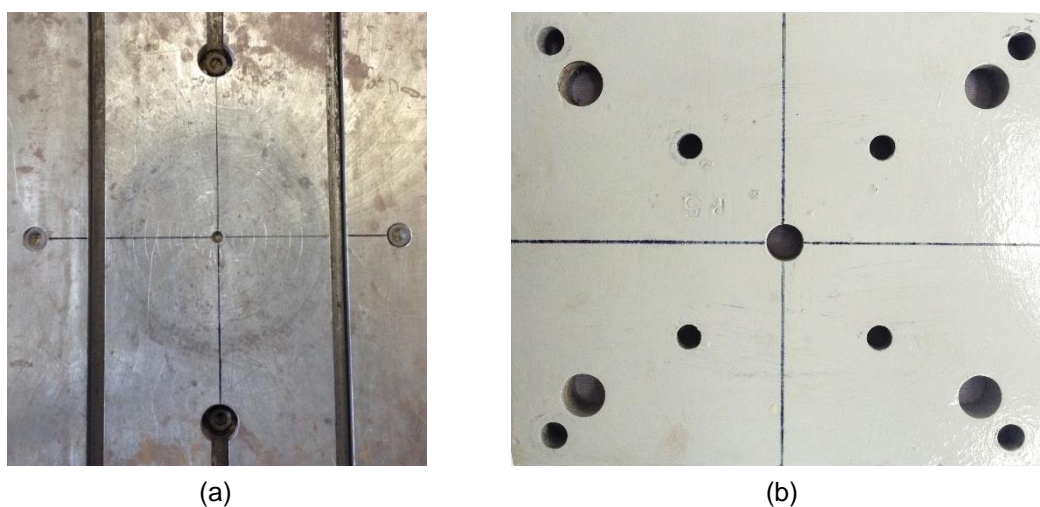


Figura 2.12 - Processo de alinhamento das chapas com a prensa: (a) Marcação na prensa; (b) Marcação na chapa de engaste inferior

- O alinhamento manual foi realizado com a guia das duas marcações descritas anteriormente (Figura 2.13 - setas vermelhas). O ajuste final é feito pela coincidência do furo central da prensa, que indica o eixo da carga, com a perfuração no centro da chapa de engaste inferior (Figura 2.13 - seta azul);

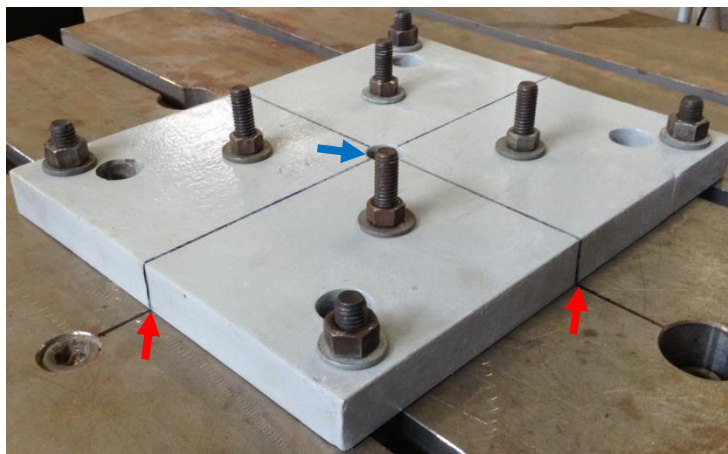


Figura 2.13 - Chapa inferior de engaste posicionada no prato da máquina de ensaios com detalhes do alinhamento para o carregamento centrado

- O ponto médio de cada aresta da chapa de apoio foi destacado e marcado ao longo da sua espessura para facilitar o alinhamento com o prato da máquina de ensaios. A coincidência da marcação com a linha média da chapa de engaste inferior é representado pelas setas vermelhas na Figura 2.14.

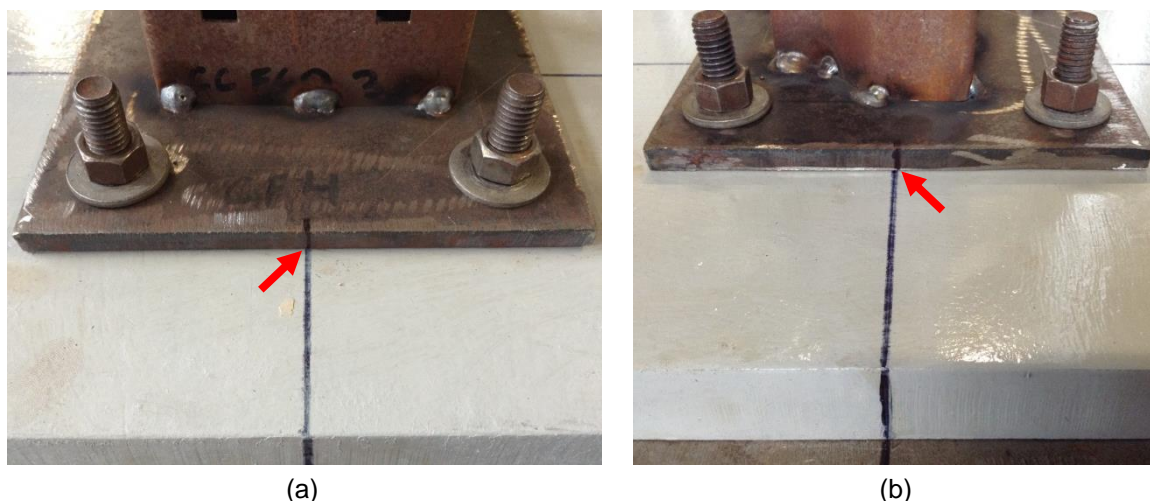


Figura 2.14 - Alinhamento da chapa de apoio inferior com a chapa de engaste inferior: (a) Região da alma; (b) Região dos flanges

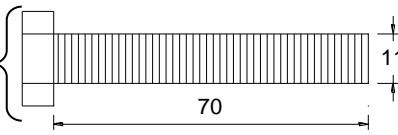
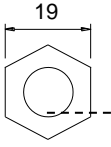
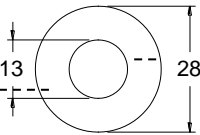

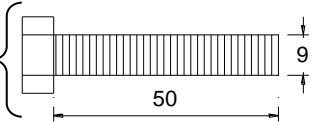
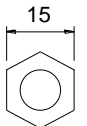
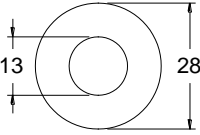

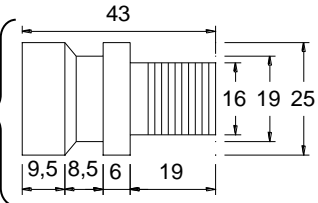

A chapa de engaste superior foi fabricada de modo a encaixar com precisão no prato da máquina de ensaios, através do pino orientador. Assim, as marcações e

alinhamentos realizados na extremidade inferior são suficientes para centralizar todo o sistema.

Após a realização do alinhamento do carregamento, todos os elementos foram fixados com acessórios para garantir o engastamento. A escolha desses foi baseada na capacidade resistente, dimensões dos furos e encaixe dos mesmos nas canaletas da prensa. A distribuição em cada extremidade do engaste é descrita a seguir:

- Extremidade inferior do engaste: A fixação da chapa de engaste com o prato da prensa foi feita com o auxílio do Modelo 1 dos parafusos. Já o Modelo 2 foi utilizado para fixar as duas chapas envolvidas.
- Extremidade superior do engaste: A chapa de engaste foi acoplada ao prato da prensa com o auxílio do pino orientador. O Modelo 2 dos parafusos foi utilizado como anteriormente. A Tabela 2.3 apresenta os elementos de fixação e suas respectivas dimensões geométricas.

Tabela 2.3 - Elementos utilizados para fixação das chapas de engaste, apoio e prensa

	Parafuso	Porca	Arruela	Fotos
Modelo 1				
Modelo 2				
Pino Orientador				

As etapas descritas anteriormente são fundamentais para estabelecer a condição de engaste desejada. As Figuras abaixo apresentam o sistema biengastado utilizado durante os ensaios. Nota-se que não há marcações na extremidade superior pelo fato do alinhamento ser configurado na inferior. Porém, as imperfeições da peça podem interferir neste alinhamento. A montagem experimental dos protótipos é finalizada dando início à instrumentação e aquisição de dados.

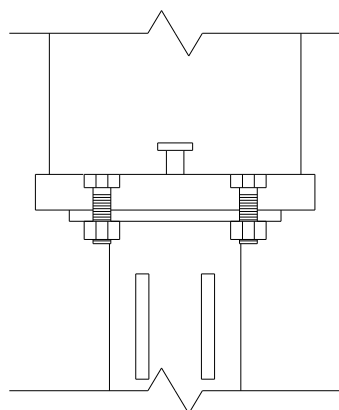


Figura 2.15 - Extremidade de engaste superior

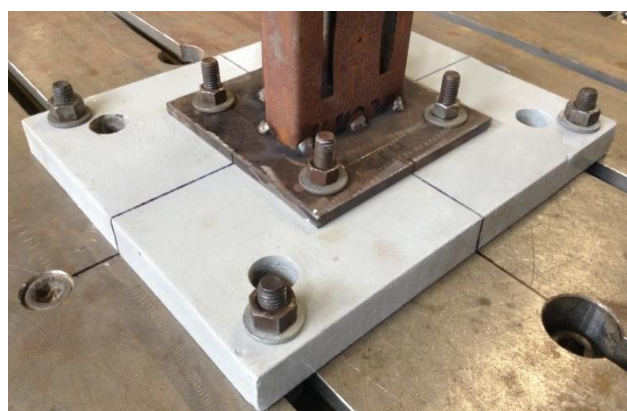
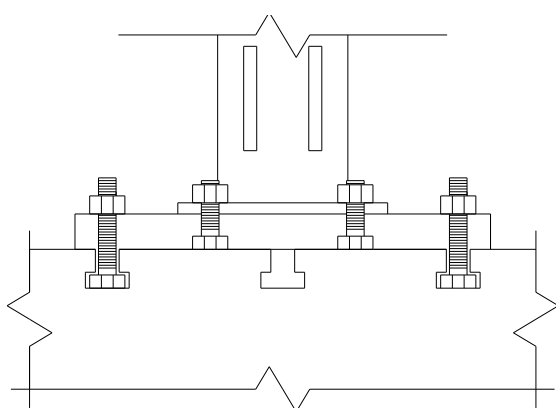


Figura 2.16 - Extremidade de engaste inferior

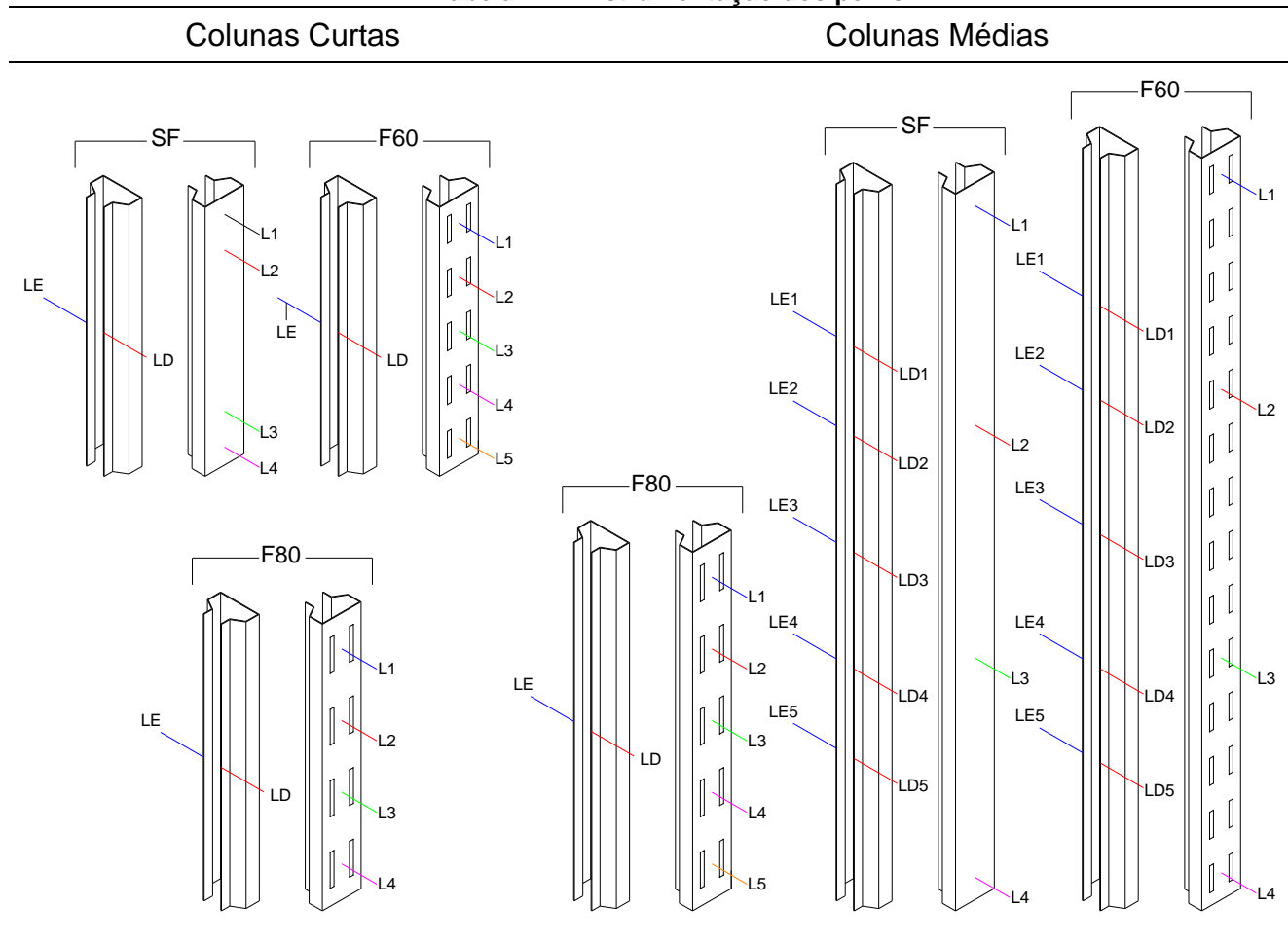
2.4 Instrumentação e aquisição de dados

Os deslocamentos decorrentes das meias-ondas do modo de flambagem local e deslocamentos das arestas devido à flambagem distorcional, foram medidos por meio de transdutores de deslocamentos (LVDT's - *linear variable differential transducer*). Estes foram posicionados ao longo do comprimento do perfil e na região com maior amplitude de deslocamento. A distância entre os LVDT's para todos os modelos de ensaio foi definida com base na previsão da análise numérica realizada anteriormente e apresentada no capítulo 3. Os trabalhos de Silva (2011) e Souza (2013) também utilizaram esta técnica.

A Tabela 2.4 apresenta a posição da instrumentação dos modelos ensaiados. Os LVDT's localizados no elemento da alma para monitorar a flambagem local, são identificados de cima para baixo pela sequência de L1 a L5. O elemento flange de ligação foi instrumentado em função da flambagem distorcional, com transdutores do lado esquerdo (LE) e direito (LD) com variações na quantidade de seções em função

do comprimento do perfil. Os protótipos foram separados em duas séries (curta e média) em função do comprimento das colunas e conseqüentemente da esbeltez.

Tabela 2.4 - Instrumentação dos perfis.



O perfil CC-F60-CP2 foi escolhido para exemplificar o posicionamento dos transdutores ao longo da alma, Figura 2.17 (a), e flange de ligação, Figura 2.17 (b). Observa-se que a Figura 2.17 (b) apresenta um LVDT localizado na alma, com sentido oposto aos demais da Figura 2.17 (a), apenas para comparar os deslocamentos do instrumento correspondente.

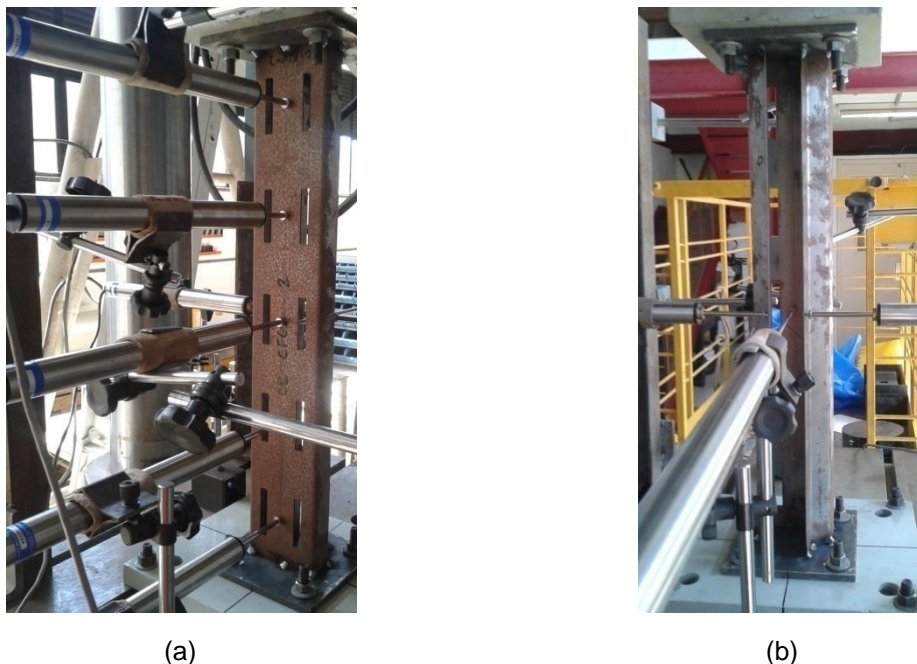


Figura 2.17 - Instrumentação do protótipo CC-F60-CP2 com os LVDT's posicionados: (a) Região da alma; (b) Região dos flanges

Para a aquisição de dados foi utilizado o software Partner (INSTRON, 2008) com o objetivo de coletar os dados da célula de carga, e também por um sistema de aquisição adicional, Spider8 (HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIC, 2003a), controlado pelo software Catman 4.5 (HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIC, 2003b), para medição dos deslocamentos dos LVDT's (Figura 2.18).



Figura 2.18 - Sistema de aquisição de dados

2.5 Levantamento das imperfeições geométricas

As imperfeições geométricas foram coletadas na seção transversal e ao longo do comprimento de cada perfil. Para as medições utilizou-se paquímetro, micrômetro e nível (Figura 2.19).

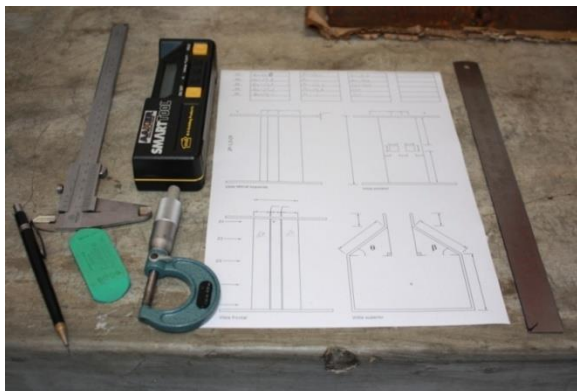


Figura 2.19 - Ferramentas utilizadas no levantamento de imperfeições

As imperfeições de cada coluna foram levantadas e apresentadas no item 4.1. Tais dados foram utilizados na análise numérica para atualização da geometria dos modelos. As dimensões reais do protótipo possibilita uma simulação mais confiável e representativa. O capítulo 3 descreve todos os procedimentos computacionais empregados no estudo.

3 ANÁLISE NUMÉRICA

Os modelos computacionais são ferramentas importantes para representar o comportamento de estruturas, gerando economia em relação à análise experimental. Atualmente, existem diversos softwares comerciais destinados ao uso em escritórios de projeto e também com fins de pesquisa.

Neste capítulo será apresentada a análise numérica via Teoria Generalizada de Vigas (GBT) e Método dos Elementos Finitos (MEF). A simulação consiste em avaliar o comportamento de perfis do tipo rack com e sem perfurações submetidos à compressão centrada. Esse tipo de estrutura é comumente encontrado nos sistemas de armazenagem industrial, onde os furos presentes ao longo do comprimento da coluna auxiliam na montagem da estrutura.

A GBT, por meio do software GBTUL (BEBIANO *ET AL.*, 2008), foi utilizada para a definição de seções sujeitas aos modos de flambagem desejados.

O modelo via elementos finitos, construído no software ANSYS reproduz os testes realizados em laboratório, buscando a validação do modelo com base na comparação dos resultados.

3.1 Teoria Generalizada de Viga (GBT) - Software GBTUL

A Teoria Generalizada de Vigas (GBT), com o uso do software GBTUL, é um dos métodos numéricos utilizado neste trabalho. A ferramenta permite a avaliação dos modos de flambagem e das cargas críticas da seção em diversos comprimentos da coluna. Esse programa possibilita a utilização de apoios simples, engastes ou extremidades livres. Nele, foram analisadas as seções sem a presença de furos, visto que o mesmo não permite introduzir tais perfurações nos elementos estudados.

Inicialmente o GBTUL foi utilizado para definir as dimensões do protótipo (SOUZA, 2013), visando a ocorrência dos modos de flambagem a serem observados neste trabalho. A seção transversal foi modelada a partir das coordenadas nodais levantadas na etapa de imperfeições geométricas (item 4.1), conforme Figura 3.1 (a). As configurações de engaste e aplicação de carregamento são apresentadas na Figura 3.1 (b).

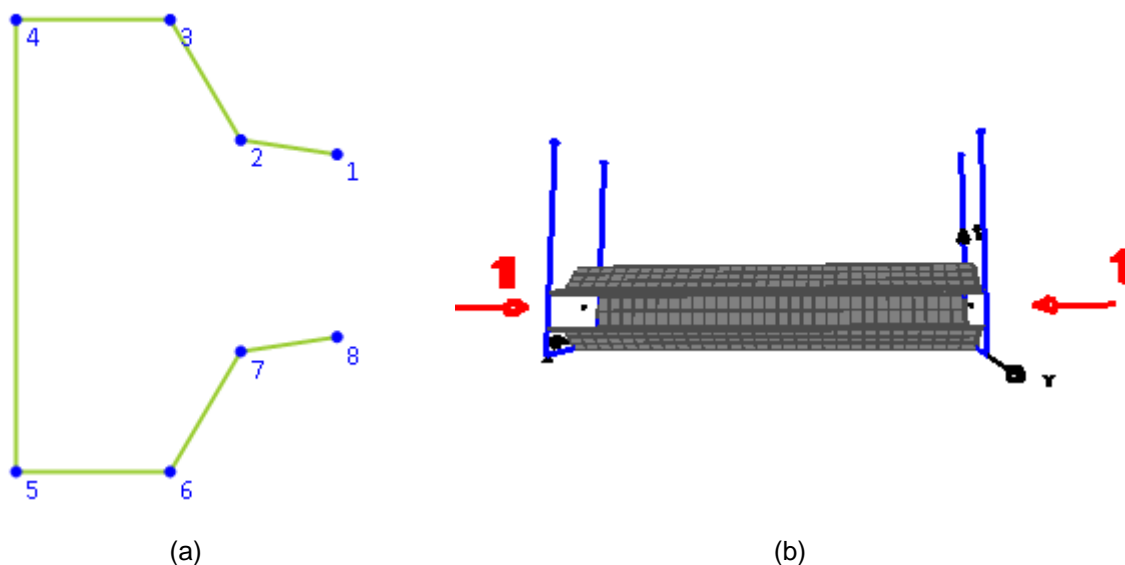


Figura 3.1 - Modelo criado no GBTUL: (a) Seção transversal; (b) Modelo em três dimensões
 FONTE: Bebiano et al. (2008)

3.2 Análise por meio de elementos finitos de casca

O Método dos Elementos Finitos foi utilizado por meio do software ANSYS 14 (ANSYS, 2011). Observa-se que os modelos de elementos finitos têm seus resultados sensíveis às condições de contorno, refinamento da malha e o tipo de elemento utilizado. Logo, foi feita a calibração do procedimento a partir da comparação com os resultados da GBT, definindo-se os procedimentos apresentados a seguir.

3.2.1 Tipos de elementos

O primeiro elemento utilizado em análise foi o SHELL181, sendo esta escolha baseada em estudos anteriormente realizados considerando seções perfuradas (FREITAS *et al.*, 2010; SILVA 2011; SOUZA, 2013). Este elemento possui quatro nós com seis graus de liberdade em cada nó (translações e rotações em X, Y e Z) e é indicado para análises elastoplásticas. Os protótipos foram modelados com o elemento em questão, ilustrado na Figura 3.2.

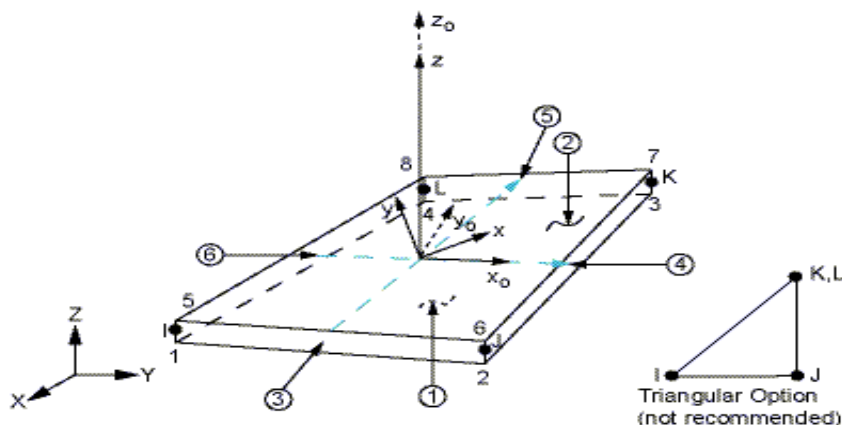


Figura 3.2 - Elemento utilizado na análise numérica: SHELL181
 FONTE: ANSYS (2011)

A simulação das chapas de extremidade foi feita com o auxílio do elemento SOLID45, apresentado na Figura 3.3. É definido por oito nós, sendo três graus de liberdade em cada nó (translação em torno dos eixos x, y e z).

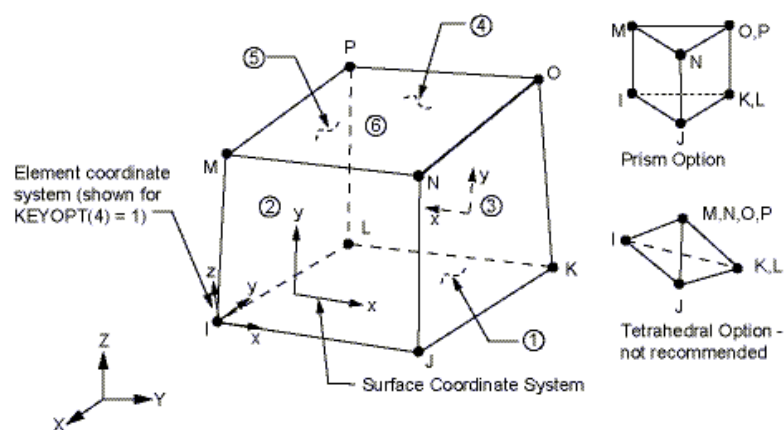


Figura 3.3 - Elemento SOLID45
 FONTE: ANSYS (2011)

3.2.2 Refinamento da malha

Buscou-se um refinamento adequado ao problema, aliando precisão e custo computacional a partir de elementos quadrados do perfil. As dimensões dos elementos foram relacionadas com a largura da alma, buscando uniformidade na malha. Foram testados elementos com lado igual a 5 e 10% da alma e, a partir das análises, concluiu-se que esse último é o mais indicado para a simulação por apresentar uma melhor correlação entre os resultados da análise de estabilidade via GBT. A Figura 3.4 apresenta a comparação entre modelos numéricos ANSYS e

GBTUL para diversos comprimentos de colunas sem perfurações. Nota-se que há uma convergência entre os resultados, com diferença máxima de 4% entre os dados.

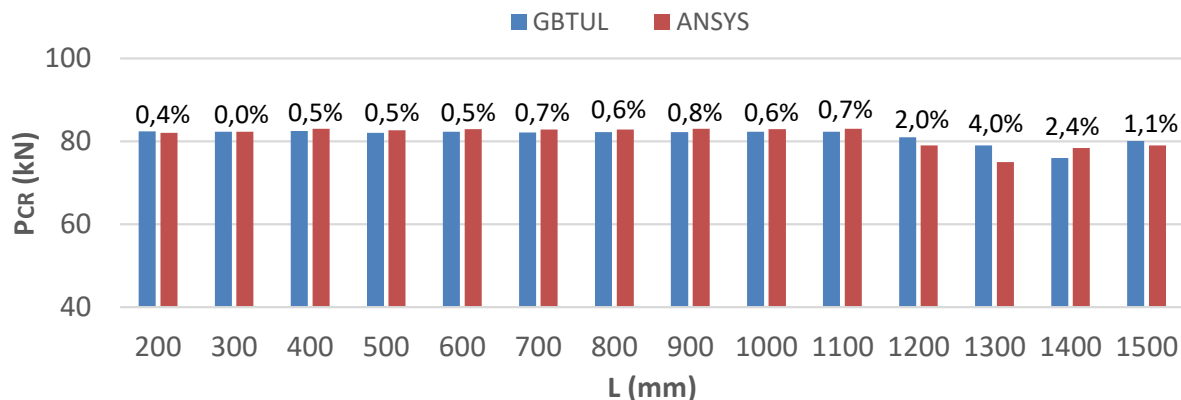


Figura 3.4 - Comparação entre cargas críticas para modelos sem perfurações (GBTUL e ANSYS)

Para a simulação da chapa de extremidade, foram adotados elementos de volume tetraédricos (SOLID 45). O refinamento adotado tem como referência a espessura da chapa de extremidade, cuja função é fazer a transmissão da carga para o perfil. A Figura 3.5 (a) apresenta a malha adotada em todo perfil e a Figura 3.5 (b) destaca a região inferior do modelo.

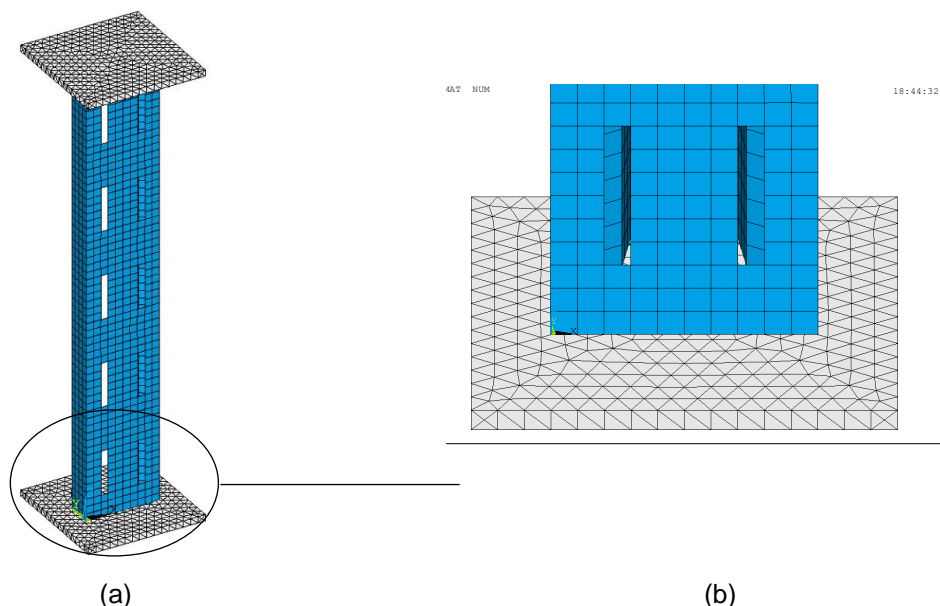


Figura 3.5 - Distribuição da malha nos elementos do perfil: (a) Visualização da malha em todo perfil; (b) Distribuição da malha na chapa de extremidade e região dos furos

3.2.3 Condições de contorno

As condições de contorno empregadas simulam o engaste nas duas extremidades do perfil e a aplicação do carregamento pela prensa.

Os nós coincidentes da seção transversal do perfil com a chapa foram acoplados em todas as direções para estabelecer o efeito da solda entre o perfil e a chapa de extremidade. A Figura 3.6 (a) apresenta a vista geral do modelo e a Figura 3.6 (b) destaca a região de acoplamento.

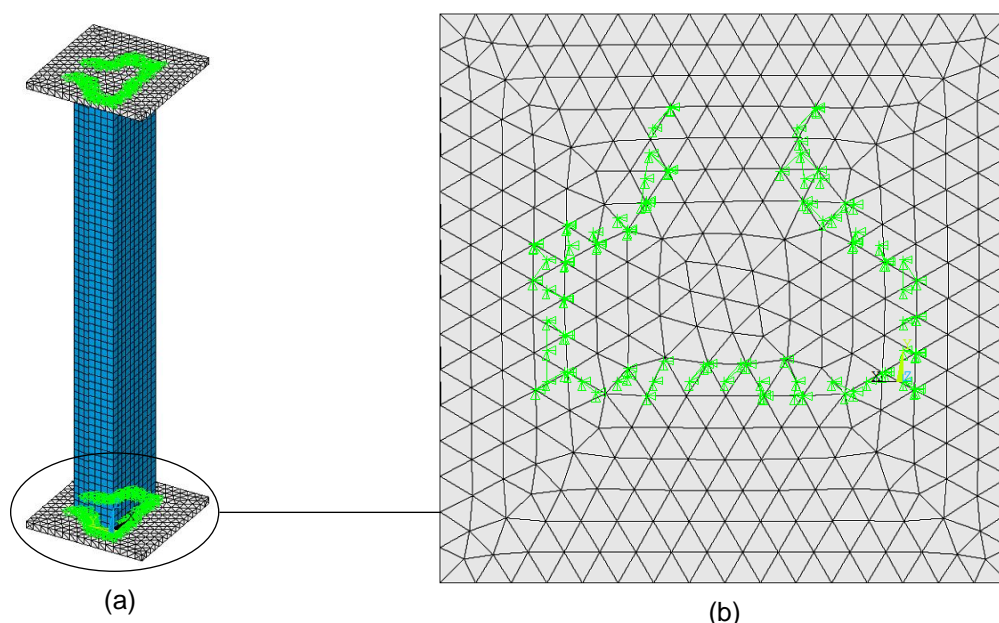


Figura 3.6 - Simulação do efeito solda: (a) Vista geral do perfil com a região da solda; (b) Região de acoplamento do perfil com a chapa de extremidade

Para impedir o deslocamento de corpo rígido na direção axial da coluna, um nó à meia altura do modelo teve sua translação impedida nesta direção, como é observado na Figura 3.7 (a). Os deslocamentos em torno dos eixos perpendiculares à coluna nas placas de extremidade foram restringidos para simular o engaste, conforme apresentado na Figura 3.7 (b).

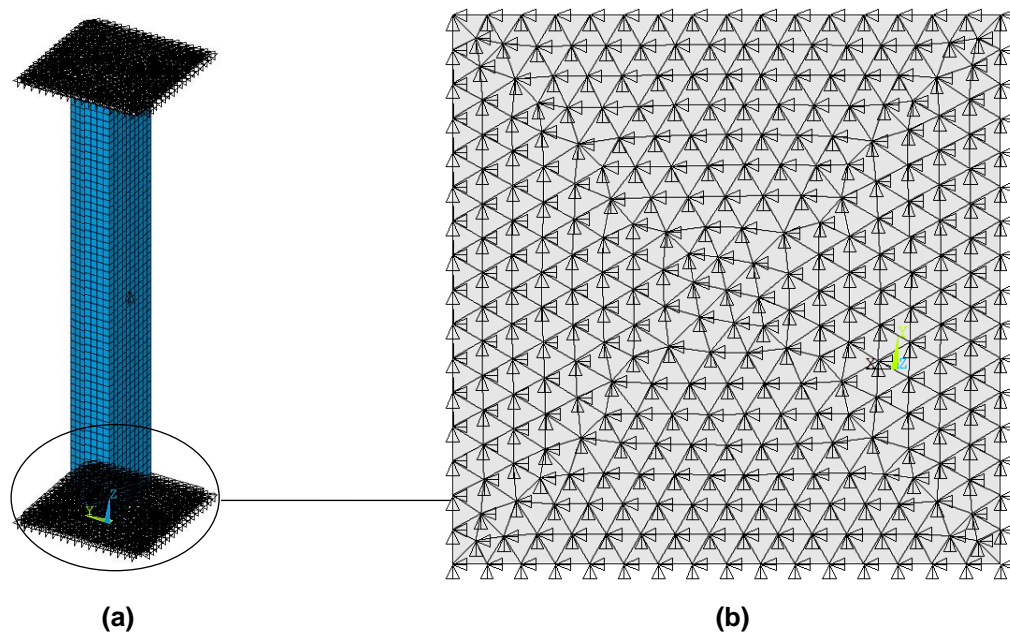


Figura 3.7 - Restrições de deslocamentos: (a) Vista geral do perfil com a região restringida; (b) Chapa de extremidade com os nós restritos

Os nós de extremidade foram acoplados, conforme apresentado Figura 3.8, com o objetivo de garantir o deslocamento uniforme de todos os nós envolvidos, garantindo a simulação do engaste.

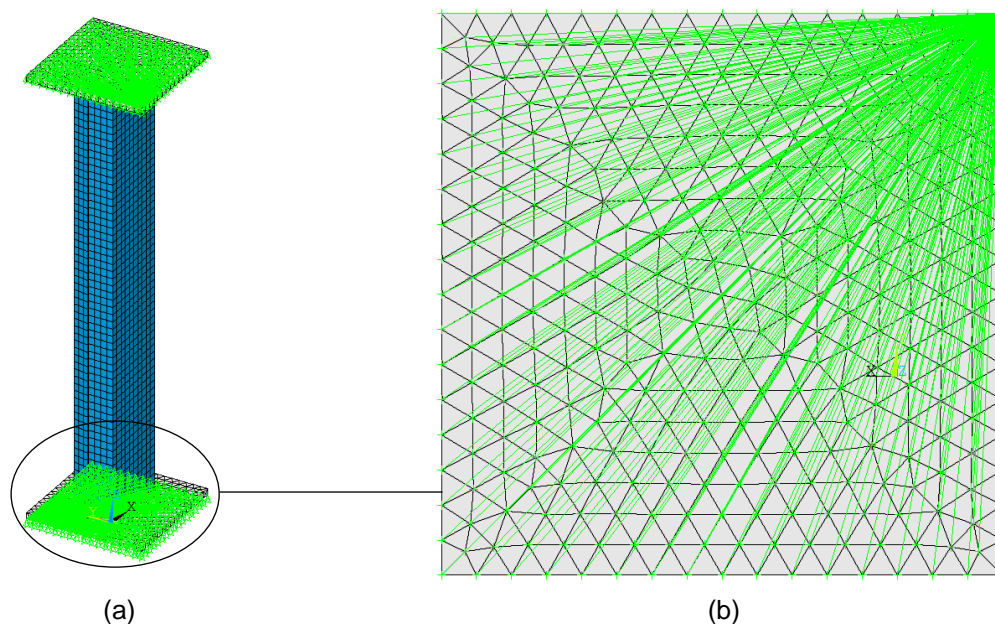


Figura 3.8 - Acoplamento dos nós de extremidade: (a) Vista geral do perfil com as regiões acopladas; (b) Chapa de extremidade com os nós acoplados

O carregamento foi aplicado de forma uniforme em todos os nós das placas de extremidades a fim de se garantir a centralização das cargas, conforme Figura 3.9 (a). O modelo com todas as condições de contorno é apresentado na Figura 3.9 (b).

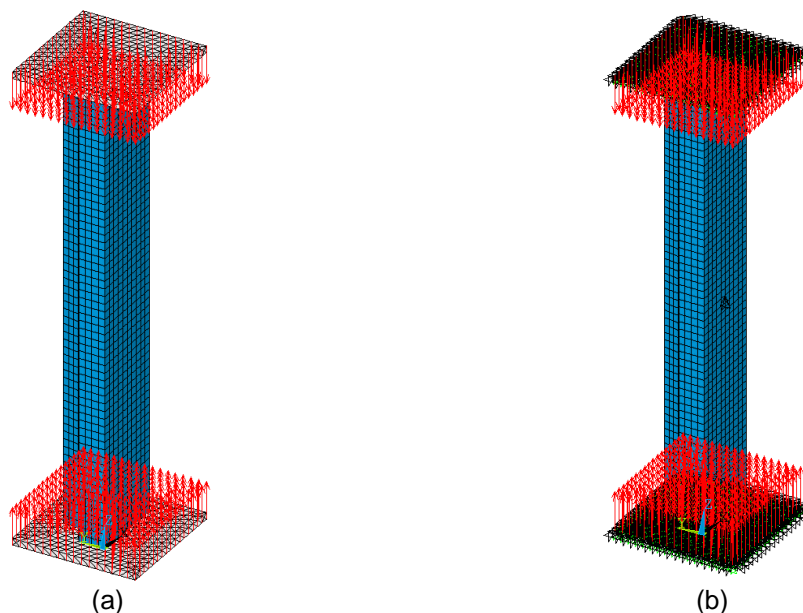


Figura 3.9 - Aplicação das condições de contorno no modelo numérico: (a) Aplicação do carregamento; (b) Todas as condições de contorno

Inicialmente foi feita a análise de flambagem linear de perfis tipo rack submetidos à compressão centrada para o estudo da estabilidade dos perfis. Em um segundo momento, os efeitos de segunda ordem e da plasticidade do aço foram considerados para verificar o comportamento pós crítico e a resistência dos perfis. Nesta etapa, torna-se fundamental a introdução das imperfeições geométricas no modelo numérico. Foi feita, então, a atualização da geometria inicial a partir dos modos de flambagem obtidos na análise linear, por meio de um fator de imperfeição obtido a partir de medidas realizadas nos protótipos.

3.2.4 Análise de estabilidade

A linguagem de programação do ANSYS (APDL - ANSYS Parametric Design Language) foi utilizada com o objetivo de automatizar a construção do modelo e facilitar as variações de geometria. Esta ferramenta permite o controle de todas as características do modelo numérico. Para a análise linear de estabilidade, foi desenvolvida a seguinte rotina de comandos:

- 1) Inicialização do *software* ANSYS 14.
- 2) Tipo de análise: Estrutural.
- 3) Elemento utilizado: SHELL 181, SOLID 45.
- 4) Dados do aço:
 - a. Módulo de elasticidade
- 5) Definição da geometria do modelo (flange, alma, enrijecedor e etc):
 - a. Keypoints;
 - b. Lines;
 - c. Áreas;
 - d. Perfurações (caso o modelo possua);
 - e. Chapas de extremidade.
- 6) Geração da malha de elementos finitos.
- 7) Condições de contorno:
 - a. Restrições de deslocamentos;
 - b. Acoplamentos dos nós de extremidade e coincidentes;
 - c. Aplicação da carga de compressão unitária.
- 8) Solução do problema de autovalor e autovetor para determinação da carga de flambagem elástica e do modo associado.
- 9) Visualização e armazenamento dos resultados.

3.2.5 Análise não linear

Além da análise linear de perfis tipo rack submetidos à compressão centrada, foi feita também uma análise não linear considerando os efeitos de segunda ordem e as propriedades elastoplásticas do aço. A metodologia de APDL e a utilização do *software* ANSYS 14 foram mantidas com a nova rotina de análise:

- 1) Inicialização do *software* ANSYS 14.
- 2) Mesma sequência dos procedimentos descritos em 3.2.4.
- 3) Propriedades elastoplásticas do aço (aproximado por diagrama multilinear):
 - a. Tensão de escoamento;
 - b. Diagrama tensão x deformação multilinear: No diagrama, adotou-se um trecho linear elástico até o valor de $0,7f_y$. A escolha desse fator é em função das tensões residuais do aço descritas na NBR 6892 (NBR ISO 6892, 2002) como sendo 30%

do escoamento. As deformações correspondentes ao final de cada trecho são apresentadas a seguir (SALMON E JOHNSON, 1990):

- Os valores de f_y e f_u foram obtidos na caracterização do material (item 2.2);
- A deformação correspondente ao valor de $0,7f_y$ é definida como ε_1 ;
- A deformação para tensão de escoamento é aproximadamente $3\varepsilon_y$;
- O final do patamar de escoamento é definido pela deformação de $10\varepsilon_y$;
- A tensão última (f_u) corresponde à deformação aproximada de $100\varepsilon_y$.

Na Figura 3.10 tem-se a relação tensão *versus* deformação do aço (considerando plasticidade com encruamento).

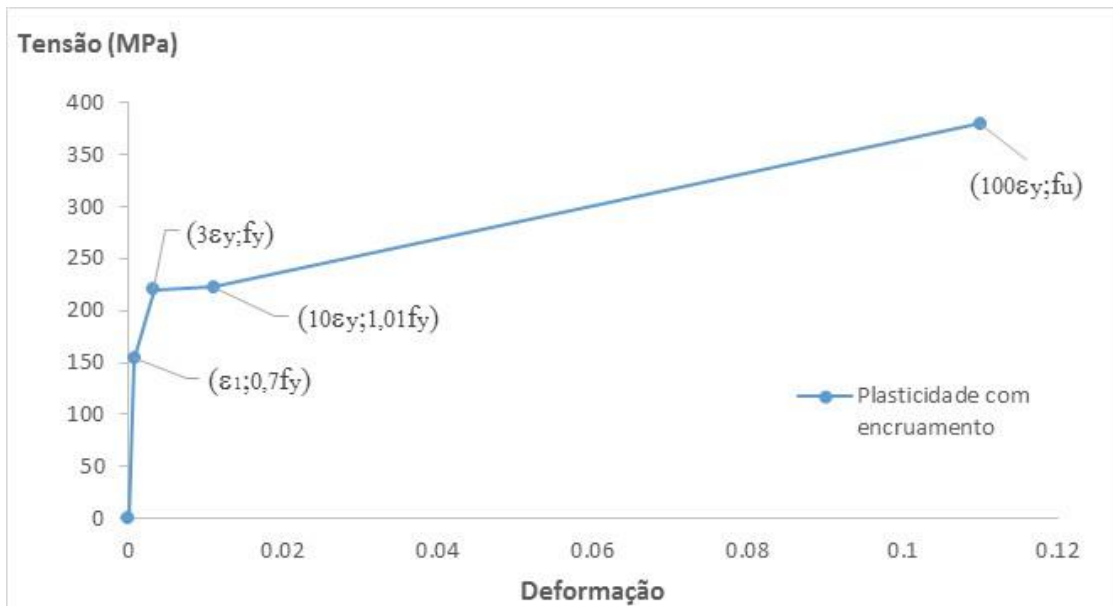


Figura 3.10 - Diagrama tensão x deformação

- 4) Aplicação de força no sentido do comprimento do modelo.
- 5) Identificação dos modos de flambagem adequados a cada protótipo.
- 6) Introdução das imperfeições geométricas:

O fator que representa a imperfeição geométrica na análise foi definido como a metade da espessura do modelo (0,7mm). Essa definição foi baseada em observações durante o ensaio experimental e no levantamento de imperfeições.

- 7) Solução do problema não linear:

Foi utilizado o Método do Comprimento de Arco para garantir a convergência da análise. O critério de parada foi a fixação de um deslocamento limite na estrutura, baseado nas observações feitas durante o experimento.

- 8) Visualização e armazenamento dos resultados.

Na análise não linear houve a aplicação de força para atingir o colapso da estrutura. Essa carga foi distribuída uniformemente entre os nós da chapa de extremidade. A introdução das imperfeições geométricas é importante devido à sensibilidade do modelo numérico a elas e à sua influência na convergência da análise. Esta técnica também foi utilizada por Silva (2011), Souza (2013) e Freitas *et al.* (2013, 2014).

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão comparados os resultados obtidos por análise numérica e experimental. Os ensaios foram importantes para obtenção da capacidade resistente dos protótipos e seus modos de flambagem, por meio da medição dos deslocamentos com o auxílio dos transdutores (LVDT's). Para a análise, os ensaios foram separados em dois grupos (colunas curtas e médias) contendo três séries em cada grupo (diferenciadas na questão das dimensões dos furos e altura da coluna). Em cada série foram ensaiados três perfis com as mesmas características. Nos itens a seguir, serão apresentados os resultados para um corpo de prova de cada série, sendo os demais apresentados em apêndice.

A carga crítica e os modos de flambagem, obtidos na análise numérica linear com imperfeições reais de geometria da seção, são importantes na definição da instrumentação dos protótipos ensaiados. A indução do modo de flambagem na análise numérica não linear é dependente das observações experimentais, para assim aproximar o comportamento real do protótipo por um modelo computacional. A Figura 4.1 resume as etapas realizadas na análise dos resultados considerando o programa experimental e as análises numéricas.

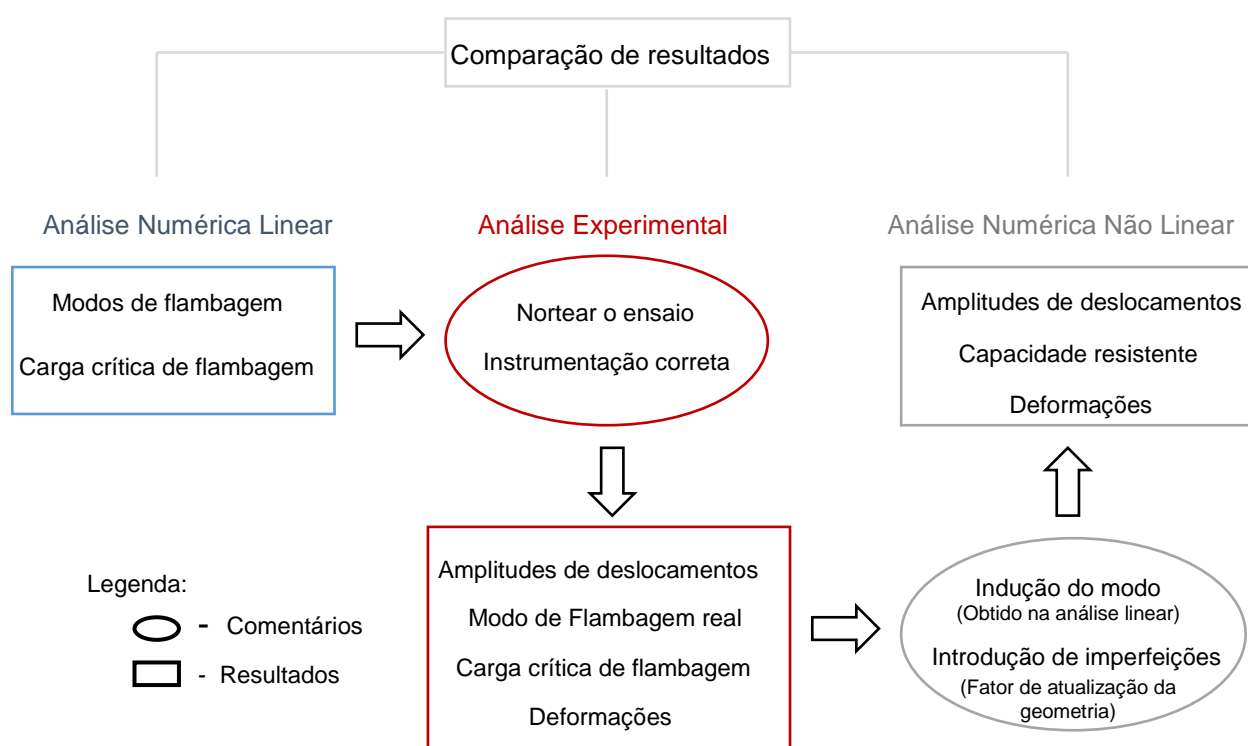


Figura 4.1 - Interação das análises numérica e experimental

4.1 Levantamento de imperfeições geométricas

As imperfeições geométricas surgem principalmente devido ao processo de fabricação dos elementos. Portanto, a verificação das dimensões reais é essencial para simular corretamente o modelo. Serão apresentados os resultados obtidos na medição da seção transversal do protótipo em que há dispersão entre os valores obtidos em relação aos valores nominais (Figura 4.2 e Tabela 4.1). Com relação às perfurações, em virtude da precisão do processo em que elas são inseridas, não foram observadas dispersões relevantes.

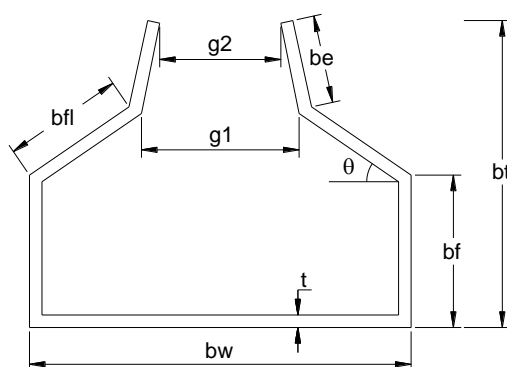


Figura 4.2 - Nomenclatura da seção transversal para coleta dos dados de imperfeições

Tabela 4.1 - Levantamento de imperfeições da seção transversal nos protótipos ensaiados

Modelo	b_w (mm)	b_f (mm)	b_{fl} (mm)	b_e (mm)	b_t (mm)	θ (°)	g_1 (mm)	g_2 (mm)	t (mm)
CC-SFS-CP1	92,46	31,50	27,30	18,04	69,36	39,40	47,48	44,18	1,43
CC-SFS-CP2	93,36	31,60	27,60	19,20	69,72	41,50	50,14	46,82	1,55
CC-SFS-CP3	93,64	31,40	27,40	19,00	69,12	40,64	49,64	46,82	1,47
CC-F60-CP1	91,60	31,63	27,30	18,20	69,38	38,20	44,98	39,92	1,44
CC-F60-CP2	92,34	31,50	27,60	18,40	69,28	39,88	45,70	40,96	1,50
CC-F60-CP3	92,00	31,20	28,10	18,70	69,14	41,22	45,66	40,82	1,46
CC-F80-CP1	93,18	31,90	28,20	19,50	69,10	41,46	48,76	43,76	1,46
CC-F80-CP2	92,86	31,30	27,80	19,00	69,24	40,38	48,80	43,78	1,46
CC-F80-CP3	93,06	31,80	27,30	18,80	69,18	40,76	49,02	43,50	1,46
CM-SFS-CP1	92,20	32,20	28,10	18,10	69,38	39,18	47,50	45,04	1,43
CM-SFS-CP2	92,36	31,90	27,80	18,00	69,68	40,58	48,30	46,30	1,42
CM-SFS-CP3	92,44	31,70	27,90	18,00	69,64	39,66	49,14	47,76	1,42
CM-F60-CP1	90,78	32,20	28,20	18,30	69,76	39,18	42,10	38,86	1,42
CM-F60-CP2	91,42	32,40	28,10	17,90	69,42	37,80	44,78	41,22	1,42
CM-F60-CP3	91,38	32,30	28,20	18,10	69,58	40,26	42,52	38,80	1,41
CM-F80-CP1	92,14	32,00	27,60	18,20	69,32	38,28	45,44	42,42	1,44
CM-F80-CP2	92,80	31,30	28,00	18,50	70,28	37,70	45,60	43,04	1,45
CM-F80-CP3	91,80	31,80	28,00	18,20	69,46	37,12	42,52	38,74	1,45
Valores nominais	94,00	32,00	29,00	20,00	66,7	30,39	40,97	40,97	1,50

4.2 Série CC-SFS

Neste item serão comparados os resultados numéricos e experimentais para a série de colunas curtas sem perfurações. Para representar a série, o protótipo escolhido foi o CC-SFS-CP2.

A análise de estabilidade do protótipo foi realizada via ANSYS com a expansão do primeiro e segundo modos de flambagem e a obtenção das respectivas cargas críticas, como ilustrados na Figura 4.3.

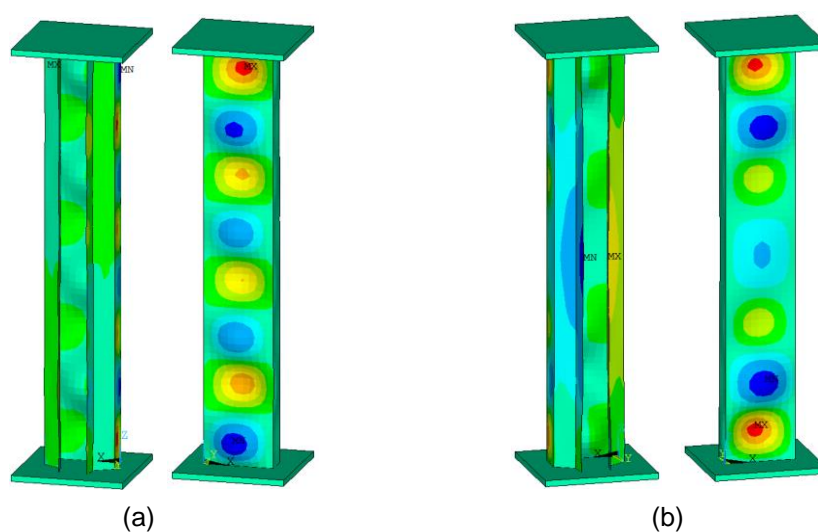


Figura 4.3 - Modos de flambagem do protótipo CC-SFS-CP2: (a) Primeiro modo com $P_{CR} = 82,7$ kN; (b) Segundo modo com $P_{CR} = 83,7$ kN

Nota-se que os maiores deslocamentos na alma são previstos nas extremidades do perfil (alterando o número de meias ondas e o sentido da amplitude). Logo, os transdutores de deslocamentos (LVDT's) foram posicionados com o objetivo de monitorar o comportamento dessa região. A Figura 4.4 apresenta a distribuição dos instrumentos de medição e a comparação entre os deslocamentos da alma em função da carga de compressão aplicada, obtidos via análises numérica e experimental, sendo a primeira representada pelas curvas em tracejado, e a segunda pelas curvas contínuas, respectivamente.

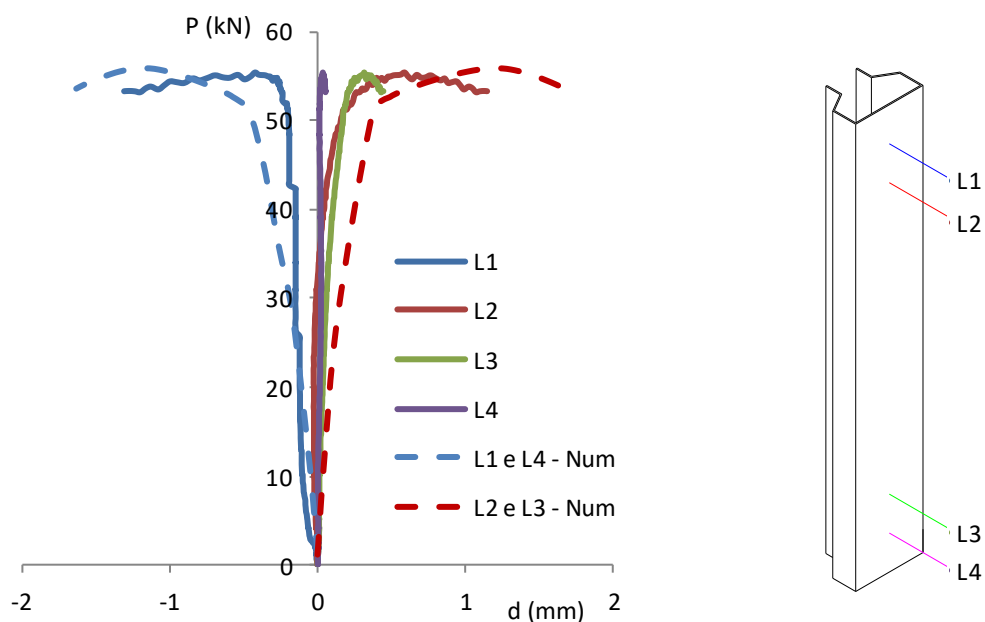


Figura 4.4 - Deslocamentos na alma do protótipo CC-SFS-CP2

Neste modelo, baseando-se nos resultados experimentais, houve predomínio do segundo modo de flambagem, sendo necessário induzi-lo na análise numérica. Essa afirmação é verificada em função do comportamento dos transdutores L2 e L3 (ambos possuem a mesma direção de deslocamento). A Figura 4.5 ilustra os deslocamentos na alma quando a carga última é alcançada.

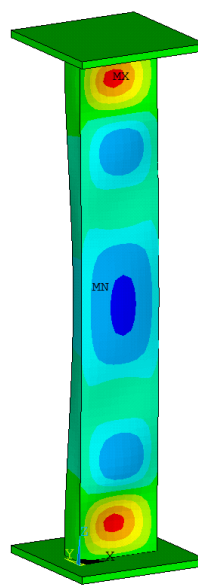


Figura 4.5 - Comparação experimental e numérica do protótipo CC-SFS-CP2 (alma)

O comportamento dos flanges é evidenciado na Figura 4.6. A curva tracejada representa os dados numéricos e a curva contínua os dados experimentais. As

maiores amplitudes previstas no segundo modo de flambagem definiram o posicionamento dos LVDT's (altura média do perfil). Observa-se que o modelo numérico simulou de maneira adequada os deslocamentos e a carga última observados experimentalmente.

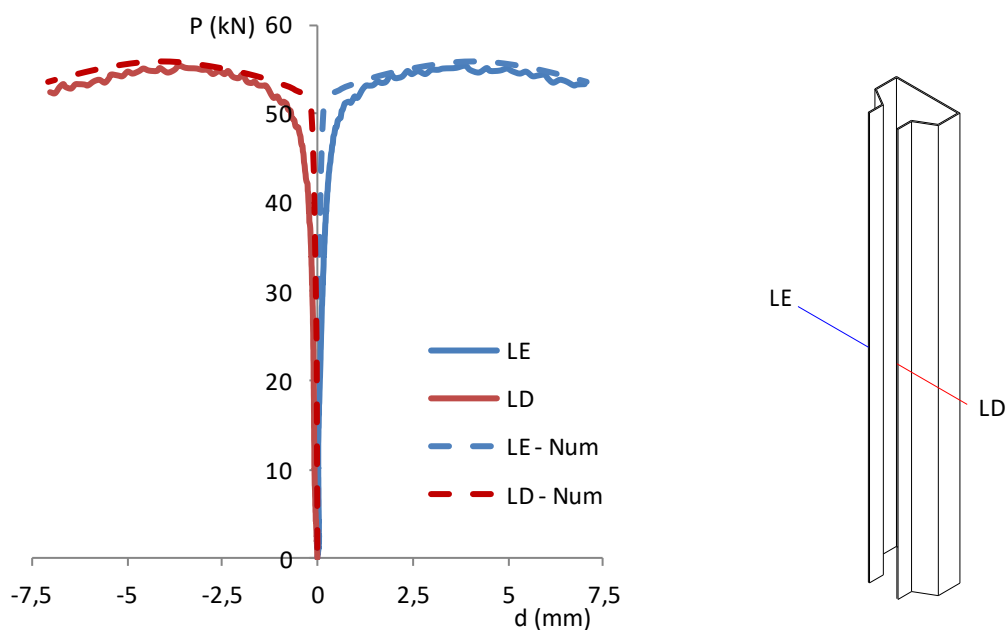


Figura 4.6 - Deslocamentos nos flanges do protótipo CC-SFS-CP2

O fechamento da seção foi previsto no modelo e comprovado durante o ensaio experimental. A comparação entre os deslocamentos nos modelos numérico e experimental, quando a carga última é alcançada, é apresentada na Figura 4.7.

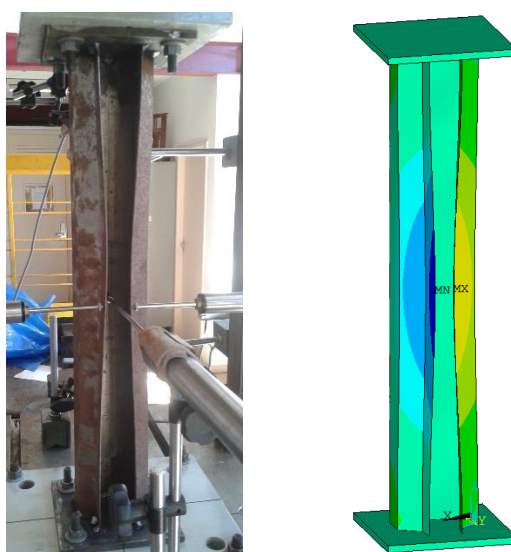


Figura 4.7 - Comparação experimental e numérica do protótipo CC-SFS-CP2 (flanges)

4.3 Série CC-F60

Neste item serão comparados os resultados numéricos e experimentais para a série de colunas curtas com perfurações ao longo do comprimento com altura do furo igual a 60% da largura da alma (56,4 x 9,4mm). O protótipo CC-F60-CP2 foi escolhido para representar a série.

A análise de estabilidade elástica foi realizada via elementos finitos no software ANSYS com a expansão do primeiro e segundo modos de flambagem, ilustrados na Figura 4.8.

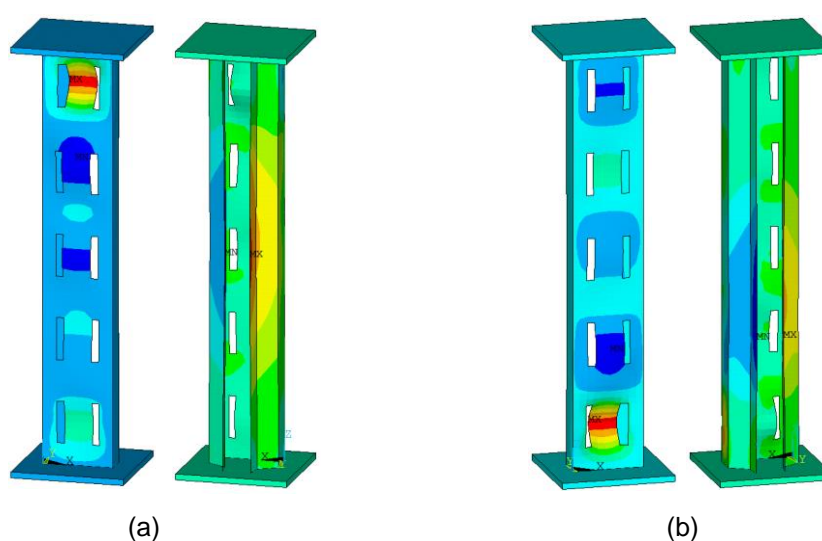


Figura 4.8 - Modos de flambagem do protótipo CC-F60-CP2: (a) Primeiro modo com $P_{CR} = 54,5$ kN; (b) Segundo modo com $P_{CR} = 54,6$ kN

Nota-se que os maiores deslocamentos, como verificado na série anterior, são previstos na extremidade do perfil. Porém, a análise linear demonstra possíveis amplitudes na região entre os furos do modelo. Os transdutores de deslocamentos foram então posicionados na altura média dos furos com o objetivo de monitorar o comportamento dessa região. A Figura 4.9 apresenta a distribuição dos instrumentos de medição e a comparação entre os deslocamentos da alma em função da carga de compressão aplicada, obtidos pelas análises numérica e experimental. A primeira é representada pelas curvas em tracejado, e a segunda pelas curvas contínuas.

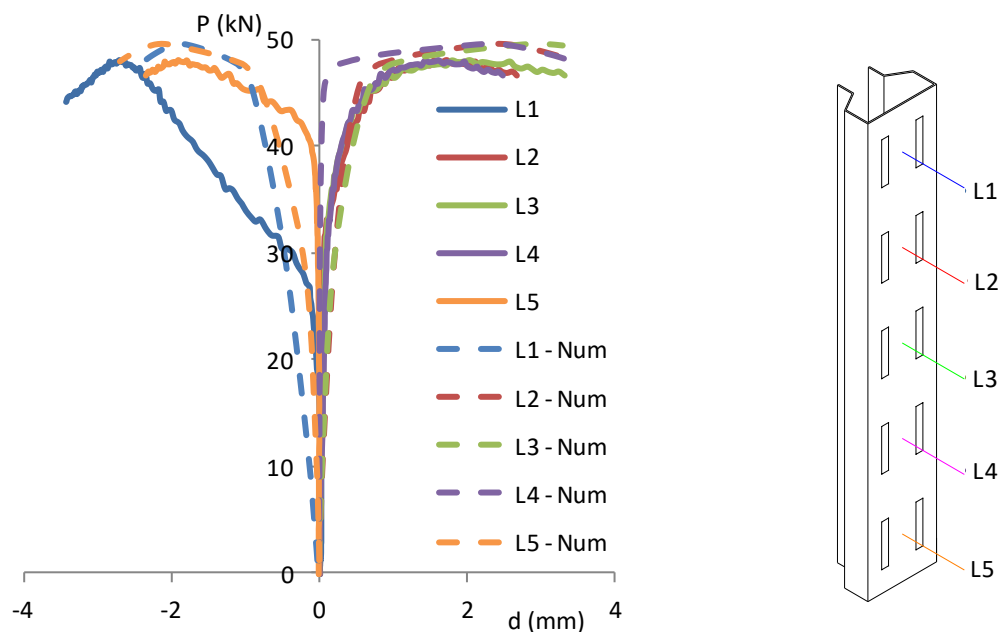


Figura 4.9 - Deslocamentos na alma do protótipo CC-F60-CP2

Com base nos resultados experimentais, nota-se que o primeiro modo de flambagem predominou em relação ao segundo, sendo necessário induzi-lo na análise numérica. Essa afirmação é verificada em função do comportamento dos transdutores L1 e L5 (ambos possuem a mesma direção de deslocamento). A Figura 4.10 ilustra os deslocamentos na alma quando a carga última é alcançada. A extremidade superior é destacada para possibilitar a comparação entre os resultados.

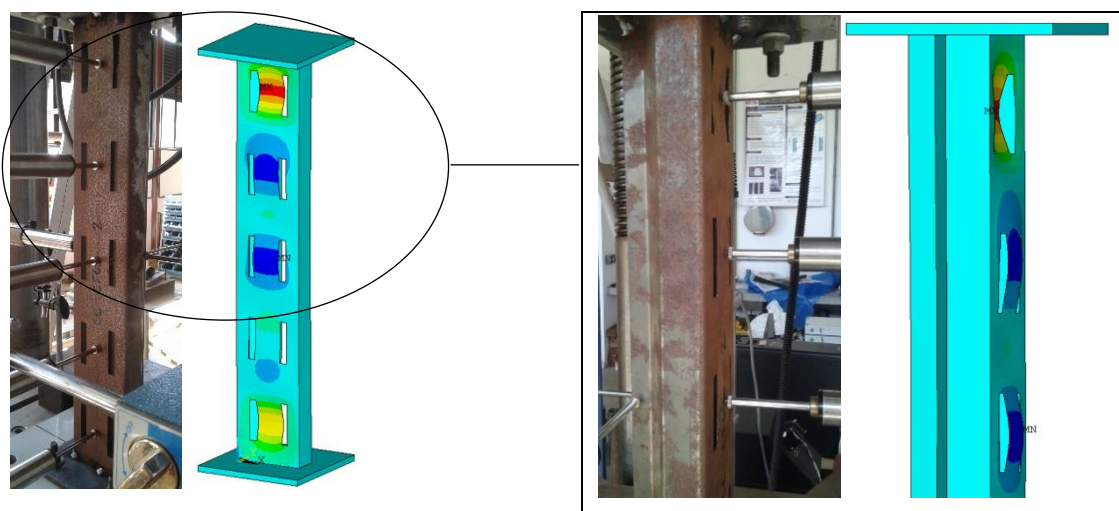


Figura 4.10 - Comparação experimental e numérica do protótipo CC-F60-CP2 (alma)

O comportamento dos flanges é apresentado na Figura 4.11. A curva tracejada representa os dados numéricos e a curva contínua os dados experimentais. As maiores amplitudes previstas no primeiro modo de flambagem definiram o posicionamento dos LVDT's (altura média do perfil).

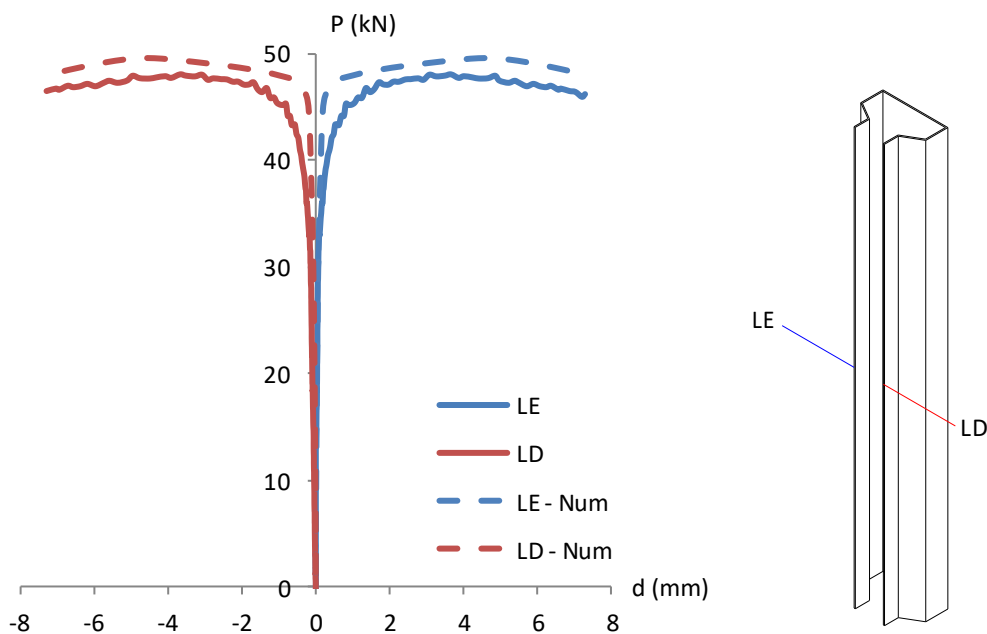


Figura 4.11 - Deslocamentos nos flanges do protótipo CC-F60-CP2

O fechamento da seção foi previsto no modelo e comprovado durante o ensaio experimental, com amplitude máxima de deslocamento identificada na altura média do perfil. A comparação dos deslocamentos obtidos, quando a carga última é alcançada, é apresentada na Figura 4.12.

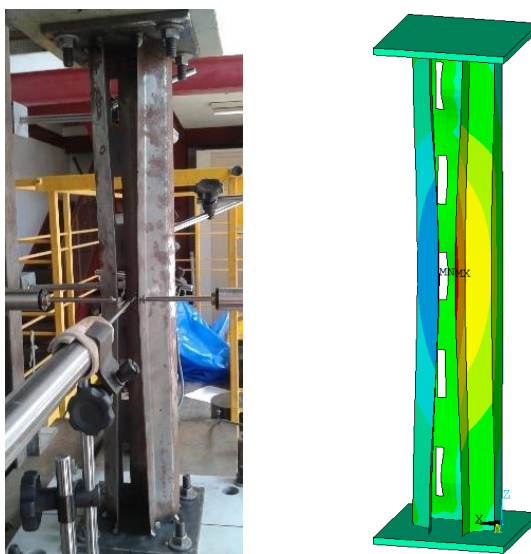


Figura 4.12 - Comparação experimental e numérica do protótipo CC-F60-CP2 (flanges)

4.4 Série CC-F80

Neste item serão comparados os resultados numéricos e experimentais para a série de colunas curtas com perfurações ao longo do comprimento com altura do furo igual a 80% da largura da alma (75,2 x 9,4mm). O protótipo CC-F80-CP2 foi escolhido para representar a série.

A análise de estabilidade foi realizada via ANSYS com a expansão do primeiro, segundo e terceiro modos de flambagem, ilustrados na Figura 4.13.

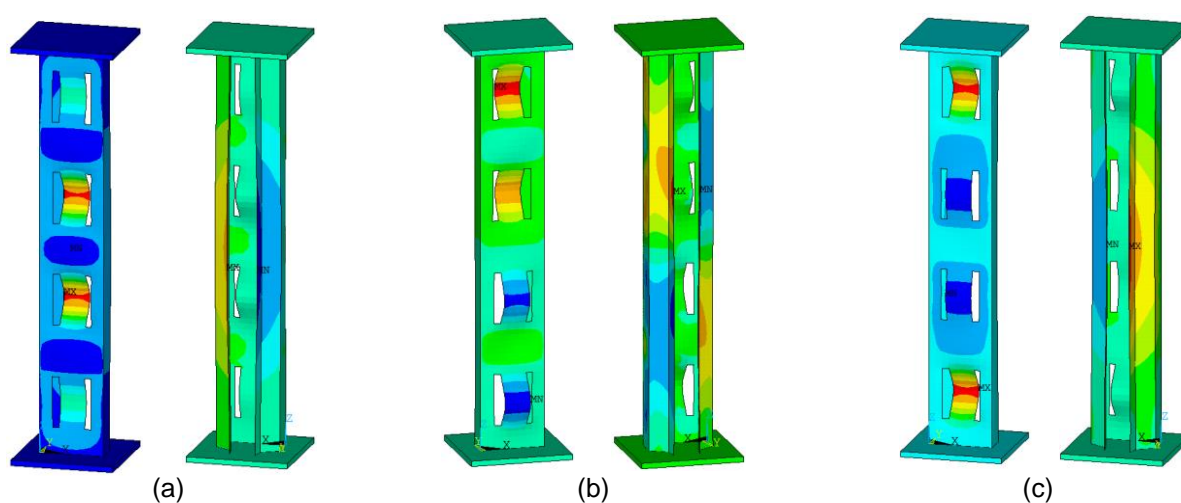


Figura 4.13 - Modos de flambagem do protótipo CC-F80-CP2: (a) Primeiro modo com $P_{CR} = 37,8$ kN; (b) Segundo modo com $P_{CR} = 38,6$ kN; (c) Terceiro modo com $P_{CR} = 39,5$ kN

Nota-se que os maiores deslocamentos, para o primeiro modo, estão localizados na área central do perfil e, para o segundo e terceiro modos, nas extremidades. Porém, em ambos os casos, as amplitudes máxima e mínima são identificadas entre as perfurações. Os transdutores de deslocamentos foram então posicionados na altura média dos furos com o objetivo de monitorar o comportamento dessas regiões. A Figura 4.14 apresenta a distribuição dos instrumentos de medição e a comparação entre os deslocamentos da alma em função da carga de compressão aplicada, obtidos via análises numérica e experimental. A primeira é representada pelas curvas em tracejado, e a segunda por curvas contínuas.

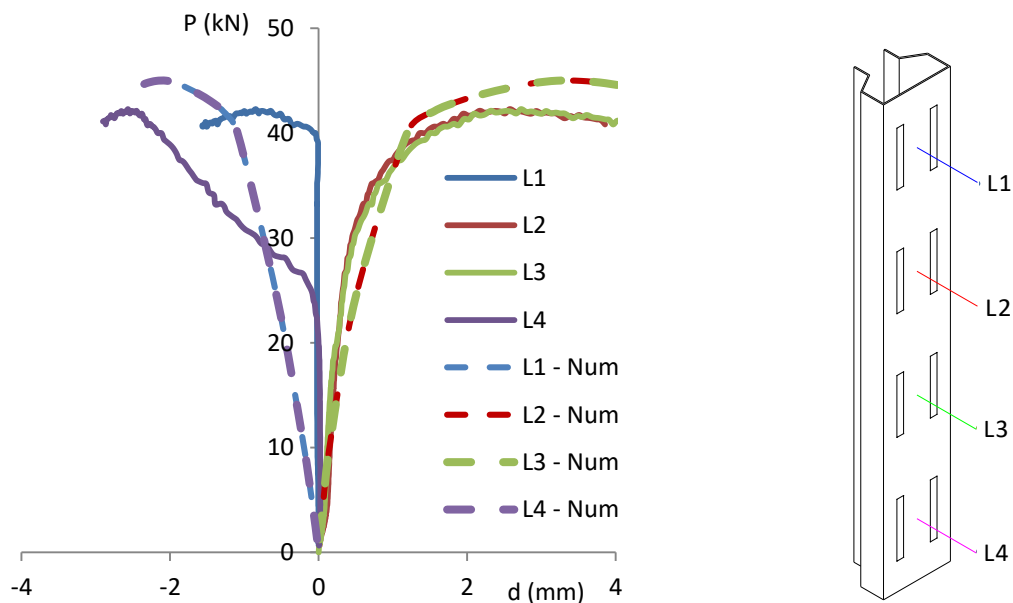


Figura 4.14 - Deslocamentos na alma do protótipo CC-F80-CP2

Com base nos resultados experimentais, nota-se que o terceiro modo de flambagem predominou em relação aos demais, sendo necessário induzi-lo na análise numérica. Essa afirmação é verificada em função dos transdutores L1 e L4 deslocarem no sentido contrário aos instrumentos L2 e L3. A Figura 4.15 ilustra a configuração deformada da alma quando a carga última é alcançada. A extremidade inferior é destacada para visualizar as deformações do modelo.

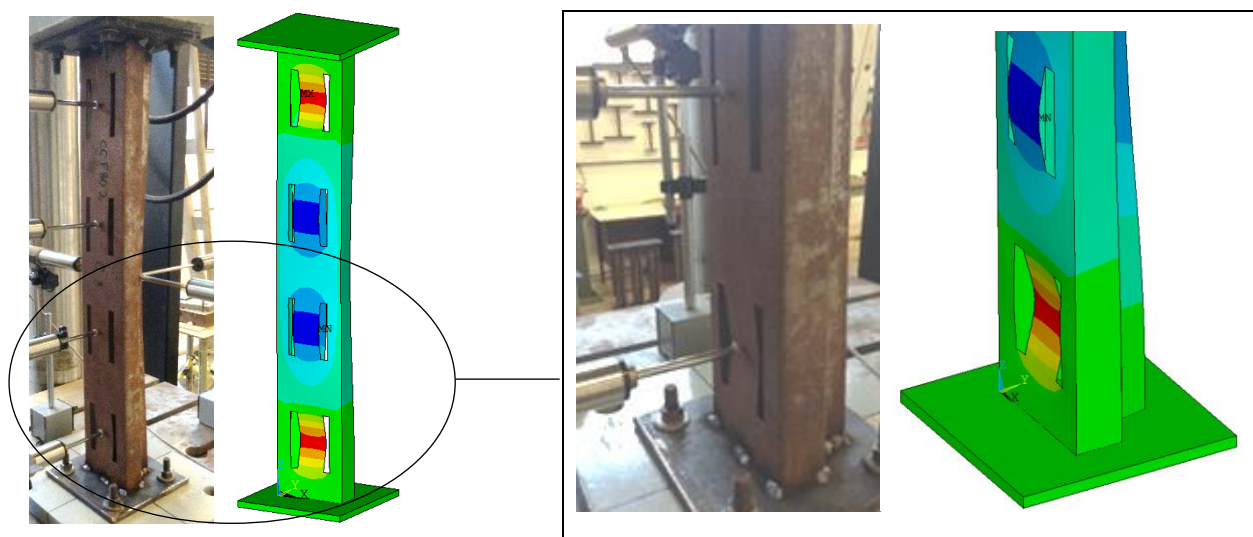


Figura 4.15 - Comparação experimental e numérica do protótipo CC-F80-CP2 (alma)

O comportamento dos flanges é apresentado na Figura 4.16. A curva tracejada representa os dados numéricos e a curva contínua os dados experimentais. As maiores amplitudes previstas no terceiro modo de flambagem definiram o posicionamento dos LVDT's (altura média do perfil).

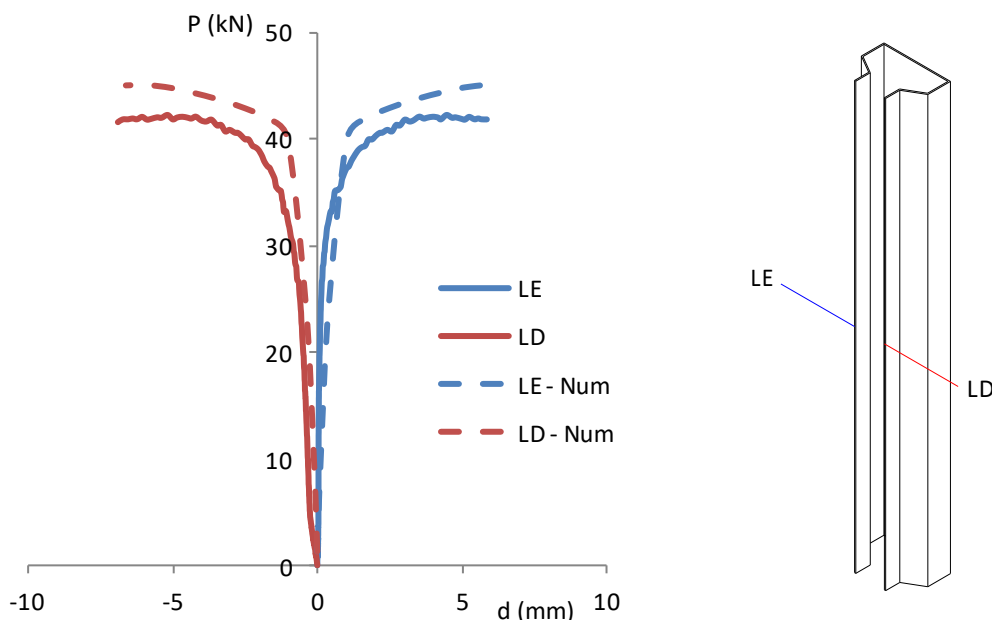


Figura 4.16 - Deslocamentos nos flanges do protótipo CC-F80-CP2

O fechamento da seção, foi previsto no modelo e comprovado durante o ensaio experimental, com amplitude máxima de deslocamento identificada na altura média do perfil. A comparação dos deslocamentos, quando a carga última é alcançada, é apresentada na Figura 4.17.

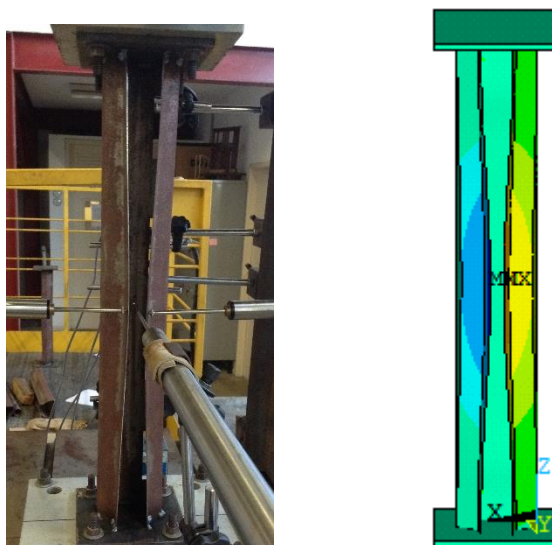


Figura 4.17 - Comparação experimental e numérica do protótipo CC-F80-CP2 (flanges)

4.5 Série CM-SFS

Neste item serão comparados os resultados numéricos e experimentais para a série de colunas médias sem perfurações ao longo do comprimento. O protótipo CM-SFS-CP1 foi escolhido para representar a série.

A análise de estabilidade foi realizada via ANSYS com a expansão do primeiro e segundo modos de flambagem, ilustrados na Figura 4.18.

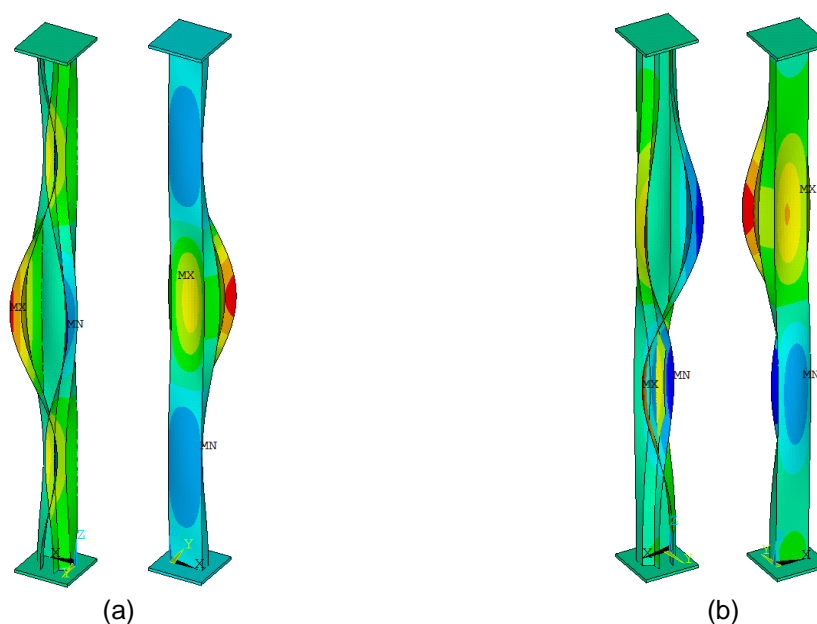


Figura 4.18 - Modos de flambagem do protótipo CM-SFS-CP1:
(a) Primeiro modo com $P_{CR} = 78,6$ kN; (b) Segundo modo com $P_{CR} = 79,4$ kN

Nota-se que os maiores deslocamentos são identificados na região dos flanges. No primeiro modo de flambagem a amplitude máxima ocorre na meia altura do perfil. Já no segundo há o deslocamento dessa região no sentido da extremidade do modelo. Os transdutores de deslocamentos foram então posicionados em cada situação de mínimo ou máximo para capturar ambos os modos e monitorar o comportamento de instabilidade. A Figura 4.19 apresenta a distribuição dos instrumentos de medição e a comparação entre os deslocamentos dos flanges em função da carga de compressão aplicada, obtidos via análises numérica e experimental. A primeira é representada pelas curvas em tracejado, e a segunda pelas curvas contínuas. Ao todo foram posicionados 10 LVDT's ao longo do comprimento do protótipo.

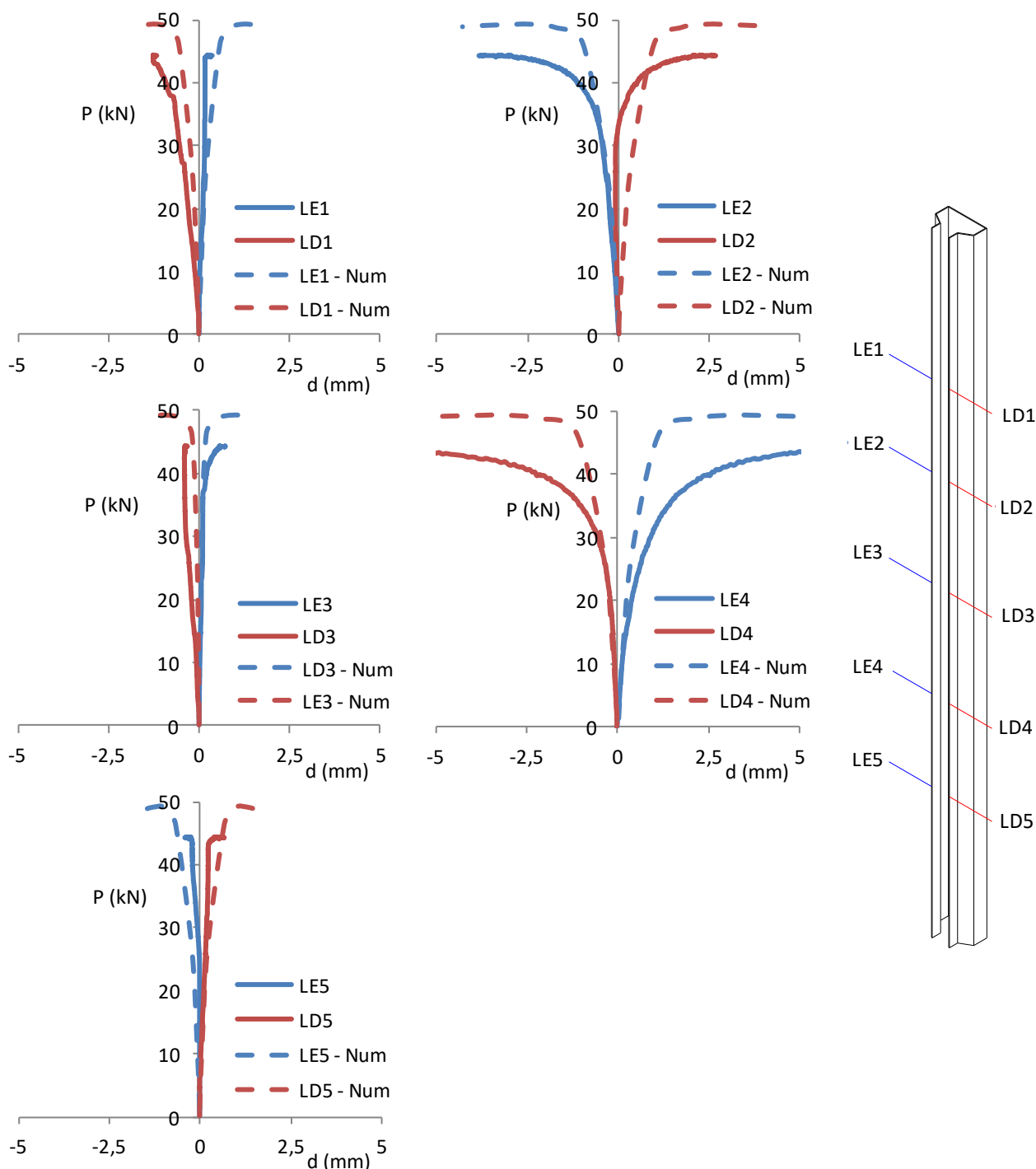


Figura 4.19 - Deslocamentos nos flanges do protótipo CM-SFS-CP1

A instabilidade distorcional predominou na falha do protótipo devido ao comprimento do mesmo. Os maiores deslocamentos foram identificados por L2 e L4, indicando a predominância do segundo modo obtido na análise de estabilidade. A comparação visual dos deslocamentos, quando a carga última é alcançada, é apresentada na Figura 4.20.

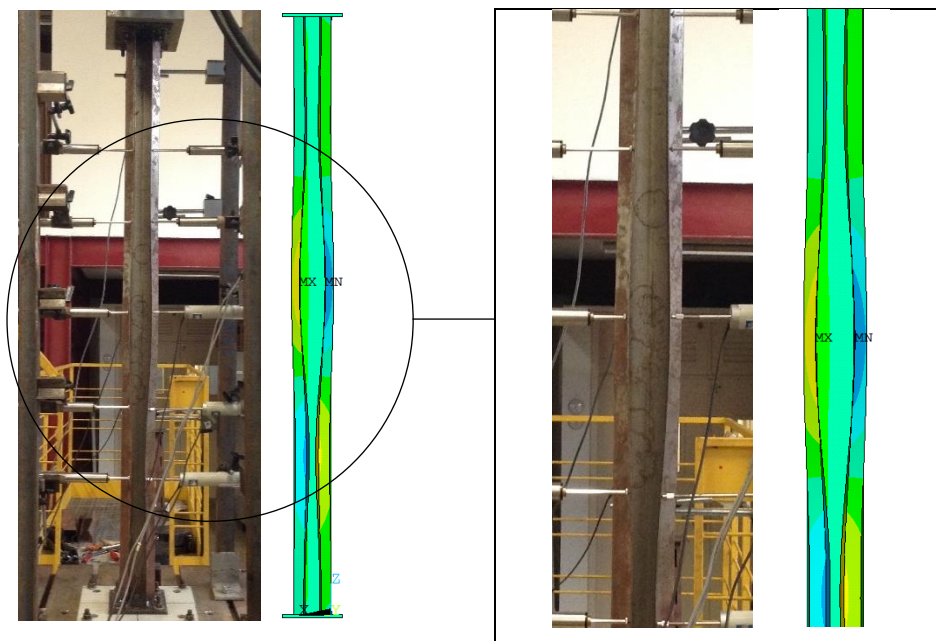


Figura 4.20 - Comparação experimental e numérica do protótipo CM-SFS-CP1 (flanges)

Os deslocamentos da alma foram monitorados por transdutores próximos às extremidades e ao longo do comprimento. A deformação nessa região é consequência do modo distorcional, ou seja, não há flambagem local. A Figura 4.21 apresenta a comparação dos resultados numéricos e experimentais.

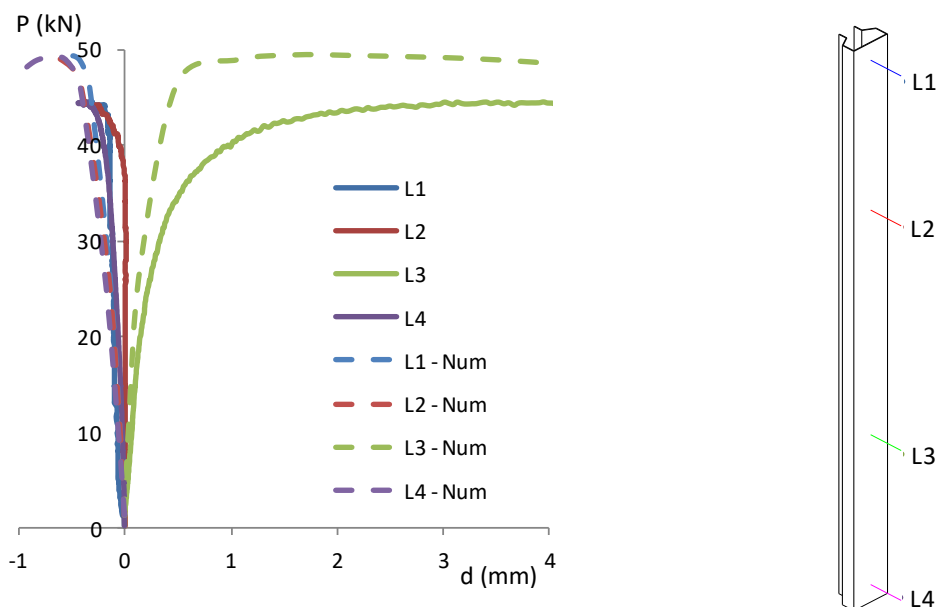


Figura 4.21 - Deslocamentos na alma do protótipo CM-SFS-CP1

4.6 Série CM-F60

Neste item serão comparados os resultados numéricos e experimentais para a série de colunas médias com perfurações ao longo do perfil com comprimento do furo igual a 60% da largura da alma (56,4 x 9,4). O protótipo CM-F60-CP2 foi escolhido para representar a série.

A análise de estabilidade foi realizada via ANSYS com a expansão do primeiro, segundo e terceiro modos de flambagem, ilustrados na Figura 4.22.

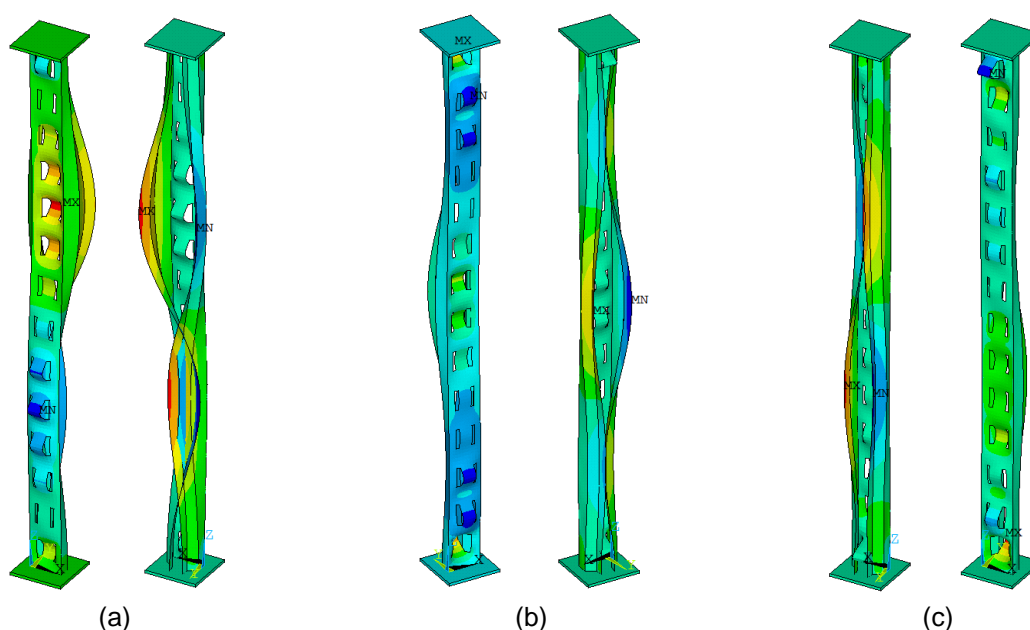


Figura 4.22 - Modos de flambagem do protótipo CM-F60-CP2: (a) Primeiro modo com $P_{CR} = 54,0$ kN; (b) Segundo modo com $P_{CR} = 54,4$ kN; (c) Terceiro modo com $P_{CR} = 54,6$ kN

Nota-se que os maiores deslocamentos são identificados na região dos flanges. No primeiro e terceiro modos de flambagem há o aparecimento de 2 meias ondas. Já no segundo desenvolvem-se três meias ondas com amplitude máxima localizada à meia altura do perfil. Os transdutores de deslocamentos foram então posicionados em cada situação de mínimo ou máximo para capturar ambos os modos e monitorar o comportamento de instabilidade. A Figura 4.23 apresenta a distribuição dos instrumentos de medição e a comparação entre os deslocamentos dos flanges em função da carga de compressão aplicada, obtidos via análises numérica e experimental. A primeira é representada pelas curvas em tracejado, e a segunda pelas curvas contínuas. Ao todo foram posicionados 10 transdutores de deslocamento ao longo do comprimento do corpo de prova.

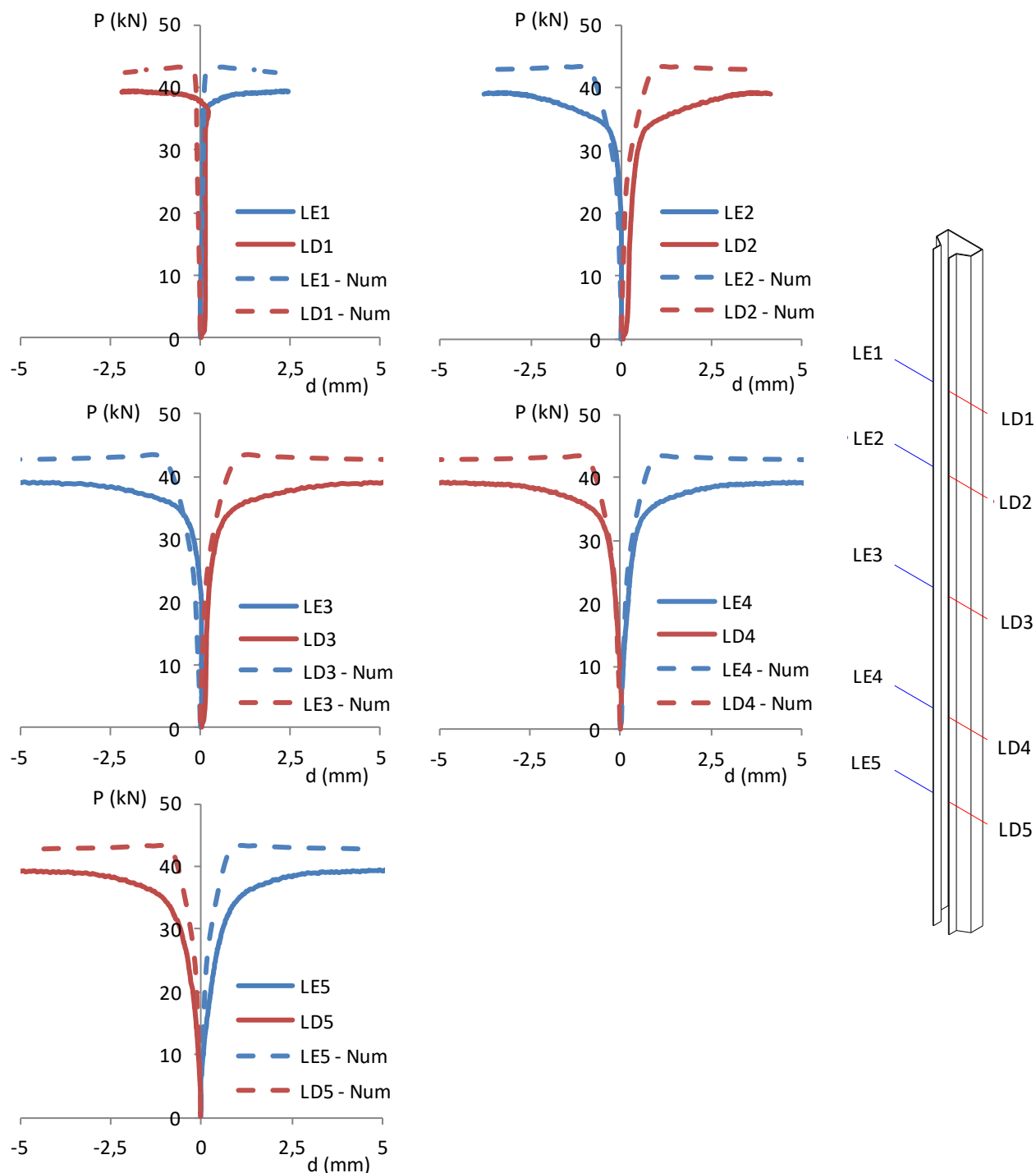


Figura 4.23 - Deslocamentos nos flanges do protótipo CM-F60-CP2

A instabilidade distorcional predominou na falha do protótipo devido ao comprimento do mesmo. Todos os transdutores identificaram deslocamentos, indicando a interação entre os modos de flambagem obtidos na análise de estabilidade. A comparação visual dos deslocamentos, quando a carga última é alcançada, é apresentada na Figura 4.24.

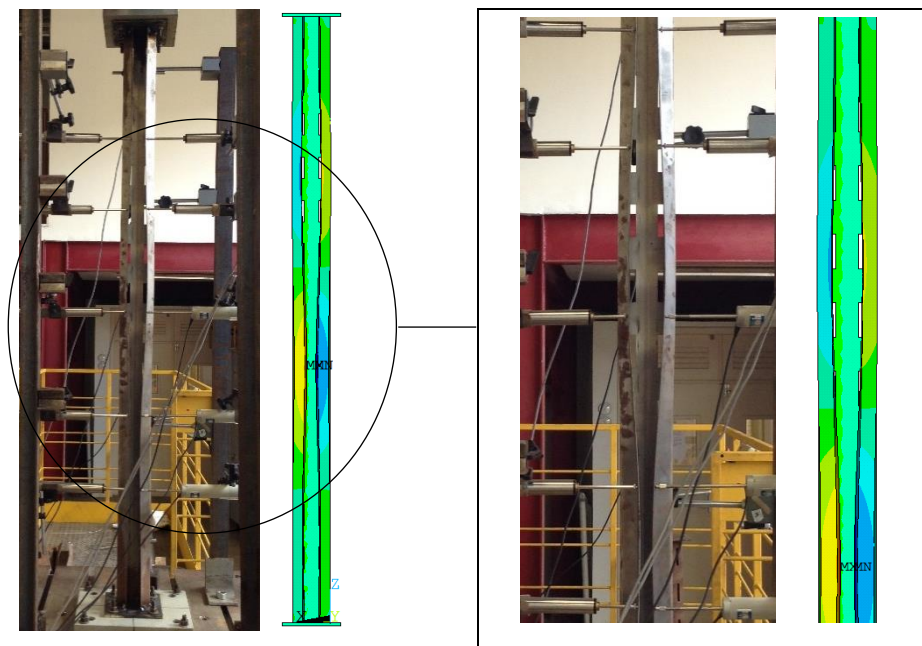


Figura 4.24 - Comparação experimental e numérica do protótipo CM-F60-CP2 (flanges)

Os deslocamentos da alma foram monitorados por transdutores próximos às extremidades e ao longo do comprimento. A deformação nessa região é consequência do modo distorcional, ou seja, não há flambagem local. A Figura 4.25 apresenta a comparação dos resultados numéricos e experimentais.

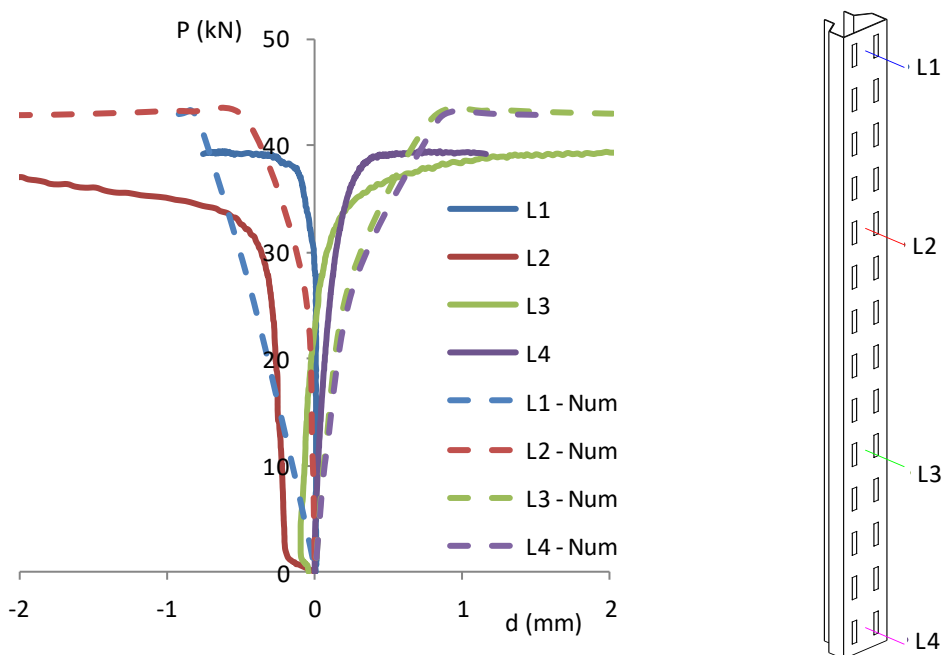


Figura 4.25 - Amplitudes na alma do protótipo CM-F60-CP2 (mm)

4.7 Série CM-F80

Neste item serão comparados os resultados numéricos e experimentais para a série de colunas médias com perfurações ao longo do perfil com comprimento do furo igual a 80% da largura da alma (75,2 x 9,4mm). O protótipo CM-F80-CP1 foi escolhido para representar a série.

A análise de estabilidade elástica foi realizada via ANSYS com a expansão do primeiro e segundo modos de flambagem, ilustrados na Figura 4.26.

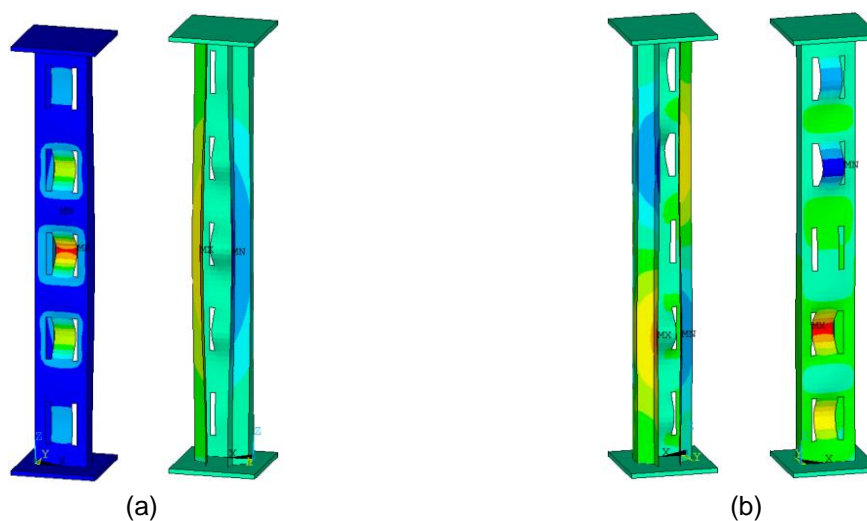


Figura 4.26 - Modos de flambagem do protótipo CM-F80-CP1:
(a) Primeiro modo com $P_{CR} = 37,5$ kN; (b) Segundo modo com $P_{CR} = 38,3$ kN

Nota-se que os maiores deslocamentos são identificados entre as perfurações, indicando um modo de instabilidade na região entre os furos. No primeiro modo de flambagem a amplitude em todos os segmentos possui o mesmo sentido. Já no segundo há uma variação nas extremidades. Os transdutores de deslocamentos foram então posicionados ao longo das 5 linhas de furos para monitorar o comportamento dessas regiões. A Figura 4.27 apresenta a distribuição dos instrumentos de medição e a comparação entre os deslocamentos da alma em função da carga de compressão aplicada, obtidos via análises numérica e experimental. A primeira é representada pelas curvas em tracejado, e a segunda pelas curvas contínuas. Ao todo foram posicionados 5 LVDT's ao longo do comprimento do corpo de prova.

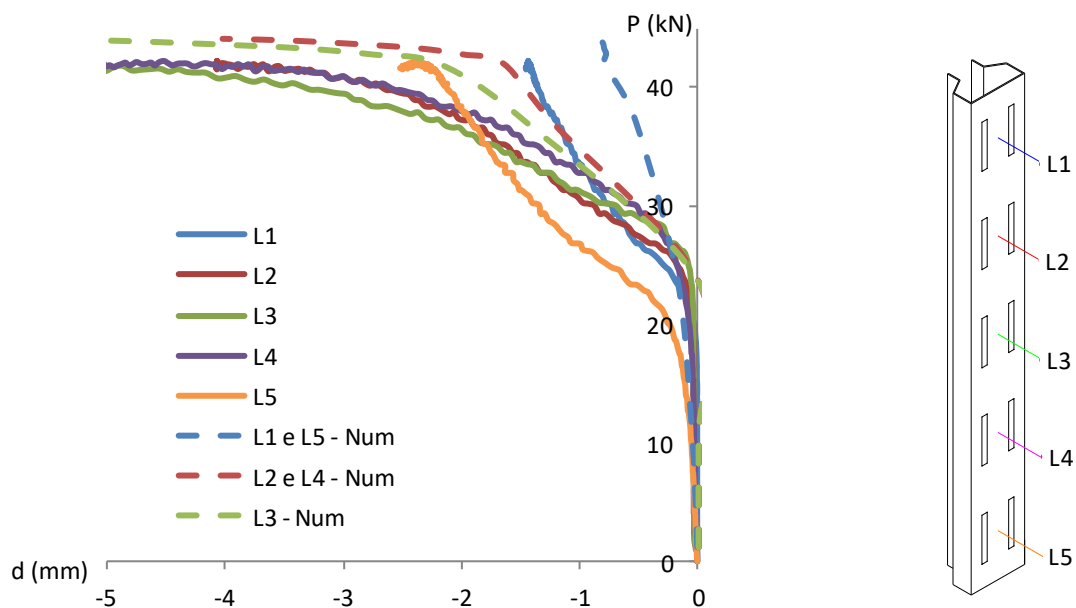


Figura 4.27 - Amplitudes na alma do protótipo CM-F80-CP1

Com base nos resultados experimentais, nota-se que o primeiro modo de flambagem predominou em relação aos demais, sendo necessário induzi-lo na análise numérica. Essa afirmação é verificada em função dos deslocamentos possuírem o mesmo sentido em todos os pontos de monitoramento. A Figura 4.28 ilustra a configuração da alma quando a carga última é alcançada.

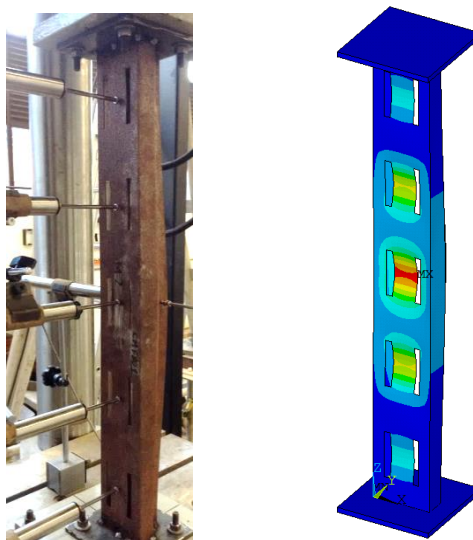


Figura 4.28 - Comparação experimental e numérica do protótipo CM-F80-CP1 (alma)

O comportamento dos flanges é evidenciado na Figura 4.29. A curva tracejada representa os dados numéricos e a curva contínua os dados experimentais. As

maiores amplitudes previstas no primeiro modo de flambagem definiram o posicionamento dos LVDT's (altura média do perfil).

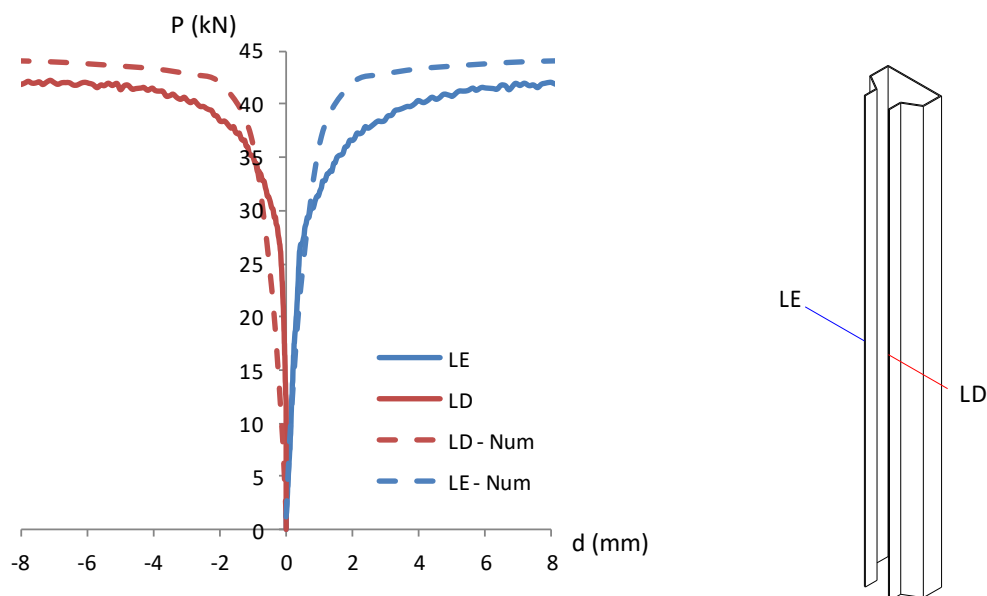


Figura 4.29 - Deslocamentos nos flanges do protótipo CM-F80-CP1

A abertura da seção foi prevista no modelo e comprovada durante o ensaio experimental, com amplitude máxima de deslocamento identificada na altura média do perfil. A comparação visual das análises, quando a carga última é alcançada, é apresentada na Figura 4.30.



Figura 4.30 - Comparação experimental e numérica do protótipo CM-F80-CP1 (flanges)

4.8 Considerações sobre as comparações entre os resultados numéricos e experimentais

A Tabela 4.2 apresenta as cargas máximas obtidas e os modos de flambagem para as séries ensaiadas. Apesar das variações de comprimento observadas, pode-se observar que existe uma uniformidade dos resultados nos diversos ensaios.

Tabela 4.2 - Comparação entre as cargas últimas ensaiadas e simuladas

Modelo	L (mm)	P _U -NUM (kN)	P _U -EXP (kN)	Diferença (%)	Modo de flambagem
CC-SFS-CP1	564,00	55,80	57,50	-2,96%	Distorcional
CC-SFS-CP2	564,00	55,80	55,10	1,27%	Distorcional
CC-SFS-CP3	564,00	55,80	55,70	0,18%	Distorcional
CC-F60-CP1	564,00	49,00	41,50	18,07%	Distorcional / Localizado de placa
CC-F60-CP2	564,00	49,00	48,00	2,08%	Distorcional / Localizado de placa
CC-F60-CP3	564,00	49,00	44,80	9,38%	Distorcional / Localizado de placa
CC-F80-CP1	601,60	46,50	48,50	-4,12%	Distorcional / Localizado de placa
CC-F80-CP2	601,60	44,00	42,10	4,51%	Distorcional / Localizado de placa
CC-F80-CP3	601,60	46,00	41,30	11,38%	Distorcional / Localizado de placa
CM-SFS-CP1	1504,00	49,10	44,30	10,84%	Distorcional
CM-SFS-CP2	1504,00	-	-	-	-
CM-SFS-CP3	1504,00	50,00	47,50	5,26%	Distorcional
CM-F60-CP1	1579,20	-	-	-	-
CM-F60-CP2	1579,20	43,00	39,40	9,14%	Distorcional / Localizado de placa
CM-F60-CP3	1579,20	43,00	38,70	11,11%	Distorcional / Localizado de placa
CM-F80-CP1	752,00	43,30	42,20	2,61%	Distorcional / Localizado de placa
CM-F80-CP2	752,00	43,30	37,50	15,47%	Distorcional / Localizado de placa
CM-F80-CP3	752,00	43,30	43,50	-0,46%	Distorcional / Localizado de placa

Observa-se que a existência dos furos acarreta em redução da carga última das colunas, uma vez que a área líquida das colunas perfuradas é menor que a área bruta. Nota-se também que o modo distorcional predominou em todos os casos, com interação com o modo localizado de placa devido à proximidade das cargas críticas. Porém, esse último não influenciou na capacidade resistente da coluna (mais detalhes do modo no item 4.9). Para os perfis com perfurações, observa-se uniformidade nos resultados, mesmo com variação em algum valor dentro da série ocasionada por fatores de experimento. Os protótipos CM-SFS-CP2 e CM-F60-CP1 tiveram os resultados experimentais comprometidos em função de falhas na aquisição de dados durante os ensaios experimentais.

Os protótipos ensaiados apresentaram grande sensibilidade às imperfeições. A introdução dessas na análise numérica seguiu as observações visuais e as medidas coletadas nos perfis. Por isso, o valor adotado para representar essas irregularidades, considerando desalinhamento e desvios de fabricação, foi a metade da espessura, ou seja, 0,7 mm. A Tabela 4.3 apresenta os modos e as amplitudes para a introdução das imperfeições nos protótipos, obtidos a partir de análise elástica de flambagem (apresentados neste capítulo e no Apêndice). Ressalta-se que em três modelos foi necessária a combinação linear entre os modos observados.

Tabela 4.3 - Modos de flambagem induzidos e amplitude de imperfeição

Modelo	Modos (°)	Amplitude (mm)
CC-SFS-CP1	2	0,7
CC-SFS-CP2	2	0,7
CC-SFS-CP3	2	0,7
CC-F60-CP1	1	0,7
CC-F60-CP2	1	0,7
CC-F60-CP3	2	0,7
CC-F80-CP1	3	0,7
CC-F80-CP2	3	0,7
CC-F80-CP3	1	0,7
CM-SFS-CP1	2	0,7
CM-SFS-CP2	-	-
CM-SFS-CP3	1 e 2	0,7
CM-F60-CP1	-	-
CM-F60-CP2	1 e 2	0,7
CM-F60-CP3	2 e 3	0,7
CM-F80-CP1	1	0,7
CM-F80-CP2	1	0,7
CM-F80-CP3	1	0,7

4.9 Análise da estabilidade de elementos perfurados

Foi observada, durante os ensaios experimentais e também nos modelos numéricos, a ocorrência de um modo de flambagem concentrado na placa entre as perfurações. Para melhor compreensão deste fenômeno, foi realizado um estudo sobre a ocorrência deste modo aqui chamado "Modo localizado de placa".

Inicialmente, foi estudada a estabilidade de uma chapa plana, com e sem perfurações, a fim de observar a influência dos furos no modo local de flambagem e

em seguida, tem-se a análise do perfil rack considerando diversas tipologias de furos, conforme descritas a seguir.

As dimensões das seções transversais utilizadas são apresentadas na Figura 4.31. O elemento de placa analisado possui a mesma geometria da alma do perfil rack.

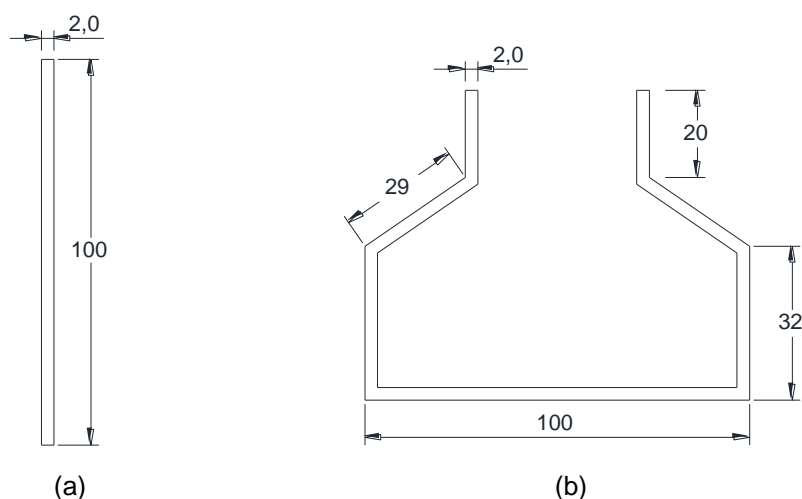


Figura 4.31 - Dimensões da seção transversal (mm): (a) Placa; (b) Perfil rack

A distribuição dos furos ao longo da coluna é apresentada na Figura 4.32. A geometria segue o padrão estabelecido para evidenciar a flambagem local. Observa-se que a posição dos furos é fixada no valor de 20% da largura do elemento em relação às bordas, o comprimento dos furos "hf" varia de 10 a 80% desta mesma largura, ou seja, de 10 a 80 mm. A espessura de todos os modelos é de 2 mm e o comprimento final do elemento é um valor aproximado a cinco vezes a largura da alma (para minimizar o efeito de extremidade). Esse último sofre variação para acomodar os furos na placa. As variáveis da Figura 4.32 (L e hf) estão representadas na Tabela 4.4.

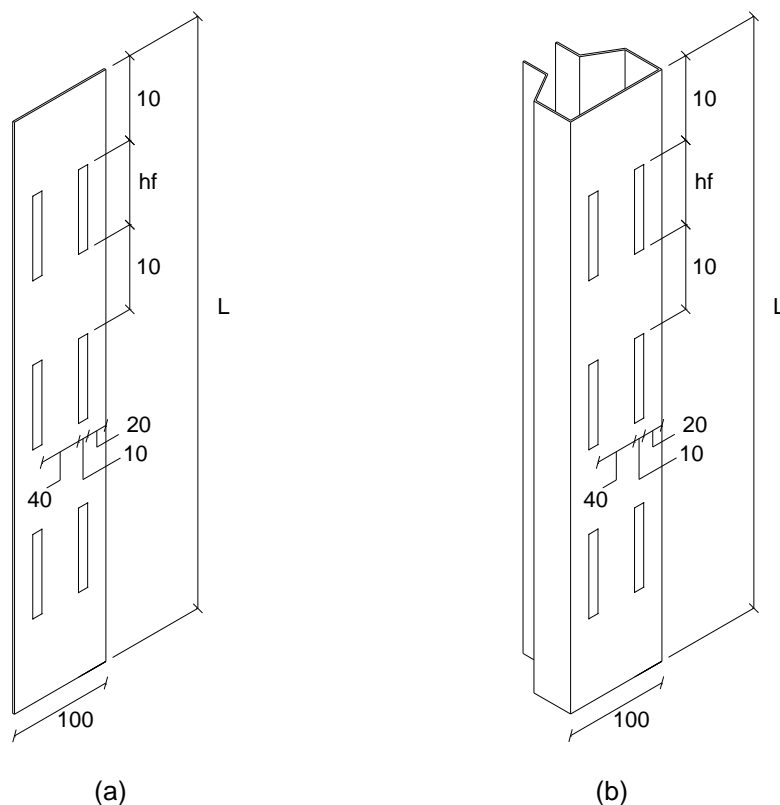


Figura 4.32 - Geometria dos modelos (mm): (a) Placa; (b) Perfil rack

Tabela 4.4 - Tipologias de furos localizadas no elemento da alma

L = 500mm	L = 510mm	L = 490mm	L = 490mm	L = 510mm	L = 490mm	L = 500mm	L = 490mm	L = 540mm
hf = 0mm	hf = 10mm	hf = 20mm	hf = 30mm	hf = 40mm	hf = 50mm	hf = 60mm	hf = 70mm	hf = 80mm

A Norma NBR 14762:2010, Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio, estabelece procedimentos de avaliação da resistência de elementos sem perfurações. Para a análise de placas sem furos, o

procedimento da norma brasileira foi aplicado diretamente e comparado com o modelo numérico. Para placas com perfurações, as análises foram realizadas utilizando o software de elementos finitos ANSYS, bem como no caso de seções tipo rack.

A tensão crítica de flambagem local, de uma placa biapoada submetida à compressão uniforme, é função do coeficiente de rigidez à flexão desta placa, do carregamento uniformemente aplicado e do deslocamento senoidal correspondente ao modo de instabilidade (SARMANHO, 1991). Estas variáveis são inseridas na equação diferencial de equilíbrio da placa, obtendo-se a seguinte expressão:

$$\sigma_{cr} = \frac{k \pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2 \quad (4.1)$$

Onde:

σ_{cr} é a tensão crítica de flambagem do elemento;

A é a área da seção transversal do elemento;

k é o coeficiente de flambagem local, com valor adotado de 4;

E é o módulo de elasticidade do material, com o valor adotado de 200 GPa;

t é a espessura do elemento;

b é a largura do elemento;

ν é o coeficiente de Poisson, com o valor de 0,3.

A Equação 4.1 foi utilizada para o cálculo da carga crítica da placa biapoada (P_{cr-t} da Tabela 4.6) considerando o modelo sem perfurações, ou seja, a área da seção transversal é a multiplicação da largura (b) pela espessura (t).

4.9.1 Modelo de elementos finitos

O método numérico empregado para análise foi o Método dos Elementos Finitos através do software ANSYS (ANSYS, 2011). Esta escolha foi devido à limitação do software GBTUL em analisar apenas seções sem furos. Os primeiros estudos envolveram a análise de autovalor para a obtenção da carga crítica e dos autovetores para os modos de flambagem. Os resultados foram então comparados com aqueles obtidos via GBT a fim de calibrar o modelo. Observa-se que os modelos de elementos finitos têm seus resultados sensíveis às condições de contorno, refinamento da malha e o tipo de elemento utilizado. O tipo de elemento e o refinamento da malha foram apresentados no capítulo 3.

A condição de contorno utilizada para a placa foi biapoiada ao longo do comprimento das paredes, similar aos apoios dos flanges na seção rack, conforme Figura 4.33 (a). Para impedir o deslocamento de corpo rígido na direção axial da coluna, um nó à meia altura do modelo teve sua translação impedida nesta direção, Figura 4.33 (b). As rotações em torno dos eixos perpendiculares à coluna foram acopladas, com o objetivo de garantir o deslocamento uniforme de todos os nós envolvidos. Com isso o empenamento é restringido conforme Figura 4.33 (c). O carregamento foi aplicado uniformemente distribuído em todos os nós das extremidades a fim de se garantir a centralização das cargas, Figura 4.33 (d). O conjunto das condições de contorno é mostrado na Figura 4.33 (e).

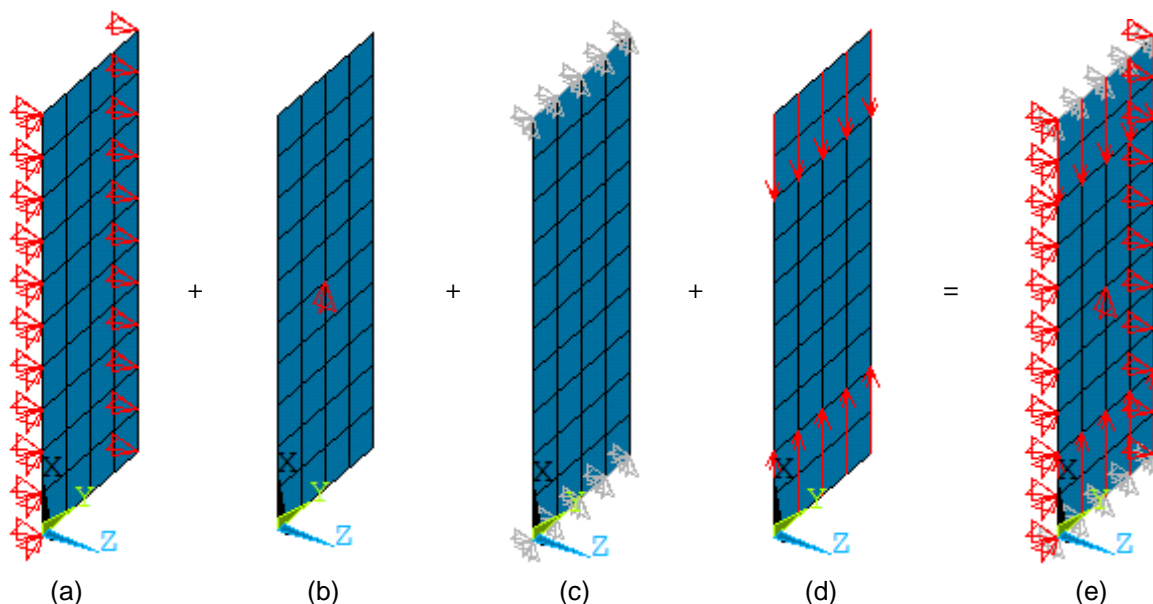


Figura 4.33 - Condições de contorno implementadas no modelo de elementos finitos para placa:
(a) Condição biapoiada das paredes da alma; (b) Restrição de deslocamento para impedir o deslocamento de corpo rígido; (c) Acoplamento das rotações; (d) Aplicação do carregamento unitário; (e) Todas as condições de contorno aplicadas

No perfil, para evitar a distorção das seções extremas, foram restringidos os deslocamentos nas direções perpendiculares ao eixo da coluna, conforme Figura 4.34(a). Para impedir o deslocamento de corpo rígido na direção axial da coluna, um nó à meia altura do modelo teve sua translação impedida nesta direção, Figura 4.34 (b). As rotações em torno dos eixos perpendiculares à coluna foram acopladas, com o objetivo de garantir o deslocamento uniforme de todos os nós envolvidos. Com isso o empenamento é restringido conforme Figura 4.34 (c). O carregamento foi aplicado uniformemente distribuído em todos os nós das extremidades a fim de se garantir a centralização das cargas, Figura 4.34 (d). O

conjunto das condições de contorno é mostrado na Figura 4.34 (e). Esta técnica também foi utilizada por Silva (2011) e Souza (2013).

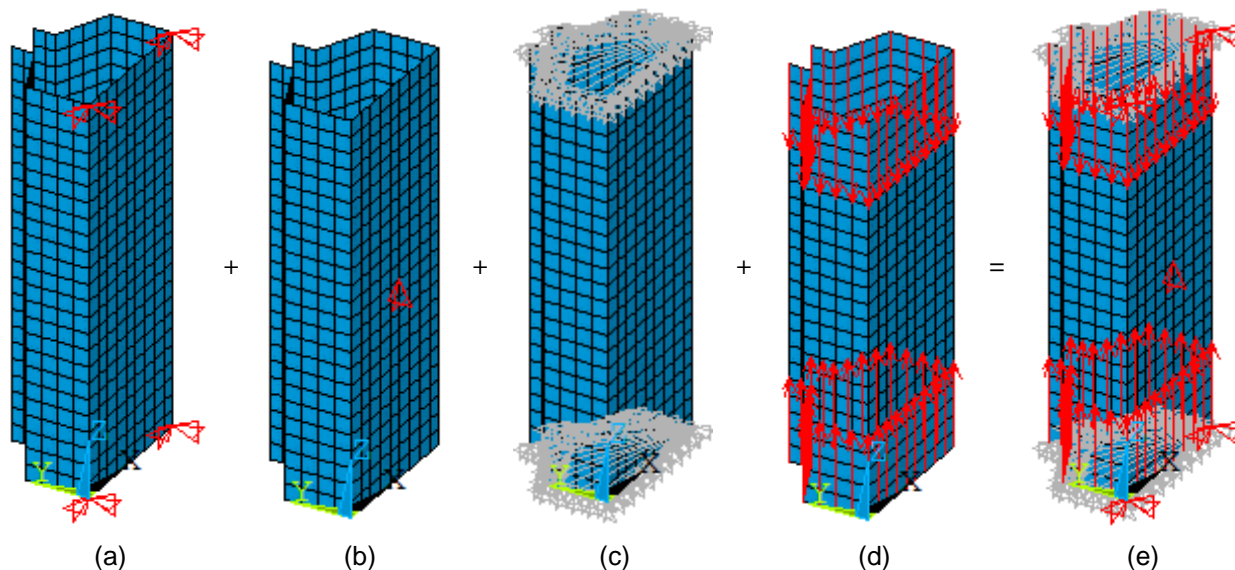


Figura 4.34 - Condições de contorno implementadas no modelo de elementos finitos para rack: (a) Restrições de deslocamentos nas direções perpendiculares ao eixo da coluna; (b) Restrição de deslocamento para impedir o deslocamento de corpo rígido; (c) Acoplamento das rotações; (d) Aplicação do carregamento unitário; (e) Todas as condições de contorno aplicadas

4.9.2 Resultados das análises em elementos finitos

Nesse item, têm-se os resultados das análises de estabilidade para as placas e seções estudadas. Em todas elas, observa-se a ocorrência de flambagem local. No entanto, para os casos com perfurações maiores, esse modo concentra-se na região entre os furos.

4.9.2.1 Placa

Os valores das cargas críticas foram determinados e o modo local identificado nas análises para as configurações de furo ilustradas na Tabela 4.4

A Tabela 4.5 apresenta os modos observados para diversas configurações de perfurações. Observa-se que a partir da relação onde a proporção do furo é de 0,5; surge uma configuração diferente no modo de instabilidade quando comparada com as anteriores, pois os deslocamentos concentram-se entre os furos. Com isso, essa nova configuração foi denominada de modo localizado de placa, que ainda não é abordado na literatura. Este comportamento evidencia-se também na Figura 4.35,

onde se observa uma mudança na inclinação da curva a partir do valor 0,5, indicando um decréscimo mais acentuado da carga crítica a partir deste valor.

Tabela 4.5 - Modos de instabilidade para o elemento placa considerando a relação h_f/b_w

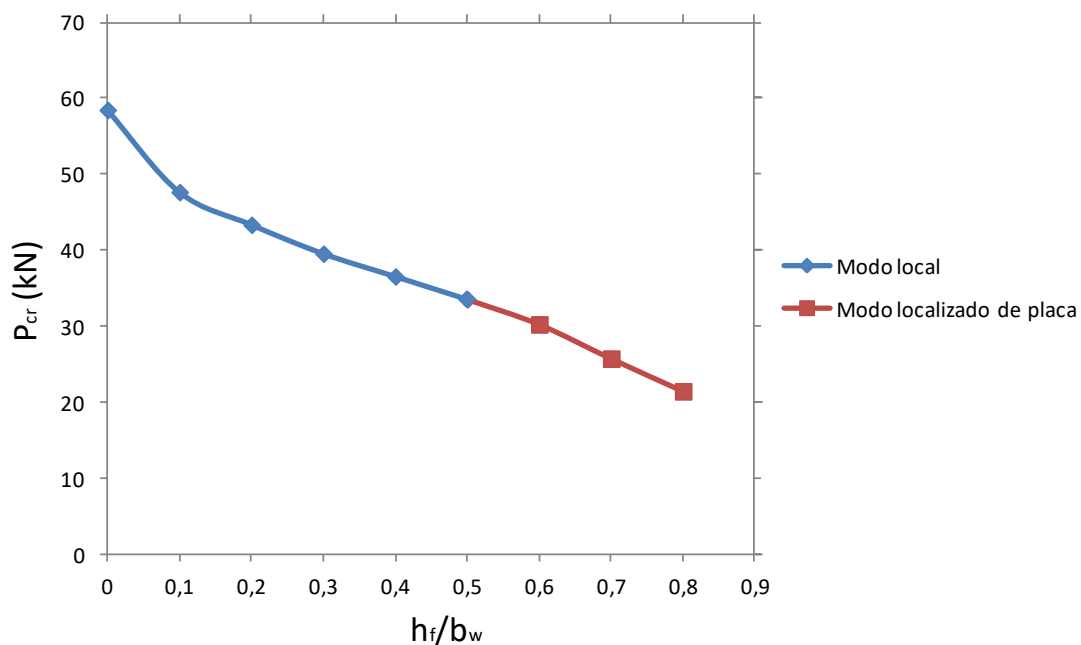
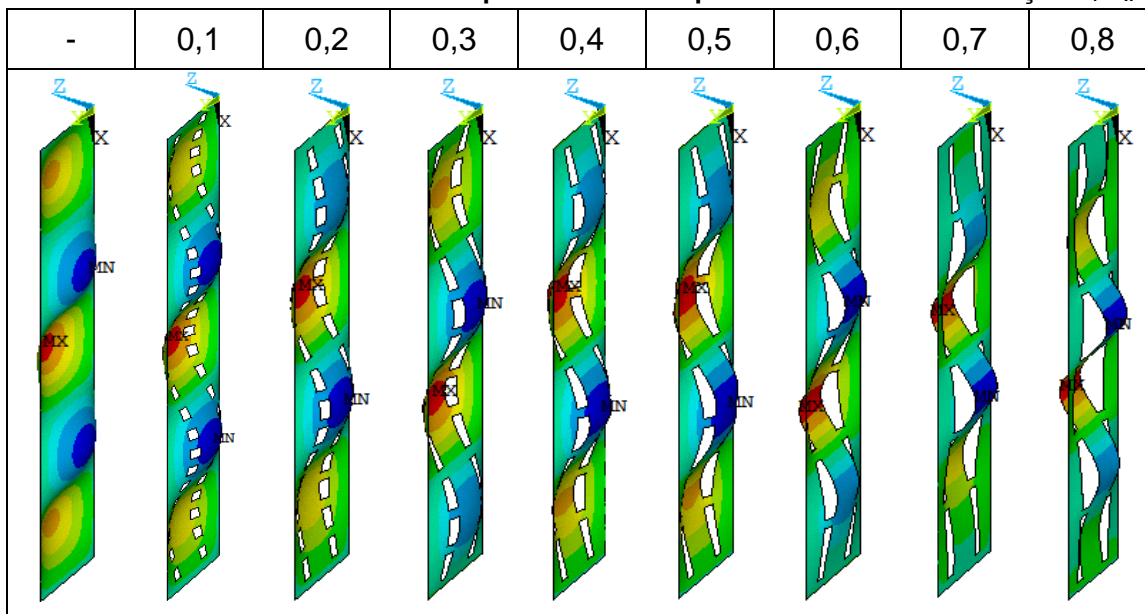


Figura 4.35 - Carga crítica de flambagem em função do comprimento do furo para placa

As cargas críticas de flambagem (P_{cr}) foram obtidas pela análise numérica bem como a carga crítica teórica (P_{cr-t}) calculada por meio da Equação 4.1 da Teoria de

Placas considerando a mesma sem furos e biapoiada. A Tabela 4.6 apresenta os resultados obtidos.

$$P_{cr-t} = A \frac{k \pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2 \quad (4.2)$$

onde $\{k = 4; E = 200\text{GPa}; b = 100\text{mm}; t = 2,0\text{mm}; A=200\text{mm}^2; \nu = 0,3\}$

Tabela 4.6 - Resultados das cargas críticas para perfil placa

h_f/b	P_{cr} (kN)	P_{cr-t} (kN)	P_{cr}/P_{cr-t}	Descrição
0	58,5	57,8	1,01	
0,1	47,7	-	0,83	P_{cr} -Carga crítica numérica obtida via ANSYS
0,2	43,4	-	0,75	
0,3	39,6	-	0,69	P_{cr-t} -Carga crítica teórica calculada pela teoria de placa
0,4	36,6	-	0,63	
0,5	33,6	-	0,58	b - Largura da placa
0,6	30,3	-	0,52	h_f – Altura do furo no sentido do comprimento da placa
0,7	25,8	-	0,45	
0,8	21,5	-	0,37	

Observa-se que há influência significativa da variação do comprimento do furo no modo local de flambagem; visto que houve uma diminuição de até 63% da carga crítica devido ao aumento das perfurações. Comparando-se a carga crítica da placa sem furos com a carga crítica teórica calculada, nota-se uma aproximação satisfatória, o que valida o modelo numérico adotado.

4.9.2.2 Seção tipo rack

Para a seção rack as cargas críticas foram determinadas pela análise numérica e o modo local identificado visualmente. Devido à presença dos furos, a carga crítica associada à flambagem local diminui quando comparada ao elemento sem perfurações.

Nos modelos em que se consideraram furos com comprimento a partir de $h_f=0,5b_w$ (onde b_w representa a largura do elemento), a flambagem concentra-se na região entre os furos, caracterizando o modo localizado de placa como observado na análise da placa. A Tabela 4.7 ilustra os modos de instabilidade mencionados. Nestes

modelos, observa-se ainda o efeito do modo localizado de placa na mudança na inclinação da curva apresentada na Figura 4.36, indicando a redução da carga crítica da seção a partir dessa relação entre a altura do furo e a largura da alma.

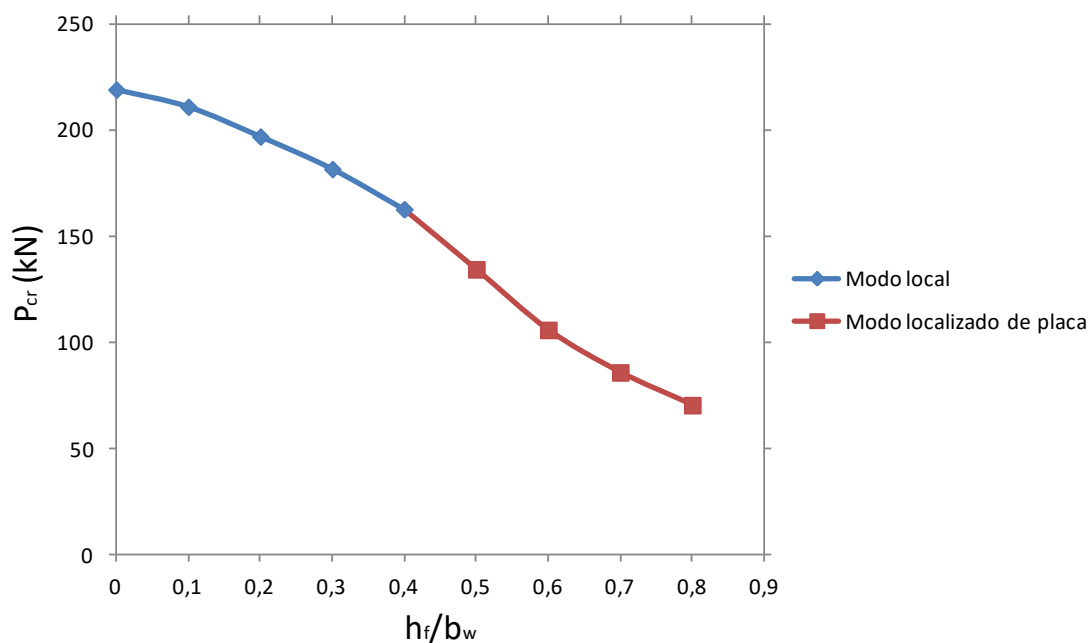
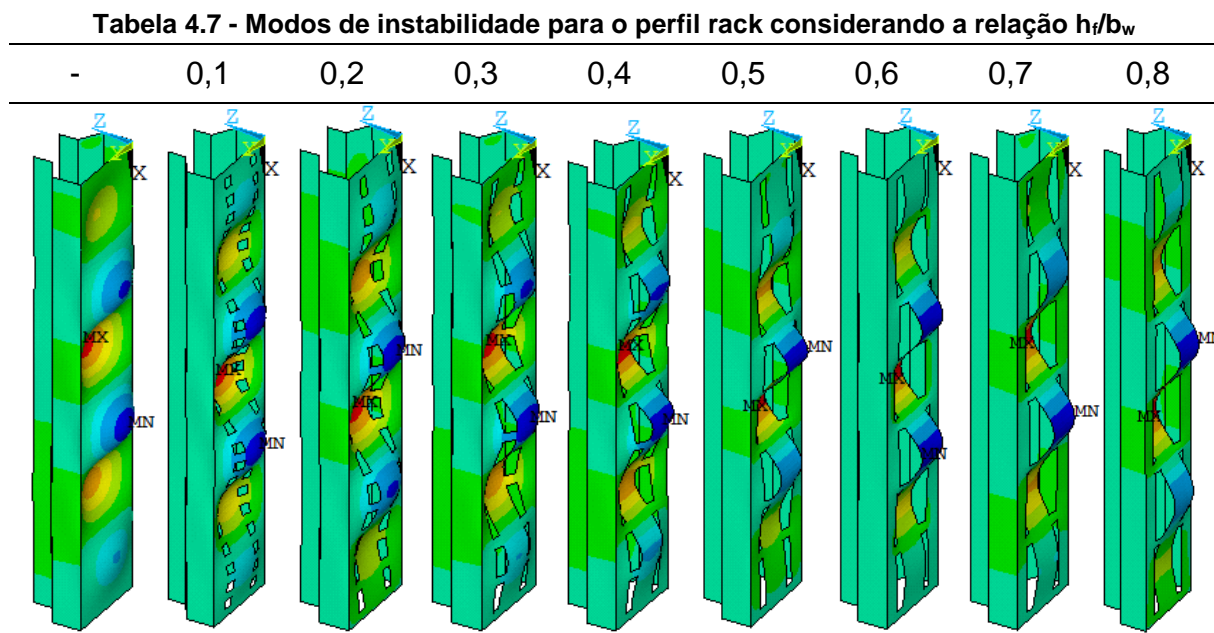


Figura 4.36 - Carga crítica de flambagem em função do comprimento do furo para perfil rack

4.9.3 Considerações sobre o estudo

Neste item foi analisada a ocorrência do modo local de flambagem em uma placa e em um perfil de seção transversal tipo rack sob compressão centrada. Foram

simulados numericamente, por meio de elementos finitos (ANSYS), elementos com e sem perfurações. Observou-se que, devido a presença dos furos, a carga crítica de flambagem local diminui quando comparada ao elemento sem perfurações. Para os modelos com furos de comprimento superior a 50% da largura da alma, o modo local concentra-se na região entre os furos, ocorrendo nestes casos uma acentuada redução da carga crítica em relação aos furos menores. Este modo de instabilidade difere do modo local de placa e não é abordado na literatura existente, devendo, então, ser objeto de mais estudos.

Os dados desta análise, quando comparados aos resultados experimentais do capítulo 3, representam o modo de instabilidade localizado para determinadas tipologias de perfurações. Apesar das diferenças geométricas entre as seções envolvidas, o fenômeno ocorre nas duas situações a partir de uma proporção do tamanho do furo em relação à largura da alma. Os perfis que se aproximam das configurações do estudo e que desenvolveram o modo localizado de placa são: CC-F60 (Item 4.3), CC-F80 (Item 4.4), CM-F60 (Item 4.6) e CM-F80 (Item 4.7).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência do modo de flambagem local e distorcional, em perfis formados a frio do tipo rack, desenvolvidas para sistemas de armazenagem. Estas colunas possuem perfurações ao longo dos seus comprimentos para facilitar a montagem. O trabalho considerou a influência dos furos no comportamento estrutural do perfil através de análises numéricas e experimentais.

A definição da geometria dos protótipos foi feita por Souza (2013) buscando a ocorrência dos modos local e distorcional, em seus diversos comprimentos, de forma isolada ou em interação.

Uma vez definida a geometria do perfil, o estudo numérico foi realizado em elementos finitos via ANSYS. O modelo foi calibrado, inicialmente, pela Teoria Generalizada de Vigas, através do software GBTul. A linguagem de programação utilizada foi o sistema de APDL (ANSYS Parametric Design Language) com o objetivo de automatizar a construção do modelo e facilitar suas variações de geometria. As condições de contorno foram definidas de modo a garantir o engaste das extremidades e impedir o deslocamento de corpo rígido. A partir de estudos anteriores, os elementos SHELL181 e SOLID 45 (biblioteca ANSYS) foram utilizados para a discretização do perfil e chapas de apoio, respectivamente. Foram testados elementos da malha com lado igual a 5 e 10% da alma e, a partir das análises, concluiu-se que esse último é o mais indicado para a simulação por apresentar uma melhor correlação entre os resultados da análise de estabilidade via GBT. Observa-se que os modelos de elementos finitos têm seus resultados bastante sensíveis a essas condições.

O modelo desenvolvido foi então utilizado para a análise da estabilidade da seção, com o objetivo de determinar os modos de flambagem e cargas críticas associadas. Esse processo foi importante para nortear a instrumentação dos ensaios experimentais.

O programa experimental foi realizado no Laboratório de Estruturas - DECIV/EM/UFOP com o objetivo de medir os deslocamentos associados aos modos de flambagem local e distorcional em função de um carregamento crescente aplicado. A bateria de testes foi composta por 18 ensaios sob carregamento axial centrado, divididos em dois grupos (colunas curtas e médias) contendo três séries em cada grupo diferenciadas na questão das dimensões dos furos e altura da coluna. Em cada

série foram ensaiados três perfis com as mesmas características. A identificação dos mesmos foi baseada na dimensão de comprimento, existência ou não de perfurações e magnitude dos furos, assim denominadas:

- CC-SF, colunas curtas sem perfurações;
- CC-F60, colunas curtas com perfurações em que o comprimento do furo é igual a 60%da largura da alma;
- CC-F80, colunas curtas com perfurações em que o comprimento do furo é igual a 80%da largura da alma;
- CM-SF, colunas médias sem perfurações;
- CM-F60, colunas médias com perfurações em que o comprimento do furo é igual a 60%da largura da alma;
- CM-F80, colunas médias com perfurações em que o comprimento do furo é igual a 80%da largura da alma.

O levantamento das imperfeições geométricas apontou pequenas variações nas medidas da seção transversal que, no entanto, não comprometeram a viabilidade de sua utilização. Na região das perfurações, houve precisão satisfatória nas medidas geométricas em virtude do processo em que são inseridas (equipamento a laser). O levantamento foi importante para simular as irregularidades na modelagem numérica.

A instrumentação do ensaio foi definida buscando identificar a ocorrência dos modos de flambagem local e distorcional com o auxílio de transdutores de deslocamentos que foram posicionados ao longo do comprimento do perfil, de modo a abranger a área com maior amplitude de deslocamento prevista na análise de estabilidade.

Os protótipos foram alinhados e centralizados na prensa (INSTRON SATEC 5569) através de chapas de apoio desenvolvidas neste estudo para materializar a condição de engastamento exigida. A aplicação da carga com controle de deslocamento (0,1mm/min) atendeu os objetivos do ensaio, mostrando-se adequada e segura. Os resultados experimentais foram monitorados pelo sistema de aquisição de dados através dos softwares Partner, Spider8 e Catman 4.5.

Os resultados experimentais indicaram que a existência dos furos acarreta em redução da carga última das colunas, uma vez que a área líquida das colunas perfuradas é menor que a área bruta. Essa informação foi comprovada pela série CC-SFS quando comparada com a CC-F60. Ambas possuem o mesmo comprimento (564mm) e apresentaram redução na carga última em função da presença de furos

no segundo modelo. Em relação aos ensaios das colunas médias, a diferença dos resultados com o aumento da capacidade resistente da coluna CM-F80 em relação a CM-F60 é associada ao comprimento dos protótipos, o que também ocorre quando se compara as colunas CC-F60 e CM-F60.

Observou-se que, para as colunas com furos, o modo local concentra-se na região entre os furos. Porém, esse último não influenciou na capacidade resistente da mesma, predominando em todos os casos, o modo distorcional. Este novo modo de instabilidade difere da flambagem local e foi abordado neste trabalho como modo localizado de placa, sendo analisado de forma específica. Inicialmente, foi estudada a estabilidade de uma chapa plana, com e sem perfurações, a fim de observar a influência destas no modo local e, em seguida, tem-se a análise do perfil rack considerando as mesmas premissas da placa. Para os modelos, cujo comprimento médio dos furos é superior a 50% da largura da alma, o modo local se inicia na região destes ocorrendo uma acentuada redução da carga crítica em relação as perfurações menores. Os dados desta análise, quando comparados aos resultados experimentais, representam o modo de instabilidade localizado para os modelos perfurados.

Tendo-se identificado o modo de flambagem real nos ensaios, o modelo numérico foi então calibrado com a indução deste na análise não linear. Ressalta-se que em diversos modelos foi necessária a combinação entre os modos observados. Foi estabelecido um coeficiente para simular as imperfeições levantadas no valor da metade da espessura (0,7mm) em função de observações visuais realizadas durante os ensaios. A carga última e os modos de colapso numéricos foram obtidos e comparados com os resultados experimentais.

De modo geral, a uniformidade nos resultados foi verificada, mesmo com variação em algum valor dentro da série ocasionada por fatores de experimento. A análise não linear realizada apresentou boa correlação com os resultados experimentais, indicando a sua viabilidade na avaliação do comportamento pós-crítico dos protótipos.

Para a continuidade deste estudo, sugere-se:

- Aplicação dos métodos apresentados neste trabalho na avaliação de colunas com dimensões e arranjos de perfurações utilizadas comercialmente;
- Aprofundamento do estudo relativo à ocorrência do modo localizado de placa;
- Avaliação da influência de enrijecedores de alma no comportamento dos perfis com perfurações nesta região.

REFERÊNCIAS

Águia. Disponível em <<http://www.aguiasistemas.com.br/aguiasistemas/>>, (2013).

ANSYS. **User's Manual for revision 14**. Swanson Analysis Systems Inc. Inc., Houston, PA, (2011).

Batista, E. M. **Local–global buckling interaction procedures for the design of cold-formed columns: Effective width and direct method integrated approach**. Thin-Walled Structures 47, p.1218–1231, (2009).

Bebiano R., Pina P.; Silvestre N. and Camotim D. **GBTUL – Buckling and Vibration Analysis of Thin-Walled Members**, DECivil/IST, Technical University of Lisbon (<http://www.civil.ist.utl.pt/gbt>), (2008).

Camotim, D.; Silvestre, N.; Dinis, P. B. **FEM-based analysis of the local-plate/distortional mode interaction in cold-formed steel lipped channel columns**. Computers & Structures 85, p.1461-1474, (2007).

Casafont, M.; Marimon, F.; Pastor, M.M. **Calculation of pure distortional elastic buckling loads of members subject to compression via finite element method**. Thin-Walled Structures 47, 701-729, (2009).

Casafont, M.; Roure, F.; Pastor, M. M.; Somalo, M. R. **Stub column tests for racking design: Experimental testing, FE analysis and EC3**. Thin - Walled Structures 49, 167-184, (2011).

ESAB. **Manual do usuário e peças de reposição**. Revisão 1, (2009).

Faria, V. O.; Sarmanho, A. M.; Souza, F. T. **Análise do modo local de flambagem em elementos com perfurações**. XXXV Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering - CILAMCE, (2014).

Freitas, A. M. S.; Freitas, M. S. R.; Souza, F. T. **Analysis and behavior of steel storage drive-in racks**. Thin-Walled Structures, v. 48, p. 110-117, (2010).

Freitas, A. M. S.; Freitas, M. S. R.; Souza, F. T.; Silva, G. G.; Faria, V. O. **Theoretical and experimental analysis of perforated rack columns**. REM. Revista Escola de Minas (Impresso), v.66, p.289 - 294, (2013).

Freitas, A. M. S.; Souza, F. T.; Faria, V. O.; Miranda, S. A. **Análise de elementos estruturais em perfis formados a frio com perfurações - Sistemas "Racks"**. CBCA. Revista da Estrutura de Aço, (2014).

Godley, M.H. R. **Storage Racking In Design of Cold Formed Steel Members**, Chapter 11, Ed Rhodes . Elsevier Applied Science, Amsterdam. p.361-399, (1991).

Hottinger Baldwin Messtechnik. **Manual de operação Spider8 e Spider8-30**. (2003a).

Hottinger Baldwin Messtechnik. **Catman 4.5 Operating Manual**. (2003b).

Instron. **Partner Operating Help**. Version 8.4a, (2008).

Lecce, M., Rasmussen, K. J. R. **Distortional buckling of cold-formed stainless steel sections: experimental investigation**. Journal of Structural Engineering. 132 p.497-504, (2006a).

Lecce, M., Rasmussen, K. J. R. **Distortional buckling of cold-formed stainless steel sections: finite element modelling and design**. Journal of Structural Engineering. 132, p.505-514, (2006b).

Melo, F. **Pensador**. Disponível em <<http://pensador.uol.com.br/frase/NTMwNDIx/>>, (2016).

NBR 14762:2010 – **Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio**, (2010).

NBR ISO 6892 – **Materiais metálicos: Ensaio de tração à temperatura ambiente**, (2002).

Salmon e Johnson. **STEEL STRUCTURES: Design and Behavior. Emphasizing Load and Resistance Factor Design**, Third Edition, p.45-46, (1990).

Sarmanho, A. M. C. **Estudo do Comportamento Pós-Crítico de Paredes Esbeltas de Perfis Metálicos**. Dissertação de Mestrado. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, (1991).

Schaffer, B. **Local, distortional and Euler buckling of thin-Walled columns**. Journal of Structural Engineering 128, p.289-299, (2002).

Schaffer, B., Yu, C. **Distortional buckling tests on cold-formed steel beams**. Journal of Structural Engineering 132 p.515-528, (2006).

Silva, G. G. **Análise Teórico-Experimental de Colunas Perfuradas**. Dissertação de Mestrado, PROPEC - UFOP, (2011).

Souza, D. A.; Freitas, M. S. R.; Freitas, A. M. S. **Estabilidade de colunas com seções enrijecidas em perfis de aço formados a frio**. REM. Revista Escola de Minas (Impresso), v.59, p.199 - 205, (2006).

Souza, F. T. **Análise Teórico-Experimental da Estabilidade de Colunas Perfuradas em Perfis de Aço Formados a Frio em Seções Tipo Rack**. Tese de Doutorado, PROPEC - UFOP, (2013).

Vazquez, E. G. **Análise teórica e experimental da instabilidade torcional de perfis formados a frio sob compressão centrada**. Tese de doutorado. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, (2002).

Winter G. Strength of thin-walled compression flanges. Trans ASME, (1947).

Yu, W. W. **Cold-Formed Steel Design**, Wiley, New York, (2000).

APÊNDICE

APÊNDICE – Comparação de resultados dos protótipos

A.1 Série CC-SFS

A.1.1 Protótipo CC-SFS-CP1

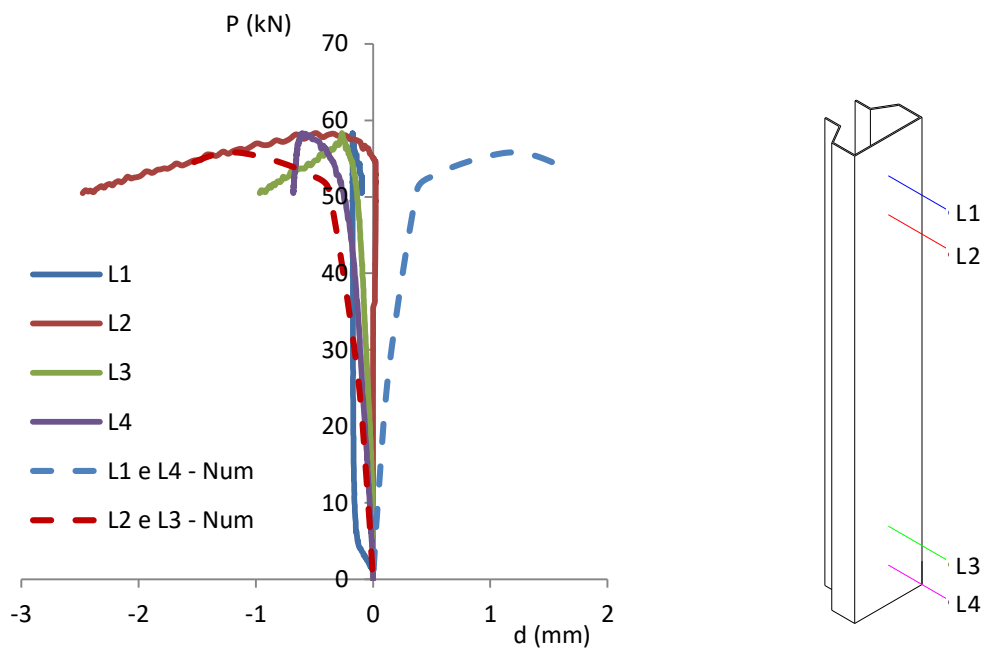


Figura A.1 - Deslocamentos na alma do protótipo CC-SFS-CP1

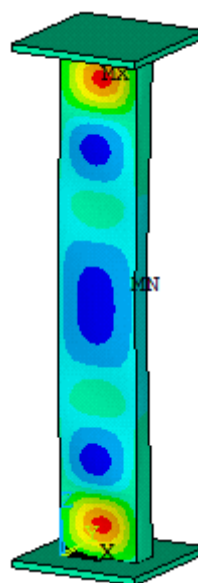


Figura A.2 - Comparação experimental e numérica do protótipo CC-SFS-CP1 (alma)

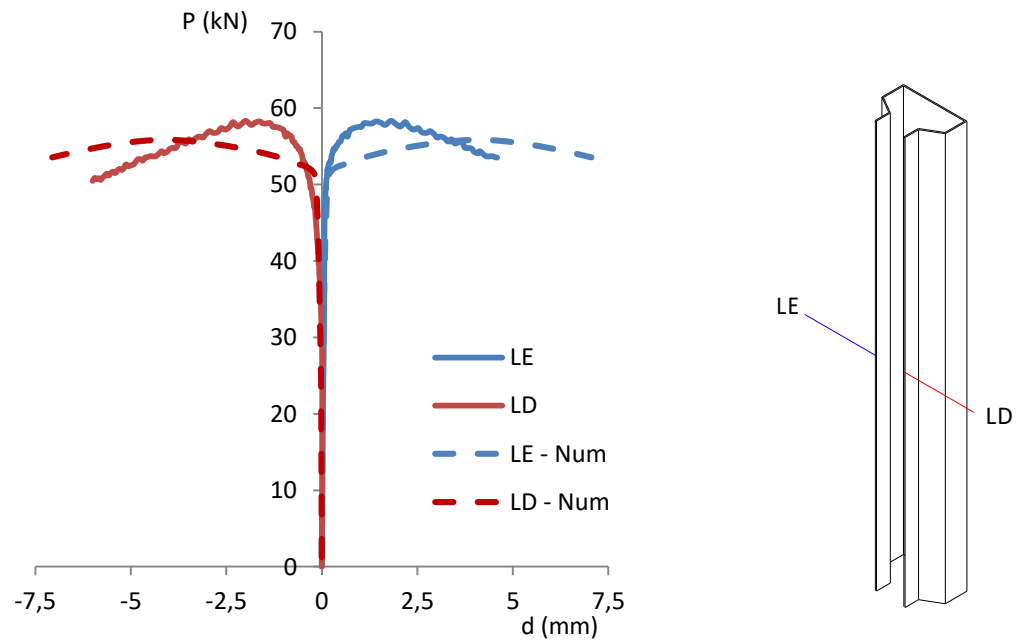


Figura A.3 - Deslocamentos nos flanges do protótipo CC-SFS-CP1

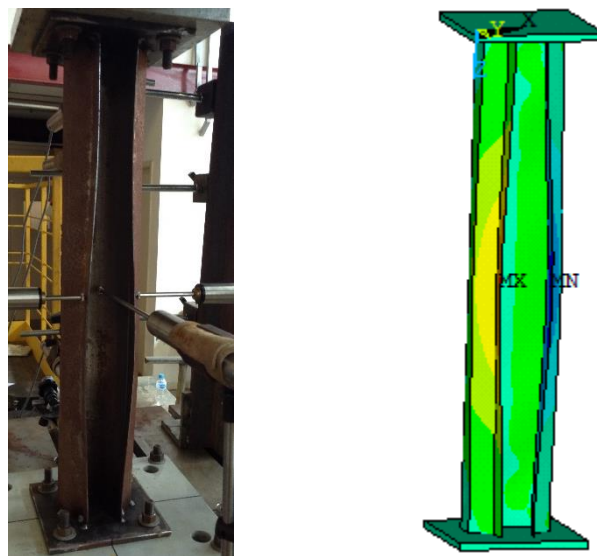


Figura A.4 - Comparação experimental e numérica do protótipo CC-SFS-CP1 (flanges)

A.1.2 Protótipo CC-SFS-CP3

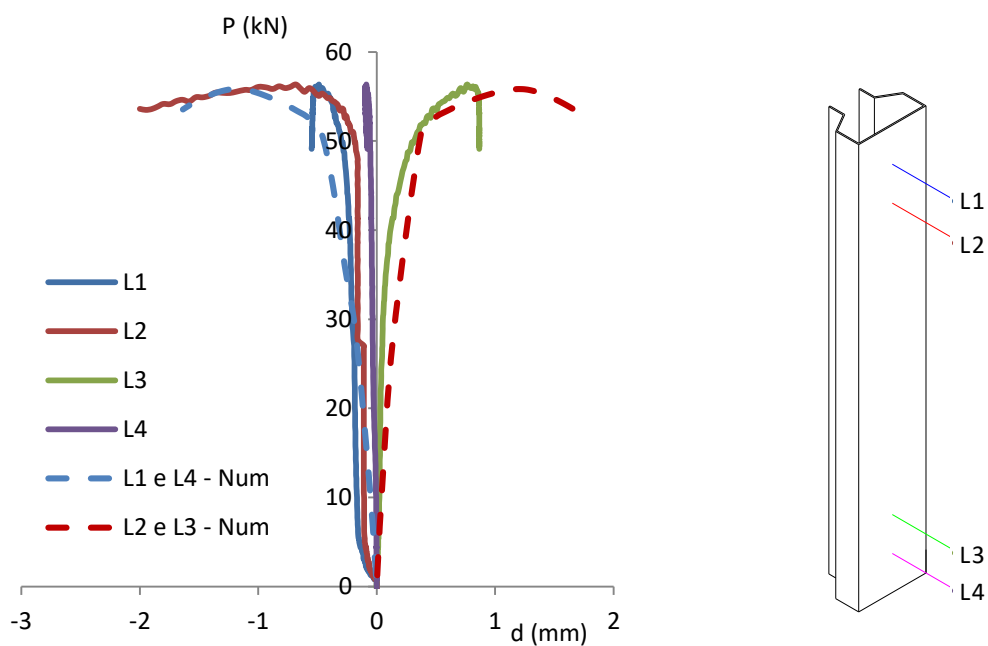


Figura A.5 - Deslocamentos na alma do protótipo CC-SFS-CP3

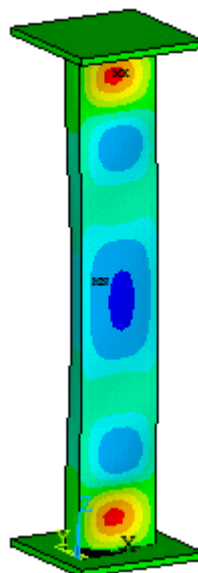


Figura A.6 - Comparação experimental e numérica do protótipo CC-SFS-CP3 (alma)

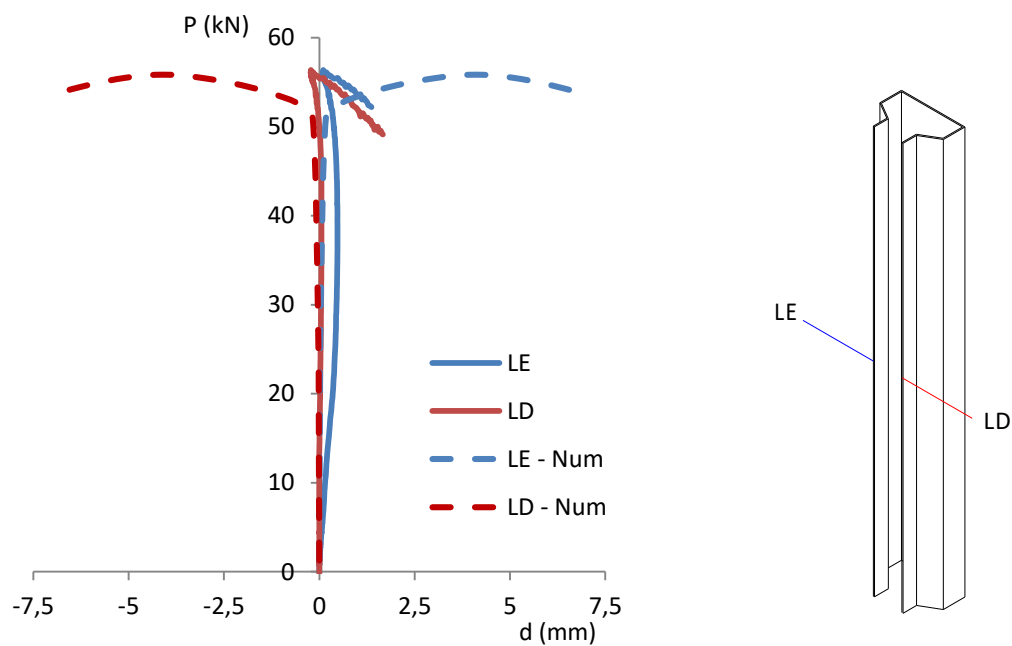


Figura A.7 - Deslocamentos nos flanges do protótipo CC-SFS-CP3

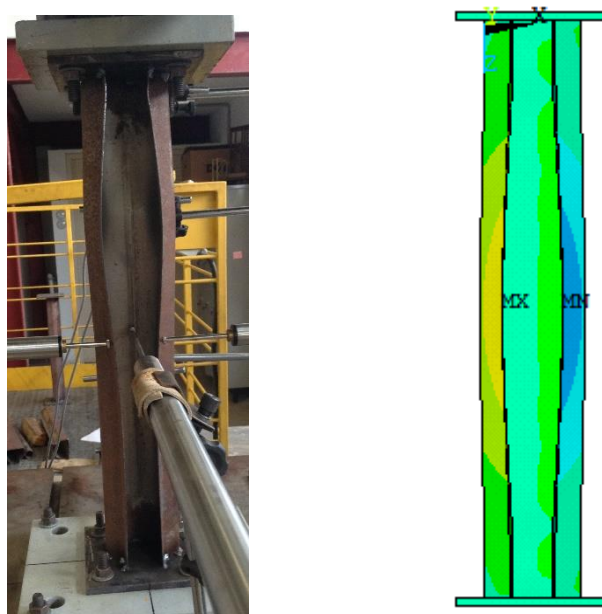


Figura A.8 - Comparação experimental e numérica do protótipo CC-SFS-CP3 (flanges)

A.2 Série CC-F60

A.2.1 Protótipo CC-F60-CP1

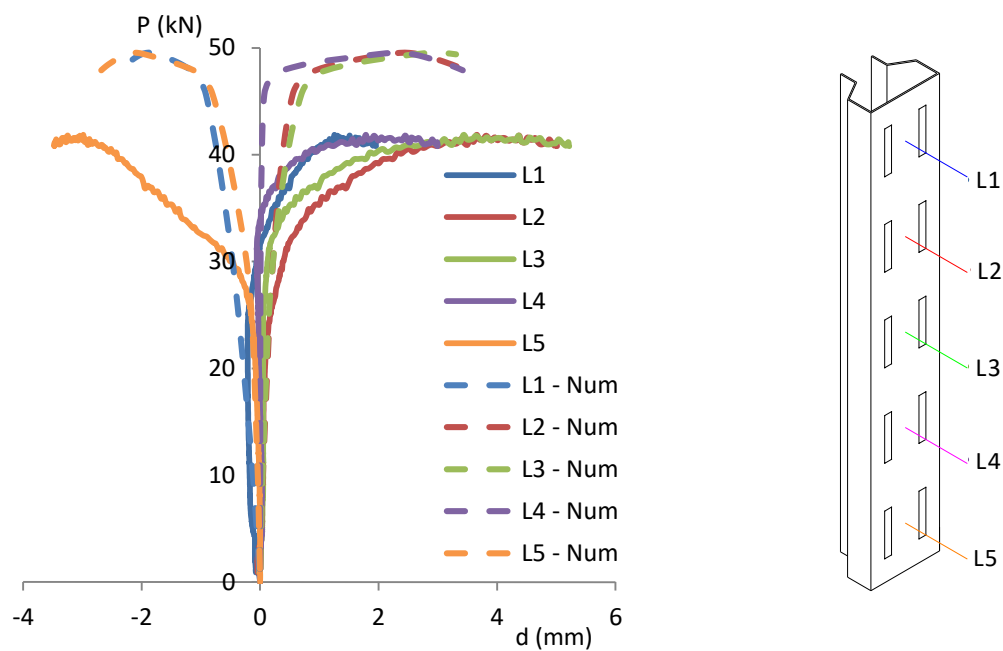


Figura A.9 - Deslocamentos na alma do protótipo CC-F60-CP1

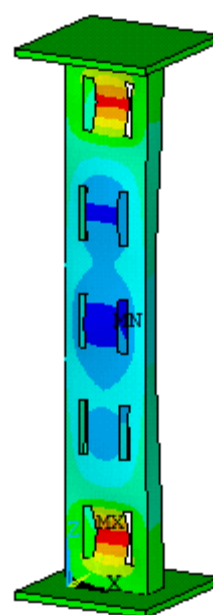


Figura A.10 - Comparação experimental e numérica do protótipo CF-F60-CP1 (alma)

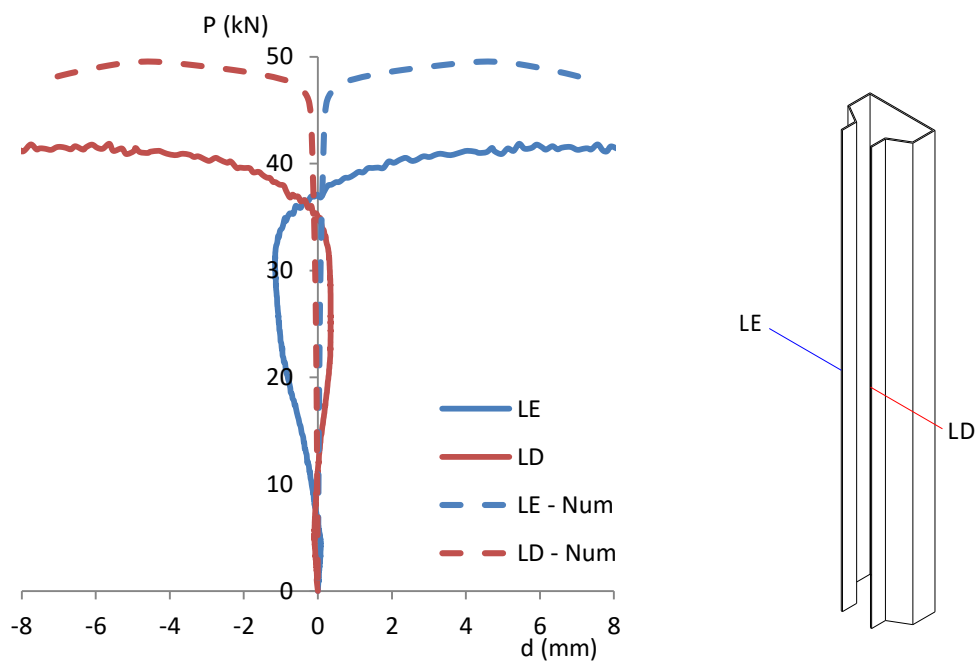


Figura A.11 - Deslocamentos nos flanges do protótipo CC-F60-CP1

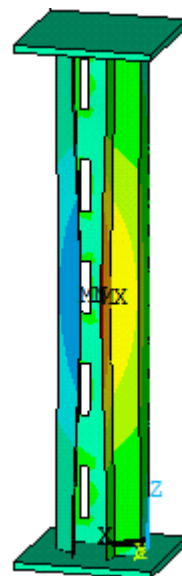


Figura A.12 - Comparação experimental e numérica do protótipo CF-F60-CP1 (flanges)

A.2.2 Protótipo CC-F60-CP3

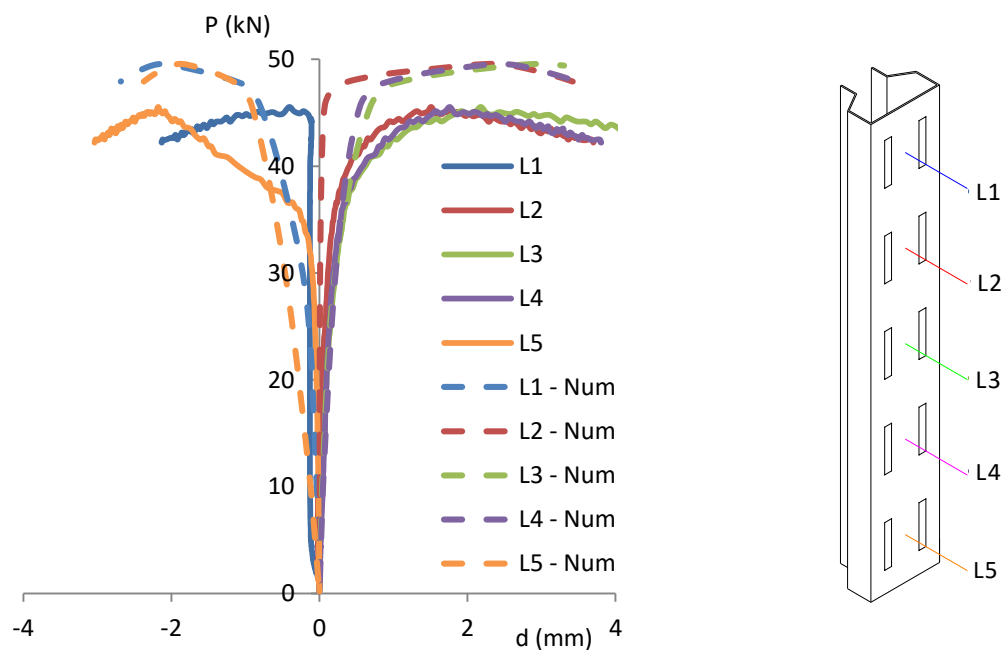


Figura A.13 - Deslocamentos na alma do protótipo CC-F60-CP3

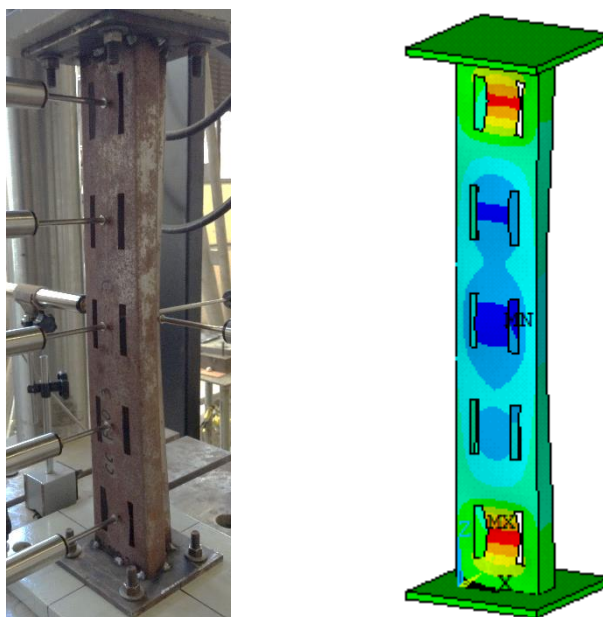


Figura A.14 - Comparação experimental e numérica do protótipo CC-F60-CP3 (alma)

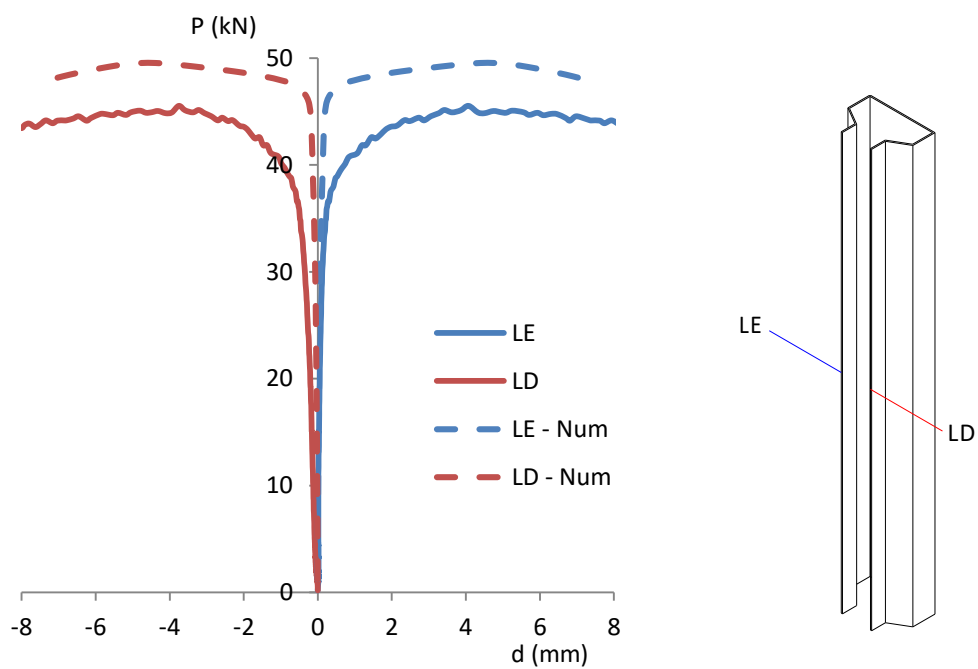


Figura A.15 - Deslocamentos nos flanges do protótipo CC-F60-CP3

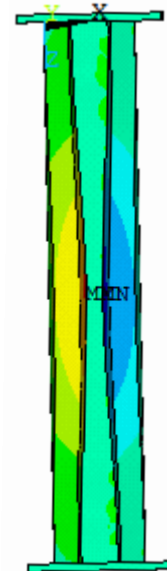


Figura A.16 - Comparação experimental e numérica do protótipo CC-F60-CP3 (flanges)

A.3 Série CC-F80

A.3.1 Protótipo CC-F80-CP1

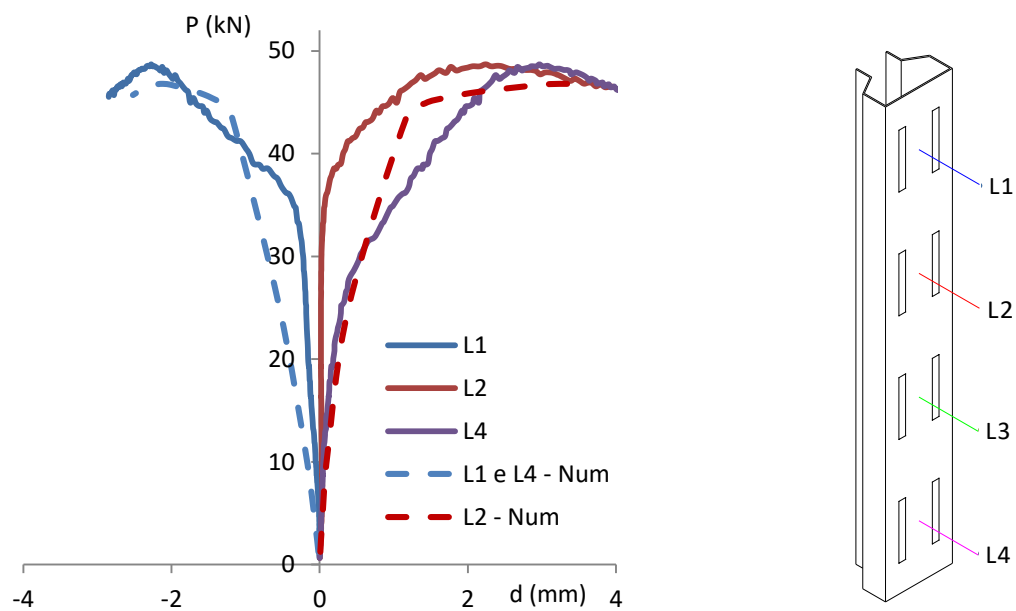


Figura A.17 - Deslocamentos na alma do protótipo CC-F80-CP1

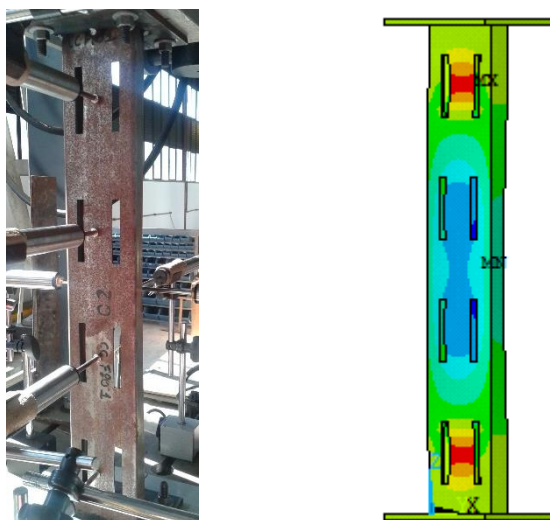


Figura A.18 - Comparação experimental e numérica do protótipo CC-F80-CP1 (alma)

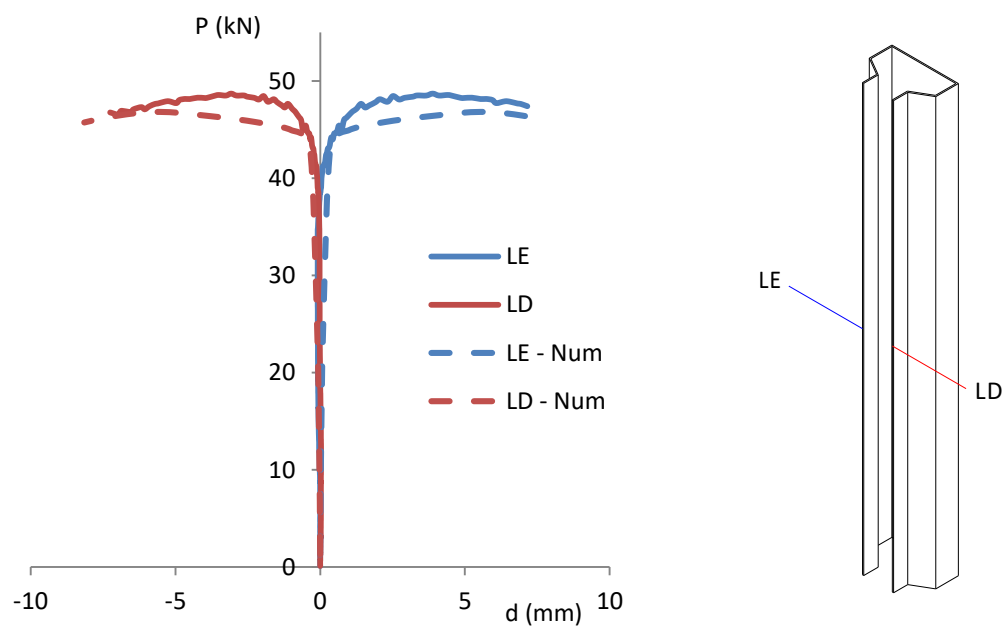


Figura A.19 - Deslocamentos nos flanges do protótipo CC-F80-CP1

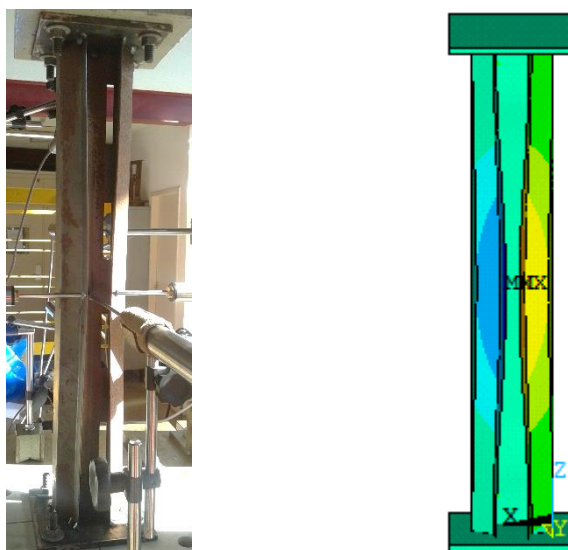


Figura A.20 - Comparação experimental e numérica do protótipo CC-F80-CP1 (flanges)

A.3.2 Protótipo CC-F80-CP3

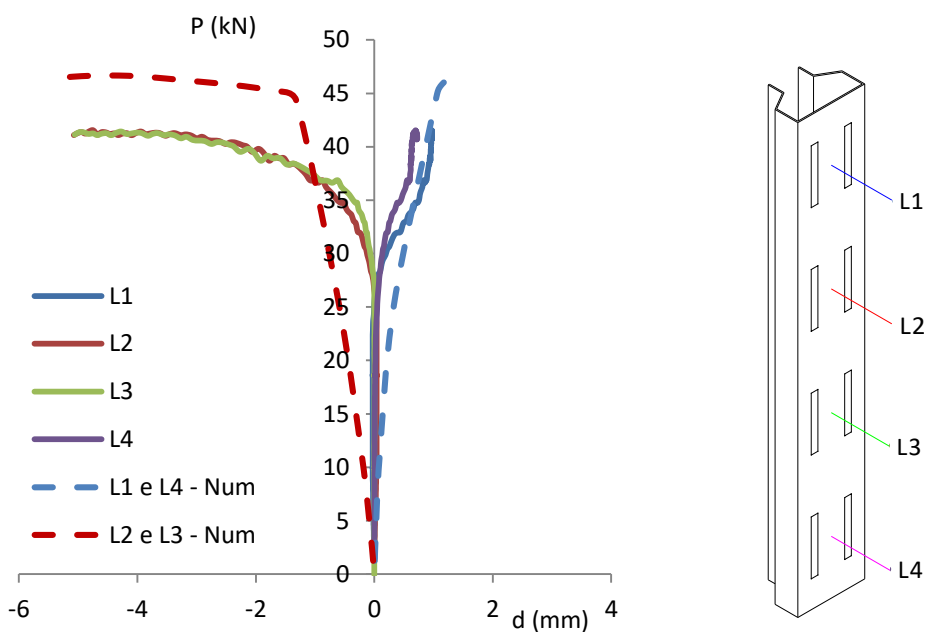


Figura A.21 - Deslocamentos na alma do protótipo CC-F80-CP3

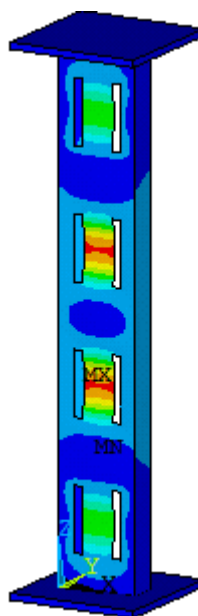


Figura A.22 - Comparação experimental e numérica do protótipo CC-F80-CP3 (alma)

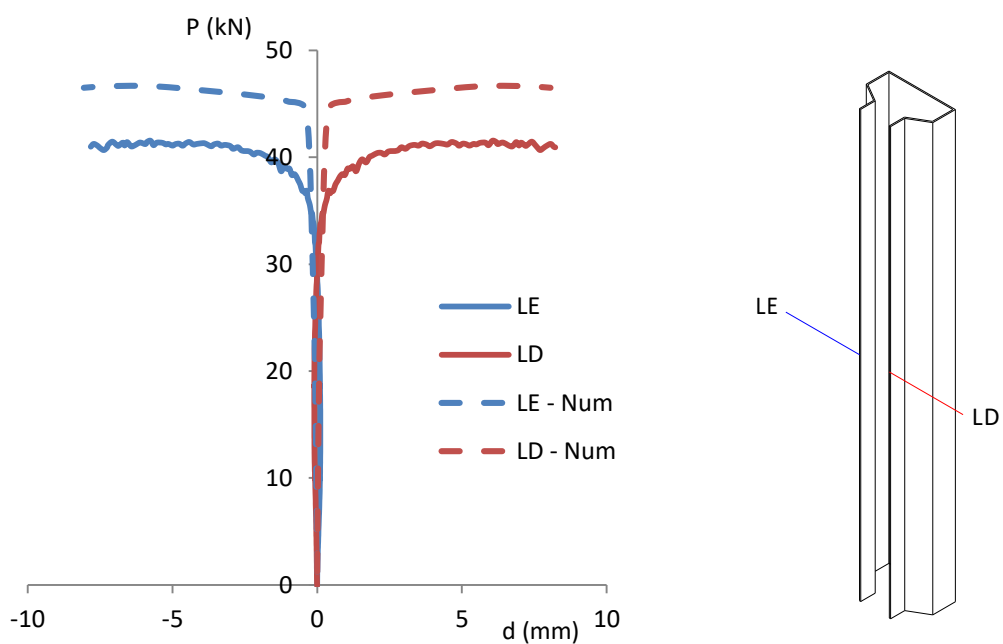


Figura A.23 - Deslocamentos nos flanges do protótipo CC-F80-CP3

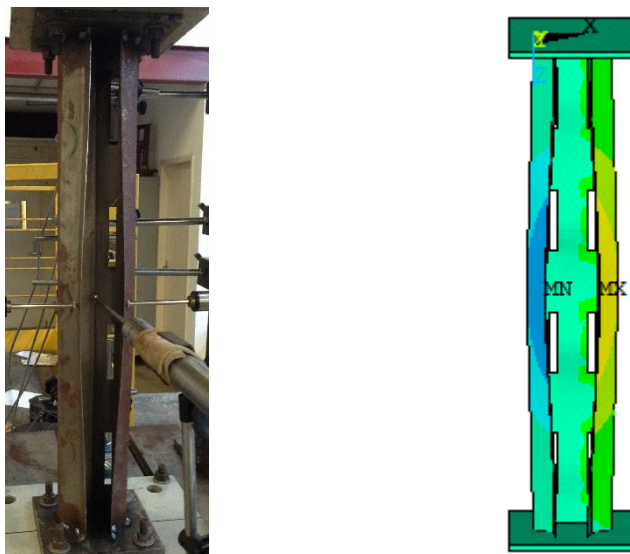
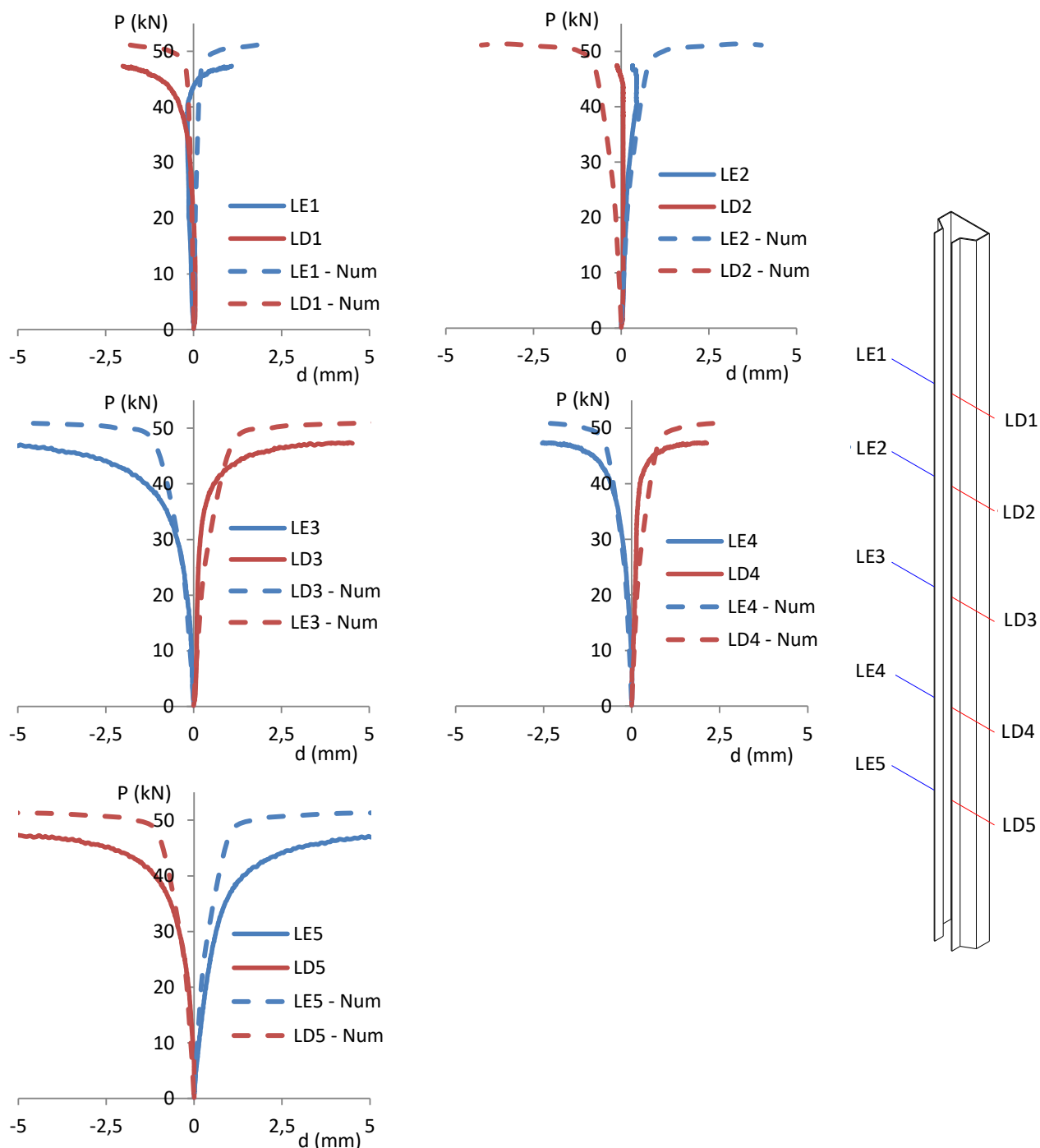


Figura A.24 - Comparação experimental e numérica do protótipo CC-F80-CP3 (flanges)

A.4 Série CM-SFS

A.4.1 Protótipo CM-SFS-CP3



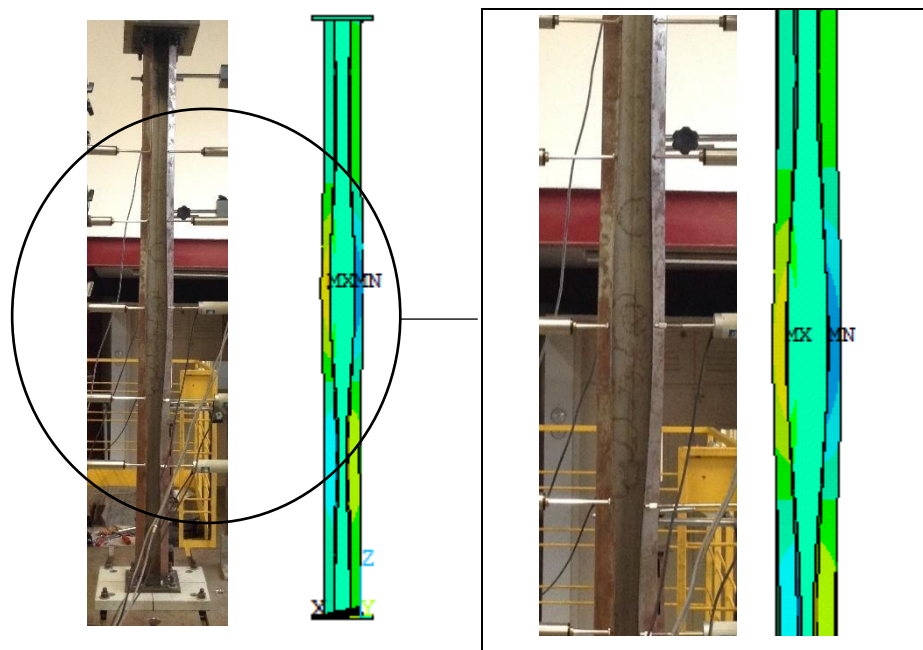


Figura A.26 - Comparação experimental e numérica do protótipo CM-SFS-CP3 (flanges)

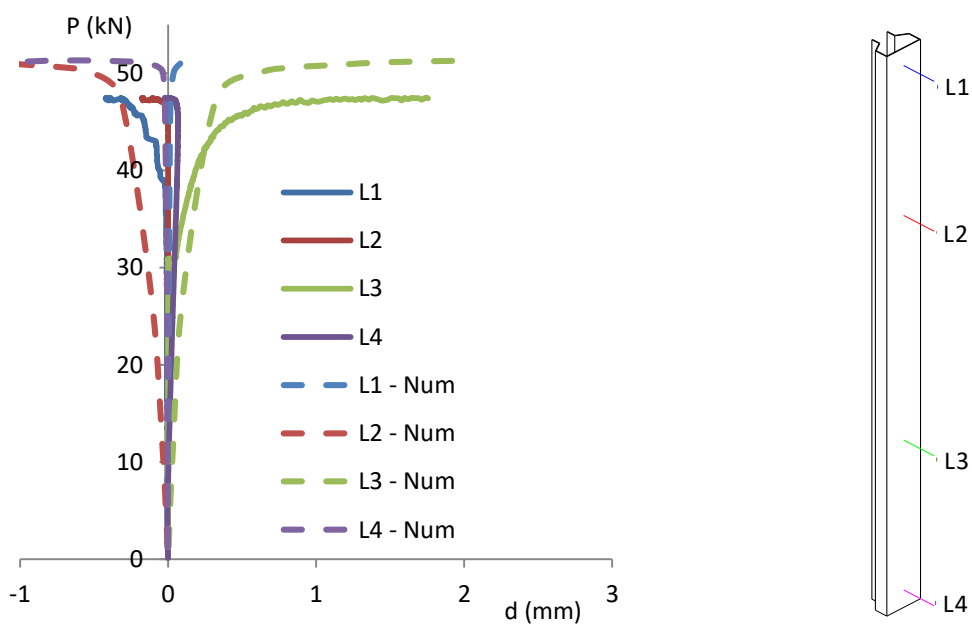


Figura A.27- Deslocamentos na alma do protótipo CM-SFS-CP3

A.5 Série CM-F60

A.5.1 Protótipo CM-F60-CP1

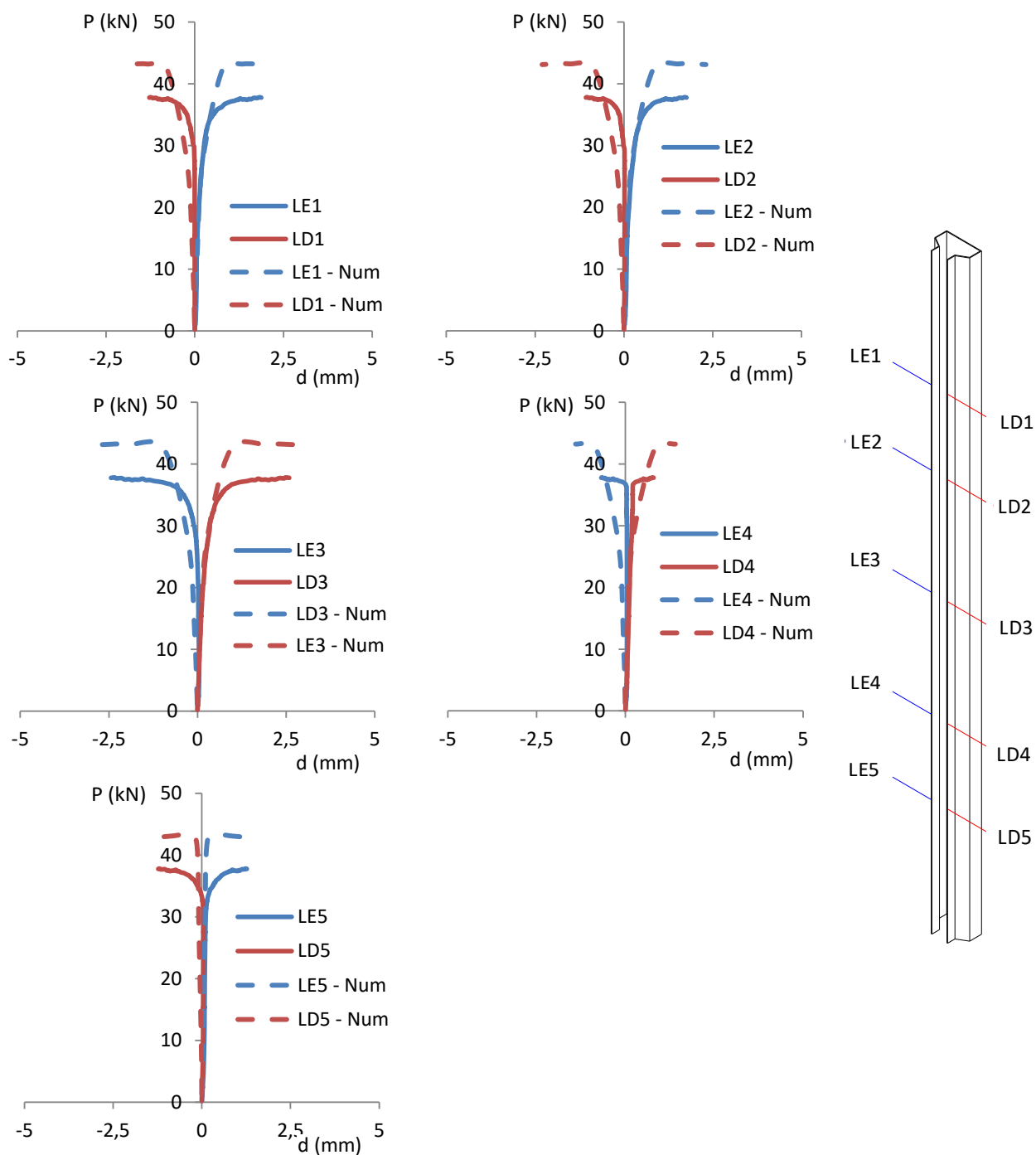


Figura A.28 - Deslocamentos nos flanges do protótipo CM-F60-CP1

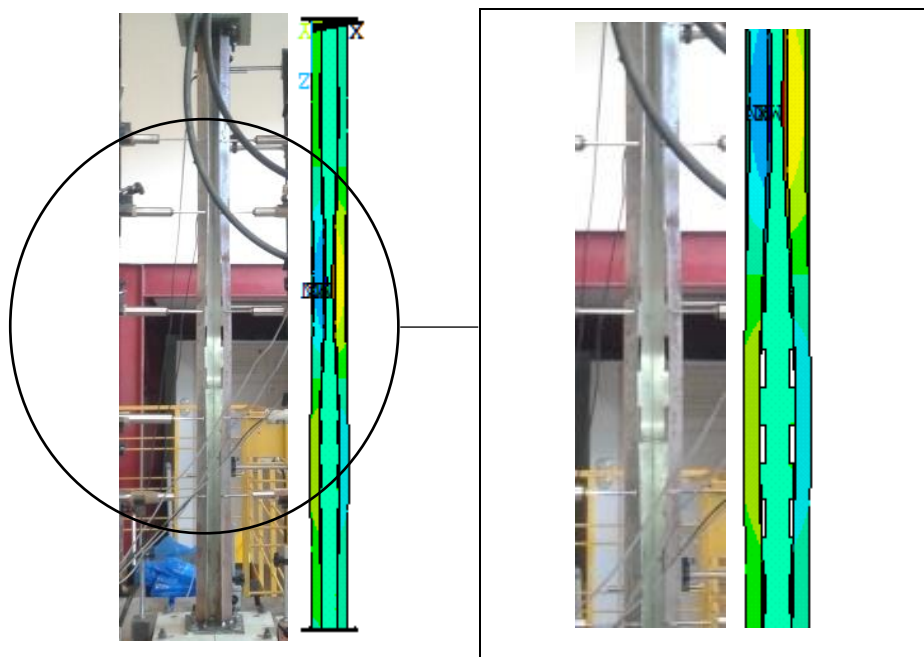


Figura A.29 - Comparação experimental e numérica do protótipo CM-F60-CP1 (flanges)

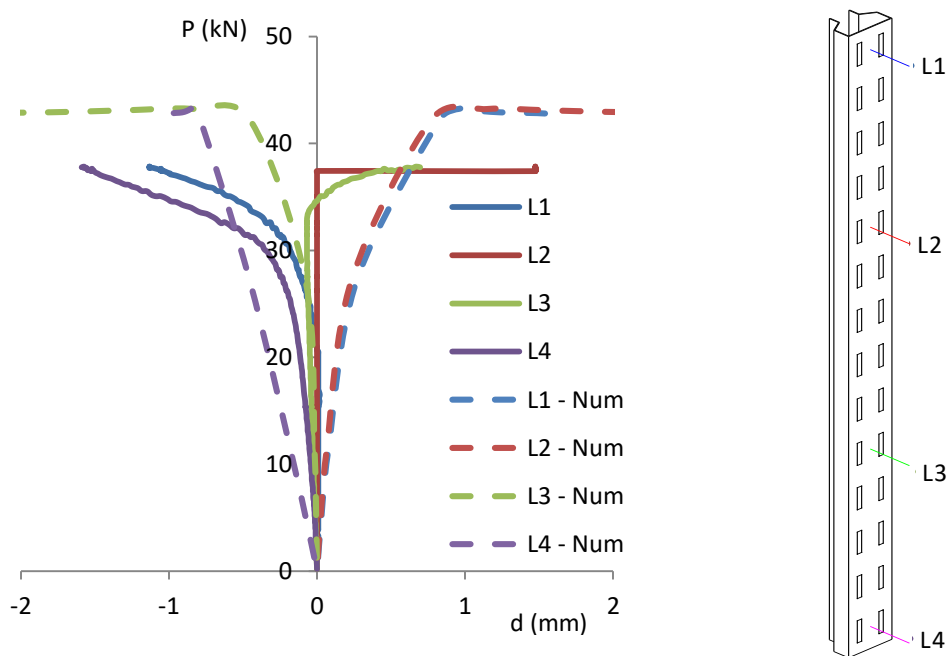


Figura A.30 - Amplitudes na alma do protótipo CM-F60-CP1 (mm)

A.5.2 Protótipo CM-F60-CP3

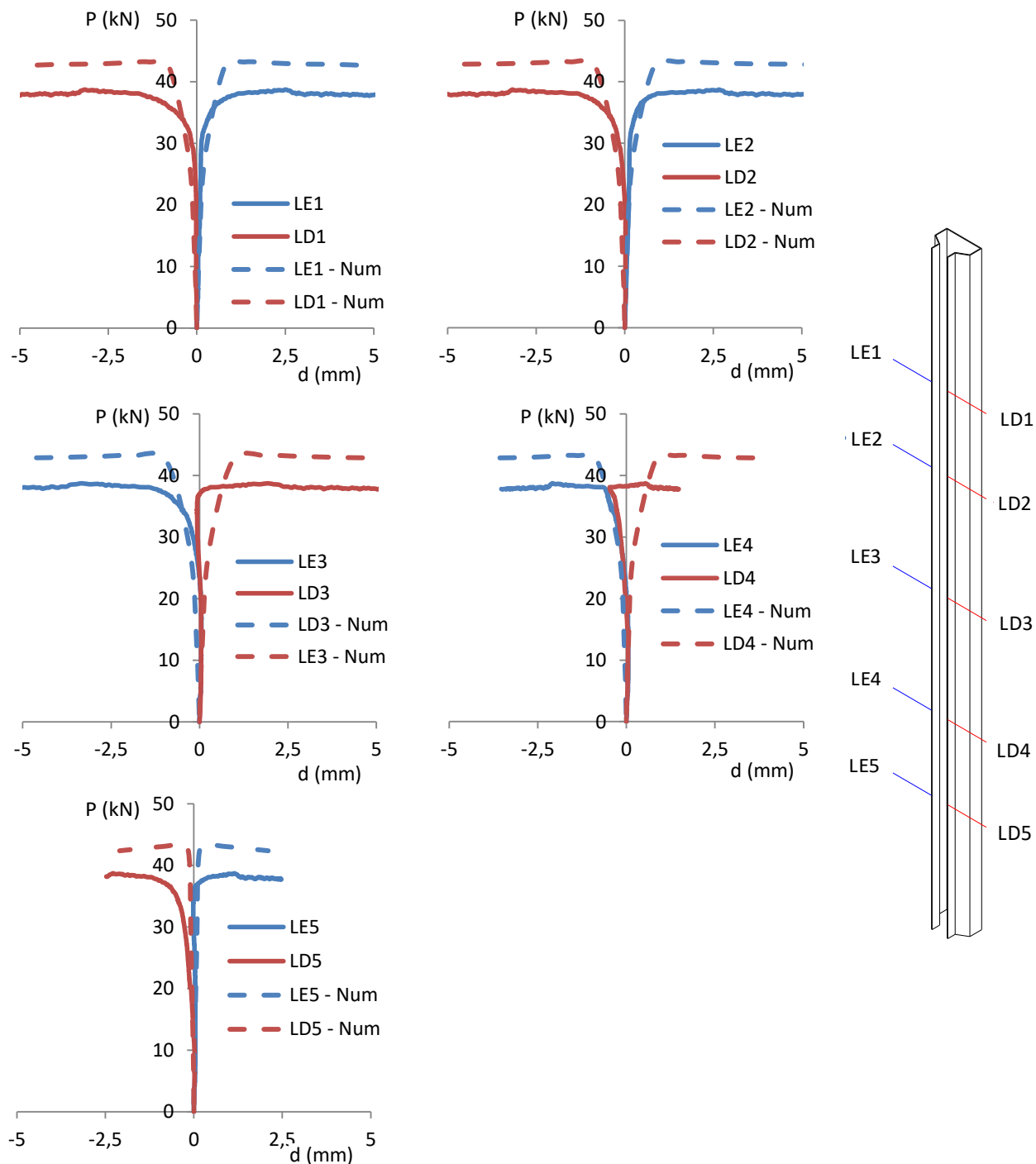


Figura A.31 - Deslocamentos nos flanges do protótipo CM-F60-CP3

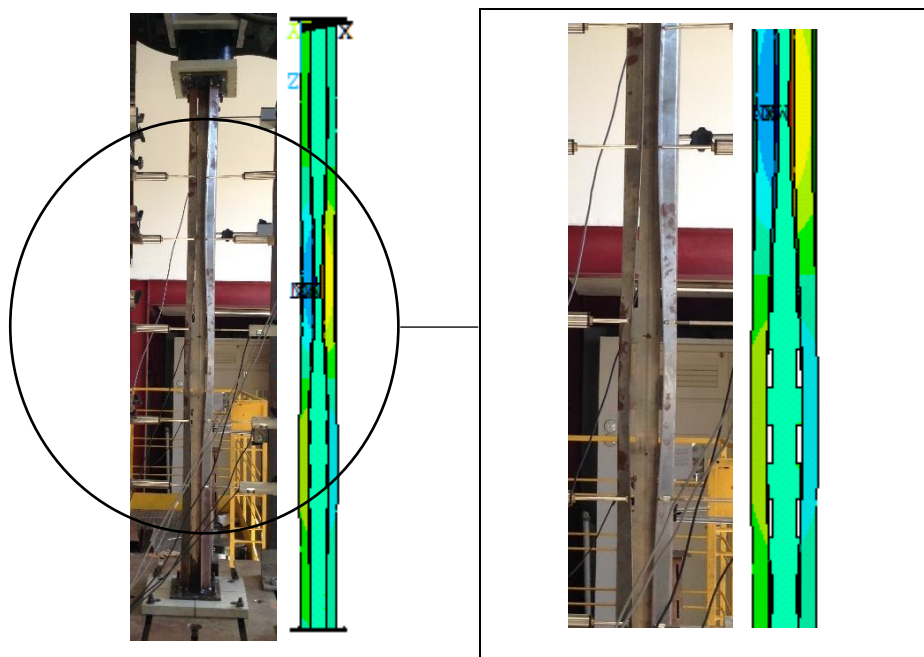


Figura A.32 - Comparação experimental e numérica do protótipo CM-F60-CP3 (flanges)

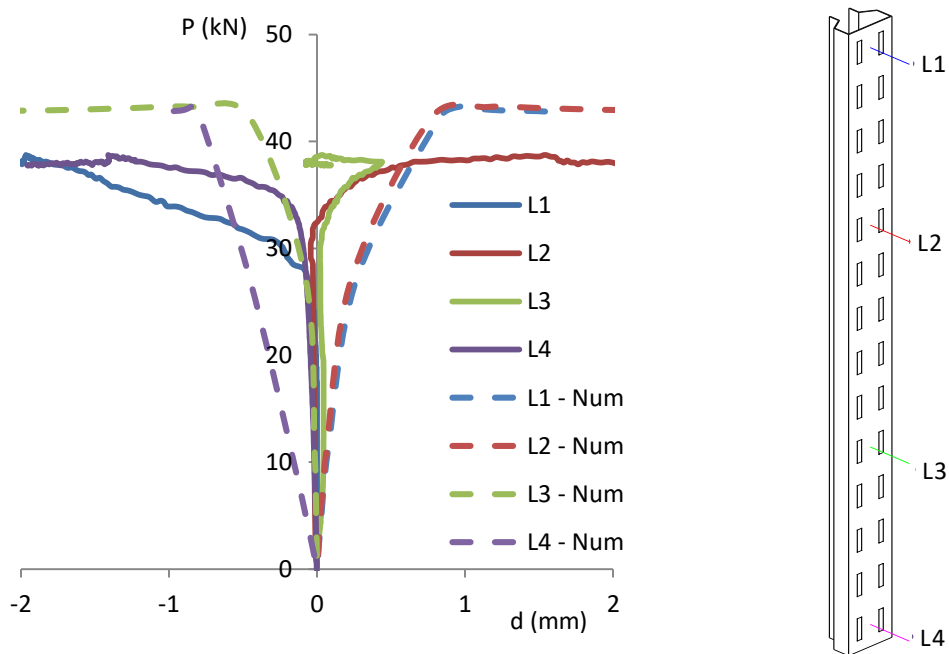


Figura A.33 - Amplitudes na alma do protótipo CM-F60-CP3 (mm)

A.6 Série CM-F80

A.6.1 Protótipo CM-F80-CP2

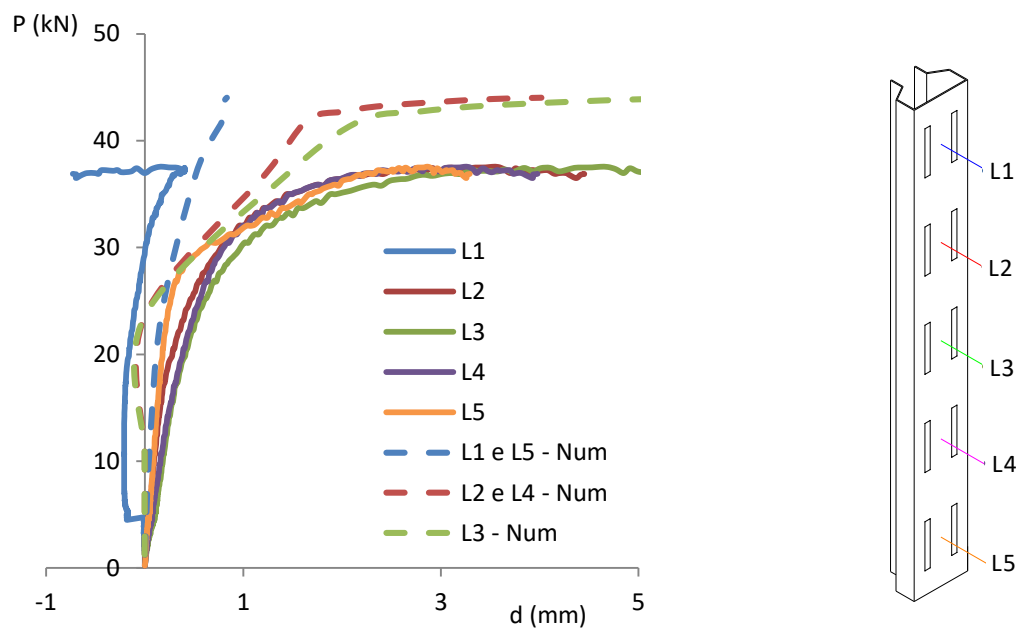


Figura A.34 - Amplitudes na alma do protótipo CM-F80-CP2

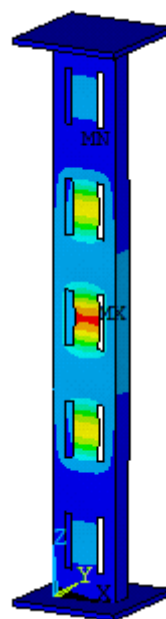


Figura A.35 - Comparação experimental e numérica do protótipo CM-F80-CP2 (alma)

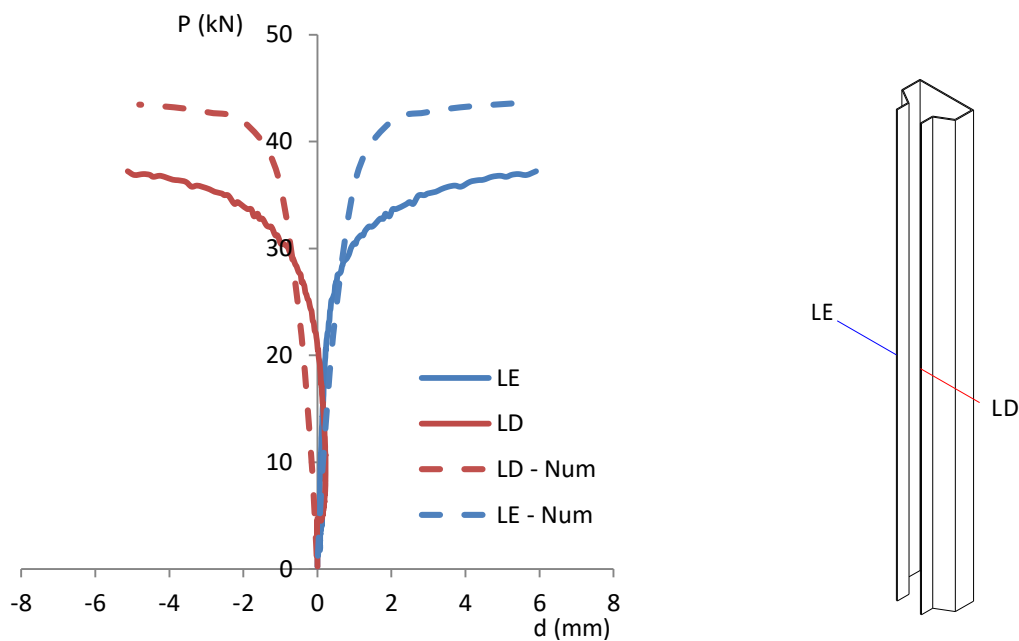


Figura A.36 - Deslocamentos nos flanges do protótipo CM-F80-CP2

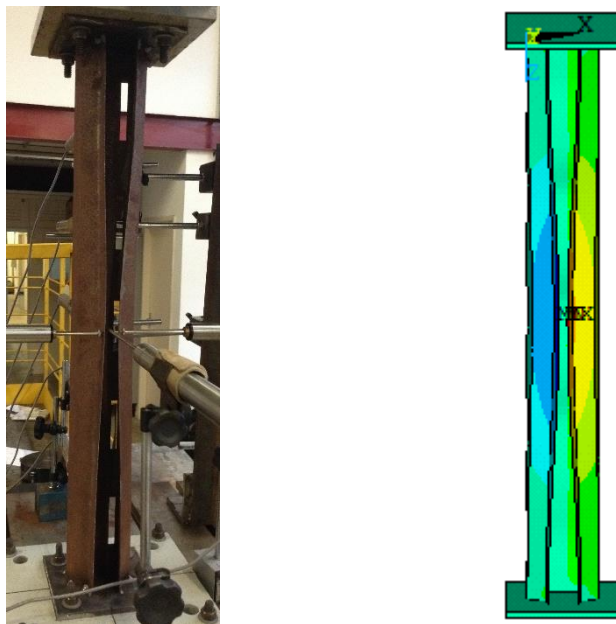


Figura A.37 - Comparação experimental e numérica do protótipo CM-F80-CP2 (flanges)

A.6.2 Protótipo CM-F80-CP3

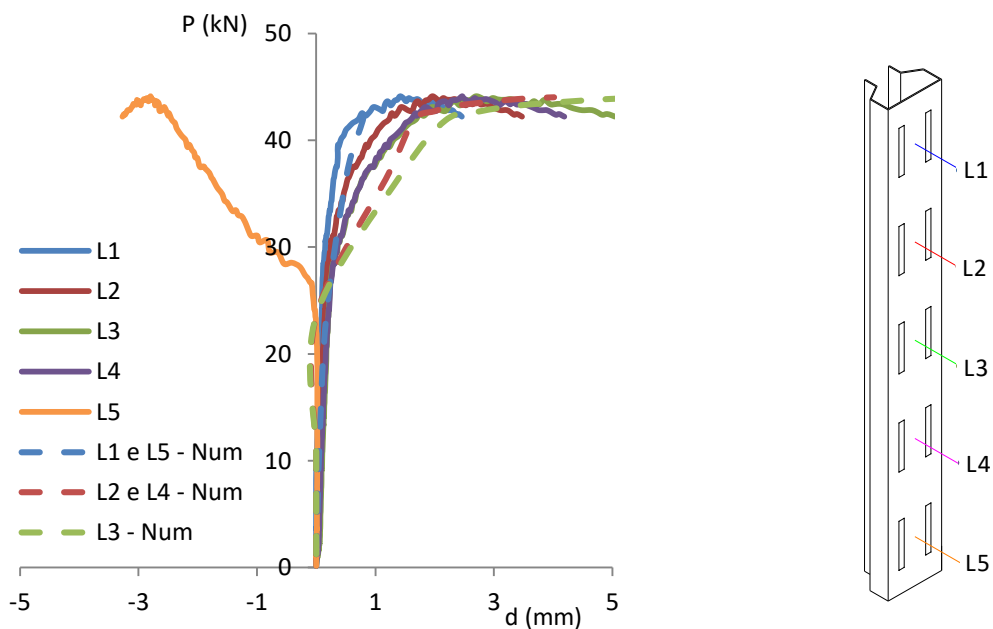


Figura A.38 - Amplitudes na alma do protótipo CM-F80-CP3

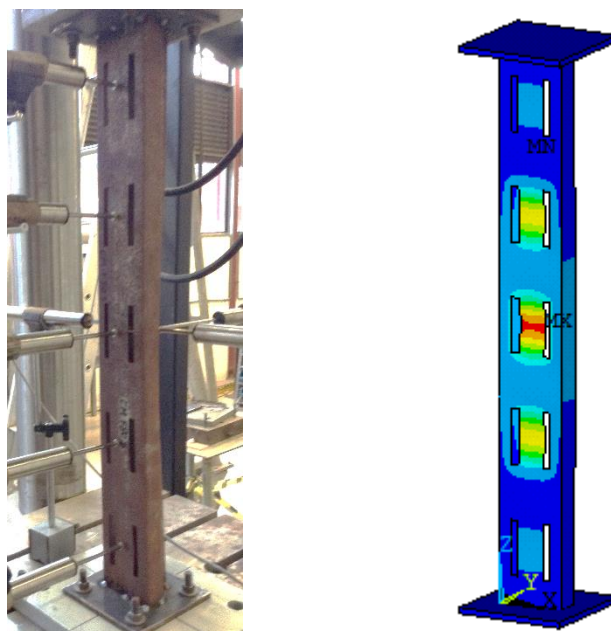


Figura A.39 - Comparação experimental e numérica do protótipo CM-F80-CP3 (alma)

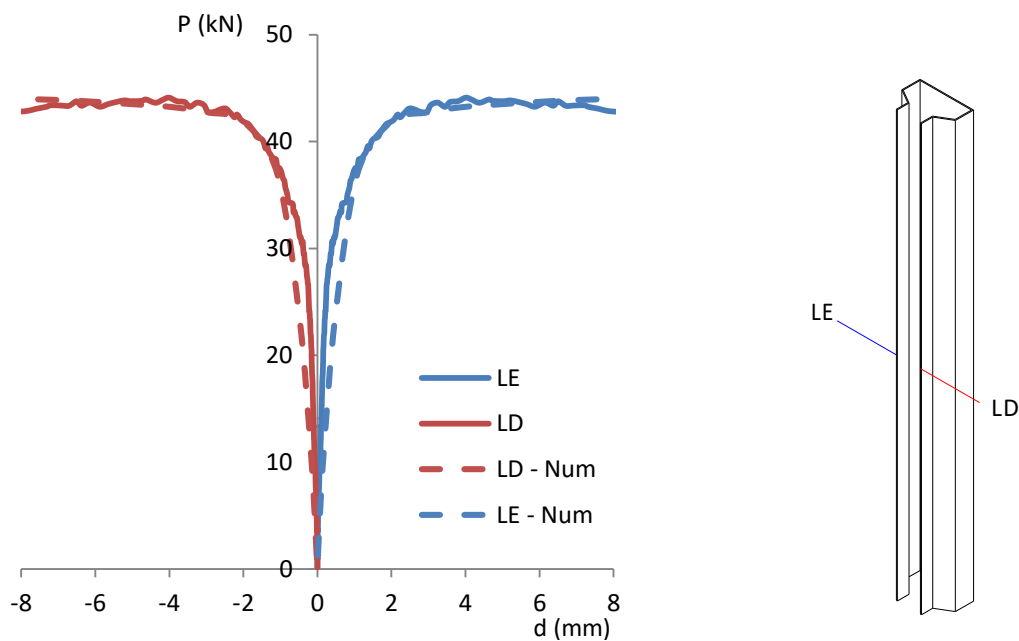


Figura A.40 - Deslocamentos nos flanges do protótipo CM-F80-CP3



Figura A.41 - Comparação experimental e numérica do protótipo CM-F80-CP3 (flanges)