

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

**ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DA  
ESTABILIDADE DE COLUNAS PERFURADAS EM  
PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO DE SEÇÕES TIPO  
RACK**

**FLÁVIO TEIXEIRA DE SOUZA**

ORIENTADORES: Profa. Dra. Arlene Maria Sarmanho Freitas  
Prof. Dr. Marcílio Sousa da Rocha Freitas

Tese 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 Doutor em Engenharia Civil, área de concentração: Construção Metálica.

Ouro Preto, março de 2013.

S729a

Souza, Flávio Teixeira de.

Análise teórico-experimental da estabilidade de colunas perfuradas em perfis de aço formados a frio de seções tipo rack [manuscrito] / Flávio Teixeira de Souza. - 2013.

xiii, 194f.: il. color.; grafs.; tabs.

Orientadora: Profª Drª Arlene Maria Sarmanho Freitas.

Coorientador: Prof. Dr. Marcílio Sousa da Rocha Freitas.

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

Área de concentração: Construção Metálica.

1. Estruturas metálicas - Teses. 2. Método dos elementos finitos - Teses. 3. Flambagem (Mecânica) - Teses. 4. Estabilidade estrutural - Modos de instabilidade - Modo local - Teses. 5. Estabilidade estrutural - Modos de instabilidade - Modo distorcional - Teses. I. Freitas, Arlene Maria Sarmanho. II. Freitas, Marcílio Sousa da Rocha. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 624.014.2:624.07

Catálogo: [sisbin@sisbin.ufop.br](mailto:sisbin@sisbin.ufop.br)

## **Agradecimentos**

Agradeço a Deus por abençoar este trabalho. E peço a ele que abençoe a todos que o tornaram possível.

A Sione, que com seu amor incondicional tornou a jornada menos árdua.

A meus pais e minha irmã, por tudo o que sou.

Arlene e Marcílio, por me acompanharem em toda a minha formação profissional. Com eles aprendi a ser professor, mais do que no aspecto acadêmico, no aspecto humano da profissão.

Águia Sistemas, pela doação dos protótipos.

Aos amigos Afonso Ligório, Fernando, Gabriel, Juliano, Vinícius e Ana Amélia pela inestimável ajuda em diversos momentos deste trabalho.

Aos amigos João, Dequinha, Osvaldo, Aloísio e Róvia, pelo excelente suporte técnico e administrativo.

Aos engenheiros Eduardo e Agripa, da Braços, pela ajuda na preparação dos protótipos.

Aos amigos do IFMG, que sempre me incentivaram durante a realização deste trabalho.

Agradeço especialmente a Ney Nolasco, pelo esforço pessoal em minha remoção para o Campus Ouro Preto, fundamental para a conclusão deste trabalho. E aos amigos Cabello, Marcelo, Rodolfo, Dário, Sandra e Gilberto, pela alegria de suas presenças.

Agradeço por fim a Ouro Preto, minha amada terra natal, pródiga em oportunidades àqueles que abriga.

## Resumo

Os perfis formados a frio têm sua utilização crescente devido às suas características, principalmente economia e versatilidade. Uma de suas aplicações é a construção de sistemas de armazenagem, os racks, em que as colunas constituem-se de perfis formados a frio com seção característica e perfurações ao longo de seu comprimento que visam facilitar a montagem. As seções utilizadas estão sujeitas aos modos local, distorcional e global. A influência das perfurações na ocorrência destes modos ainda não é inteiramente conhecida. O objetivo deste trabalho é contribuir para o entendimento deste fenômeno com a realização de análise teórico experimental para avaliação da ocorrência dos modos de flambagem em perfis perfurados e a possível interação entre eles. A Teoria Generalizada de Vigas (GBT) e o Método dos Elementos Finitos foram utilizados na definição da geometria de uma série de protótipos com e sem perfurações sujeitos à ocorrência dos modos de local, distorcional e global, de forma isolada ou em interação. Estes protótipos foram ensaiados, e os resultados experimentais foram utilizados para a validação de um procedimento via elementos finitos de análise não linear de perfis formados a frio. A comparação entre resultados numéricos e experimentais demonstrou a validade do uso de Método dos Elementos Finitos, com dispersão máxima de 5,3%. A análise da estabilidade da seção por meio do Método dos Elementos Finitos foi utilizado no Método da Resistência Direta para a avaliação de sua eficiência na previsão da resistência dos perfis formados a frio do tipo rack com e sem perfurações. Foi considerada a ocorrência dos modos isolados e em interação. A consideração dos modos de forma isolada levou a uma dispersão máxima em relação aos resultados experimentais de 22,1% com a consideração da área bruta e 19% com a consideração da área líquida. A consideração dos modos em interação levou a dispersões de 30,5% e 32,4% considerando-se a área bruta e a área líquida, respectivamente. Porém, quando se aprofunda a análise da estabilidade da seção e são excluídos os modos que não estão presentes nos comprimentos das colunas consideradas, o Método da Resistência Direta com a consideração da interação entre os modos leva a dispersões máximas de 11,4% e 13,8% considerando-se a área bruta e a área líquida, respectivamente, o que indica a viabilidade de sua aplicação para colunas com perfurações.



## Abstract

Cold formed steel sections are widely used in many structural applications, due to their versatility and low cost if compared to other structural sections. They are used in Steel Storage Systems, usually called racks. These systems are built with a special section, with holes along columns length in order to easier fitting connections. The rack sections are under local, distortional or global buckling influence, and the holes effect in buckling modes is still under investigation. This work aims at analyzing perforated columns buckling behavior, evaluating the local distortional and global buckling modes occurrence and the interaction among them by a theoretical-experimental analysis. The Generalized Beam Theory (GBT) and the Finite Element Method were firstly used in order to define specimens with and without perforations, under local, distortional and global modes and local/distortional or distortional/global modes interaction. The specimens were tested under pure compression, and the experimental results were used to validate a non linear Finite Element procedure to analyze perforated cold formed columns. The comparison between experimental and numerical results showed dispersion up to 5,3%, which demonstrates the Finite Element model suitability to this study. In a second stage, Finite Element model was used to determine local, distortional and global critical loads to use the Direct Strength Method (DSM) to assess columns with and without holes resistance. The modes were firstly considered in isolated form, and dispersion between DSM and experimental results was up to 22,1%, if the section gross area is considered and 19 % if considering section net area. The use of DSM predictions to modes in interaction lead to difference between DSM and experimental results up to 30,5% e 32,4%, considering gross and net section area, respectively. An accurate section stability analysis leads to exclusion of modes absent in the columns used in DSM, and in this case the dispersion between experimental and DSM results are up to 11,4% and 13,8% considering gross and net area, respectively, indicating the viability of DSM to evaluate perforated columns resistance.

## Lista de Figuras

Figura 1.1. Flambagem por distorção da seção transversal (NBR 14672 (2010)): (a) Perfil U enrijecido sob compressão; (b) Perfil U enrijecido sob flexão; (c) Perfil rack sob compressão; (d) Perfil zeta sob flexão. ....	2
Figura 2.1. Seção comercial analisada. ....	14
Figura 2.2. Comparação entre GBTul e CUFSM. ....	16
Figura 2.3. Modelo via elementos finitos. ....	17
Figura 2.4. Malhas de elementos finitos utilizadas (a) Modelo sem furos; (b) Modelo com furos. ....	20
Figura 2.5. Análise da estabilidade elástica da coluna sem furos. ....	22
Figura 2.6. Comparação entre os resultados do ANSYS e do GBTUL. ....	23
Figura 2.7. Modos de flambagem: ANSYS (a) L= 500 mm e (b) L=1000 mm; GBTul (c) L=500 mm e (d) L= 1000 mm. ....	23
Figura 2.8. Análise da estabilidade elástica de colunas com perfurações. ....	24
Figura 2.9. Comparação entre a coluna sem furos e coluna perfurada. ....	25
Figura 2.10. Análise não linear dos protótipos. ....	27
Figura 3.1. Seção adotada e dimensões das perfurações (Dimensões em mm). ....	28
Figura 3.2. Cargas críticas para a coluna sem furos na alma. ....	29
Figura 3.3. Cargas críticas para a coluna com furos em que $h_f=48$ mm (60% $b_w$ ). ....	30
Figura 3.4. Cargas críticas para a coluna com furos em que $h_f=64$ mm (80% $b_w$ ). ....	31
Figura 3.5. Deslocamentos em mm no modelo CC-SF: (a) alma , (b) flanges de ligação. ....	35
Figura 3.6. Deslocamentos em mm no modelo CC-SF: (a) alma , (b) flanges de ligação. ....	36
Figura 3.7. Deslocamentos em mm no modelo CC-F80: (a) alma , (b) flanges de ligação. ....	37
Figura 3.8. Deslocamentos em mm no modelo CM-SF: (a) alma , (b) flanges de ligação. ....	38
Figura 3.9. Deslocamentos em mm no modelo CM-F60: (a) alma , (b) flanges de ligação. ....	38
Figura 3.10. Deslocamentos em mm no modelo CM-F60: (a) alma , (b) flanges de ligação. ....	39
Figura 4.1. Instrumentos utilizados no levantamento das imperfeições. ....	40
Figura 4.2. Prensa hidráulica INSTRON. ....	41
Figura 4.3. Corpo de Prova a ser ensaiado (Dimensões em mm). ....	42
Figura 4.4. Esquema geral da montagem dos ensaios de compressão centrada. ....	42
Figura 4.5. Alinhamento do protótipo com a rótula. ....	43
Figura 4.6. Posição dos LVDTs nas colunas curtas: (a) flanges de ligação; (b) alma do protótipo CC-SF; (c) alma do protótipo CC-F60; (d) alma do protótipo CC-F80. ....	44
Figura 4.7. Posição dos LVDTs nas colunas médias: (a) flanges de ligação do protótipo CM-F80; (b) flanges de ligação dos protótipos CM-SF e CM-F60; (c) alma do protótipo CM-SF; (d) alma do protótipo CM-F60; (e) alma do protótipo CM-F80. ....	45
Figura 4.8. Extensômetros instalados à meia altura do protótipo. ....	46
Figura 4.9. Sistema de aquisição de dados. ....	47
Figura 5.1. Dimensões levantadas na determinação das imperfeições: (a) Seção transversal; (b) Vista da alma. ....	49
Figura 5.2. Deslocamentos no protótipo CC-SF-3: (a) flanges de ligação; (b) alma. ....	51

Figura 5.3. Resultados dos LVDT posicionados na alma do protótipo CC-SF-3.....	52
Figura 5.4. Deslocamentos nos flanges de ligação do protótipo CC-SF-3. ....	53
Figura 5.5. Resultados dos extensômetros no protótipo CC-SF-3.....	54
Figura 5.6. Deslocamentos no protótipo CC-F60-1: (a) flanges de ligação (b) alma. ....	55
Figura 5.7. Resultados dos LVDTs posicionados na alma do protótipo CC-F60-1. ....	56
Figura 5.8. Deslocamentos nos flanges de ligação do protótipo CC-F60-1. ....	57
Figura 5.9. Resultados dos extensômetros do protótipo CC-F60-1.....	58
Figura 5.10. Deslocamentos no protótipo CC-F80-1: (a) flanges de ligação; (b) alma....	59
Figura 5.11. Resultados dos LVDTs posicionados na alma do protótipo CC-F80-1. ....	60
Figura 5.12. Resultados dos LVDTs posicionados no flange de ligação do protótipo CC-F80-1. ....	61
Figura 5.13. Resultados dos extensômetros no protótipo CC-F80-1.....	61
Figura 5.14. Deslocamentos no protótipo CM-SF-2: (a) flanges de ligação; (b) alma....	63
Figura 5.15. Resultados dos LVDTs posicionados na alma do protótipo CM-SF-2. ....	63
Figura 5.16. Resultados dos LVDTs posicionados nos flanges de ligação do protótipo CM-SF-2. ....	64
Figura 5.17. Resultados dos extensômetros no protótipo CM-SF-2.....	65
Figura 5.18 . Deslocamentos no protótipo CM-F60-3: (a) flanges de ligação; (b) alma. .	66
Figura 5.19. Resultados dos LVDTs posicionados na alma do protótipo CM-F60-3.....	67
Figura 5.20. Resultados dos LVDTs posicionados nos flanges de ligação do protótipo CM-F60-3. ....	68
Figura 5.21. Resultados dos extensômetros no protótipo CM-F60-3. ....	69
Figura 5.22. Deslocamentos no protótipo CM-F80-3: (a) flanges de ligação; (b) alma..	70
Figura 5.23. Resultados dos LVDTs posicionados na alma do protótipo CM-F80-3.....	71
Figura 5.24. Resultados dos LVDTs posicionados nos flanges de ligação do protótipo CM-F80-3. ....	72
Figura 5.25. Resultados dos extensômetros no protótipo CM-F80-3.....	72
Figura 6.1. Modos de flambagem utilizados na introdução da imperfeição inicial para o protótipo CC-SF-3. ....	76
Figura 6.2. Comparação entre os resultados numéricos e experimentais dos deslocamentos na alma do protótipo CC-SF-3. ....	77
Figura 6.3. Comparação entre os resultados numéricos e experimentais dos deslocamentos nos flanges de ligação do protótipo CC-SF-3. ....	77
Figura 6.4. Comparação entre as deformações numéricas e experimentais no protótipo CC-SF-3.....	78
Figura 6.5. Deslocamentos no protótipo CC-SF-3 e no modelo numérico: (a) alma; (b) flange.....	79
Figura 6.6. Modos de flambagem utilizados na introdução da imperfeição inicial para o protótipo CC-F60-1.....	80
Figura 6.7. Comparação entre os resultados dos deslocamentos na alma do protótipo CC-F60-1. ....	80
Figura 6.8. Comparação entre os resultados dos deslocamentos nos flanges de ligação do protótipo CC-F60-1.....	81
Figura 6.9. Comparação entre as deformações no protótipo CC-F60-1.....	82
Figura 6.10. Deslocamentos no protótipo CC-F60-1 e no modelo numérico: (a) alma; (b) flange.....	83

Figura 6.11. Modos de flambagem utilizados na introdução da imperfeição inicial para o protótipo CC-F80-1.....	84
Figura 6.12. Comparação entre os resultados dos deslocamentos na alma do protótipo CC-F80-1. ....	84
Figura 6.13. Comparação entre os resultados dos deslocamentos nos flanges de ligação do protótipo CC-F80-1.....	85
Figura 6.14. Comparação entre as deformações no protótipo CC-F80-1. ....	85
Figura 6.15. Deslocamentos no protótipo CC-F80-1 e no modelo numérico: (a) alma; (b) flange.....	86
Figura 6.16. Modo de flambagem utilizado na introdução da imperfeição inicial para o protótipo CM-SF-2.....	87
Figura 6.17. Comparação entre os resultados dos deslocamentos na alma do protótipo CM-SF-2. ....	88
Figura 6.18. Comparação entre os resultados dos deslocamentos nos flanges de ligação do protótipo CM-SF-2.....	89
Figura 6.19. Comparação entre as deformações no protótipo CC-SF-2. ....	90
Figura 6.20. Deslocamentos no protótipo CM-SF-2 e no modelo numérico: (a) flange; (b) alma. ....	91
Figura 6.21. Modos de flambagem utilizados na introdução da imperfeição inicial para o protótipo CM-F60-3.....	92
Figura 6.22. Comparação entre os resultados dos deslocamentos na alma do protótipo CM-F60-3. ....	93
Figura 6.23. Posicionamento dos LVDTs e extensômetros à meia altura da seção.....	93
Figura 6.24. Comparação entre os resultados dos deslocamentos nos flanges de ligação do protótipo CM-F60-3.....	94
Figura 6.25. Comparação entre as deformações no protótipo CM-F60-3. ....	95
Figura 6.26. Deslocamentos no protótipo CM-F60-3 e no modelo numérico: (a) flange; (b) alma. ....	96
Figura 6.27. Modo de flambagem utilizado na introdução da imperfeição inicial. ....	97
Figura 6.28. Comparação entre os resultados na alma do perfil CM-F80-3.....	98
Figura 6.29. Comparação entre os resultados dos deslocamentos nos flanges de ligação do protótipo CM-F80-3.....	98
Figura 6.30. Comparação entre as deformações no protótipo CM-F80-3. ....	99
Figura 6.31. Deslocamentos no protótipo CM-F80-3 e no modelo numérico: (a) flange; (b) alma. ....	100
Figura 6.32. Comparação entre as cargas últimas experimental e numérica via elementos finitos. ....	101
Figura 7.1. Comparação entre os resultados via MRD e experimentais considerando-se a seção bruta e ocorrência dos modos isolados. ....	107
Figura 7.2. Comparação entre os resultados via MRD e experimentais considerando-se a seção líquida e a ocorrência dos modos isolados.....	108
Figura 7.3. Comparação entre os resultados via MRD e experimentais considerando-se a seção bruta e a ocorrência dos modos em interação. ....	110
Figura 7.4. Comparação entre os resultados via MRD e experimentais considerando-se a seção bruta e a ocorrência dos modos em interação. ....	111

Figura 7.5. Comparação entre os resultados via MRD e experimentais considerando-se a seção bruta e a ocorrência dos modos em interação excetuando-se o modo local da análise. ....	113
Figura 7.6. Comparação entre os resultados via MRD e experimentais considerando-se a seção líquida e a ocorrência dos modos em interação excetuando-se o modo local da análise. ....	114
Fig. B.1. Deslocamentos no protótipo: (a) Alma; (b) Flange de Ligação.....	132
Fig. B.2. Deslocamentos na alma do protótipo.....	132
Fig. B.3. Deslocamentos no flange de ligação do protótipo.....	133
Fig. B.4. Deformações no protótipo.....	133
Fig. B.5. Deslocamentos no protótipo: (a) Alma; (b) Flange de Ligação.....	134
Fig. B.6. Deslocamentos na alma do protótipo.....	134
Fig. B.7. Deslocamentos no flange de ligação do protótipo.....	135
Fig. B.8. Deformações no protótipo.....	135
Fig. B.9. Deslocamentos no protótipo: (a) Alma; (b) Flange de Ligação.....	136
Fig. B.10. Deslocamentos na alma do protótipo.....	136
Fig. B.11. Deslocamentos no flange de ligação do protótipo.....	137
Fig. B.12. Deformações no protótipo.....	137
Fig. B.13. Deslocamentos no protótipo: (a) Alma; (b) Flange de Ligação.....	138
Fig. B.14. Deslocamentos na alma do protótipo.....	138
Fig. B.15. Deslocamentos no flange de ligação do protótipo.....	139
Fig. B.16. Deformações no protótipo.....	139
Fig. B.17. Deslocamentos no protótipo: (a) Alma; (b) Flange de Ligação.....	140
Fig. B.18. Deslocamentos na alma do protótipo.....	140
Fig. B.19. Deslocamentos no flange de ligação do protótipo.....	141
Fig. B.20. Deformações no protótipo.....	141
Fig. B.21. Deslocamentos no protótipo: (a) Alma; (b) Flange de Ligação.....	142
Fig. B.22. Deslocamentos na alma do protótipo.....	142
Fig. B.23. Deslocamentos no flange de ligação do protótipo.....	143
Fig. B.24. Deformações no protótipo.....	143
Fig. B.25. Deslocamentos no protótipo: (a) Alma; (b) Flange de Ligação.....	144
Fig. B.26. Deslocamentos na alma do protótipo.....	144
Fig. B.27. Deslocamentos no flange de ligação do protótipo.....	145
Fig. B.28. Deformações no protótipo.....	146
Fig. B.29. Deslocamentos no protótipo: (a) Alma; (b) Flange de Ligação.....	147
Fig. B.30. Deslocamentos na alma do protótipo.....	147
Fig. B.31. Deslocamentos no flange de ligação do protótipo.....	148
Fig. B.32. Deformações no protótipo.....	149
Fig. B.33. Deslocamentos no protótipo: (a) Alma; (b) Flange de Ligação.....	150
Fig. B.34. Deslocamentos na alma do protótipo.....	150
Fig. B.35. Deslocamentos no flange de ligação do protótipo.....	151
Fig. B.36. Deformações no protótipo.....	152
Fig. B.37. Deslocamentos no protótipo: (a) Alma; (b) Flange de Ligação.....	153
Fig. B.38. Deslocamentos na alma do protótipo.....	153
Fig. B.39. Deslocamentos no flange de ligação do protótipo.....	154

Fig. B.40. Deformações no protótipo.....	154
Fig. B.41.Deslocamentos no protótipo: (a) Alma; (b) Flange de Ligação.....	155
Fig. B.42.Deslocamentos na alma do protótipo.....	155
Fig. B.43. Deslocamentos no flange de ligação do protótipo.....	156
Fig. B.44. Deformações no protótipo.....	156
Fig. C.1. Modos utilizados para a imperfeição inicial e suas amplitudes.....	157
Fig. C.2. Comparação entre os deslocamentos na alma e os resultados numéricos. ....	157
Fig. C.3. Comparação entre os deslocamentos no flange de ligação e os resultados numéricos.....	158
Fig. C.4. Comparação entre as deformações no protótipo e os resultados numéricos....	158
Fig. C.5. Comparação dos deslocamentos experimentais e numéricos. ....	159
Fig. C.6. Modo utilizado para a imperfeição inicial e sua amplitude. ....	160
Fig. C.7. Comparação entre os deslocamentos na alma e os resultados numéricos. ....	160
Fig. C.8.Comparação entre os deslocamentos no flange de ligação e os resultados numéricos.....	161
Fig. C.9. Comparação entre as deformações no protótipo e os resultados numéricos....	161
Fig. C.10. Comparação dos deslocamentos experimentais e numéricos. ....	162
Fig. C.11. Modos utilizados para introduzir a imperfeição inicial e suas amplitudes. ...	163
Fig. C.12. Comparação entre os deslocamentos na alma e os resultados numéricos. ....	163
Fig. C.13. Comparação entre os deslocamentos no flange de ligação e os resultados numéricos.....	164
Fig. C.14. Comparação entre as deformações no protótipo e os resultados numéricos..	164
Fig. C.15. Comparação dos deslocamentos experimentais e numéricos. ....	165
Fig. C.16. Modos utilizados para introduzir a imperfeição inicial e suas amplitudes. ...	166
Fig. C.17. Comparação entre os deslocamentos na alma e os resultados numéricos. ....	166
Fig. C.18. Comparação entre os deslocamentos no flange de ligação e os resultados numéricos.....	167
Fig. C.19. Comparação entre as deformações no protótipo e os resultados numéricos..	167
Fig. C.20. Comparação dos deslocamentos experimentais e numéricos. ....	168
Fig. C.21. Modos utilizados para introduzir a imperfeição inicial e suas amplitudes. ...	169
Fig. C.22. Comparação entre os deslocamentos na alma e os resultados numéricos. ....	169
Fig. C.23. Comparação entre os deslocamentos no flange de ligação e os resultados numéricos.....	170
Fig. C.24. Comparação entre as deformações no protótipo e os resultados numéricos..	170
Fig. C.25. Comparação dos deslocamentos experimentais e numéricos. ....	171
Fig. C.26. Modos utilizados para introduzir a imperfeição inicial e suas amplitudes. ...	172
Fig. C.27. Comparação entre os deslocamentos na alma e os resultados numéricos. ....	172
Fig. C.28. Comparação entre os deslocamentos no flange de ligação e os resultados numéricos.....	173
Fig. C.29. Comparação entre as deformações no protótipo e os resultados numéricos..	173
Fig. C.30. Comparação dos deslocamentos experimentais e numéricos. ....	174
Fig. C.31. Modos utilizados para introduzir a imperfeição inicial e suas amplitudes. ...	175
Fig. C.32. Comparação entre os deslocamentos na alma e os resultados numéricos. ....	175
Fig. C.33. Comparação entre os deslocamentos no flange de ligação e os resultados numéricos.....	176
Fig. C.34. Comparação entre as deformações no protótipo e os resultados numéricos..	177

Fig. C.35. . Comparação dos deslocamentos experimentais e numéricos. ....	178
Fig. C.36. Modos utilizados para introduzir a imperfeição inicial e suas amplitudes. ...	179
Fig. C.37. Comparação entre os deslocamentos na alma e os resultados numéricos. ....	179
Fig. C.38. Comparação entre os deslocamentos no flange de ligação e os resultados numéricos.....	180
Fig. C.39. Comparação entre as deformações no protótipo e os resultados numéricos..	181
Fig. C.40. Comparação dos deslocamentos experimentais e numéricos. ....	182
Fig. C.41. Modos utilizados para introduzir a imperfeição inicial e suas amplitudes. ...	183
Fig. C.42. Comparação entre os deslocamentos na alma e os resultados numéricos. ....	183
Fig. C.43. Comparação entre os deslocamentos no flange de ligação e os resultados numéricos.....	184
Fig. C.44. Comparação entre as deformações no protótipo e os resultados numéricos..	185
Fig. C.45. Comparação dos deslocamentos experimentais e numéricos. ....	186
Fig. C.46. Modos utilizados para introduzir a imperfeição inicial e suas amplitudes. ...	187
Fig. C.47. Comparação entre os deslocamentos na alma e os resultados numéricos. ....	188
Fig. C.48. Comparação entre os deslocamentos no flange de ligação e os resultados numéricos.....	188
Fig. C.49. Comparação entre as deformações no protótipo e os resultados numéricos..	189
Fig. C.50. Comparação dos deslocamentos experimentais e numéricos. ....	190
Fig. C.51. Modos utilizados para introduzir a imperfeição inicial e suas amplitudes. ...	191
Fig. C.52. Comparação entre os deslocamentos na alma e os resultados numéricos. ....	192
Fig. C.53. Comparação entre os deslocamentos no flange de ligação e os resultados numéricos.....	192
Fig. C.54. Comparação entre as deformações no protótipo e os resultados numéricos..	193
Fig. C.55. Comparação dos deslocamentos experimentais e numéricos. ....	194

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1. Comparação entre os resultados do ANSYS e do GBTul.....	18
Tabela 2.2. Influência do refinamento da malha.....	19
Tabela 3.1. Resumo dos modos observados. ....	31
Tabela 3.2. Protótipos da coluna curta.....	32
Tabela 3.3. Protótipos da coluna média. ....	32
Tabela 3.4. Modos de flambagem e cargas críticas nas colunas curtas (CC). ....	33
Tabela 3.5. Modos de flambagem e cargas críticas nas colunas média (CM). ....	34
Tabela 5.1. Imperfeições nas Colunas Curtas.....	49
Tabela 5.2. Imperfeições nas Colunas Médias.....	49
Tabela 5.3. Resultados dos ensaios de caracterização. ....	50
Tabela 5.4. Protótipos constituintes da série CC-SF. ....	51
Tabela 5.5. Cargas últimas dos protótipos da série CC-SF.....	54
Tabela 5.6. Protótipos constituintes da série CC-F60.....	55
Tabela 5.7. Cargas últimas dos protótipos da série CC-F60.....	58
Tabela 5.8. Protótipos constituintes da série CC-F80.....	59
Tabela 5.9. Cargas últimas dos protótipos da série CC-F80.....	62
Tabela 5.10. Protótipos constituintes da série CM-SF.....	62
Tabela 5.11. Cargas últimas dos protótipos da série CM-SF.....	65
Tabela 5.12. Protótipos constituintes da série CM-F60.....	66
Tabela 5.13. Cargas últimas dos protótipos da série CM-F60-3.....	69
Tabela 5.14. Protótipos constituintes da série CM-F80.....	70
Tabela 5.15. últimas dos protótipos da série CM-F80-3.....	73
Tabela 5.16. Cargas últimas médias para as séries ensaiadas.....	73
Tabela 6.1. Modos e amplitudes induzidos.....	101
Tabela 7.1. Comparação entre os resultados via MRD para modos isolados e os resultados numéricos e experimentais considerando-se a área da seção bruta. ....	106
Tabela 7.2. Comparação entre os resultados via MRD para modos isolados e os resultados numéricos e experimentais considerando-se a área da seção líquida. ....	107
Tabela 7.3. Comparação entre os resultados via MRD para modos em interação e os resultados numéricos e experimentais considerando-se a área da seção bruta. ....	109
Tabela 7.4. Comparação entre os resultados via MRD para modos em interação e os resultados numéricos e experimentais considerando-se a área da seção líquida. ....	110
Tabela 7.5. Valores obtidos pelo MRD com a consideração da área bruta. ....	112
Tabela 7.6. Valores obtidos pelo MRD com a área líquida.....	112
Tabela 7.7. Comparação entre os resultados via MRD para modos em interação e os resultados numéricos e experimentais considerando-se a área da seção bruta excetuando-se o modo local da análise. ....	112
Tabela 7.8. Comparação entre os resultados via MRD para modos em interação e os resultados numéricos e experimentais considerando-se a área da seção líquida excetuando-se o modo local da análise.....	113
Tab. A.1. Dimensões dos protótipos Coluna Curta (CC) .....	129
Tab. A.2. Dimensões dos Protótipos Coluna Média (CM).....	130



# Sumário

Agradecimentos .....	I
Resumo .....	II
Abstract .....	III
Lista de Figuras .....	IV
Lista de Tabelas .....	X
1 Introdução .....	1
1.1 Revisão bibliográfica.....	2
1.1.1 Sistemas de armazenagem industrial .....	2
1.1.2 Métodos Numéricos de Análise Estrutural .....	5
1.1.3 Perfis Formados a Frio.....	9
1.2 Objetivo e descrição do trabalho.....	12
2 Estudos numéricos .....	14
2.1 Introdução.....	14
2.2 Comparação entre resultados via Faixas Finitas e GBT .....	15
2.3 Calibração do modelo de Elementos Finitos.....	16
2.3.1 Escolha do tipo de elemento .....	17
2.3.2 Determinação do refinamento da malha .....	18
2.3.3 Condições de contorno.....	19
2.4 Análise da estabilidade linear de seções do tipo rack .....	20
2.4.1 Introdução .....	20
2.4.2 Análise linear de colunas sem perfurações .....	21
2.4.3 Análise linear de colunas com perfurações.....	23
2.5 Análise não linear de perfis do tipo rack submetidos à compressão.....	25
3 Resultados da análise numérica .....	28
3.1 Introdução.....	28
3.2 Análise de flambagem elástica da seção .....	29
3.3 Análise não linear dos protótipos .....	35
3.3.1 Modelo CC-SF .....	35
3.3.2 Modelo CC-F60 .....	36
3.3.3 Modelo CC-F80 .....	36
3.3.4 Modelo CM-SF .....	37
3.3.5 Modelo CM-F60 .....	38
3.3.6 Modelo CM-F80 .....	39
4 Programa experimental .....	40
4.1 Levantamento das imperfeições geométricas.....	40
4.2 Máquina de ensaios .....	40
4.3 Ensaio propostos .....	41
4.3.1 Ensaio de caracterização do aço .....	41
4.3.2 Ensaio de compressão centrada .....	42
4.4 Instrumentação e aquisição de dados .....	43
4.4.1 Transdutores de deslocamento (LVDT).....	44
4.4.2 Extensômetros.....	46
4.4.3 Célula de carga.....	46
4.4.4 Aquisição de dados .....	46
5 Resultados experimentais.....	48

5.1	Introdução.....	48
5.2	Imperfeições Geométricas.....	48
5.3	Ensaio de caracterização do aço .....	50
5.4	Ensaio de compressão centrada .....	50
5.4.1	Série CC-SF .....	50
5.4.2	Série CC-F60 .....	54
5.4.3	Série CC-F80 .....	58
5.4.4	Série CM-SF .....	62
5.4.5	Série CM-F60.....	65
5.4.6	Série CM-F80.....	69
5.4.7	Considerações sobre os resultados experimentais .....	73
6	Comparação de resultados .....	75
6.1	Introdução.....	75
6.2	Comparação dos resultados numéricos e experimentais .....	75
6.2.1	Série CC-SF .....	76
6.2.2	Série CC-F60 .....	79
6.2.3	Série CC-F80 .....	83
6.2.4	Série CM-SF .....	87
6.2.5	Série CM-F60.....	91
6.2.6	Série CM-F80.....	96
6.2.7	Considerações sobre as comparações entre os resultados numéricos e experimentais .....	100
7	Comparações teóricas .....	102
7.1	Introdução.....	102
7.2	O Método da Resistência Direta.....	102
7.3	Análise da capacidade resistente da seção .....	106
7.3.1	Método da Resistência Direta considerando os modos de forma isolada.....	106
7.3.2	Método da Resistência Direta considerando os modos em interação .....	109
7.3.3	Análise dos resultados obtidos via Método da Resistência Direta .....	111
8	Considerações finais .....	116
	Referências Bibliográficas .....	120
	Apêndices.....	128
	A Levantamento de Imperfeições.....	129
	B Resultados experimentais dos protótipos.....	132
	B.1. Série CC-SF.....	132
	B.1.1. Protótipo CC-SF-1 .....	132
	B.1.2. Protótipo CC-SF-2.....	134
	B.2. Série CC-F60 .....	136
	B.2.1. Protótipo CC-F60-2 .....	136
	B.2.2. Protótipo CC-F60-3 .....	138
	B.3. Série CC-F80 .....	140
	B.3.1. Protótipo CC-F80-2 .....	140
	B.3.2. Protótipo CC-F80-3 .....	142
	B.4. Série CM-SF.....	144
	B.4.1. Protótipo CM-SF-1 .....	144
	B.4.2. Protótipo CM-SF-3 .....	147

B.5.	Série CM-F60 .....	150
B.5.1.	Protótipo CM-F60-1 .....	150
B.6.	Série CM-F80 .....	153
B.6.1.	Protótipo CM-F80-1 .....	153
B.6.2.	Protótipo CM-F80-2 .....	155
C	Comparação de resultados dos protótipos.....	157
C.1.	Série CC-SF.....	157
C.1.1.	Protótipo CC-SF-1 .....	157
C.1.2.	Protótipo CC-SF-2.....	160
C.2.	Série CC-F60 .....	163
C.2.1.	Protótipo CC-F60-2 .....	163
C.2.2.	Protótipo CC-F60-3 .....	166
C.3.	Série CC-F80 .....	169
C.3.1.	Protótipo CC-F80-2 .....	169
C.3.2.	Protótipo CC-F80-3 .....	172
C.4.	Série CM-SF .....	175
C.4.1.	Protótipo CM-SF-1 .....	175
C.4.2.	Protótipo CM-SF-3 .....	179
C.5.	Série CM-F60 .....	183
C.5.1.	Protótipo CM-F60-1 .....	183
C.6.	Série CM-F80 .....	187
C.6.1.	Protótipo CM-F80-1 .....	187
C.6.2.	Protótipo CM-F80-2 .....	191

# 1 Introdução

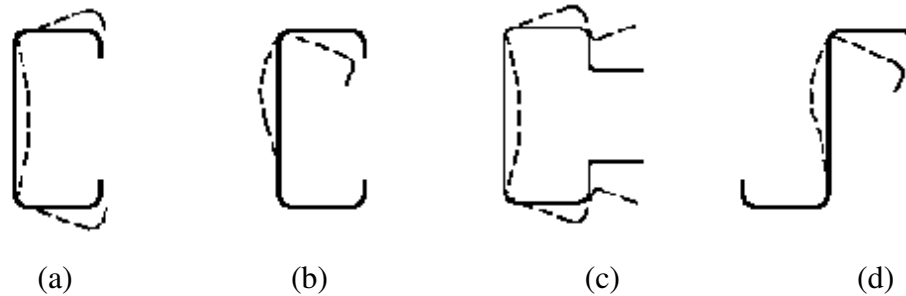
Os perfis formados a frio são elementos estruturais obtidos pelo dobramento de chapas, à temperatura ambiente, até a obtenção da forma desejada. As seções obtidas podem ser de diversos tipos, o que confere a este tipo de perfil grande versatilidade que, aliada à economia devido ao baixo peso da estrutura, faz com que ele seja uma solução adequada a diversos tipos de aplicações estruturais, tais como coberturas, galpões industriais, sistemas de armazenagem, edifícios de pequeno porte e outros.

Porém, estes perfis, devido à pequena espessura das chapas de que são constituídos, em geral apresentam problemas de instabilidade característicos, tais como a flambagem local de placa e também a flambagem distorcional da seção, além da flambagem global do elemento estrutural.

A flambagem local de placa ocorre quando as paredes que constituem a seção transversal mudam de forma, permanecendo os ângulos da seção inalterados. Este fenômeno é amplamente estudado, e existem métodos para a sua previsão e quantificação de sua influência na resistência dos elementos, tais como o Método das Larguras Efetivas (von Karman et al. (1932), Winter (1968) e o Método da Seção Efetiva (Batista (2009)).

A flambagem distorcional ocorre quando a seção sofre alterações em que há o deslocamento de suas arestas, resultando em abertura ou fechamento da mesma. Este fenômeno, que ocorre devido à elevada esbelteza das seções formadas a frio, é de difícil quantificação, sendo objeto de diversas pesquisas (Camotim et al. (2007), Basaglia et al. (2009), Casafont et al. (2011a)) . A figura 1.1 apresenta a flambagem distorcional das seções. Além destes modos de flambagem, pode ainda ocorrer a flambagem global, por flexo-torção ou por flexão.

Os modos de flambagem (local, distorcional ou global) podem ocorrer isoladamente ou em interação com outros modos, ou seja, existem comprimentos da coluna em que podem ocorrer os modos local-distorcional, local-global, distorcional-global, ou mesmo local-distorcional-global. A possível interação entre os modos dificulta a previsão do comportamento e da resistência do elemento estrutural.



**Figura 1.1. Flambagem por distorção da seção transversal (NBR 14672 (2010)): (a) Perfil U enrijecido sob compressão; (b) Perfil U enrijecido sob flexão; (c) Perfil rack sob compressão; (d) Perfil zeta sob flexão.**

A ocorrência destes modos de flambagem torna-se cada vez mais determinante no comportamento das estruturas devido à crescente esbeltez dos sistemas. Neste contexto, um sistema estrutural sensível a estes modos de flambagem são os sistemas de armazenagem industrial, conhecidos como racks, que além da elevada esbeltez são sujeitos a carregamentos e ações de impactos devidos à sua utilização.

Desta forma, atualmente existe um grande número de pesquisas em desenvolvimento para a previsão do comportamento e quantificação da capacidade de carga de elementos compostos por perfis formados a frio, sendo usual a realização de testes experimentais para a observação dos fenômenos e a utilização de ferramentas numéricas para avaliação dos mesmos.

## **1.1 Revisão bibliográfica**

### **1.1.1 Sistemas de armazenagem industrial**

Diversos trabalhos foram contribuíram para o aperfeiçoamento das técnicas de análise e projeto de Sistemas de em Industrial. Godley (1991) fez um histórico da evolução dos racks até aquele momento. Apresentou uma descrição detalhada dos componentes e dos diversos tipos de sistemas disponíveis, além de uma abordagem analítica para a avaliação dos comprimentos de flambagem das colunas.

O Instituto de Fabricantes de Racks dos Estados Unidos (RMI (1997)) elaborou uma especificação de projeto destas estruturas em consonância com a norma americana de perfis formados a frio (AISI (1996)). A especificação abrange basicamente os sistemas do tipo porta-paletes, ficando excluídos de seu escopo outros tipos, como o drive-in e o drive-through.

Oliveira (2000) realizou um estudo teórico-experimental das ligações e das colunas utilizadas em um modelo drive-in fabricado por uma empresa nacional, a Águia Sistemas de Armazenagem Industrial. Este estudo baseou-se nas prescrições do RMI (1997), com a realização do ensaio da coluna curta, para determinação da resistência da coluna e do ensaio da viga em balanço, para a determinação da rigidez das ligações.

Rasmussen e Hua (2006) estudaram o comportamento de sistemas drive-in de armazenagem industrial sob impactos horizontais, como os decorrentes dos choques de empilhadeiras. As análises foram desenvolvidas via método dos elementos finitos e análises paramétricas foram realizadas para a avaliação das forças internas e deslocamentos nos diversos casos.

Um amplo trabalho de análise do comportamento do sistema drive-in foi realizado por Campos (2003). Através do método dos elementos finitos, o sistema foi simulado e observou-se a influência dos efeitos de segunda ordem no comportamento da estrutura. Observou-se a diminuição da influência do contraventamento do plano de fundo no comportamento da coluna à medida em que se aumenta a profundidade do rack, e apresentaram-se alternativas para a representação da falta de prumo da estrutura a partir da introdução de carregamentos laterais no modelo.

Rasmussen e Gilbert (2009a) realizaram ensaios experimentais dos componentes dos sistemas de armazenagem industrial mais comuns. Foram realizados os seguintes ensaios: coluna curta, ensaio das ligações, ensaio das placas de base e ensaio de flexão das vigas. A partir dos resultados, foram propostas alterações nos métodos destes ensaios visando maior representatividade nos resultados obtidos.

Rasmussen e Gilbert (2009b) realizaram ainda um ensaio de um rack do tipo drive-in em escala real. No ensaio, investigaram a transferência de carga entre seus diversos componentes e a rigidez relativa da estrutura quando submetida a diversas condições de carregamento horizontal. Foram considerados impactos em racks carregados e descarregados, e os mecanismos envolvidos foram analisados em ambos os casos. Baseando-se nos resultados experimentais, os mesmos autores (Rasmussen e Gilbert (2009c)) desenvolveram ainda análise numérica do sistema via elementos finitos, incluindo no modelo a rigidez dos componentes e analisando a influência de cada um.

Devido ao contínuo aperfeiçoamento da indústria, continuam a ser realizados extensivos trabalhos estudando os componentes dos sistemas. Filiatraut et al. (2006) analisaram o comportamento das ligações parafusadas em sistemas de armazenagem industrial sujeitos a cargas estáticas e sísmicas. Foram realizados ensaios que permitiram a determinação da curva momento rotação e a determinação da rigidez da ligação. Foi observado um trecho inicial com boa rigidez que sofre degradação para cargas mais elevadas. Em outro trabalho (Filiatraut et al.(2007)) foi analisado outro tipo de ligação, com encaixes, que melhoram o comportamento das mesmas.

Kwon et al. (2006) analisaram o comportamento de ligações em estruturas compostas por perfis formados a frio. Foi determinada experimentalmente a resistência à flexão e a rigidez destas ligações, o escoamento e o momento crítico para elas. A partir destas análises, foi determinada a rigidez pelo método secante, e através da atribuição destes valores aos pórticos foi observado o comportamento semi-rígido destas ligações, que tem fundamental importância no comportamento estrutural.

Existem também trabalhos com o objetivo de estudar os problemas que os sistemas podem apresentar em sua operação. Affolter et al. (2009) realizaram estudo de caso sobre o colapso real de um rack. Avaliaram a estrutura através de análise numérica não linear, e observaram que a carga aplicada à estrutura era superior à capacidade do sistema, indicando falha no projeto ou na operação do mesmo.

Hancock et al. (2004) realizaram análise numérica de racks, utilizando modelos 2D e 3D para a previsão dos modos de colapso e da resistência. Comparando as análises, observaram que os modelos 2D não têm a capacidade de captar os modos de flambagem globais por flexo-torção, além da interação entre ele e outros modos. Avaliaram ainda os elementos de pórtico disponíveis nos diversos softwares comerciais, e observaram que eles são inadequados para a análise de sistemas de armazenagem de elevada esbeltez.

Koen (2008) realizou uma abrangente análise do comportamento dos sistemas de armazenagem industrial. Foram realizadas análises numéricas e experimentais, e seus resultados foram utilizados para a avaliação das prescrições de norma. Os estudos indicaram que os procedimentos das normas são em geral a favor da segurança.

Freitas et al. (2010) avaliaram a influência da placa de base no comportamento global de sistemas do tipo drive-in. A rigidez da placa de base foi determinada por análise

via elementos finitos, e seus resultados incluídos em modelo global do sistema. Os resultados obtidos foram comparados com resultados experimentais, indicando a importância da semi-rigidez da placa de base na estabilidade do sistema.

Rasmussen e Gilbert (2010) realizaram estudo considerando um modelo bidimensional de um sistema de armazenagem. Neste modelo, foram comparados tipos de análise, tais como linear, não linear geométrica e não linear física e geométrica. Foram ainda considerados sistemas contraventados, não contraventados e semi-contraventados. Os resultados obtidos indicaram que a inclusão de elementos avançados na análise aumenta a confiabilidade dos resultados, abrindo a possibilidade da utilização deste procedimento para projetar diretamente estas estruturas, eliminando a necessidade da avaliação da resistência dos elementos isolados, como proposto pelas normas vigentes.

Através deste trabalhos pôde-se observar que o crescente uso deste tipo de estrutura demanda maior aprofundamento no estudo de seu comportamento, o que tem sido feito por diversos grupos de pesquisa. No entanto, percebe-se que, apesar dos avanços obtidos, há espaço para evolução dos procedimentos vigentes.

### **1.1.2 Métodos Numéricos de Análise Estrutural**

Atualmente, existem diversos softwares comerciais destinados ao uso em escritórios de projeto. Estes softwares geralmente baseiam-se nas normas vigentes. O desenvolvimento destes softwares, porém, passa obrigatoriamente pelo desenvolvimento de métodos computacionais que lhes sirvam de suporte. Estes métodos são desenvolvidos buscando a representação dos fenômenos reais sem abdicar da eficiência computacional.

As modernas técnicas de análise possibilitaram uma grande ampliação das possibilidades de análise de perfis formados a frio, cujo comportamento é complexo devido à elevada esbeltez de seus componentes e das estruturas resultantes, com a ocorrência de modos de flambagem próprios destas estruturas, conforme referido anteriormente.

Entre estes métodos encontram-se o Método dos Elementos Finitos (FEM). Este método baseia-se na discretização da estrutura em elementos, gerando assim uma malha de elementos e de nós. Através de funções de interpolação convenientes, este sistema discreto simula o comportamento do sistema contínuo original. A vantagem do método dos elementos finitos é a amplitude de possibilidades de utilização, uma vez que os



elementos finitos se adaptam à geometria. Sua desvantagem é um alto custo computacional, pois gera um elevado número de nós, o que leva a sistemas com muitas variáveis que demandam elevado tempo de processamento. Entre os pacotes comerciais baseados no Método dos Elementos Finitos destaca-se o ANSYS (ANSYS (2010)), utilizado neste trabalho.

Além do Método dos Elementos Finitos, outras técnicas numéricas têm ganhado destaque nos últimos anos. Entre elas, destacam-se o Método das Faixas Finitas (Lau e Hancock (1986), Schaffer (2002)) e a Teoria Generalizada de Vigas (Schardt (1994), Silvestre e Camotim (2002a, 2002b)).

O método das faixas finitas tem filosofia semelhante ao método dos elementos finitos. A diferença é a divisão da estrutura, ao invés de elementos, em faixas, ou seja, elementos bidimensionais onde uma dimensão é consideravelmente superior a outra, e a utilização de funções de interpolação adequadas para a simulação. Tem a vantagem de gerar um número consideravelmente menor de nós, levando assim a maior eficiência computacional se comparada ao método dos elementos finitos. Possui, porém, limitações, como a adaptação a geometrias mais complexas, por exemplo, no caso de placas com perfurações (Eccher (2007)). Entre os programas que têm como base o Método das Faixas Finitas, destaca-se o CUFSM (Schafer e Adani (2006)), utilizado neste trabalho.

Hancock e Yap (2006) fizeram um estudo numérico via elementos finitos do comportamento pós flambagem distorcional de seções compostas por perfis formados a frio. Analisaram a ocorrência da flambagem distorcional através da distribuição das tensões na seção transversal.

Chodraui e Malite (2007) estudaram, via método das faixas finitas, a ocorrência da flambagem distorcional em seções U enrijecido submetidas à compressão e à flexão. Foram realizadas comparações com prescrições de normas e com o método dos elementos finitos. Os resultados indicaram que os métodos utilizados são eficientes na previsão do comportamento dos perfis, apesar das dificuldades inerentes à flambagem distorcional.

Eccher (2007) implementou o método das faixas finitas isoparamétricas para a análise de elementos em perfis formados a frio com perfurações. Realizou ainda ensaios

experimentais em perfis do tipo rack com perfurações a fim de obter dados para comparação com resultados numéricos.

Yao e Rasmussen (2010) utilizaram faixas finitas isoparamétricas para realizar a modelagem de elemento formados a frio perfurados. A implementação realizada foi testada em diversos exemplos, e seus resultados comparados com dados numéricos, via elementos finitos, e experimentais. As comparações apresentaram boa correlação indicando a validade do método.

Schaffer e Li (2010) apresentam trabalho desenvolvido para incluir no programa CUFSM (programa de análise de estabilidade baseado no método das faixas finitas, elaborado pelo grupo de pesquisa destes autores) a possibilidade de construir modelos com condições de apoio quaisquer, uma vez que a versão original (Schaffer e Ádáni (2006)) permite apenas modelos biapoiados com empenamento livre nas extremidades. A partir das modificações propostas, o CUFSM permite também a adoção de extremidades engastadas ou livres, com empenamento livre ou impedido, ampliando sobremaneira suas possibilidades de aplicação.

O método das faixas finitas é um dos métodos utilizados na análise da estabilidade elástica da seção, visando a sua utilização no Método da Resistência Direta, que é um método de dimensionamento incluído na Norma Brasileira de Perfis Formados a Frio (NBR14762:2010).

Schaffer (2006) apresenta o Método da Resistência Direta aplicado ao projeto de elementos em perfis formados a frio. No trabalho, ele aborda as vantagens do método, tais como não necessitar de aproximações ou equações de interação, demandando apenas o cálculo das cargas de flambagem elásticas, o que pode ser feito por meio de programas disponibilizados gratuitamente, como o CUFSM. Assim, o método descrito é apresentado como uma alternativa nas atividades de projeto e dimensionamento de estruturas formadas a frio.

Moen e Schaffer (2009a) avaliaram o comportamento de vigas e colunas constituídas por perfis formados a frio com perfurações a partir do Método das Faixas Finitas e do Método dos Elementos Finitos. Os resultados obtidos foram comparados com resultados experimentais (Moen e Schaffer (2008)). Estas análises foram empregadas no

Método da Resistência Direta a fim de possibilitar o seu uso em procedimentos de projeto.

Batista (2009) avaliou a adequação dos métodos da largura efetiva e da resistência direta na avaliação do acoplamento dos modos local e global para perfis formados a frio. Desenvolveu ainda um processo de determinação manual da resistência destes perfis baseados nestes métodos. Foi observado que algumas normas vigentes à época, baseadas no método das larguras efetivas, deveriam ser revistas adotando o método da resistência direta, pois comparações com resultados experimentais indicaram resultados normativos contra a segurança.

Outro método que tem se tornado importante na análise da estabilidade de perfis formados a frio é a Teoria Generalizada de Vigas (GBT (Schardt (1994), Silvestre e Camotim (2002a, 2002b))). Este método tornou-se mais acessível após o lançamento do software GBTul (Bebiano et al. (2008)).

A Teoria Generalizada de Vigas (GBT) se baseia na análise dos modos de deformação possíveis na viga de forma separada e a composição entre eles, de modo a obter o comportamento real da estrutura, além de possibilitar uma separação de modos, ou seja, a avaliação da influência de cada modo no comportamento estrutural. Este método também demanda menor tempo de processamento se comparado ao método dos elementos finitos, apesar de possuir limitações como a impossibilidade da consideração de placas com perfurações. Neste trabalho, foi utilizado o GBTul, programa baseado na Teoria Generalizada de Vigas, para a simulação dos perfis estudados quando sem furos e calibração dos modelos numéricos em elementos finitos.

Camotim et al. (2005) apresentam a utilização de métodos numéricos na análise de seções formadas a frio. Desta forma, são comparadas a análise via elementos finitos, utilizando-se elemento de casca (shell), a análise via faixas finitas e a teoria generalizada de vigas (GBT). Foram analisados detalhes do modelo como condições de apoio, introdução de imperfeições e tensões residuais, e em todos os casos foi observada boa correlação entre os resultados em termos de resistência e dos modos de flambagem.

Basaglia et al. (2009) desenvolveram uma análise da ocorrência dos modos local, distorcional e global em pórticos baseada na teoria generalizada de vigas (GBT). A análise é validada através da comparação de seus resultados com dados obtidos pela

análise das estruturas no ANSYS. Estas comparações apresentam boa correlação, comprovando a eficiência da análise.

Estes trabalhos são importantes no desenvolvimento da análise estrutural através de ferramentas computacionais. Dentre as alternativas e procedimentos descritos, diversas foram importantes nas diversas etapas da execução deste trabalho.

### **1.1.3 Perfis Formados a Frio**

Com o aumento da esbeltez das seções, o desenvolvimento de seções cada vez mais complexas e a utilização de aços com elevada tensão de escoamento, a previsão da ocorrência dos modos de flambagem é cada vez mais importante para os procedimentos de análise e projeto em estruturas compostas por perfis formados a frio.

Assim, os métodos apresentados anteriormente são utilizados na análise de perfis formados a frio, aliados a ensaios experimentais. O resultado é o desenvolvimento das prescrições normativas a fim de contemplar a ocorrência destes fenômenos. Entre os métodos de projeto desenvolvido encontra-se o Método da Resistência Direta, que, aliado à análise de estabilidade da seção, apresenta-se como importante ferramenta no dimensionamento de estruturas compostas por perfis formados a frio (Hancock et al. (1994); Schaffer e Pekoz (1998)).

Vazquez (2002) faz a análise da estabilidade de seções do tipo rack para a avaliação da flambagem local, distorcional e global, visando estudar principalmente a flambagem por torção. As seções utilizadas foram determinadas a partir de um estudo paramétrico que definiu as suas geometrias. A partir dos resultados obtidos buscou-se desenvolver métodos de dimensionamento para estes perfis.

Schaffer (2002) apresenta os modos de flambagem comuns em perfis formados a frio 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. Desta forma, foi proposto um novo procedimento para o dimensionamento, baseando-se na estabilidade elástica das seções.

Nagahama (2003) implementou e analisou a utilização do método das faixas finitas para a análise linear dos problemas de flambagem. Utilizou ainda o método dos

elementos finitos com análise não linear física e geométrica, considerando a variação das condições de contorno, da aplicação do carregamento e a ortotropia dos materiais.

Pérez (2003) analisou experimentalmente perfis do tipo cartola e do tipo rack submetidos à compressão excêntrica para a avaliação da ocorrência dos modos de flambagem relacionados à torção não uniforme e à distorção. Fez ainda um estudo paramétrico visando a determinação de procedimentos práticos para a verificação dos estados limites últimos.

Freitas et al. (2005) estudaram o comportamento da coluna curta com perfurações. Através da análise via elementos finitos observaram a influência destes furos, e demonstraram que a adoção de seções com área líquida é uma alternativa à realização de ensaios experimentais para o dimensionamento conforme preconizado pelo RMI.

Schaffer e Yu (2006) analisaram o problema da flambagem distorcional em vigas. Foram realizados ensaios em perfis do tipo U enrijecido e zeta sem contenção lateral. A partir dos resultados, observou-se que a flambagem distorcional acarreta grande redução da resistência da viga se comparada à flambagem local. Os resultados obtidos foram ainda utilizados para a verificação da validade de prescrições de diversas normas para o caso.

Lecce (2006) e Lecce e Rasmussen (2006a, 2006b) avaliaram a ocorrência do modo distorcional em seções formadas a frio compostas em aço inoxidável. Foram realizadas análises experimentais e numéricas de colunas curtas e médias, e foi observada a ocorrência dos modos local e distorcional. 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 estudo sobre a interação entre os modos de flambagem local e distorcional em perfis do tipo U enrijecido. Esta análise foi desenvolvida via método dos elementos finitos, utilizando-se elementos de casca para a simulação dos perfis. Além da análise de flambagem elástica, o comportamento pós-crítico foi também avaliado, mostrando assim o aumento das tensões e das deformações plásticas neste estágio.

Moen et al. (2008) desenvolveram um método analítico para a determinação de tensões residuais em seções formadas a frio. Este método foi baseado na teoria de

deformações plásticas, considerando-se os procedimentos industriais correntes. A eficiência das expressões obtidas foi avaliada a partir de comparações com resultados experimentais, observando-se boa correlação entre os resultados.

Becque (2008) investigou a interação entre os modos de flambagem local e distorcional em perfis formados a frio compostos por aço inoxidável. Estas análises foram desenvolvidas a partir de ensaios de compressão de perfis U enrijecidos e de perfis I compostos por perfis U enrijecidos. Foram realizados ensaios de compressão centrada e de compressão excêntrica, e seus resultados foram comparados com análises numéricas.

Moen e Schaffer (2009b) desenvolveram expressões para a avaliação da carga crítica em placas com perfurações simplesmente apoiadas em 3 ou 4 lados. As expressões desenvolvidas foram validadas e, comprovada sua eficiência, são apresentadas como alternativa à análise de autovalor via elementos finitos para a previsão da resistência destas placas. Estas análises mostraram ainda que as perfurações podem induzir modos de flambagem e diminuir ou aumentar a resistência da placa dependendo da sua geometria e localização.

Casafont et al (2009) apresentam um método para a previsão da carga crítica distorcional em perfis formados a frio baseado em análises via elementos finitos. As cargas críticas obtidas são bastante precisas se comparadas com aquelas obtidas via GBT.

Santos (2010) realizou ensaios experimentais em perfis do tipo U enrijecido buscando avaliar a ocorrência dos modos de flambagem local, distorcional e global, bem como a interação entre eles. As seções ensaiadas foram escolhidas a partir de análises via Teoria Generalizada de Vigas (GBT). A técnica experimental utilizada possibilitou a observação do modo de flambagem e da carga última, sendo estes resultados comparados com prescrições normativas.

Casafont et al. (2011a) realizaram um programa experimental analisando seções formadas a frio do tipo rack em comprimentos susceptíveis à ocorrência de flambagem distorcional. Observou-se que em uma faixa de comprimentos ocorre interação entre os modos distorcional e global, e que, apesar da influência deste acoplamento ser pequena, se considerado nos procedimentos de projeto torna mais precisas as prescrições de normas.

Casafont et al. (2011b) realizaram ainda estudos sobre as colunas utilizadas em sistemas de armazenagem industrial. Foram analisadas vinte seções diferentes, por via analítica, utilizando a norma europeia EN1993-1-3:2006/AC:2009, o tradicional método das larguras efetivas e o método dos elementos finitos. Comparando-se os resultados, fica mostrado que apesar da norma europeia EN 15512:2009 aceitar apenas resultados experimentais para colunas perfuradas, o método das larguras efetivas e o método dos elementos finitos também apresentam bons resultados.

Bonada et al. (2012) apresentam três metodologias para a previsão das imperfeições iniciais na análise de flambagem não linear via elementos finitos de perfis do tipo rack. As três metodologias propostas têm seus valores comparados a resultados experimentais, indicando assim a viabilidade dos processos sugeridos neste tipo de análise.

Santos et al. (2012) e Dinis et al. (2012) apresentam um abrangente trabalho em que é analisada a interação entre os modos local, distorcional e global de perfis U enrijecido submetidos à compressão. Resultados experimentais e numéricos são utilizados para a avaliação dos métodos de projeto baseados no Método da Resistência Direta.

Estes trabalhos mostram o grande progresso na avaliação do comportamento dos perfis formados a frio, simultaneamente à crescente utilização deste tipo de material. No entanto, ainda existe a necessidade de aprofundamento nas pesquisas para melhor precisão na avaliação do comportamento e resistência destas estruturas, devido à dificuldade introduzida na análise pela elevada esbeltez de seus membros.

## **1.2 Objetivo e descrição do trabalho**

Este trabalho tem o objetivo de avaliar a ocorrência dos modos local, distorcional e global em perfis do tipo rack com perfurações de forma isolada ou em interação.

No Capítulo 2 são apresentados os procedimentos numéricos utilizados no trabalho, com destaque para o desenvolvimento do procedimento via elementos finitos. Apresentam-se neste capítulo os modelos utilizados nas análises linear e não linear.

No Capítulo 3 são apresentados os resultados dos modelos numéricos, utilizados como balizadores da etapa experimental.

No Capítulo 4 é apresentado o programa experimental, com a descrição dos procedimentos. Os resultados experimentais são apresentados no Capítulo 5.

No Capítulo 6 os resultados experimentais são comparados a resultados numéricos, a fim de calibrar a eficiência do modelo.

No Capítulo 7 são feitas avaliações de acordo com prescrições teóricas e seus resultados são comparados aos resultados numéricos e experimentais.

O Capítulo 8 apresenta as conclusões obtidas com este estudo e as sugestões para a continuidade da pesquisa.



## 2 Estudos numéricos

### 2.1 Introdução

O desenvolvimento de ferramentas computacionais abre caminho para a avaliação do comportamento estrutural por métodos numéricos, e sua utilização para fins de projeto e dimensionamento. No entanto, é necessário o desenvolvimento de procedimentos adequados para esta utilização, a fim de evitar erros que comprometam o trabalho em termos de segurança ou economia.

Este capítulo apresenta o desenvolvimento de um modelo numérico para a avaliação do comportamento de perfis do tipo rack com e sem perfurações submetido à compressão centrada. Nesta fase de desenvolvimento do modelo numérico, foi considerada uma seção comercial, cuja nomenclatura dos elementos e dimensões são apresentadas na figura 2.1. A partir dos resultados obtidos nesta fase, outras seções serão analisadas.

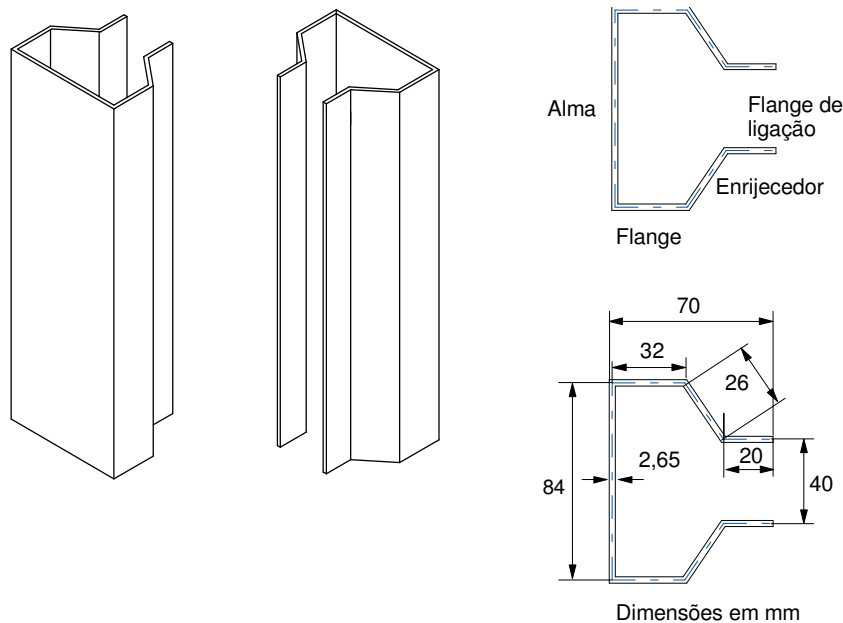


Figura 2.1. Seção comercial analisada.

Este estudo foi desenvolvido através das seguintes etapas:

1 – Comparação entre resultados obtidos com o Método das Faixas Finitas e com a GBT a fim da obtenção de parâmetros confiáveis para a comparação com os resultados obtidos via elementos finitos. Nesta etapa, foram simuladas colunas sem perfurações e com

extremidades simplesmente apoiadas e empenamento livre, e suas cargas críticas foram comparadas.

2 – Calibração entre os resultados obtidos via GBTul com resultados via elementos finitos obtidos através do software ANSYS (2011). Nesta etapa, comprimentos fixos das colunas foram simulados e seus resultados foram comparados com os resultados do GBTul com o objetivo de calibrar o modelo de elementos finitos no que se refere ao tipo de elemento, refinamento da malha e aplicação das restrições nos apoios.

3 – Desenvolvimento de rotina de programação que permite simulação via elementos finitos, no ANSYS, de uma variedade de comprimentos da coluna sem furo, a fim de obter as diversas cargas e modos críticos.

4 – Inclusão dos furos na rotina de programação elaborada no ANSYS, possibilitando assim a determinação das cargas críticas das colunas com perfurações. Nesta etapa foram escolhidos os comprimentos dos protótipos, com base nos modos desenvolvidos.

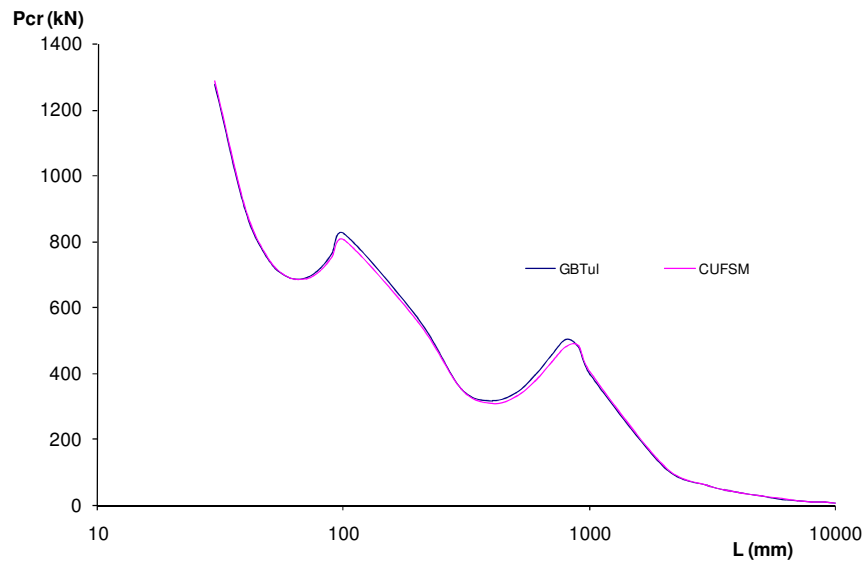
5 - Construção do modelo de elementos finitos incluindo a não linearidade física e geométrica dos protótipos, a fim de determinar o comportamento pós flambagem dos mesmos e compará-lo aos resultados experimentais.

Ressalta-se que nas etapa 4 e 5 a utilização do método dos elementos finitos foi imperativa devido à necessidade da inclusão dos furos, o que não é possível nos outros métodos, que serviram como referência para a validação do procedimento adotado nas etapas anteriores. A seguir, serão mostrados os resultados obtidos em cada etapa dos estudos numéricos.

## ***2.2 Comparação entre resultados via Faixas Finitas e GBT***

Nesta etapa do trabalho, a calibração entre os resultados obtidos via GBT e Faixas Finitas foi desenvolvida através dos programas GBTul e CUFSM. A calibração foi realizada com o objetivo de ajustar os o modelo para a obtenção de resultados confiáveis. Foram simuladas nesta etapa apenas colunas com carga centrada, extremidades simplesmente apoiadas com empenamento livre e sem perfurações ao longo de sua altura.

No programa GBTul foram utilizadas as soluções analítica e numérica para a determinação do resultado. Os resultados obtidos para a seção apresentada na figura 2.1 são apresentados na figura 2.2.



**Figura 2.2. Comparação entre GBTul e CUFSM.**

A partir das cargas críticas apresentadas na figura 2.2, pode-se observar uma boa correlação entre os resultados dos dois programas, o que demonstra o ajuste de parâmetros e a viabilidade de seu emprego para o estudo da estabilidade da coluna. Destaca-se que o GBTul apresenta possibilidade de variação das condições de contorno e permite melhor gerenciamento de múltiplos modos e manipulação de seus resultados, sendo, por isto, utilizado nas etapas subsequentes deste estudo.

### **2.3 Calibração do modelo de Elementos Finitos**

Sabe-se que os modelos de elementos finitos têm seus resultados bastante sensíveis às condições de contorno, ao refinamento da malha e ainda ao tipo de elemento empregado na análise. Esta etapa da análise numérica visa a obtenção de um procedimento de modelagem que leve a um modelo com resultados coerentes com aqueles obtidos da análise com emprego da GBT. Assim, foram construídos modelos de elementos finitos no ANSYS de colunas com a seção apresentada na figura 2.1 sem perfurações e com os comprimentos de 70 mm, para o qual ocorre a carga crítica para o modo local e 400 mm, para o qual ocorre a carga crítica para o modo distorcional. Os resultados obtidos com estes modelos de elementos finitos foram validados a partir de comparações com resultados do GBTul.

### 2.3.1 Escolha do tipo de elemento

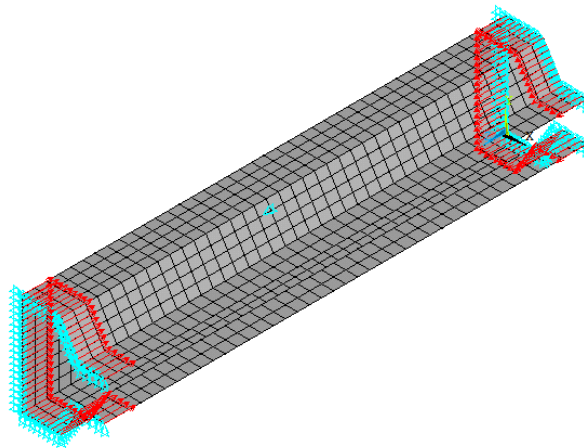
Para a realização da análise da estabilidade de colunas de perfis formados a frio via elementos finitos é comum a utilização de elementos de casca (Davies et al. (1997)). O ANSYS possui em sua biblioteca de elementos uma variada série de elementos deste tipo. Para esta análise, três tipos foram testados:

SHELL63: elemento de casca com quatro nós, adequado para análise elástica.

SHELL181: elemento de casca com quatro nós, especialmente indicado para análises plásticas. Este elemento pode ser utilizado com integração reduzida (IR) ou com integração completa (IC).

SHELL281: elemento de casca com nós intermediários (oito nós).

Nesta etapa, foram criados modelos com os comprimentos em que ocorrem os mínimos local e distorcional citados anteriormente e com as extremidades simplesmente apoiadas, com empenamento livre. Estas condições de apoio são obtidas com a aplicação de restrições translacionais nas duas direções ortogonais ao eixo da coluna nas extremidades e, a fim de evitar o deslocamento de corpo rígido, é impedida a translação na direção axial da coluna em um nó à meia altura do modelo. A figura 2.3 apresenta o modelo via elementos finitos utilizado nesta análise.



**Figura 2.3. Modelo via elementos finitos.**

A carga foi aplicada distribuída uniformemente ao longo da aresta das extremidades da coluna.

Os resultados foram obtidos a partir da análise de flambagem elástica (eigenbuckling), e foram obtidos o modo de flambagem e a carga crítica associada a ele.

Os resultados obtidos pela análise através de elementos finitos foram comparados a resultados numéricos do GBTul. A tabela 2.1 apresenta os resultados obtidos, explicitando a diferença entre os resultados via elementos finitos e via GBT.

**Tabela 2.1. Comparação entre os resultados do ANSYS e do GBTul.**

L (mm)	Modo	Cargas de Flambagem (kN)					Diferença (%)			
		GBTul	Shell63	Shell181 IR	Shell181 IC	Shell281	Shell63	Shell181 IR	Shell181 IC	Shell281
70	L	658,63	601,06	618,83	614,59	582,49	-8,74	-6,04	-6,69	-11,56
400	D	305,48	289,44	275,87	288,54	297,46	-5,25	-9,69	-5,55	-2,63

A partir dos resultados apresentados na tabela 2.1, observa-se que apresenta melhor correlação aos resultados de carga crítica para os modos local e distorcional é o elemento SHELL 181 com integração completa (SHELL181-IC).

Ressalta-se que nesta etapa o refinamento das malhas geradas foi o mesmo, variando-se apenas o tipo do elemento.

### 2.3.2 Determinação do refinamento da malha

Após determinar o tipo de elemento finito mais adequado para a análise, torna-se necessária a determinação de um nível de refinamento que conduza a bons resultados sem excessivo custo computacional. Buscou-se neste estudo a obtenção de malhas de padrão regular, com elementos quadrados. Uma gama de comprimentos do lado do quadrado foi testada, e seus resultados foram comparados com resultados obtidos via GBTul. A tabela 2.2 apresenta os valores obtidos.

Foram testados níveis de refinamento relacionando o tamanho dos elementos à largura da alma ( $b_w$ ), buscando a futura acomodação das perfurações nos modelos perfurados. Foram testados elementos com 5% e 10% da largura da alma. A partir dos resultados apresentados na tabela 2.3 pode-se ver que quando se considera o lado do elemento como 10% do valor da largura da alma (Figura 2.1), ou seja, 8,4 mm, ocorre uma melhor correlação entre os resultados, principalmente no que se refere ao modo local. Sendo este tamanho do elemento considerada adequada aos fins da simulação, este foi o nível de refinamento adotado.

**Tabela 2.2. Influência do refinamento da malha.**

L (mm)	Modo	Cargas de Flambagem (kN)			Diferença (%)	
		GBTul	Shell181-IC			
			b <sub>w</sub> /10	b <sub>w</sub> /20	b <sub>w</sub> /10	b <sub>w</sub> /20
70	L	658,63	614,59	598,05	-6,69	-9,20
400	D	305,48	288,54	285,76	-5,55	-6,46

### 2.3.3 Condições de contorno

As condições de contorno utilizadas devem simular extremidades globalmente rotuladas, porém com o empenamento impedido. Esta condição foi obtida com a restrição, em todos os nós das extremidades, dos deslocamentos nas direções perpendiculares ao eixo da coluna. Além disto, foram acopladas as rotações em torno destes mesmos eixos, ou seja, as rotações no plano definido pela seção extrema, com o objetivo de impedir seu empenamento.

Para impedir movimento de corpo rígido na direção axial da coluna, um nó à meia altura do modelo teve sua translação impedida nesta direção. O carregamento é aplicado distribuído em todos os nós das extremidades, a fim de garantir a compressão uniforme do protótipo.

A metodologia apresentada foi utilizada para a construção dos modelos de elementos finitos de colunas com e sem perfurações. A figura 2.4 apresenta os modelos gerados, com e sem perfurações, onde pode ser observado o acoplamento das rotações nos nós das extremidades, o que difere o modelo daquele apresentado na figura 2.3.

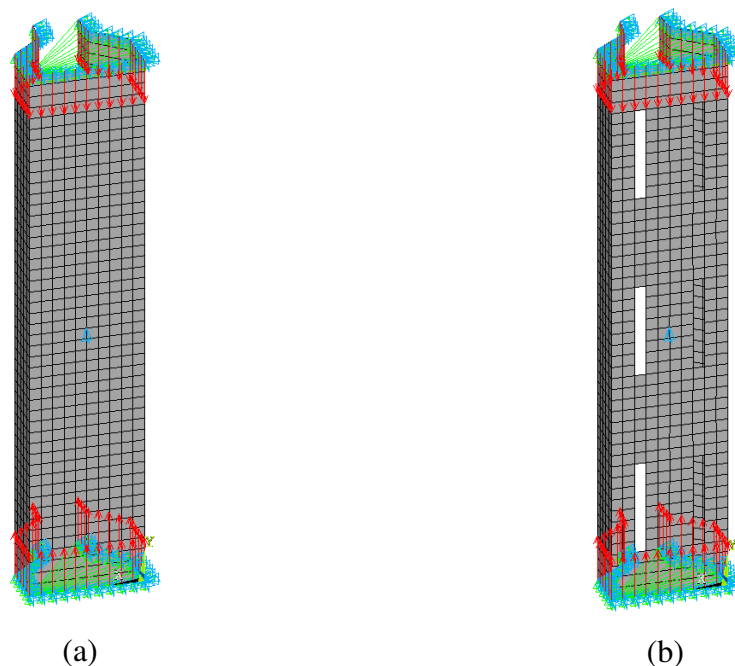


Figura 2.4. Malhas de elementos finitos utilizadas (a) Modelo sem furos; (b) Modelo com furos.

## ***2.4 Análise da estabilidade linear de seções do tipo rack***

### **2.4.1 Introdução**

As cargas críticas das colunas são obtidas com a avaliação de sua estabilidade em diversos comprimentos, conforme apresentado na figura 2.2. Assim, pode-se avaliar a influência dos diversos modos de flambagem para os vários comprimentos da coluna.

Os programas baseados em Faixas Finitas (CUFSM) e GBT (GBTul) fazem esta análise da estabilidade. A modelagem em elementos finitos apresentada, porém, contempla uma coluna com comprimento fixo por vez. Desta forma, a elaboração manual de modelos em elementos finitos nos diversos comprimentos necessários torna-se trabalhoso.

Assim, optou-se por usar a linguagem de programação paramétrica disponível no ANSYS (APDL- ANSYS Parametric Design Language) visando a automatização de processos ou ainda a construção de modelos baseados em parâmetros que possam ser variáveis de estudo. A APDL possibilita estruturas de repetição, macros, if-then-else, do-loops e operações com escalares, vetores e matrizes.

Esta ferramenta do ANSYS foi utilizada nesta etapa do estudo, de modo a automatizar a análise numérica. O desenvolvimento da rotina se deu em duas etapas. Na

primeira delas foram analisadas colunas sem perfurações, com o objetivo de calibrar a rotina desenvolvida a partir de comparações com resultados obtidos no GBTul. A segunda etapa foi a inserção das perfurações no modelo. Os resultados das duas etapas estão nos itens 2.4.2 e 2.4.3.

### **2.4.2 Análise linear de colunas sem perfurações**

Nesta etapa do trabalho foi desenvolvida uma rotina para a obtenção das cargas críticas das colunas visando a análise de sua estabilidade, que segue as etapas descritas a seguir.

1-Iniciação do ANSYS, definição do tipo de análise (estrutural) e ajuste das opções de visualização do modelo.

2-Definição dos parâmetros do modelo, ou seja, da geometria da seção, com a inserção das dimensões de seus elementos (alma, flange, flange de ligação e enrijecedor) (Figura 2.1). Definem-se ainda o comprimento inicial do protótipo, o incremento de comprimento a ser utilizado e o número de comprimentos que deverão ser simulados.

3-Definição do tipo de elemento e inserção das propriedades mecânicas do aço. Utilizou-se o elemento SHELL181 com integração completa conforme apresentado no item 2.3.1.

4-Geração das áreas a partir dos parâmetros inseridos na etapa 2.

5-Geração da malha de elementos finitos com o nível de refinamento descrito anteriormente.

6-Aplicação das condições de contorno.

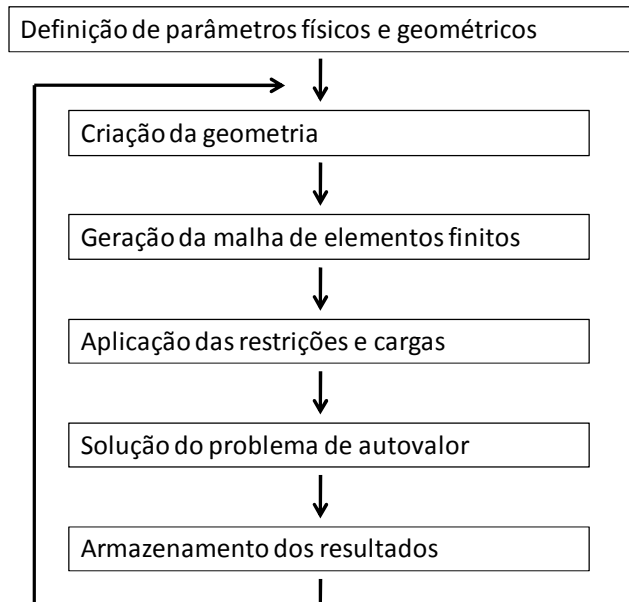
7 - Acoplamento das rotações em torno dos eixos perpendiculares ao eixo da coluna em todos os nós das extremidades.

8 -Aplicação das cargas de compressão. Esta aplicação é feita distribuindo-se uma carga unitária em todos os nós das extremidades.

9 -Solução do problema de autovalor, para a determinação da carga de flambagem elástica e do modo a ela associado. São determinados os três primeiros valores de cargas críticas e os três primeiros modos de flambagem para cada comprimento da coluna.

10 -Armazenagem dos resultados para cada comprimento. Esta armazenagem é feita com o preenchimento de um vetor com os resultados das três primeiras cargas críticas para cada comprimento e ainda com a captura de uma imagem JPEG de cada modo obtido para análise posterior. A figura 2.5 apresenta o fluxograma da rotina implementada.





**Figura 2.5. Análise da estabilidade elástica da coluna sem furos.**

A rotina em linguagem de programação paramétrica foi utilizada para a obtenção das cargas críticas para a seção apresentada na figura 2.1 e seus resultados foram comparados com os obtidos pelo GBTul. A figura 2.6 apresenta os resultados obtidos. Nela são apresentadas as cargas críticas obtidas pela GBT e pelo método dos elementos finitos, respectivamente através do GBTul e do ANSYS, para colunas sem perfurações. No gráfico podem ser observadas as cargas críticas para os três primeiros modos. Em geral, existe uma boa correlação entre as curvas, com diferença variando entre 2,82% e 4,5%.

Pode-se ainda observar que os modos de flambagem observados são semelhantes nas duas simulações, conforme figura 2.7. Nesta figura, pode-se observar que para o comprimento de 500 mm, tanto o ANSYS (a) como o GBTUL (c) indicam o modo distorcional com uma meia onda, enquanto para o comprimento de 1000 mm, o ANSYS (b) e o GBTul (d) captaram o modo distorcional com o desenvolvimento de duas meias ondas.

Por meio das comparações efetuadas, pode-se comprovar a eficiência da rotina de programação desenvolvida na obtenção das cargas críticas e dos modos associados. Esta rotina foi, então, adaptada para contemplar as perfurações existentes nas colunas.

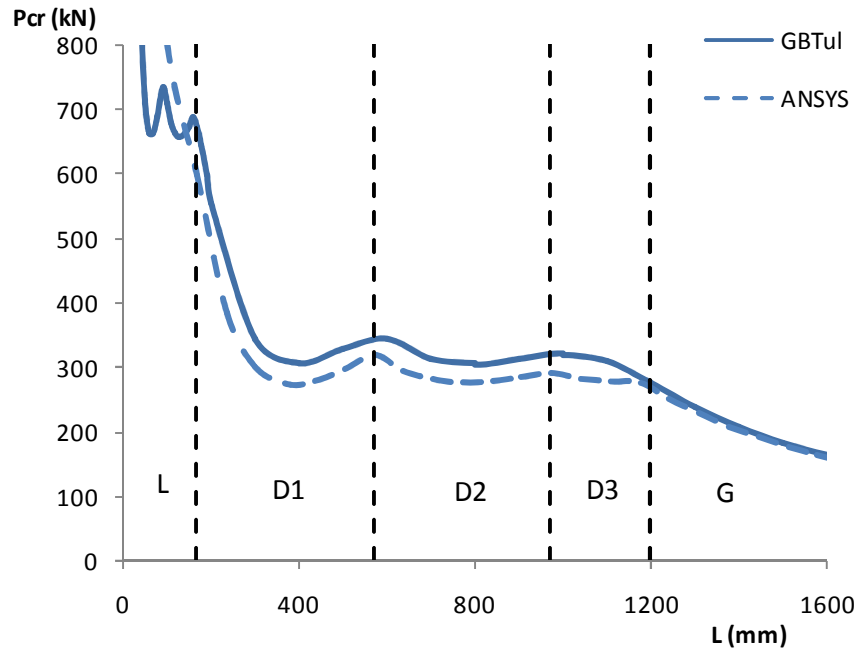


Figura 2.6. Comparação entre os resultados do ANSYS e do GBTUL.

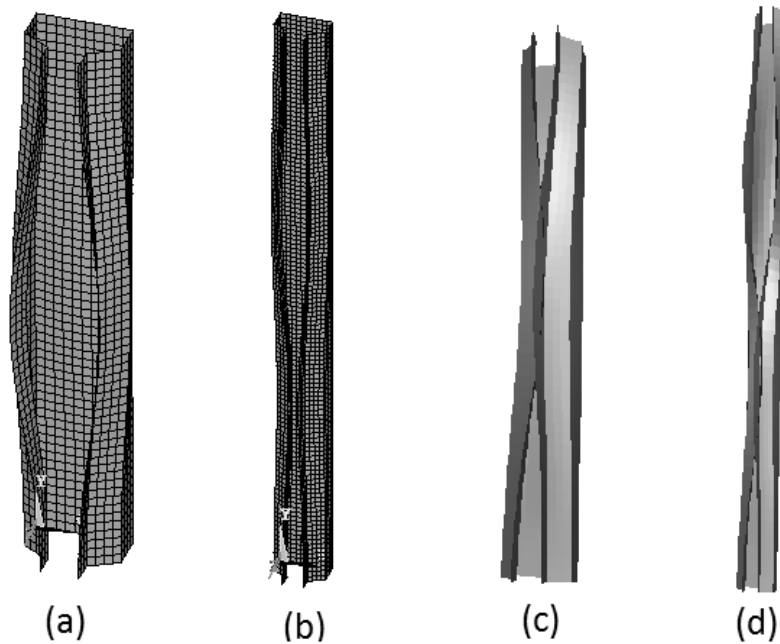


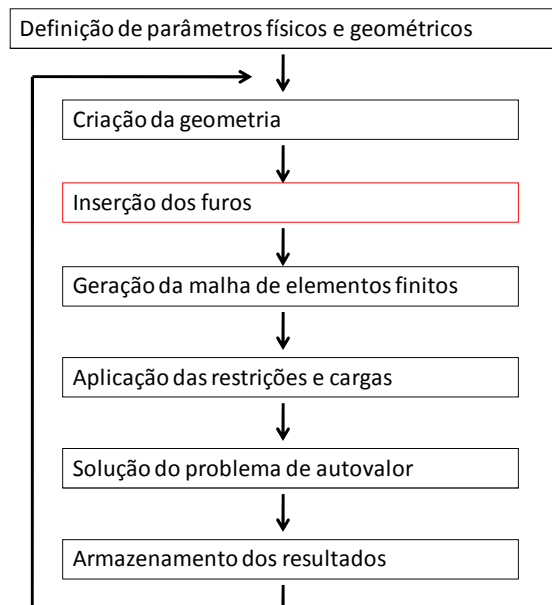
Figura 2.7. Modos de flambagem: ANSYS (a)  $L= 500$  mm e (b)  $L=1000$  mm; GBTul (c)  $L=500$  mm e (d)  $L= 1000$  mm.

### 2.4.3 Análise linear de colunas com perfurações

Os perfis utilizados para a fabricação das colunas dos sistemas de armazenagem industrial possuem perfurações ao longo de sua altura, para facilitar a conexão das

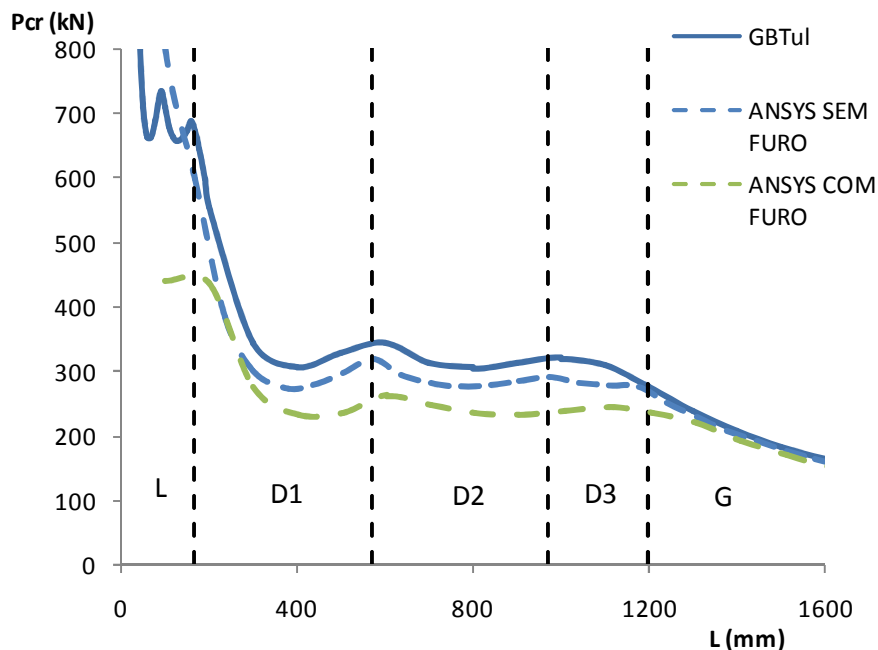
ligações, o que pode influenciar a resistência destes elementos. Estes furos inviabilizam sua análise através dos programas CUFSM e GBTul, o que demanda a utilização do ANSYS. Desta forma, foram introduzidas as perfurações na rotina de programação apresentada na seção anterior, de modo a possibilitar a obtenção das cargas críticas para perfis com perfurações.

A inserção dos furos é feita entre as etapas 4 (construção das áreas) e 5 (geração da malha) na rotina de programação, sendo esta a única alteração na estrutura do programa. É prevista a inserção de dois furos com largura igual a 10% da largura da alma e com o comprimento igual a uma porcentagem qualquer da largura da alma. É previsto ainda um espaçamento entre os furos igual ao seu comprimento, e um espaçamento entre a extremidade da coluna e o furo igual à metade do comprimento do furo. Durante todo o processo, procura-se manter a uniformidade da malha, ou seja, a regularidade da geometria dos elementos. A figura 2.8 apresenta o fluxograma da análise linear de colunas com perfurações.



**Figura 2.8.** Análise da estabilidade elástica de colunas com perfurações.

Foi feita a análise para a seção apresentada na figura 2.1, inserindo nas colunas perfurações com comprimento igual a 40% da largura da alma, e seus resultados foram comparados com os resultados para a coluna sem furos. A figura 2.9 apresenta os resultados obtidos.



**Figura 2.9. Comparação entre a coluna sem furos e coluna perfurada.**

Observa-se que, conforme esperado, as perfurações reduziram a resistência da coluna em comparação com o comportamento da coluna sem furos, no que se refere aos modos local e distorcional. No entanto, observa-se que o modo global não é afetado de forma significativa pela presença das perfurações.

As análises de estabilidade das colunas perfuradas a partir da rotina de programação paramétrica apresentada foram utilizadas para a avaliação do comportamento das colunas para posterior definição dos protótipos a serem ensaiados. Após os ensaios, foi feita a análise numérica não linear dos protótipos, conforme apresentado no item 2.5.

## ***2.5 Análise não linear de perfis do tipo rack submetidos à compressão***

Além da análise de estabilidade linear dos perfis do tipo rack perfurados sob compressão centrada, foi feita também a análise não linear dos mesmos, com a consideração dos efeitos de segunda ordem e também das propriedades elasto-plásticas do aço. Esta análise foi feita para os protótipos ensaiados, cujo comprimento foi determinado a partir das análises lineares apresentadas anteriormente.

Para efetuar esta análise, construiu-se uma rotina de programação na linguagem de programação do ANSYS (APDL), que segue as etapas a seguir.

1 - Iniciação do ANSYS e definição do tipo de análise (estrutural).

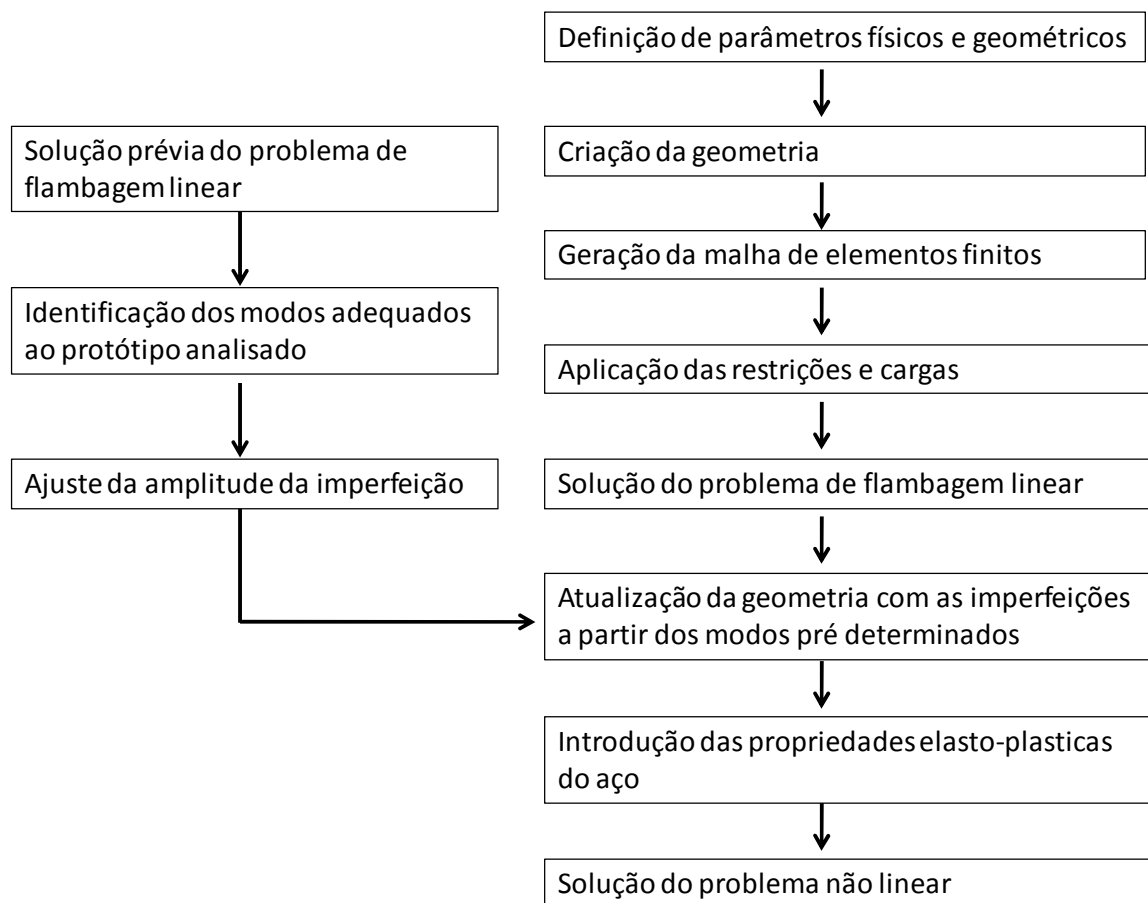
2 - Resolução do problema de flambagem elástica, utilizando a mesma seqüência apresentada no item 2.4.2, porém considerando as dez primeiras cargas críticas e seus respectivos modos de flambagem.

3 - Introdução das imperfeições geométricas no modelo. Esta etapa é importante pois são estas imperfeições que irão induzir a flambagem. A escolha dos modos a serem combinados para cada protótipo é feita após análise de estabilidade linear prévia, em que os modos são observados e, posteriormente, introduzidos no modelo ponderados por fatores de imperfeição, apresentados no capítulo 6 juntamente aos resultados destas análises. Ressalta-se a importância desta etapa uma vez que ela é decisiva no desenvolvimento do modo de flambagem e mesmo da resistência do modelo.

4 - Introdução das propriedades elasto-plásticas do aço. Neste trabalho, esta introdução foi feita aproximando-se o Diagrama Tensão x Deformação real através de um diagrama bilinear, considerando-se a Tensão de Escoamento, o Módulo de Elasticidade e o Módulo Tangente obtidos em ensaios de caracterização do material.

5 - Solução do problema não linear. Nesta etapa, foi aplicada, distribuída pelos nós da extremidade dos modelos, uma carga axial de valor superior àquele esperado no escoamento da seção. A fim de garantir a convergência dos resultados, esta carga foi aplicada em 50 subetapas, e foi utilizado o Método do Comprimento de Arco. Ao fim de cada subetapa, os resultados foram armazenados, para que se possam traçar as trajetórias de equilíbrio das colunas. O critério de parada para o Comprimento de Arco foi a fixação de um deslocamento limite na estrutura, baseado nas observações feitas durante os ensaios experimentais.

A partir das rotinas descritas, foi possível a análise da flambagem não linear dos protótipos, com a obtenção das curvas Carga x Deslocamento em seus nós, visando comparação com os resultados experimentais. A figura 2.10 apresenta o fluxograma da análise não linear desenvolvida.



**Figura 2.10. Análise não linear dos protótipos.**

### 3 Resultados da análise numérica

#### 3.1 Introdução

Este capítulo apresenta os resultados da análise numérica das seções, que foram importantes na definição dos ensaios experimentais. São apresentados os resultados obtidos a partir dos modelos de elementos finitos apresentados no capítulo anterior.

Primeiramente serão apresentados os resultados da análise de flambagem elástica das colunas, que norteou a definição dos protótipos utilizados na fase experimental deste trabalho. Em uma segunda etapa, apresentam-se os resultados da análise não linear do modelo, apresentando-se uma visão do comportamento das colunas.

A seção adotada, a partir de análises preliminares (Souza (2011)), foi a seção cujas dimensões são apresentadas na figura 3.1. Esta seção apresenta os modos local e distorcional com cargas críticas menores que a carga de escoamento da seção. Para esta seção foram consideradas perfurações retangulares ao longo da altura da coluna, sendo estes furos de comprimento  $h_f$ , igual a 60% e 80% da largura da alma.. A figura 3.1 apresenta a seção adotada e o arranjo das perfurações.

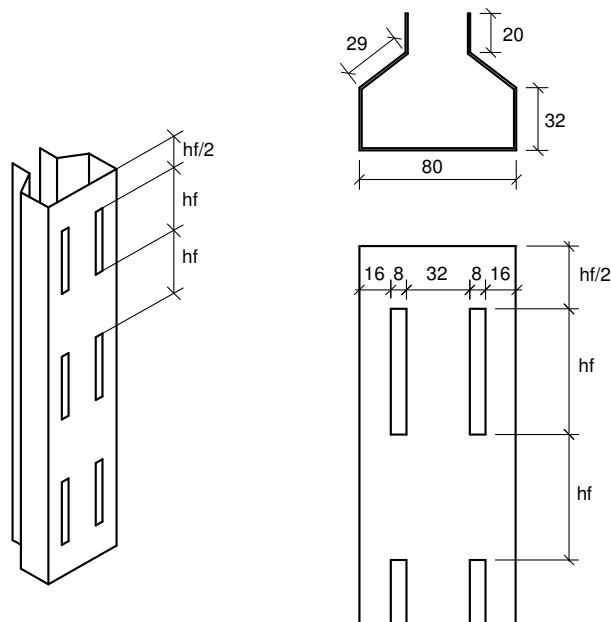


Figura 3.1. Seção adotada e dimensões das perfurações (Dimensões em mm).

### 3.2 Análise de flambagem elástica da seção

Nesta etapa, serão apresentadas as cargas críticas para a seção com e sem perfurações. Através destas cargas críticas é possível a avaliação dos modos de flambagem em cada faixa de comprimentos do protótipo.

A figura 3.2 apresenta as cargas críticas obtidas para a coluna sem perfurações. Na figura apresentam-se os dois primeiros modos de flambagem e ainda os modos críticos observados em cada um deles. As linhas tracejadas inseridas no gráfico delimitam as faixas de comprimento associadas aos diferentes modos. Na primeira faixa ( $L < 256$  mm), observa-se a ocorrência do modo local. Na segunda faixa ( $256$  mm  $< L < 1600$  mm) observa-se a ocorrência do modo local e distorcional, variando o número de meias ondas e na terceira faixa ( $L > 1600$  mm) observa-se a ocorrência do modo global.

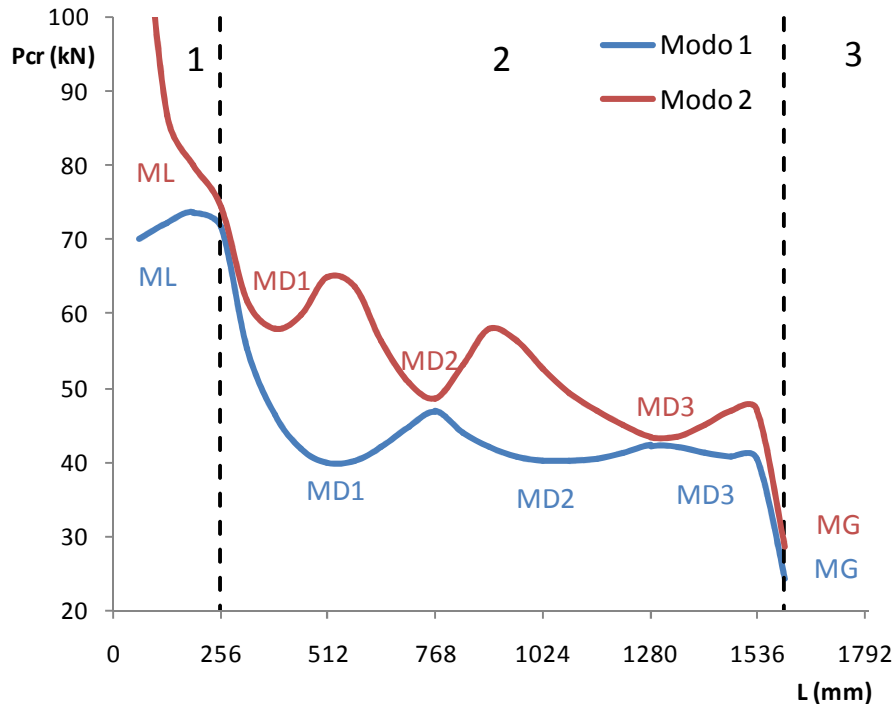
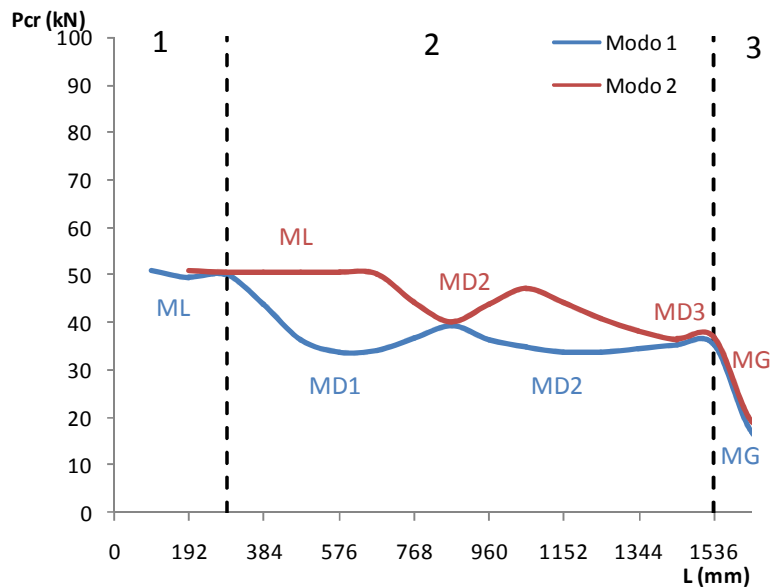


Figura 3.2. Cargas críticas para a coluna sem furos na alma.

As cargas críticas e os modos críticos para a coluna com furos cujo comprimento é igual a 60% da largura da alma são apresentadas na figura 3.3. As linhas tracejadas delimitam a faixa de ocorrência dos modos de flambagem. Para comprimentos inferiores a 288 mm observa-se a ocorrência do modo local. Deste comprimento até 1536 mm, ocorre o modo distorcional com variado número de meias ondas e, por fim, deste



comprimento até 1536 mm observa-se a ocorrência do modo distorcional, variando-se o número de meias ondas. Acima deste comprimento, ocorre o modo global.



**Figura 3.3. Cargas críticas para a coluna com furos em que  $h_f=48$  mm (60%  $b_w$ ).**

Observa-se na figura 3.4, que apresenta as cargas críticas para as colunas com furos cuja comprimento é igual a 64 mm (80% da largura da alma), que em comprimentos inferiores a 384 mm ocorre modo local na coluna. Para comprimentos entre 384 e 1536 mm ocorre modo distorcional e, acima deste comprimento, surge o modo global.

A definição da geometria dos protótipos que serão utilizados na etapa experimental desta pesquisa baseou-se nos resultados numéricos da análise de estabilidade linear. A escolha foi feita considerando os seguintes aspectos:

- Seções em que o colapso ocorre por flambagem, eliminando-se as seções em que há a probabilidade de falha por escoamento do aço;
- Comprimentos que permitam o ensaio de compressão centrada no equipamento disponível;
- Variedade das dimensões dos furos, a fim de que se tenha parâmetros que permitam a comparação de sua influência na resistência e no comportamento das seções.
- Modo distorcional na faixa 2, em valores próximos à ocorrência dos modos local e global.

A tabela 3.1 apresenta o resumo dos modos de flambagem observados na análise numérica e que nortearam a escolha dos protótipos.

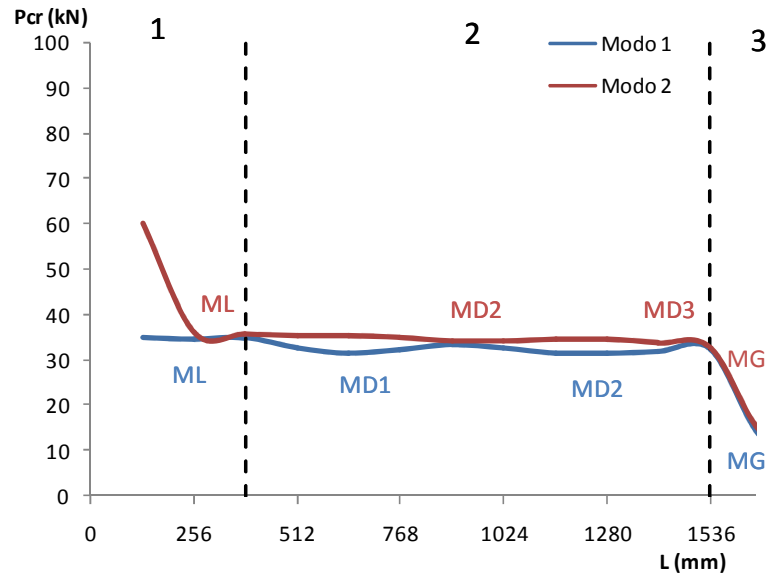


Figura 3.4. Cargas críticas para a coluna com furos em que  $h_f=64$  mm (80%  $b_w$ ).

Tabela 3.1. Resumo dos modos observados.

Faixa	Sem Furo	$h_f= 60\% b_w$	$h_f= 80\% b_w$
1	-	L	L
2	D	D	D
3	G	G	G

O estudo experimental será conduzido em duas etapas. Na primeira etapa serão ensaiadas colunas em que pode haver a ocorrência do modo distorcional, chamadas neste trabalho colunas curtas (CC), com o objetivo de avaliar a influência das perfurações neste fenômeno. A tabela 3.2 apresenta os protótipos que serão utilizados nesta etapa. Para as colunas sem furos (CC-SF) e com furo de comprimento igual a 60% da largura da alma (CC-F60), espera-se a ocorrência do modo distorcional. Já para a coluna CC-F80 (comprimento do furo igual a 80% da largura da alma), a carga crítica distorcional é bastante próxima à carga crítica do modo localizado de placa, caracterizado por deslocamentos perpendiculares ao plano da alma concentrado na região entre as perfurações.

**Tabela 3.2. Protótipos da coluna curta.**

Protótipo	Seção	Altura (mm)	Comprimento do furo (mm)	Altura do furo/Largura da alma (%)
CC-SF	80x32x29x20x1,2	384	-	-
CC-F60	80x32x29x20x1,2	384	48	60
CC-F80	80x32x29x20x1,2	384	64	80

A segunda etapa, visando à avaliação da ocorrência do modo distorcional e a possibilidade da influência das imperfeições em seu desenvolvimento será o ensaio de compressão centrada de colunas médias (CM). A tabela 3.3 apresenta os protótipos utilizados nesta etapa. Para as colunas sem furos (CM-SF) e com furo de comprimento igual a 60% da largura da alma (CM-F60), existe a ocorrência do modo distorcional, nas proximidades da ocorrência do modo global. Já para a coluna com furo de comprimento igual a 80% da largura da alma (CM-F80), o comprimento escolhido corresponde ao comprimento crítico para o modo distorcional com a formação de uma meia onda (MD1), prevalecendo a ocorrência deste modo.

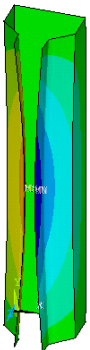
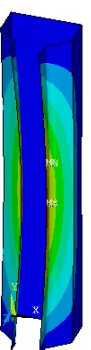
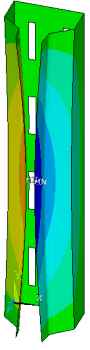
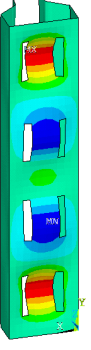
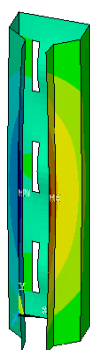
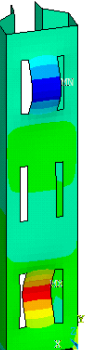
**Tabela 3.3. Protótipos da coluna média.**

Protótipo	Seção	Altura (mm)	Comprimento do furo (mm)	furo/Largura da alma (%)
CM-SF	80x32x29x20x1,2	1600	-	-
CM-F60	80x32x29x20x1,2	1536	48	60
CM-F80	80x32x29x20x1,2	640	64	80





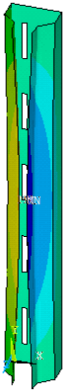

Ressalta-se que os comprimentos escolhidos para os protótipos, além de atenderem aos critérios de ocorrência dos modos desejados ainda têm o objetivo de acomodarem adequadamente as perfurações.

As tabelas 3.4 e 3.5 apresentam os modos de flambagem e as cargas críticas para os modos de flambagem dos protótipos a serem ensaiados, para as colunas curtas e médias, respectivamente. os modos são identificados como LP (modo localizado de placa) e DN (modo distorcional com a formação de N meias ondas).

**Tabela 3.4. Modos de flambagem e cargas críticas nas colunas curtas (CC).**

Protótipo	1° Modo	2° Modo
<p>CC-SF L=384 mm P<sub>y</sub> =64,5 kN</p>	 <p style="text-align: center;">D1</p> <p style="text-align: center;">P<sub>cr</sub> = 45,50 kN</p>	 <p style="text-align: center;">FT</p> <p style="text-align: center;">P<sub>cr</sub> = 57,88 kN</p>
<p>CC-F60 L=384 mm P<sub>y</sub> =61,2 kN</p>	 <p style="text-align: center;">D1</p> <p style="text-align: center;">P<sub>cr</sub> = 41,85 kN</p>	 <p style="text-align: center;">LP</p> <p style="text-align: center;">P<sub>cr</sub> = 50,16 kN</p>
<p>CC-F80 L=384 mm P<sub>y</sub> =61,2 kN</p>	 <p style="text-align: center;">D1</p> <p style="text-align: center;">P<sub>cr</sub> = 34,31 kN</p>	 <p style="text-align: center;">LP</p> <p style="text-align: center;">P<sub>cr</sub> = 35,24 kN</p>

**Tabela 3.5. Modos de flambagem e cargas críticas nas colunas média (CM).**

Protótipo	1° Modo	2° Modo
<p>CM-SF L=1600 mm <math>P_y = 64,5</math> kN</p>	 <p style="text-align: center;">D3</p> <p style="text-align: center;"><math>P_{cr} = 25,08</math> kN</p>	 <p style="text-align: center;">D3</p> <p style="text-align: center;"><math>P_{cr} = 29,10</math> kN</p>
<p>CM-F60 L=1536 mm <math>P_y = 61,2</math> kN</p>	 <p style="text-align: center;">D3</p> <p style="text-align: center;"><math>P_{cr} = 31,43</math> kN</p>	 <p style="text-align: center;">D3</p> <p style="text-align: center;"><math>P_{cr} = 35,52</math> kN</p>
<p>CM-F80 L=640 mm <math>P_y = 61,2</math> kN</p>	 <p style="text-align: center;">D1</p> <p style="text-align: center;"><math>P_{cr} = 30,59</math> kN</p>	 <p style="text-align: center;">D2</p> <p style="text-align: center;"><math>P_{cr} = 34,64</math> kN</p>

### 3.3 Análise não linear dos protótipos

Nesta etapa do trabalho foi feita a análise não linear prévia dos protótipos a ser ensaiados. Foi considerada a tensão de escoamento nominal do aço SAE ( $f_y = 180$  MPa) e utilizado o procedimento descrito no item 2.5. O objetivo deste estudo é uma avaliação do comportamento pós flambagem da coluna visando o ajuste do procedimento experimental.

#### 3.3.1 Modelo CC-SF

A figura 3.5 apresenta os deslocamentos em mm na carga última na alma e nos flanges de ligação da coluna sem furos para o modelo CC-SF que possui comprimento igual a 384 mm.

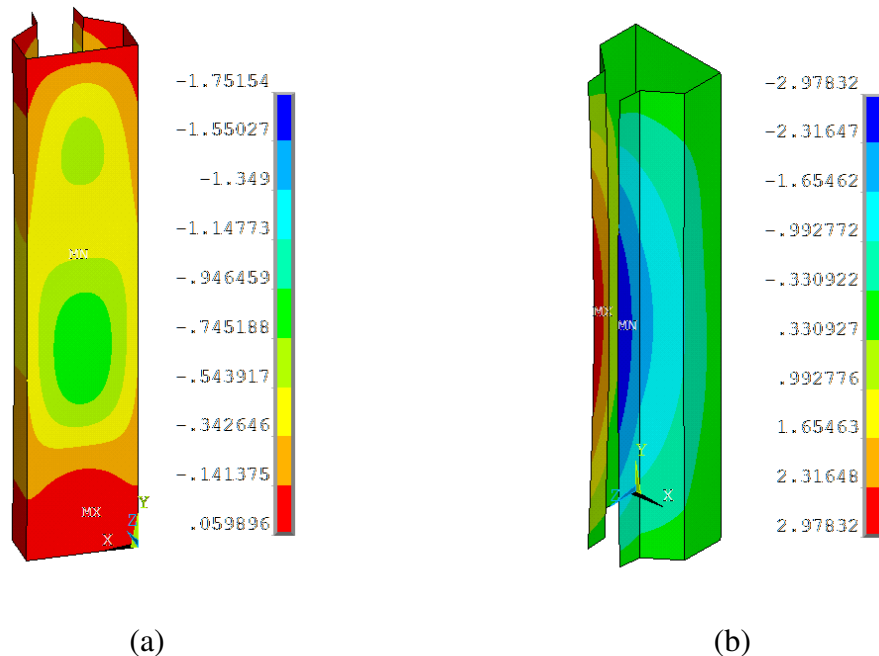


Figura 3.5. Deslocamentos em mm no modelo CC-SF: (a) alma , (b) flanges de ligação.

Observa-se que os deslocamentos na alma são inferiores aos deslocamentos nos flanges de ligação, indicando o modo distorcional para este comprimento da coluna. Observa-se também que os deslocamentos na alma são devidos ao fechamento da seção no modo distorcional.

### 3.3.2 Modelo CC-F60

A figura 3.6 apresenta os resultados para o modelo CC-F60 para os deslocamentos em mm na carga última das colunas com perfurações na alma cujo comprimento do furo é igual a 60% da largura da alma. O modelo possui 384 mm de comprimento.

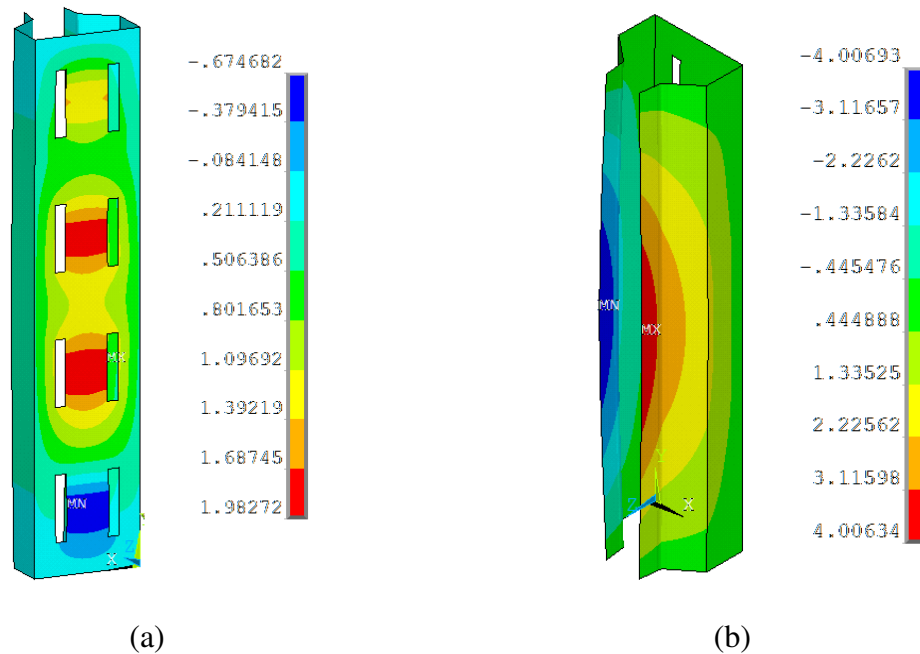


Figura 3.6. Deslocamentos em mm no modelo CC-SF: (a) alma , (b) flanges de ligação.

Assim como na coluna sem furos, observa-se que os deslocamentos na alma são inferiores aos deslocamentos nos flanges da coluna. Observa-se também que os deslocamentos na alma concentram-se nas regiões entre os furos, sendo que a abertura da seção faz com que a região central da alma desloque-se para o interior da seção.

### 3.3.3 Modelo CC-F80

A figura 3.7 apresenta os deslocamentos em mm para o modelo CC-F80, na carga última, na alma e no flange da coluna com perfurações de comprimento igual a 80% da largura da alma. O modelo é de coluna curta e possui 384 mm de comprimento.

Observa-se que neste caso existe uma proximidade entre os deslocamentos observados nos flanges de ligação e na alma, devido à redução da resistência à

flambagem introduzida pelas perfurações neste elemento. Mais uma vez a análise demonstra coerência entre os deslocamentos da alma e dos flanges.

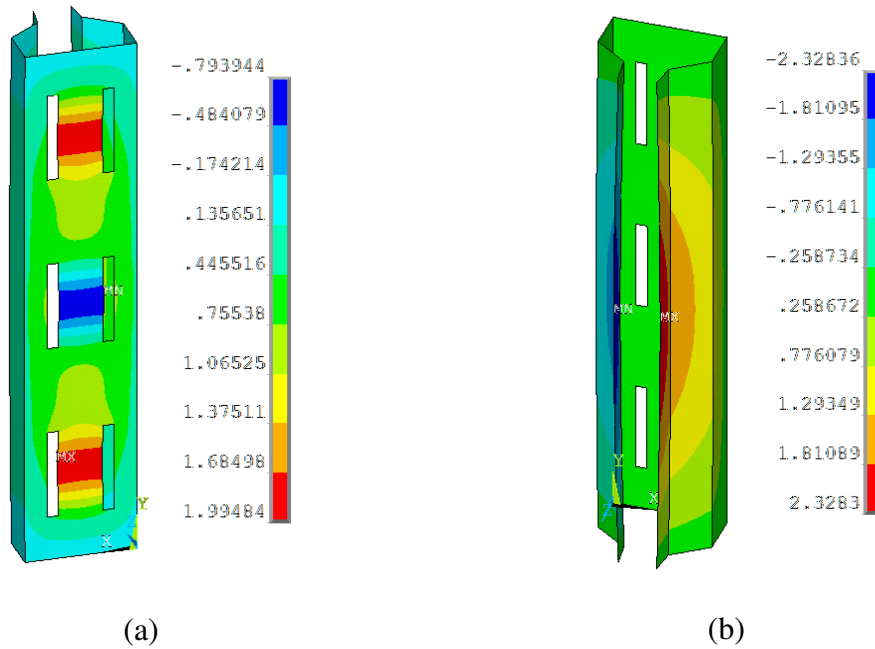
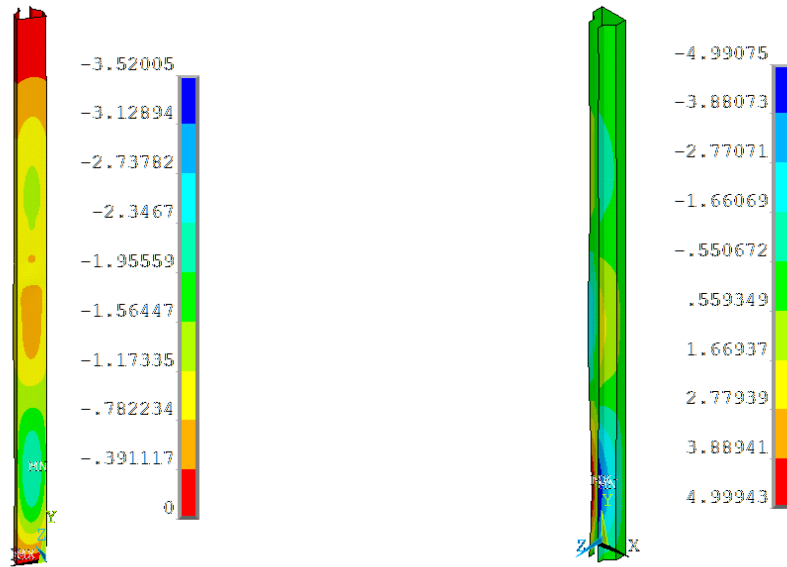


Figura 3.7. Deslocamentos em mm no modelo CC-F80: (a) alma , (b) flanges de ligação.

### 3.3.4 Modelo CM-SF

A figura 3.8 apresenta os deslocamentos em mm, na carga ultima, na alma e nos flanges de ligação da coluna sem furos, modelo CM-SF com 1600 mm de comprimento. Observa-se que há um fechamento da seção na metade inferior da altura da coluna, e que os deslocamentos no flange são superiores aos deslocamentos na alma. Mais uma vez, observa-se que o deslocamento da alma para a parte posterior da seção deriva-se do fechamento dos flanges naquela altura.





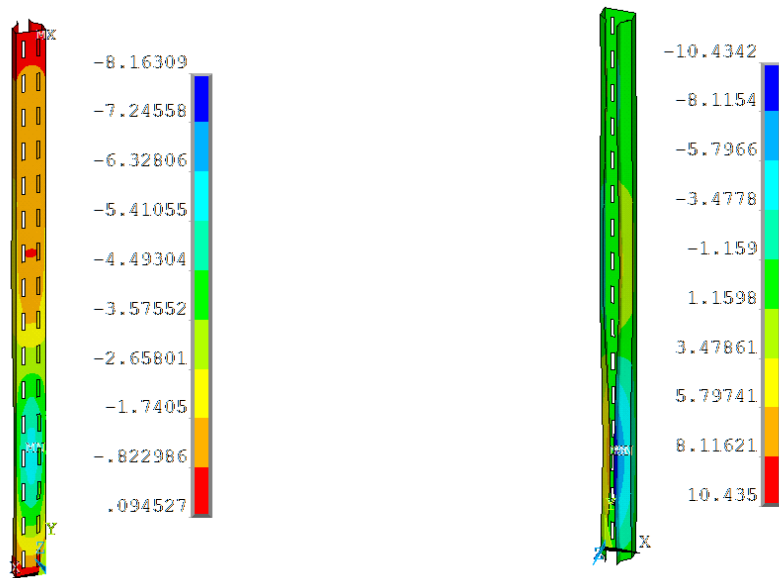
(a)

(b)

Figura 3.8. Deslocamentos em mm no modelo CM-SF: (a) alma , (b) flanges de ligação.

### 3.3.5 Modelo CM-F60

A figura 3.9 apresenta os deslocamentos em mm na alma e no flange de ligação da coluna CM-F60, que possui furos na alma de comprimento igual a 60% da largura da alma. A altura deste modelo é 1536 mm.



(a)

(b)

Figura 3.9. Deslocamentos em mm no modelo CM-F60: (a) alma , (b) flanges de ligação.

Observa-se neste caso comportamento similar ao da coluna sem perfurações, indicando que as perfurações não influenciaram significativamente o comportamento da coluna.

### 3.3.6 Modelo CM-F80

A figura 3.10 apresenta os deslocamentos em mm na alma e no flange de ligação da coluna com furos na alma de comprimento igual a 80% da largura da mesma.

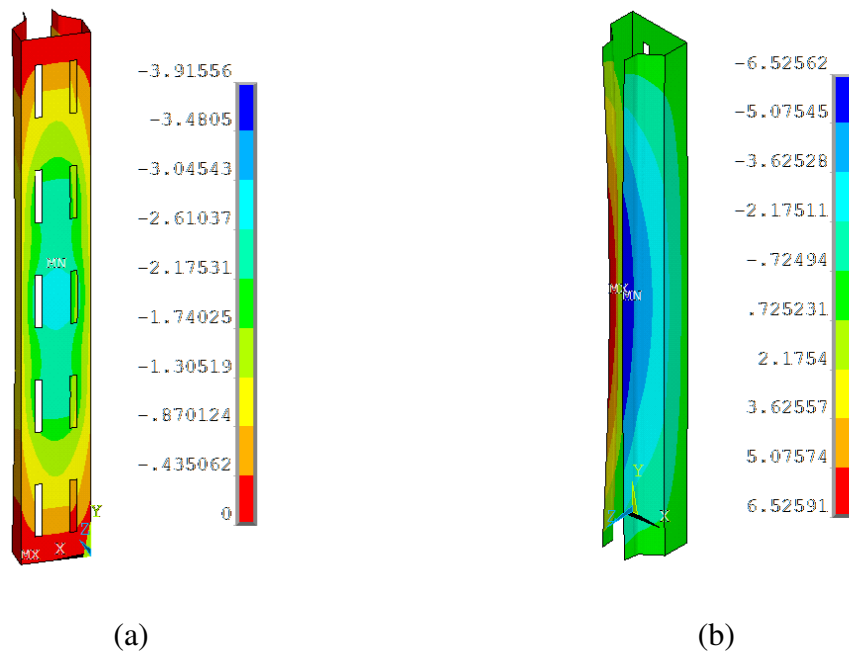


Figura 3.10. Deslocamentos em mm no modelo CM-F60: (a) alma , (b) flanges de ligação.

Observa-se que ocorre o fechamento da seção com a formação de uma meia onda no modo distorcional. Observam-se ainda deslocamentos na alma da coluna, com deslocamentos para fora da seção, compatíveis com o fechamento observado nos flanges de ligação.

O modelo não linear desenvolvido nesta etapa foi utilizado em comparações com os resultados experimentais, para validação da eficiência do modelo na representação do comportamento da estrutura e também na avaliação dos diversos modos que podem ocorrer em cada um dos protótipos ensaiados. Esta comparação será apresentada no capítulo 6 deste trabalho.

## 4 Programa experimental

Esta etapa do trabalho tem o objetivo de validar o procedimento numérico desenvolvido para a avaliação da influência dos furos na estabilidade das seções do tipo rack.

Este capítulo descreve o procedimento experimental empregado. Primeiramente, definem-se os protótipos que foram ensaiados, seguido de sucinta descrição do equipamento utilizado. É apresentada esquematicamente a montagem experimental e finalmente a instrumentação utilizada e o sistema de aquisição de dados.

### 4.1 Levantamento das imperfeições geométricas

Sabe-se que as imperfeições geométricas têm importante influência no comportamento das estruturas em geral e, mais acentuadamente, em seções formadas a frio. Desta forma, todos os protótipos tiveram suas imperfeições levantadas. Foram determinadas as dimensões reais dos componentes da seção, e dos ângulos da mesma em diversas seções ao longo do comprimento dos protótipos, sendo utilizados os instrumentos apresentados na figura 4.1.



Figura 4.1. Instrumentos utilizados no levantamento das imperfeições.

### 4.2 Máquina de ensaios

Os ensaios foram realizados na máquina de ensaios universal INSTRON SATEC 5569. Esta máquina possui capacidade de carga de 2 MN, e realiza ensaios de tração e compressão. Possui aplicação de carga por sistema servo-hidráulico, e controle de carga e deslocamentos.

A máquina universal INSTRON permite ainda o posicionamento de rótulas que garantem a verticalidade e a centralização da carga aplicada ao longo de todo o ensaio, o

que foi utilizado neste trabalho. A figura 4.2 apresenta aspecto geral da máquina. Destaca-se que os ensaios de caracterização do material também foram realizados neste equipamento.



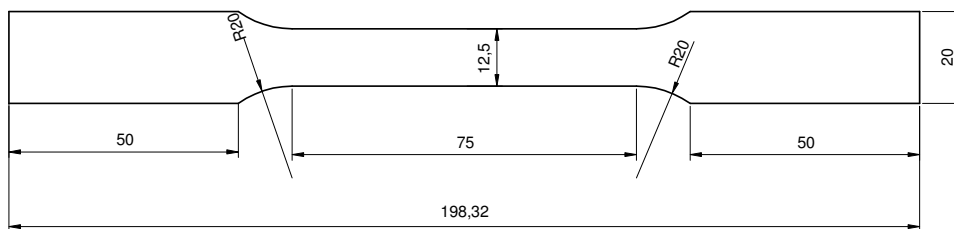
**Figura 4.2. Prensa hidráulica INSTRON.**

### ***4.3 Ensaio propostos***

#### **4.3.1 Ensaio de caracterização do aço**

O ensaio de caracterização do aço é necessário para a determinação de suas propriedades elasto-plásticas, importantes para a análise numérica não linear que foi realizada posteriormente.

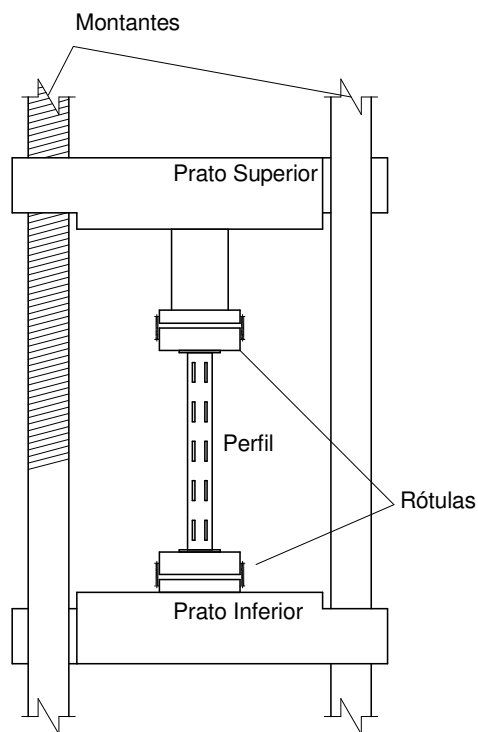
Para a realização destes ensaios foram retirados corpos de prova de protótipo previsto para este fim. Os corpos de prova obedeceram às prescrições da ABNT NBR 6892 (2002). A figura 4.3 apresenta as dimensões do corpo de prova ensaiado.



**Figura 4.3. Corpo de Prova a ser ensaiado (Dimensões em mm).**

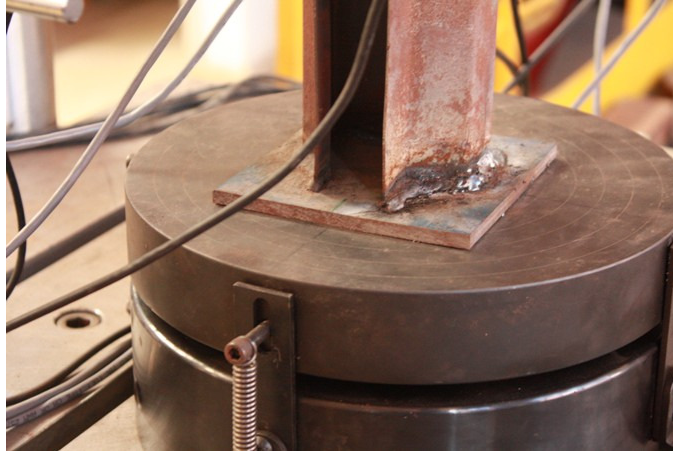
### 4.3.2 Ensaio de compressão centrada

Foram realizados ensaios de compressão centrada de colunas compostas por seções formadas a frio do tipo rack. Um dos principais procedimentos a serem adotados é a garantia de restrição do empenamento e abertura nas seções extremas, o que foi feito com a soldagem de chapas de extremidade com filete contínuo em toda a seção. Foram utilizadas chapas com 6.3 mm de espessura, posicionadas de modo a coincidir seu centro de gravidade com o da seção. Para garantir a verticalidade das cargas aplicadas durante todo o ensaio foram utilizadas rótulas universais disponíveis na máquina INSTRON. O posicionamento do corpo de prova foi feito alinhando-se o centro de gravidade da seção ao centro da aplicação de cargas. A figura 4.5 apresenta esquema geral da montagem experimental.



**Figura 4.4. Esquema geral da montagem dos ensaios de compressão centrada.**

A metodologia do ensaio inicia-se com o posicionamento do corpo de prova de forma a se garantir a centralidade da aplicação da carga. Para isto, os eixos que passam pelo centro das rótulas são marcados para, posteriormente, serem alinhados visualmente aos eixos das placas de extremidade do protótipo, conforme apresenta a figura 4.5.



**Figura 4.5. Alinhamento do protótipo com a rótula.**

A seguir, as rótulas são ajustadas de modo a garantir seu apoio uniforme em toda a placa de extremidade. Isto se faz ajustando o nível da rótula superior, ao mesmo tempo que se controla a verticalidade da coluna. Neste momento, o controle da uniformidade da compressão na seção é verificado a partir dos extensômetros instalados na alma e no flange das seções, que serão apresentados no próximo item.

Em seguida, é aplicada a carga de compressão. Esta aplicação é feita com controle de deslocamentos da máquina, a uma velocidade de 0,3 mm/min. A baixa velocidade adotada deve-se à necessidade da observação do comportamento da coluna em cada estágio de carregamento, a fim de identificar a ocorrência dos modos de flambagem. O critério de parada para o ensaio foi manual em todos os ensaios, a partir do momento em que ocorre a perda da capacidade de carga no protótipo associado a deslocamentos excessivos no mesmo.

#### **4.4 Instrumentação e aquisição de dados**

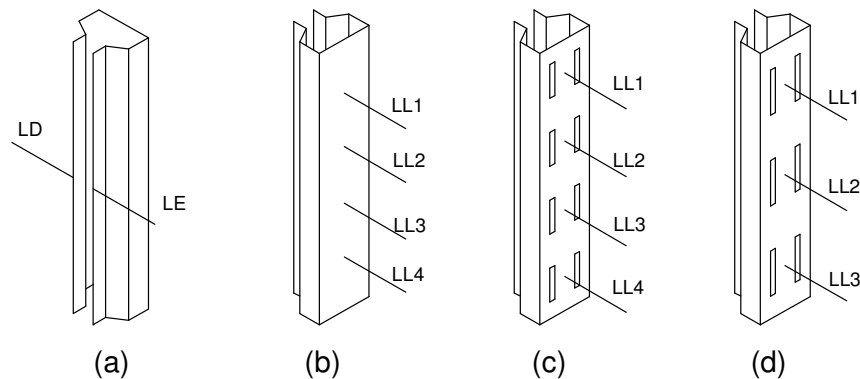
Para a realização destes ensaios de compressão centrada, foram utilizados a célula de carga da prensa INSTRON, transdutores de deslocamento (LVDT) da própria máquina e também avulsos e extensômetros elétricos de resistência. O objetivo desta instrumentação é a observação da ocorrência dos modos local e distorcional e também a

avaliação do comportamento pós-crítico das seções. A aquisição de dados foi feita através da própria prensa e também por um sistema de aquisição independente.

#### 4.4.1 Transdutores de deslocamento (LVDT)

Para a observação da ocorrência dos modos de flambagem local e distorcional é necessário que seja feito o monitoramento dos deslocamentos na alma e no flange de ligação da seção. Para esta finalidade é utilizado um arranjo com transdutores de deslocamento (LVDT), distribuídos de forma racional na alma (para verificar a ocorrência do modo local) e no flange de ligação da seção ao longo da altura do perfil ( a fim de captar o modo distorcional).

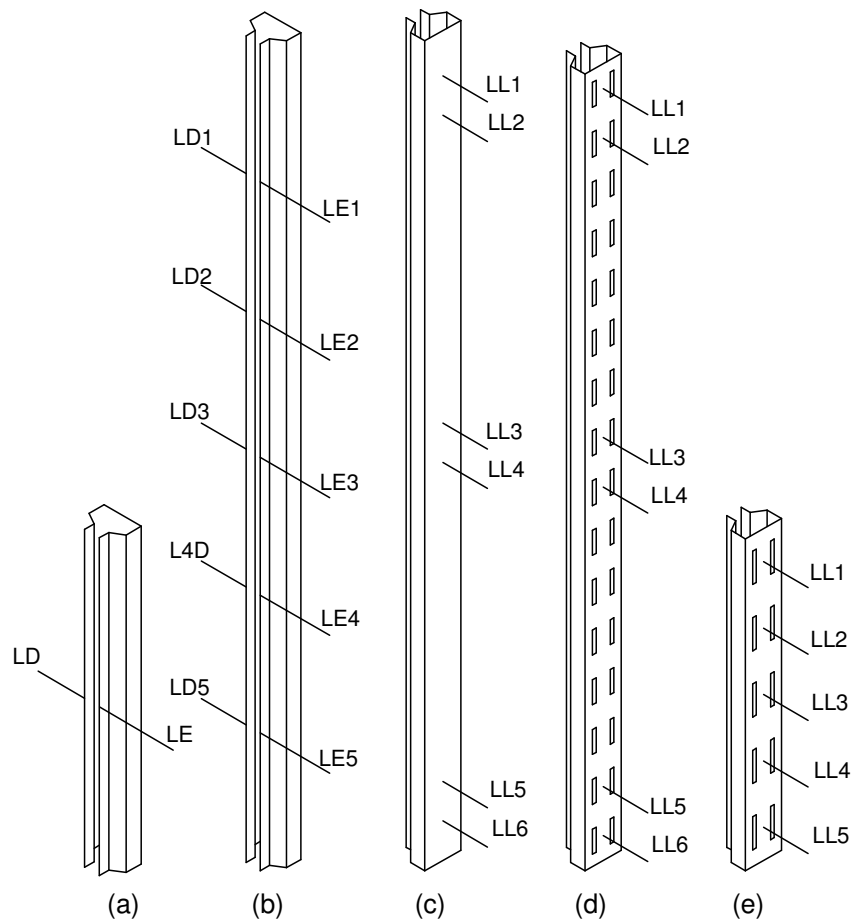
O posicionamento dos LVDTs foi inicialmente definido a partir dos modos observado nas análises de flambagem elástica da seção e revistos quando da realização dos ensaios. Para as colunas curtas, foram posicionados dois LVDTs à meia altura da coluna no flange de ligação do protótipo, para a avaliação da ocorrência do modo distorcional, pois a análise de Flambagem elástica indicou a ocorrência de uma meia onda nestes protótipos. Na alma, as dimensões e o posicionamento das perfurações fez com que este arranjo fosse modificado, uma vez que a análise preliminar indicou a ocorrência de flambagem local na região dos furos, o que determinou a instalação dos transdutores nesta posição. A figura 4.6 apresenta o posicionamento dos LVDTs nas colunas curtas.



**Figura 4.6. Posição dos LVDTs nas colunas curtas: (a) flanges de ligação; (b) alma do protótipo CC-SF; (c) alma do protótipo CC-F60; (d) alma do protótipo CC-F80.**

Nas colunas médias, foi utilizado maior número de LVDTs para mapear os deslocamentos da alma e do flange de ligação. Para o protótipo CM-F80 a análise de

flambagem indicou a ocorrência do modo distorcional com a formação de uma meia onda, o que permitiu o posicionamento de um LVDT à meia altura do flange de ligação. Indicou ainda a ocorrência do modo local na região dos furos na alma, o que levou ao posicionamento de LVDTs nestas posições, de modo similar ao adotado para as colunas curtas. Já para os protótipos CM-F60 e CM-SF, análise de flambagem elástica indicou a possibilidade da ocorrência do modo distorcional com a formação de duas ou três meias ondas. Desta forma, foram distribuídos cinco LVDTs em cada flange de ligação visando captar esta ocorrência. De mesmo modo, a análise preliminar indicou a possibilidade da ocorrência do modo local na alma nas proximidades das extremidades ou à meia altura da seção, motivo que levou ao posicionamento de LVDTs para verificar experimentalmente a ocorrência ou não do modo referido. A figura 4.7 apresenta o posicionamento dos LVDT nas colunas médias.



**Figura 4.7. Posição dos LVDTs nas colunas médias: (a) flanges de ligação do protótipo CM-F80; (b) flanges de ligação dos protótipos CM-SF e CM-F60; (c) alma do protótipo CM-SF; (d) alma do protótipo CM-F60; (e) alma do protótipo CM-F80.**



#### 4.4.2 Extensômetros

Os extensômetros foram instalados à meia altura da coluna, na alma e nos flanges da seção, conforme mostra a figura 4.8

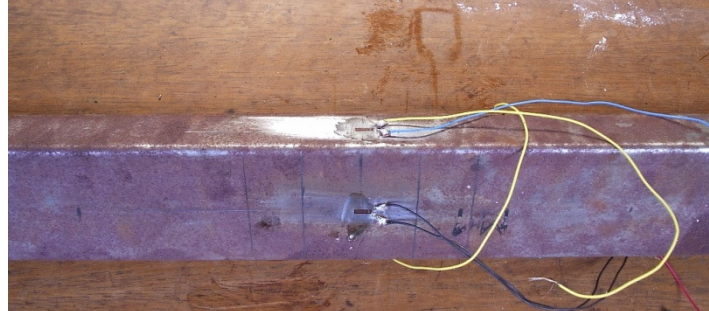


Figura 4.8. Extensômetros instalados à meia altura do protótipo.

A instalação dos extensômetros elétricos de resistência (EER) nos protótipos tem diversos objetivos. No início do ensaio são importantes para certificar a uniformidade da compressão na seção, ou seja, através deles é possível comprovar a centralização da aplicação da carga, a distribuição uniforme da mesma nas extremidades da coluna e a verticalidade do corpo de prova. A outra função dos extensômetros é o mapeamento das deformações/tensões e do comportamento da seção ao longo do ensaio. Desta forma, é possível avaliar a ocorrência de modos de instabilidade ou, ao invés disto, a plastificação da seção.

#### 4.4.3 Célula de carga

A mensuração da carga aplicada ao corpo de prova foi feita pela célula de carga da à máquina de ensaios INSTRON, com capacidade de carga de 2 MN e precisão de +/- 0,5% da carga aplicada.

#### 4.4.4 Aquisição de dados

Dois sistemas de aquisição de dados foram utilizados neste trabalho, um próprio da máquina de ensaios e outro independente.

O controle e a aquisição de dados feita pela máquina é gerenciada pelo software Partner (Instron (2008)). Os dados obtidos são os resultados da célula de carga e de um LVDT acoplado à máquina.

A aquisição de dados dos extensômetros e dos demais LVDTs foi feita pelo Spider8 (Hottinger Baldwin Messtechnik (2003a)). O Spider8 é um sistema eletrônico de medição para PCs e se destina à medição elétrica de variáveis mecânicas tais como tensão, força, pressão, percurso, aceleração e temperaturas. Todos os ajustes necessários são feitos através de computador por meio do software de aquisição, Catman 4.5 (Hottinger Baldwin Messtechnik (2003b)). No desenvolvimento deste trabalho o Catman foi programado para captar dados simultaneamente ao Partner, para garantir perfeita sincronia entre as aquisições de dados nos dois sistemas. Por este sistema foram adquiridos os dados dos extensômetros e dos demais LVDTs utilizados nos ensaios. A figura 4.9 apresenta os sistemas de aquisição de dados utilizados.



**Figura 4.9. Sistema de aquisição de dados.**

## **5 Resultados experimentais**

### **5.1 Introdução**

Os ensaios experimentais foram realizados no Laboratório de Estruturas Altamiro Tibiriçá Dias da Universidade Federal de Ouro Preto. Os resultados são apresentados neste capítulo. Primeiramente, apresentam-se os resultados do levantamento das imperfeições geométricas dos protótipos. Em seguida são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização do aço, obtidos conforme descrito no item 4.4.1. Finalmente, são apresentados os resultados dos ensaios de compressão centrada, enfatizando-se os modos observados e os resultados em termos de deslocamentos (na alma e no flange de ligação) e de tensões na alma e no flange à meia altura da seção. São explicitadas também as cargas de colapso de cada um dos protótipos ensaiados.

### **5.2 Imperfeições Geométricas**

As imperfeições geométricas são decorrentes dos processos de fabricação e influenciam o comportamento das estruturas. A seguir são apresentados os resultados obtidos na medição das dimensões reais dos protótipos, feitas como descrito no item 4.2. As medidas foram tomadas em diversas seções ao longo da altura dos protótipos. A figura 5.1 apresenta as dimensões levantadas e suas respectivas nomenclaturas. Ressalta-se nesta figura que os flanges de ligação não apresentavam-se paralelos, sendo realizado o levantamento de sua posição real.

As tabelas 5.1 e 5.2 apresentam as médias dos resultados obtidos para cada protótipo. O levantamento completo das imperfeições é apresentado no Apêndice A deste trabalho.

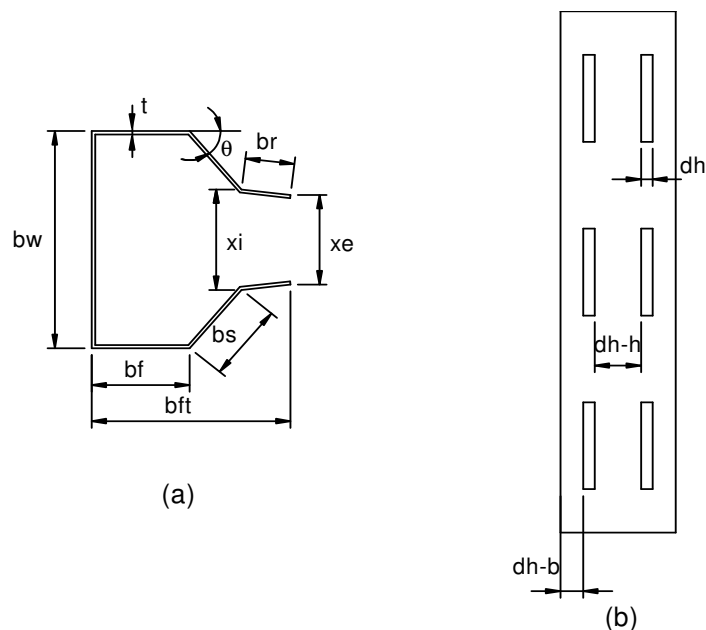


Figura 5.1. Dimensões levantadas na determinação das imperfeições: (a) Seção transversal; (b) Vista da alma.

Tabela 5.1. Imperfeições nas Colunas Curtas.

Protótipo	$b_w$ (mm)	$b_f$ (mm)	$b_s$ (mm)	$b_r$ (mm)	$b_{ft}$ (mm)	$\theta$ (°)	$x_i$ (mm)	$x_e$ (mm)	$d_{hb}$ (mm)	$d_{hh}$ (mm)	$b_h$ (mm)	$t$ (mm)
CC-SF-1	79,8	34,1	30,0	17,5	69,2	38,7	36,5	33,2				1,2
CC-SF-2	79,6	34,5	30,0	17,9	69,2	39,7	34,4	31,1				1,2
CC-SF-3	80,4	34,3	30,6	18,8	68,6	41,4	38,1	35,6				1,2
CC-F60-1	79,9	33,0	29,2	18,0	68,3	38,7	34,1	29,6	16,1	32,0	7,9	1,2
CC-F60-2	79,4	34,6	29,9	17,8	69,4	37,0	35,2	31,8	15,7	32,0	8,0	1,2
CC-F60-3	80,1	34,4	30,0	17,6	69,0	37,8	35,1	31,7	15,7	32,0	8,0	1,2
CC-F80-1	81,8	32,1	30,6	18,0	66,7	37,2	34,9	30,5	16,6	32,0	7,9	1,2
CC-F80-2	82,6	32,0	30,2	17,9	66,7	39,7	38,7	35,0	17,3	32,0	8,0	1,2
CC-F80-3	82,4	32,6	30,8	17,7	66,1	37,4	35,9	33,9	17,1	32,1	7,9	1,2

Tabela 5.2. Imperfeições nas Colunas Médias.

Protótipo	$b_w$ (mm)	$b_f$ (mm)	$b_s$ (mm)	$b_r$ (mm)	$b_{ft}$ (mm)	$\theta$ (°)	$x_i$ (mm)	$x_e$ (mm)	$d_{hb}$ (mm)	$d_{hh}$ (mm)	$b_h$ (mm)	$t$ (mm)
CM-SF-1	80,2	32,1	29,5	18,3	69,0	40,8	37,4	34,7				1,2
CM-SF-2	81,6	31,6	29,5	18,3	68,8	40,5	39,1	36,1				1,2
CM-SF-3	80,1	32,1	29,7	18,7	69,4	40,0	37,5	34,1				1,2
CM-F60-1	80,9	33,4	30,0	18,3	68,7	40,7	36,2	32,6	16,4	32,0	8,0	1,2
CM-F60-2	81,9	31,8	30,5	19,0	68,2	39,7	37,3	33,7	17,0	32,0	8,0	1,2
CM-F60-3	81,9	31,9	30,1	18,5	68,2	42,2	38,8	35,2	16,7	32,1	7,9	1,2
CM-F80-1	80,7	32,7	26,7	17,9	69,3	37,6	36,8	33,0	16,1	32,0	8,0	1,2
CM-F80-2	79,6	32,2	27,4	18,2	69,3	38,8	34,5	30,8	16,0	32,0	7,9	1,2
CM-F80-3	79,6	32,5	27,8	18,1	68,7	39,8	34,9	30,3	16,1	32,0	7,9	1,2

Observa-se que há dispersão entre os valores medidos e os valores nominais da seção, apresentados na figura 3.1. Esta dispersão deve-se ao processo de fabricação dos protótipos, feito em dobradeiras. Observa-se, no entanto, grande precisão nas dimensões das perfurações, uma vez que este processo é feito através de moderno equipamento a laser.

### **5.3 Ensaios de caracterização do aço**

As propriedades elasto-plásticas do aço foram obtidas conforme apresentado anteriormente. Seus resultados foram importantes para a análise numérica não linear dos protótipos ensaiados e para os estudos teóricos que se seguiram. A tabela 5.3 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização.

**Tabela 5.3. Resultados dos ensaios de caracterização.**

	$f_y$ (MPa)	$f_u$ (MPa)	Alongamento residual (%)
CP1	215,57	319,78	23,36
CP2	218,16	332,62	34,22
CP3	221,74	327,79	29,20
CP4	225,66	331,61	28,43
Média	220,28	327,95	28,80

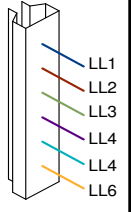
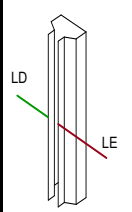
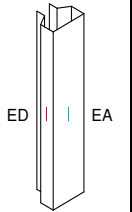
### **5.4 Ensaios de compressão centrada**

Os ensaios de compressão centrada foram executados conforme descrito no item 4.4.2. Para cada grupo foram realizados três ensaios, sendo que apenas no grupo CM-F60 foram realizados dois ensaios, devido a um problema técnico ocorrido com um dos protótipos que levou à perda de seus resultados. Para evitar a apresentação de dados repetitivos, neste capítulo serão apresentados os resultados de um protótipo por série, sendo os demais apresentados no Apêndice B.

#### **5.4.1 Série CC-SF**

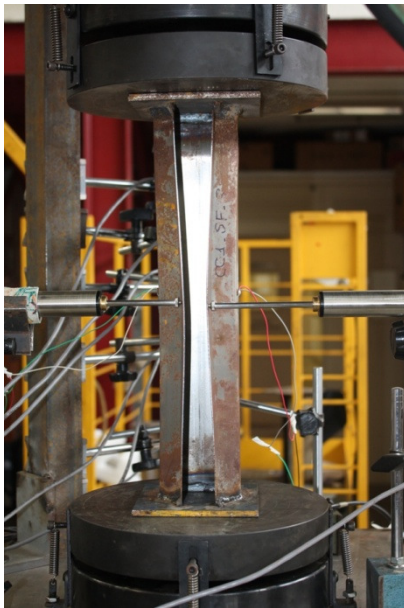
Esta série é composta por três da coluna curta protótipos sem furo. A tabela 5.4 apresenta a descrição resumida dos protótipos e de sua instrumentação.

**Tabela 5.4. Protótipos constituintes da série CC-SF.**

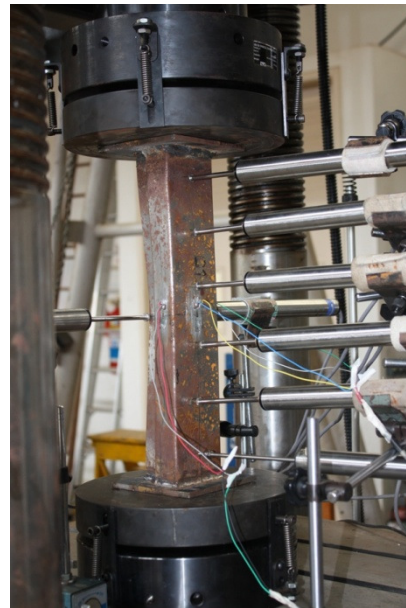
Seção	80x32x29x20x1,2						
Protótipo	L (mm)	LVDT Alma		LVDT Flange		EER	
CC-SF-1	384	4		2		3	
CC-SF-2	384	4		2		3	
CC-SF-3	384	6		2		3	

Conforme previsto na análise de flambagem elástica, nos três protótipos desta série foi observada a ocorrência de deslocamentos na alma e no flange de ligação. O modo distorcional se apresentou em todos eles formando uma meia onda, conforme indicação da análise numérica. Com relação ao modo local na alma, a análise numérica não indicou a possibilidade da sua ocorrência.

Para esta série, são apresentados os resultados obtidos para o protótipo CC-SF-3. Ao decorrer do ensaio, foi observado o fechamento da coluna à meia altura da seção, conforme apresenta a figura 5.2 (a). Este fechamento da seção levou a um deslocamento da alma para fora da seção, com exceção da região das extremidades, em que ocorreu deslocamento para dentro da seção, conforme pode-se ver na figura 5.2 (b). A figura 5.3 apresenta os resultados obtidos para os seis LVDT posicionados na alma do protótipo.

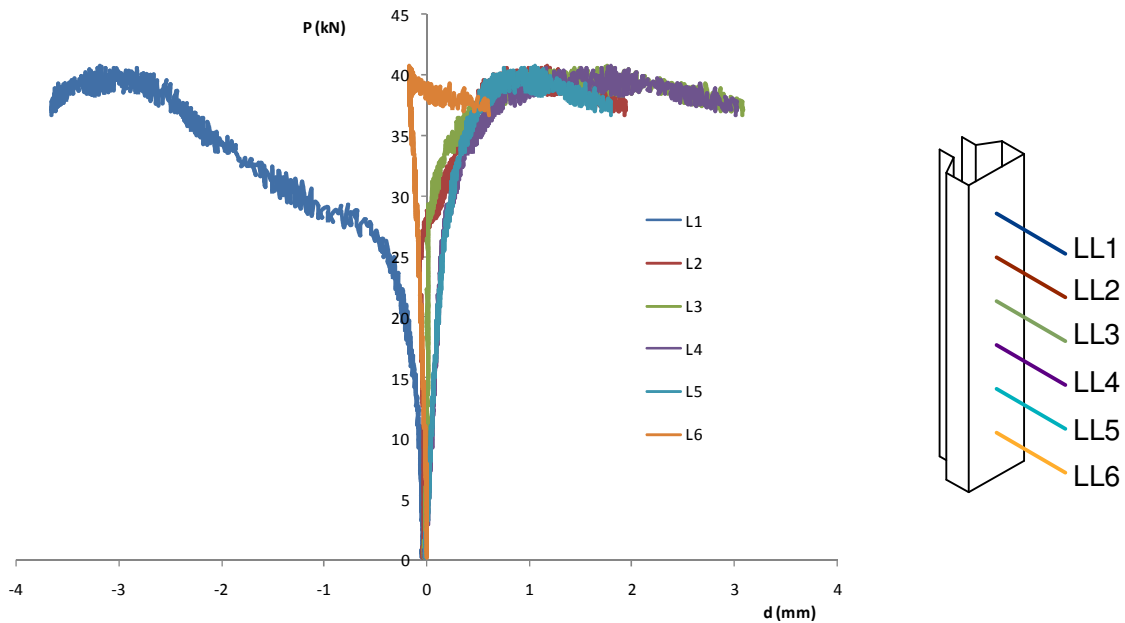


(a)



(b)

**Figura 5.2. Deslocamentos no protótipo CC-SF-3: (a) flanges de ligação; (b) alma.**

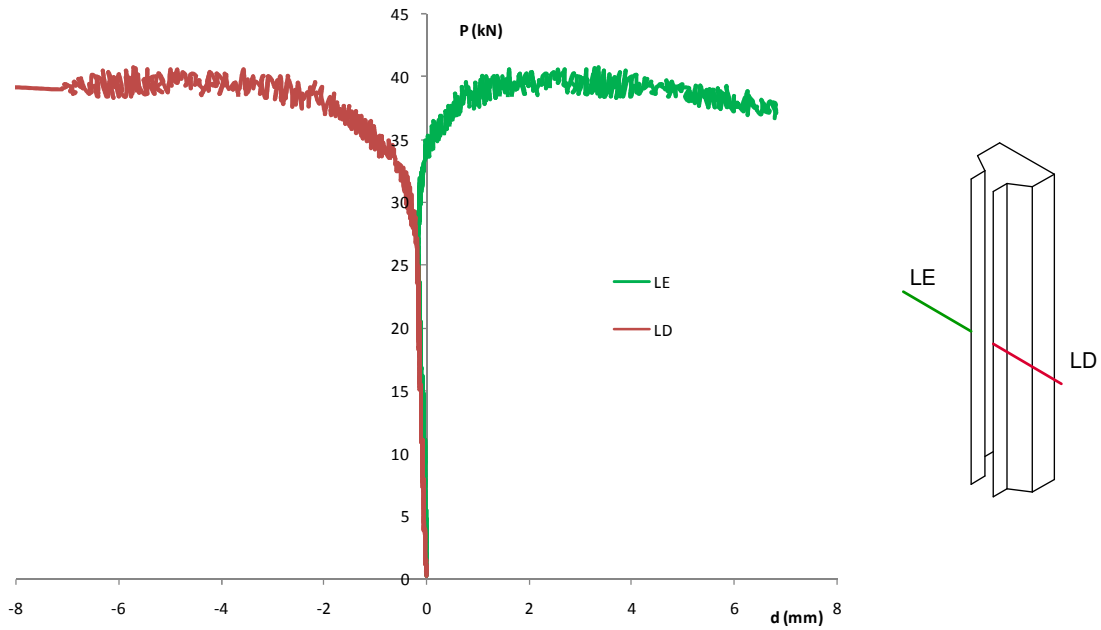


**Figura 5.3. Resultados dos LVDT posicionados na alma do protótipo CC-SF-3.**

A partir da figura 5.3 pode-se observar que todos os LVDTs posicionados na alma do protótipos com exceção do LL1 indicaram deslocamentos para fora da seção. Estes resultados são compatíveis com o fechamento da seção observado. A discrepância observada no LVDT LL1 pode ser explicada pelo mesmo estar próximo à região de aplicação de carga.

Comportamento similar é o apresentado pelo LVDT LL6. Apresentando, de início, tendência a seguir o LVDT 1 e deslocar-se para dentro da seção, a alma nesta região, a partir do aumento de deslocamentos no flange, reverte esta tendência e ao final do ensaio observa-se deslocamento para fora da seção.

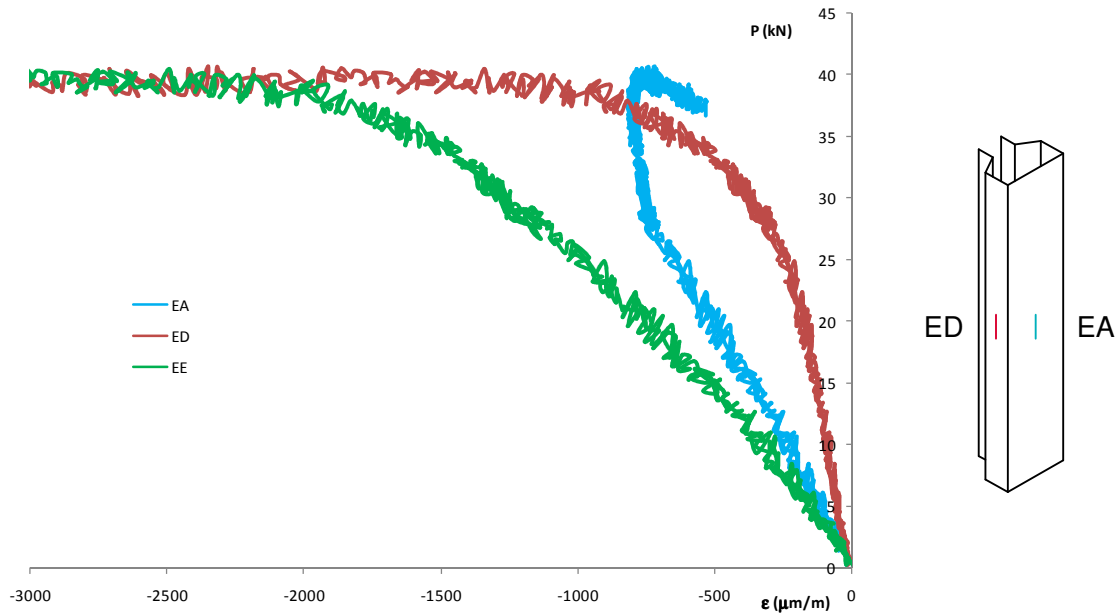
A figura 5.4 apresenta os resultados dos LVDTs posicionados nos flanges de ligação dos protótipos. Pode-se observar neste gráfico o deslocamento do LVDT posicionado à direita (LD) para a esquerda e do LDVT posicionado à esquerda (LE) para a direita, o que ilustra o fechamento da seção observado no ensaio.



**Figura 5.4. Deslocamentos nos flanges de ligação do protótipo CC-SF-3.**

Finalmente, a figura 5.5 apresenta os resultados obtidos pelos extensômetros instalados na alma e nos flanges do protótipo na seção localizada à metade de seu comprimento. Os resultados indicam que até a ocorrência do escoamento do aço nos flanges ( $\epsilon = 1100 \mu\text{m/m}$ ) a alma apresentava tensões de compressão. A partir deste valor, devido ao seu deslocamento para fora da seção, houve uma reversão da tendência na mesma, havendo assim um alívio da tensão de compressão na mesma.





**Figura 5.5. Resultados dos extensômetros no protótipo CC-SF-3.**

A tabela 5.5 apresenta as cargas últimas obtidas para os protótipos desta série. Observa-se boa concordância entre os valores, havendo diferença máxima entre eles igual a 1,3 kN.


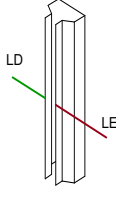

**Tabela 5.5. Cargas últimas dos protótipos da série CC-SF.**

Protótipo	$P_u$ (kN)
CC-SF-1	41,52
CC-SF-2	40,23
CC-SF-3	40,72
Média	40,82

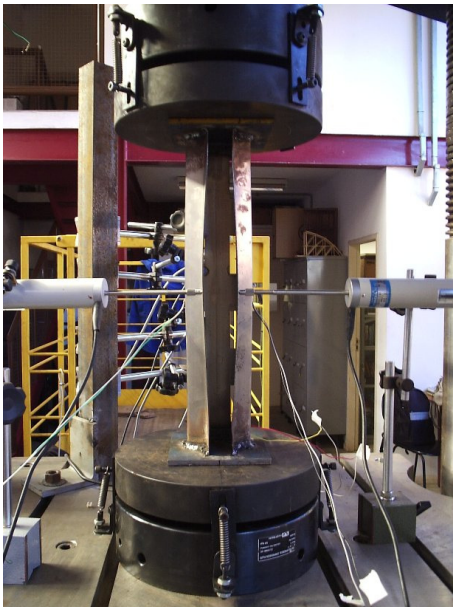
#### 5.4.2 Série CC-F60

Esta série é composta por três colunas curtas com perfurações ao longo do seu comprimento cujos furos possuem comprimento igual a 60% da largura da alma do perfil (48 mm). A tabela 5.6 apresenta os protótipos ensaiados e a instrumentação utilizada em cada um deles.

**Tabela 5.6. Protótipos constituintes da série CC-F60.**

Seção	80x32x29x20x1,2						
Protótipo	L (mm)	LVDT Alma		LVDT Flange		EER	
CC-F60-1	384	4		2		3	
CC-F60-2	384	4		2		3	
CC-F60-3	384	4		2		3	

Nos três protótipos, houve o modo distorcional com a formação de uma meia onda. Na alma, os maiores deslocamentos foram observados na região entre os furos. O protótipo que será apresentado para esta série é o CC-F60-1, em que a seção se abriu. A figura 5.6 (a) apresenta os deslocamentos no flange de ligação e a figura 5.6 (b) mostra os deslocamentos na alma. A figura 5.7 apresenta os resultados obtidos para os LVDTs posicionados na alma do protótipo.

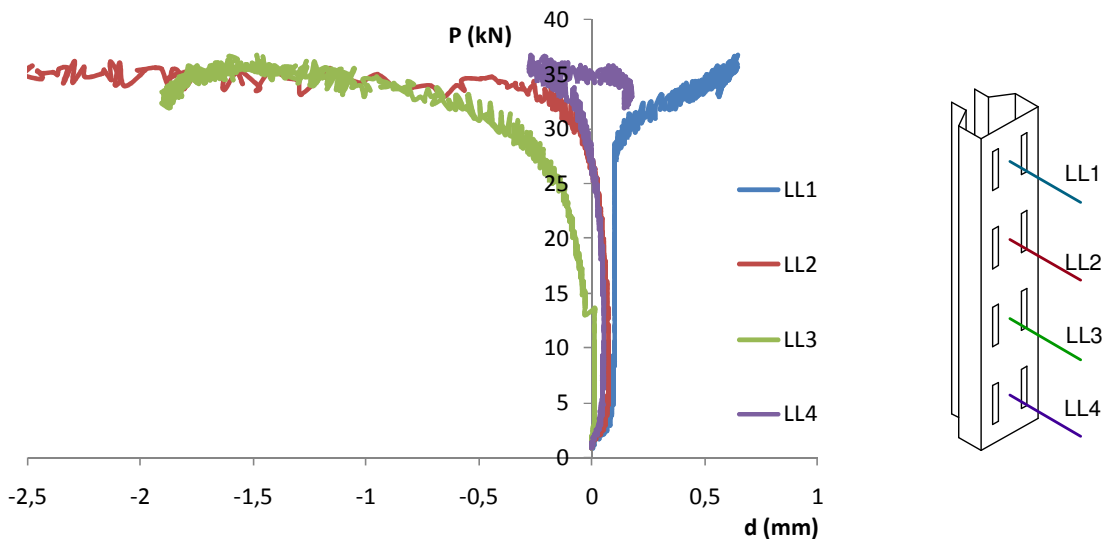


(a)



(b)

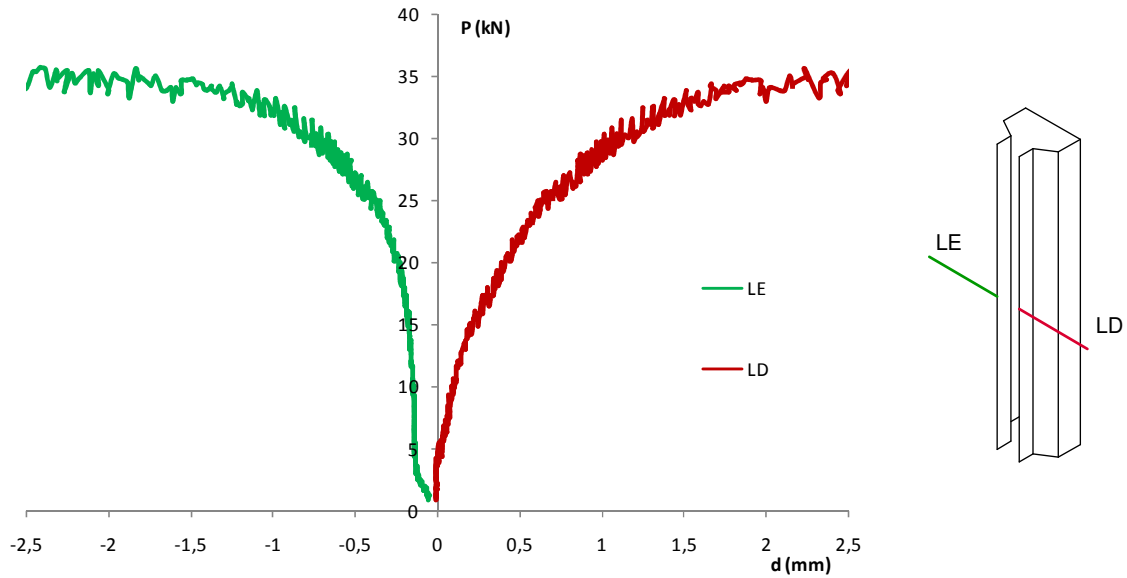
**Figura 5.6. Deslocamentos no protótipo CC-F60-1: (a) flanges de ligação (b) alma.**



**Figura 5.7. Resultados dos LVDTs posicionados na alma do protótipo CC-F60-1.**

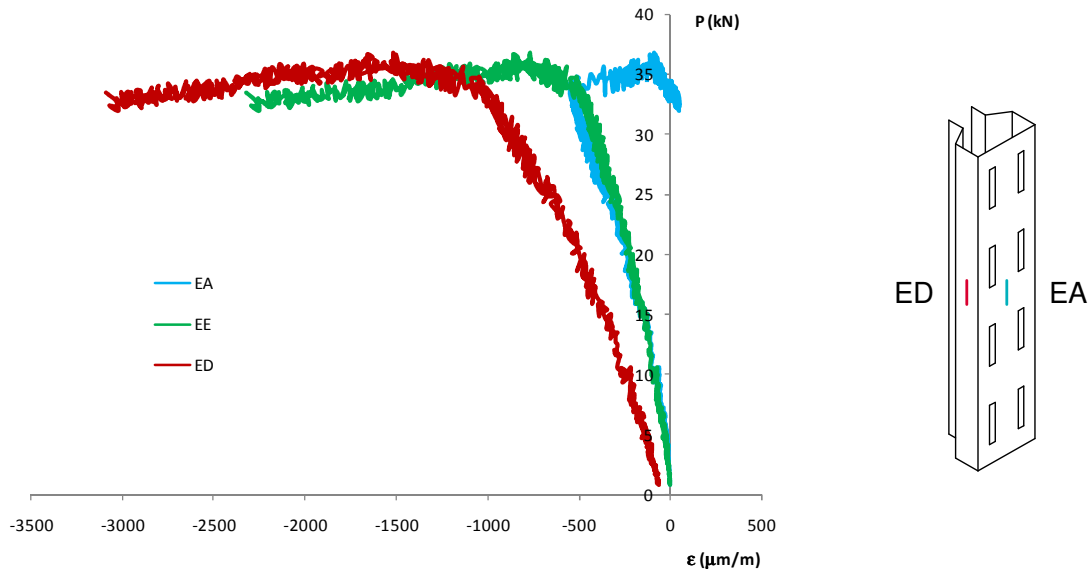
Na figura 5.7 pode-se observar que os LVDTs 1 e 4 indicaram que nestas regiões da alma houve deslocamentos para fora da seção, enquanto os LVDTs 2 e 3 captaram deslocamentos para dentro da mesma. Interessante notar o comportamento do LVDT LL4. Até a carga última da coluna ele capta deslocamentos para dentro da seção. Após o colapso, ocorre uma reversão da tendência de seus deslocamentos, devido à abertura excessiva da seção que induz a alma a este comportamento.

Os deslocamentos nos flanges de ligação são apresentados na figura 5.8. Pode-se observar a abertura da seção transversal, com o LVDT posicionado à esquerda (LE) se deslocando nesta direção e LD se deslocando para a direita. Pode-se observar que os maiores deslocamentos começam a surgir com uma carga de aproximadamente 25 kN, indicando que a flambagem distorcional ocorre antes do colapso da seção.



**Figura 5.8. Deslocamentos nos flanges de ligação do protótipo CC-F60-1.**

Por fim, a figura 5.9 apresenta os resultados para os extensômetros instalados à meia altura do protótipo na alma e nos flanges. Observa-se excelente correlação entre os resultados obtidos pelos extensômetros na alma e no flange esquerdo da seção, até a carga de 33 kN. A partir deste ponto, ocorre mudança na tendência do comportamento entre eles, com aumento da compressão no flange e alívio da mesma na alma do perfil. Já o extensômetro instalado no flange direito do protótipo indica tensões maiores que os demais, sem, no entanto, comprometer o resultado do ensaio. Observa-se ainda que, a partir do colapso do protótipo, ocorre uma convergência dos resultados dos extensômetros instalados nos flanges da coluna.



**Figura 5.9. Resultados dos extensômetros do protótipo CC-F60-1.**

A tabela 5.7 apresenta os resultados obtidos para as cargas últimas dos protótipos desta série. Pode-se observar que houve boa correlação entre os resultados, havendo dispersão máxima de 0,35 kN entre os protótipos.

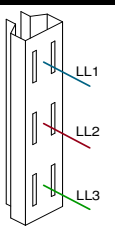
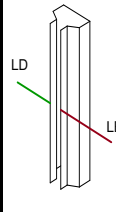

**Tabela 5.7. Cargas últimas dos protótipos da série CC-F60.**

Protótipo	$P_u$ (kN)
CC-F60-1	36,75
CC-F60-2	37,00
CC-F60-3	37,10
Média	36,95

### 5.4.3 Série CC-F80

Esta série é composta por três colunas curtas com perfurações ao longo do seu comprimento cujos furos possuem comprimento igual a 80% da largura da alma do perfil (64 mm). A tabela 5.8 apresenta os protótipos ensaiados e a instrumentação utilizada em cada um deles.

**Tabela 5.8. Protótipos constituintes da série CC-F80.**

Seção	80x32x29x20x1,2						
Protótipo	L (mm)	LVDT Alma		LVDT Flange		EER	
CC-F80-1	384	3		2		3	
CC-F80-2	384	3		2		3	
CC-F80-3	384	3		2		3	

Assim como na série anterior, o modo distorcional se desenvolve com a formação de uma meia onda e do modo local de placa nas regiões entre os furos da alma. Para representar a série será apresentado o protótipo CC-F80-1. A figura 5.10 apresenta os deslocamentos observados nos flanges de ligação (a) e na alma do protótipo (b). Pode-se ver na figura a abertura da seção à meia altura dos flanges de ligação e deslocamentos na alma concentrados nas regiões entre os furos, principalmente entre os furos situados na parte superior do protótipo.



(a)

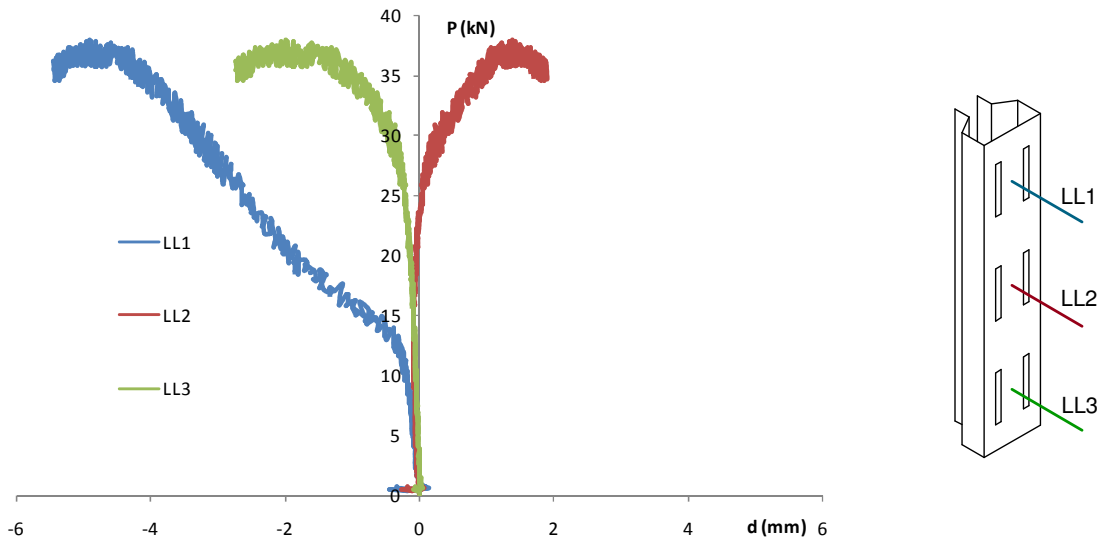


(b)

**Figura 5.10. Deslocamentos no protótipo CC-F80-1: (a) flanges de ligação; (b) alma.**

A figura 5.11 apresenta os resultados obtidos pelos LVDTs posicionados na alma das colunas. Pode-se observar que o LVDT LL1, posicionado entre os furos da parte

superior do perfil, tem deslocamentos superiores aos demais, além de indicar o aumento dos deslocamentos para um carregamento de 14 kN, aquém dos indicados pelos outros LVDTs, que é de 25 kN. Percebe-se também que os LVDTs 1 e 3 indicam deslocamentos para o interior da seção da coluna, enquanto o LVDT 2 indica deslocamentos para fora.



**Figura 5.11. Resultados dos LVDTs posicionados na alma do protótipo CC-F80-1.**

Os deslocamentos no flange são apresentados na figura 5.12. Estes resultados indicam a abertura da seção mostrada na figura 5.10 (a) com os deslocamentos dos LVDTs LE para a esquerda e LD para a direita. Observa-se ainda que ocorre um aumento progressivo dos deslocamentos, desde o começo dos ensaios até o colapso da coluna, não sendo possível a identificação visual de um carregamento em que ocorrem modificações no comportamento dos flanges de ligação.

Finalmente a figura 5.13 apresenta os resultados dos extensômetros instalados na alma e nos flanges da coluna. Observa-se excelente correlação entre os três dispositivos até a carga de 25 kN, o que indica a compressão uniforme da seção. A partir deste valor, ocorre reversão dos resultados do extensômetro instalado na alma, que passa a indicar tração. Isto se dá devido ao deslocamento desta região para a parte externa da seção. Observando a figura 5.11, pode-se ver que esta carga é a mesma em que ocorre aumento de deslocamentos na alma.

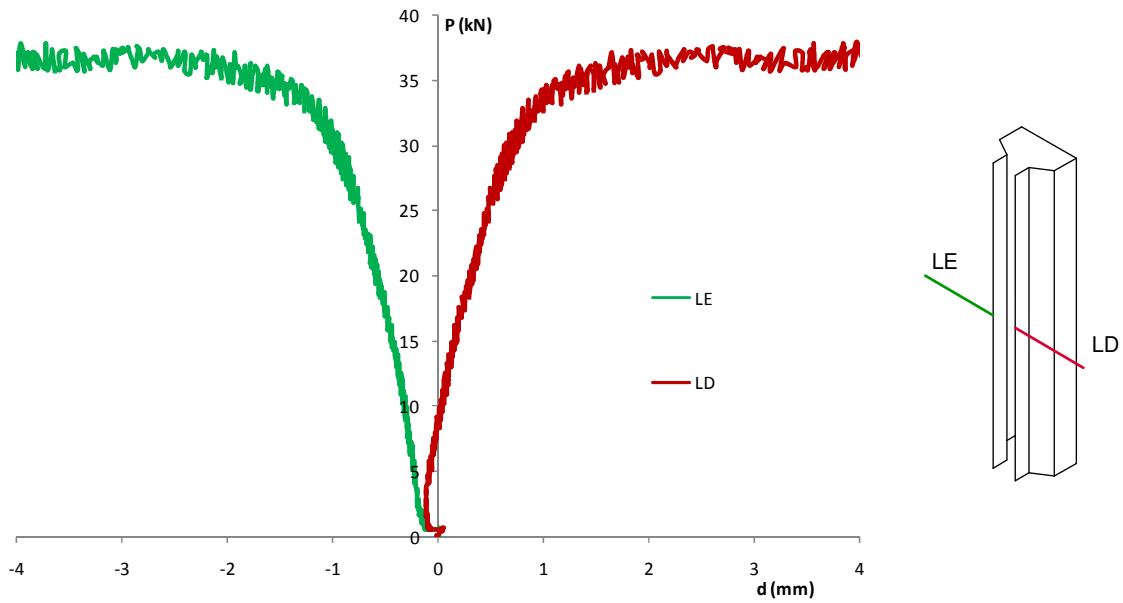


Figura 5.12. Resultados dos LVDTs posicionados no flange de ligação do protótipo CC-F80-1.

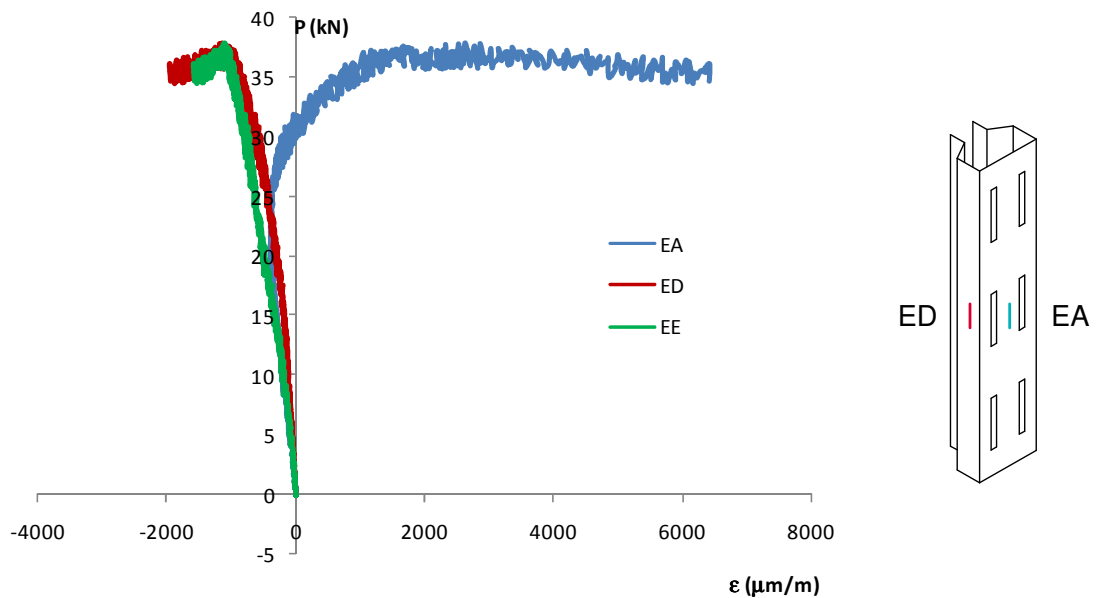


Figura 5.13. Resultados dos extensômetros no protótipo CC-F80-1.

A tabela 5.9 apresenta as cargas últimas observadas para os perfis desta série. Mais uma vez pode-se ver boa correlação entre os valores dos três protótipos, com dispersão máxima de 0,77 kN entre os valores.




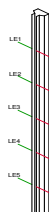
**Tabela 5.9. Cargas últimas dos protótipos da série CC-F80.**

Protótipo	$P_u$ (kN)
CC-F80-1	37,89
CC-F80-2	38,66
CC-F80-3	38,07
Média	38,21

#### 5.4.4 Série CM-SF

Esta série é composta por três colunas médias sem perfurações na alma. A tabela 5.10 apresenta os protótipos, seu comprimento e a instrumentação utilizada. Ressalta-se que nesta série foram empregados dez LVDTs no flange de ligação das colunas, uma vez que a análise numérica indicou a possibilidade de formação de múltiplas meias ondas no modo distorcional. O arranjo utilizado é apresentado na figura 4.7 (b).

**Tabela 5.10. Protótipos constituintes da série CM-SF.**

Seção	80x32x29x20x1,2					
Protótipo	L (mm)	LVDT Alma		LVDT Flange		EER
CM-SF-1	1600	6		10		3
CM-SF-2	1600	6		10		3
CM-SF-3	1600	6		10		3

Para representar esta série, serão apresentados os resultados do protótipo CM-SF-2. A figura 5.14 apresenta os deslocamentos observados nos flanges e na alma do protótipo. Pode-se observar que há a formação de três meias ondas, com maior amplitude de deslocamentos naquelas formadas na metade inferior da altura da coluna. Os deslocamentos na alma são, contudo, imperceptíveis na análise visual, face à sua pequena magnitude se comparados aos deslocamentos nos flanges de ligação.

A figura 5.15 apresenta os resultados obtidos pelos LVDTs posicionados na alma do protótipo. Conforme apontado pela análise numérica, observa-se que os maiores deslocamentos ocorreram próximos à extremidade da coluna, neste caso com maior amplitude na parte inferior da mesma, como pode ser visto nos resultados de LL5 (deslocamento para fora da seção) e LL6 (deslocamento para dentro). Nos demais LVDT o deslocamento indicado pelos transdutores manteve-se inferior a 1 mm durante todo o procedimento experimental, indicando o início do modo global de flexão.

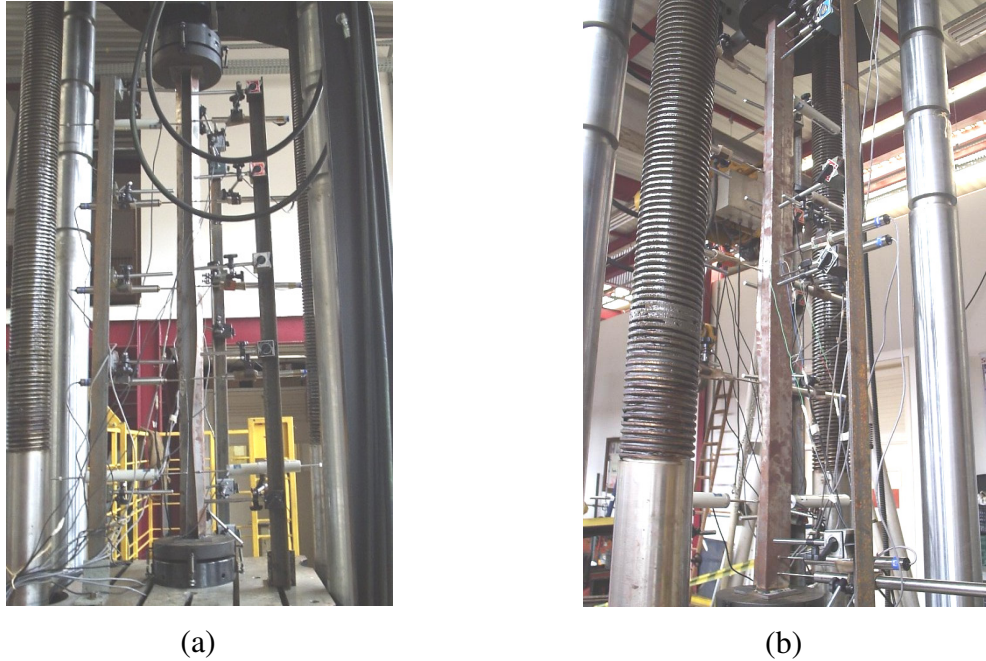


Figura 5.14. Deslocamentos no protótipo CM-SF-2: (a) flanges de ligação; (b) alma.

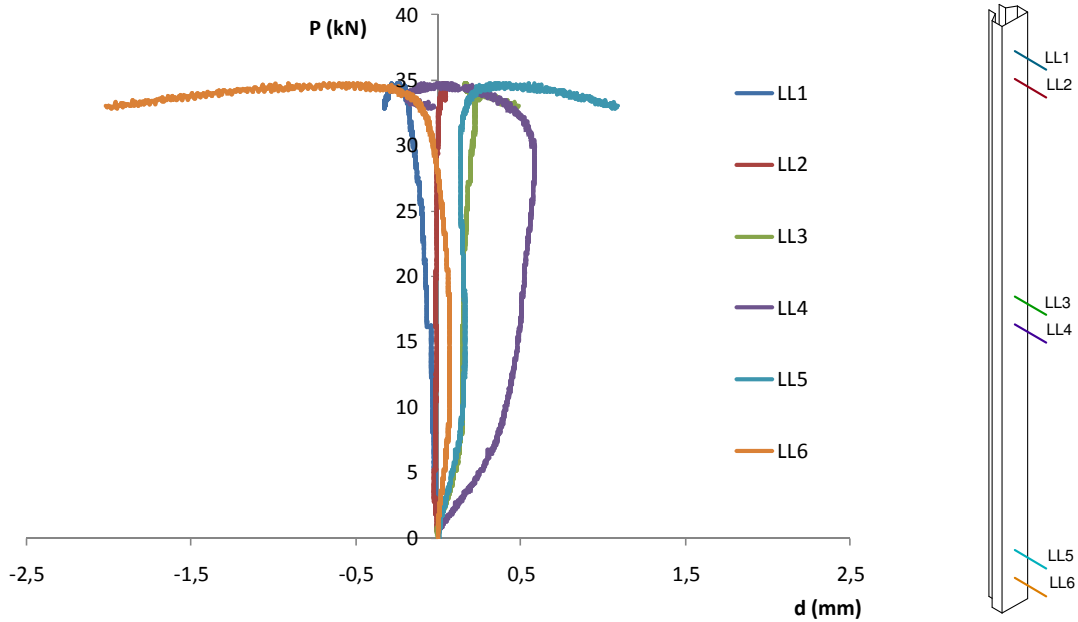
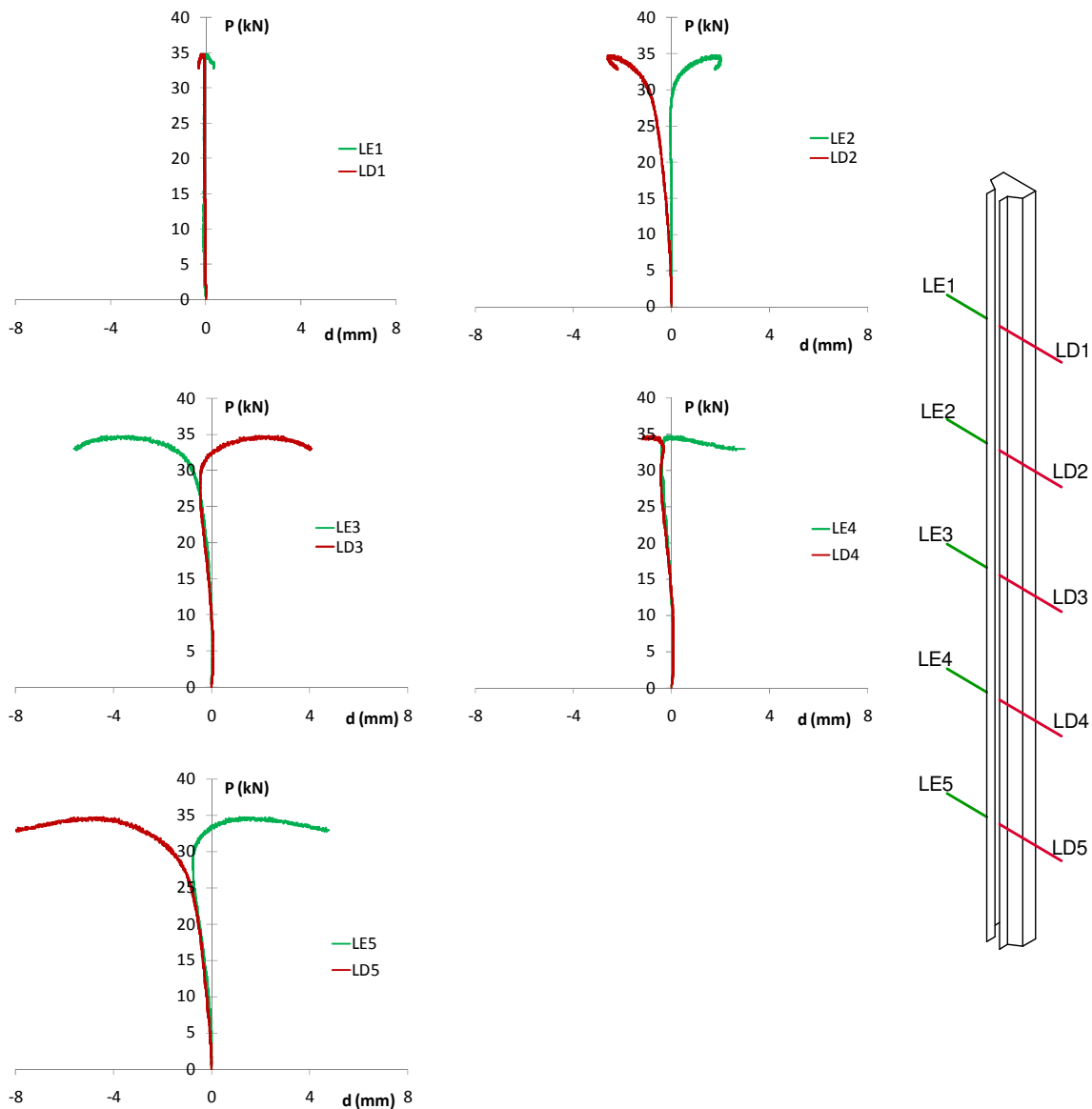


Figura 5.15. Resultados dos LVDTs posicionados na alma do protótipo CM-SF-2.

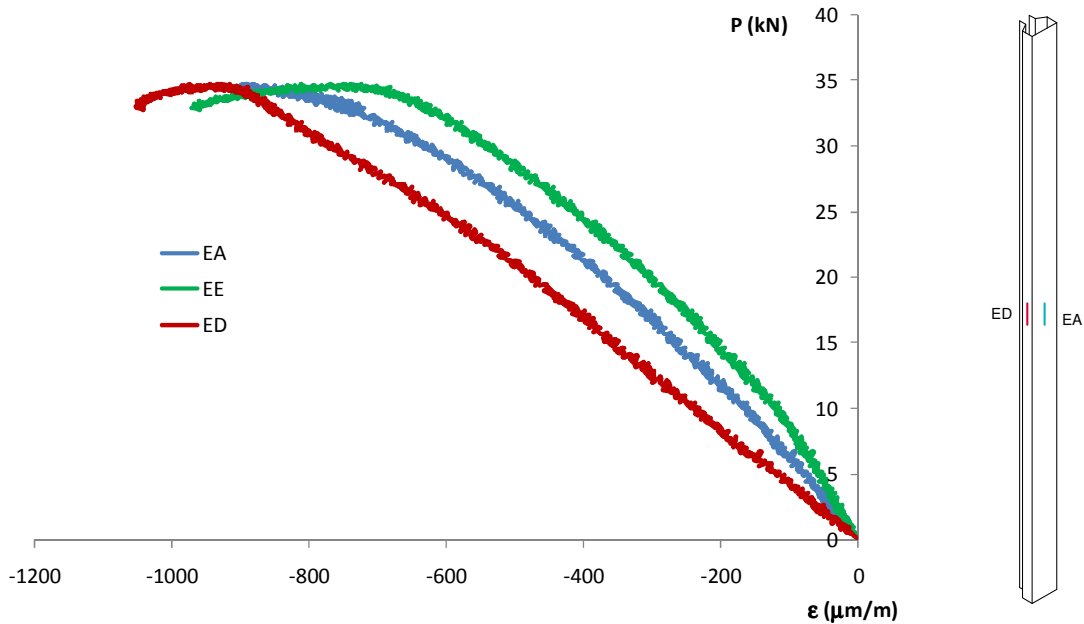
A figura 5.16 apresenta os deslocamentos obtidos nos flanges de ligação do protótipo. Os LVDTs LE1 e LD1 indicam pequenos deslocamentos na parte superior do protótipo, com pequeno fechamento da seção. Esta tendência de fechamento prossegue nos LVDTs LE2-LD2, mas com maiores amplitudes. Nos LVDTs LE3-LD3, posicionado à meia altura do protótipo, pode-se observar que nesta região ocorreu uma abertura da

seção, com amplitude de deslocamentos maiores que aquelas observadas na metade superior da coluna. Os LVDTs LE4-LD4 indicam pequenos deslocamentos devido a situar-se numa região de inflexão e os LVDTs LE5-LD5 aponta o fechamento da seção nesta região. Estes deslocamentos podem ser verificados na figura 5.14 (a). Pode-se ainda observar que os resultados dos LVDTs LE3-LD3 e LE5-LD5 indicam a ocorrência da flambagem distorcional para um carregamento de 25 kN.



**Figura 5.16. Resultados dos LVDTs posicionados nos flanges de ligação do protótipo CM-SF-2.**

A figura 5.17 apresenta os resultados obtidos pelos extensômetros instalados na alma e no flange da coluna, na metade de seu comprimento. Observa-se durante toda a realização do ensaio que existe boa correlação entre os resultados, indicando compressão uniforme na seção.



**Figura 5.17. Resultados dos extensômetros no protótipo CM-SF-2.**

A tabela 5.11 apresenta as cargas de colapso obtidas nos protótipos desta série. Observa-se uniformidade nos resultados, com dispersão máxima entre eles de 0,08 kN.

**Tabela 5.11. Cargas últimas dos protótipos da série CM-SF.**

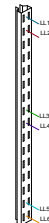
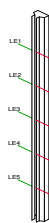

Protótipo	$P_u$ (kN)
CM-SF-1	32,65
CM-SF-2	34,76
CM-SF-3	34,84
Média	34,08

#### 5.4.5 Série CM-F60

Esta série é composta por três colunas médias com perfurações ao longo de seu comprimento cujos furos possuem comprimento igual a 60% da largura da alma do perfil (48 mm). A tabela 5.12 apresenta os protótipos ensaiados e a instrumentação utilizada em

cada um deles. Nesta série, um problema técnico inviabilizou o ensaio do protótipo CM-F60-2, motivo que levou ao ensaio de apenas dois protótipos.

**Tabela 5.12. Protótipos constituintes da série CM-F60.**

Seção	80x32x29x20x1,2					
Protótipo	L (mm)	LVDT Alma		LVDT Flange		
CM-F60-1	1536	6		10		
CM-F60-2						
CM-F60-3	1536	6		10		

Para ilustrar esta série serão apresentados os resultados obtidos para o protótipo CM-F60-3. A figura 5.18 apresenta os deslocamentos observados no flange de ligação e na alma dos protótipos. Observa-se a formação de três meias ondas no modo distorcional e a existência de deslocamentos na alma, na região localizada entre os furos. Nos flanges de ligação, podem ser observadas maiores amplitudes nos deslocamentos da metade inferior da coluna.



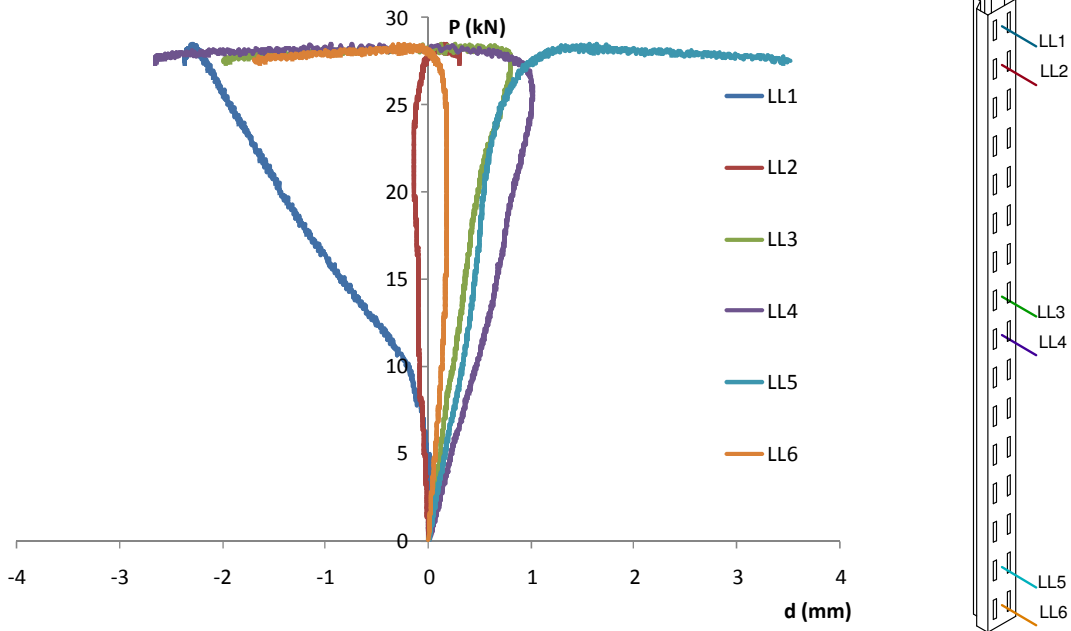
(a)



(b)

**Figura 5.18 . Deslocamentos no protótipo CM-F60-3: (a) flanges de ligação; (b) alma.**

A figura 5.19 apresenta os resultados dos LVDTs posicionados na alma do protótipo. Nesta figura, observa-se que o LVDT LL1 indica deslocamentos a partir de um carregamento relativamente baixo, de cerca de 10 kN. Isto explica-se pelo LVDT estar instalado próximo à extremidade da coluna. O transdutor LL2 indica pequenos deslocamentos em todo o ensaio, enquanto os LVDTs LL3 e LL4, posicionados à meia altura da alma, indicam pequenos deslocamentos para fora da seção até o colapso da coluna, indicando o início do modo global de flexão. Isto explica-se pela abertura observada na seção nesta região, gerando os deslocamentos na alma. Já LL5 e LL6, posicionados na extremidade inferior, indicam deslocamentos a partir do colapso da estrutura, sendo LL5 para fora da seção e LL6 para dentro da mesma.



**Figura 5.19. Resultados dos LVDTs posicionados na alma do protótipo CM-F60-3**

Na figura 5.20 são apresentados os resultados obtidos para os LVDTs posicionados nos flanges de ligação da coluna. Os LVDTs LE1-LD1, os LVDTs indicam pequeno fechamento da seção nesta posição, tendência mantida no segundo par de LVDTs posicionados na metade superior da altura da coluna, LE2-LD2, o que comprova que esta região possui pequenos deslocamentos. Os LVDTs posicionados à meia altura da seção, LE3-LD3, indicam que esta região tem abertura com maiores deslocamentos. Os

LVDTs LE4-LD4 indicam pequenos deslocamentos em região de inflexão e os LVDTs LE5-LD5 indicam o fechamento da seção, com maiores deslocamentos.

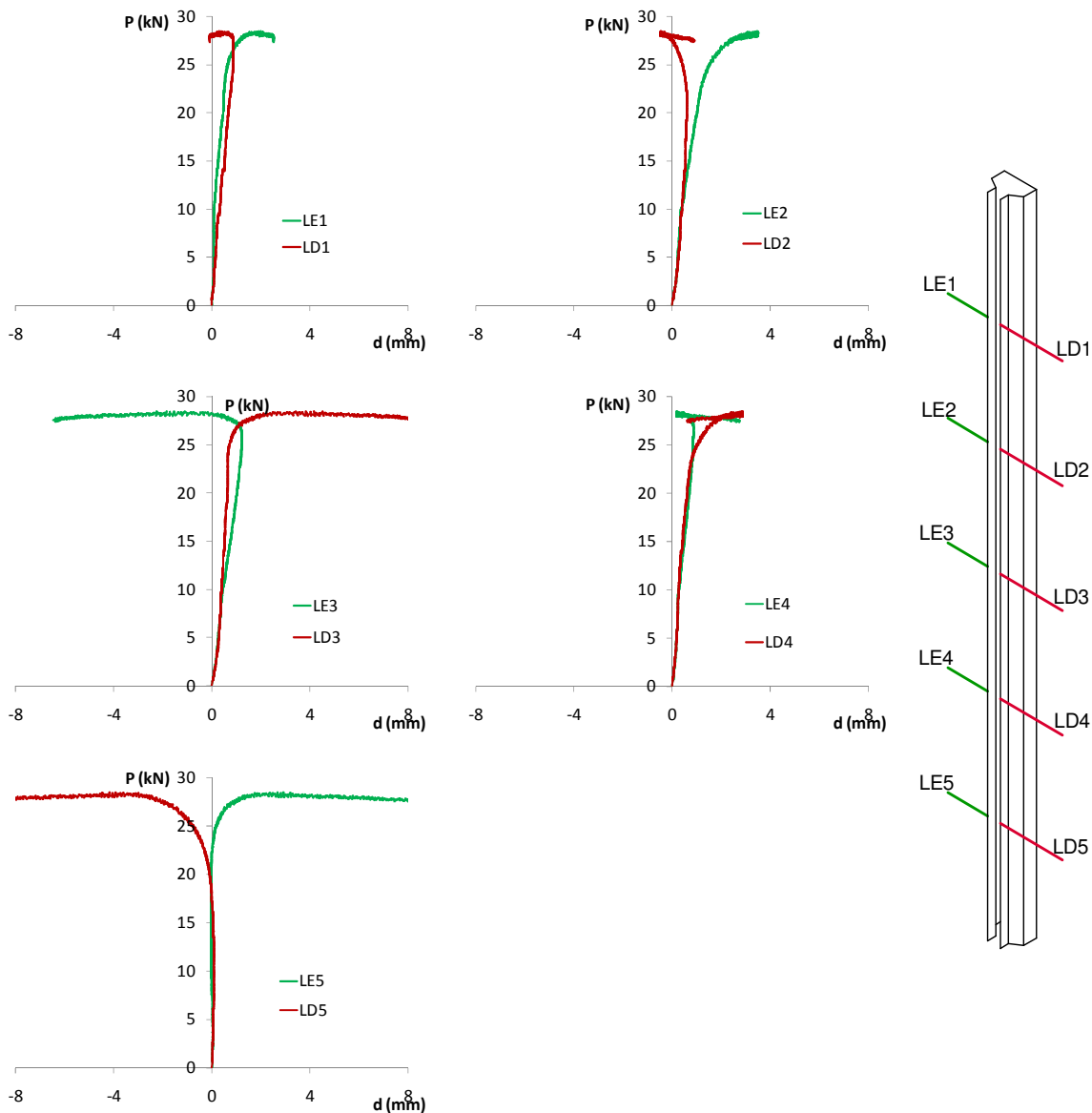
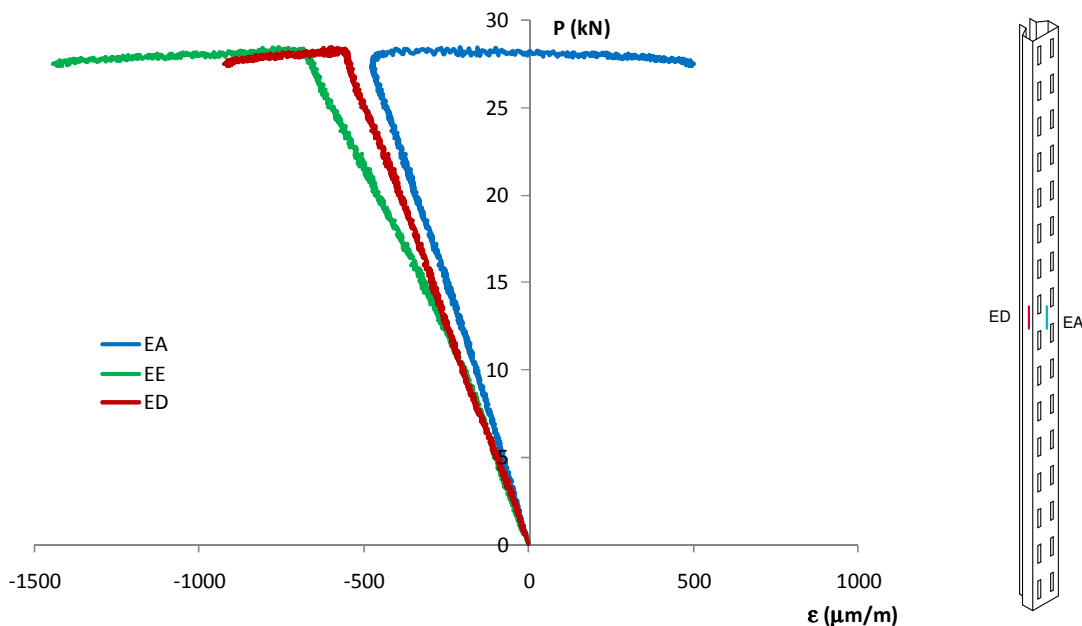


Figura 5.20. Resultados dos LVDTs posicionados nos flanges de ligação do protótipo CM-F60-3.

A figura 5.21 apresenta os resultados para os extensômetros instalados no protótipo. Observa-se a compressão uniforme da coluna até o seu colapso, indicada pela boa correlação dos resultados dos extensômetros neste trecho. A partir deste valor, observa-se uma reversão no extensômetro posicionado na alma, que passa a indicar valores de tração devido aos deslocamentos na alma induzidos pela ocorrência do modo distorcional.



**Figura 5.21. Resultados dos extensômetros no protótipo CM-F60-3.**

A tabela 5.13 apresenta os resultados das cargas de colapso obtidas para os protótipos desta série. Observa-se que, de forma geral, existe uniformidade entre os resultados. Ressalta-se aqui que o protótipo CM-F60-2 teve seus resultados comprometidos por falha durante a execução do ensaio.

**Tabela 5.13. Cargas últimas dos protótipos da série CM-F60-3.**

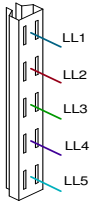
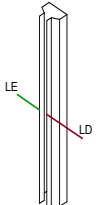

Protótipo	$P_u$ (kN)
CM-F60-1	26,13
CM-F60-2	
CM-F60-3	29,28
Média	27,71

#### 5.4.6 Série CM-F80

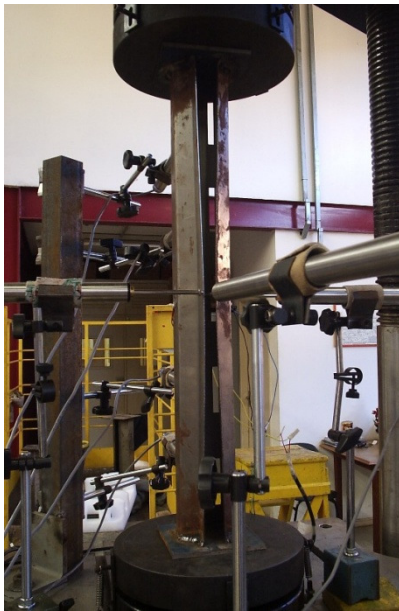
Esta série é composta por três colunas médias com perfurações ao longo do seu comprimento cujos furos possuem comprimento igual a 80% da largura da alma do perfil (64 mm). A tabela 5.14 apresenta os protótipos ensaiados e a instrumentação utilizada em cada um deles. Como a análise numérica indicou a ocorrência do modo distorcional com o desenvolvimento de uma meia onda, foi utilizado apenas um LVDT em cada flange de ligação da coluna.



**Tabela 5.14. Protótipos constituintes da série CM-F80.**

Seção	80x32x29x20x1,2						
Protótipo	L (mm)	LVDT Alma		LVDT Flange		EER	
CM-F80-1	640	5		2		3	
CM-F80-2	640	5		2		3	
CM-F80-3	640	5		2		3	

Para representar esta série, foi escolhido o protótipo CM-F80-3. A figura 5.22 apresenta os deslocamentos obtidos neste protótipo. Pode-se observar que ocorre fechamento da seção à meia altura e que os maiores deslocamentos na alma se encontram na região entre os furos, e as maiores amplitudes são observadas próximas ao furo localizado na extremidade inferior da coluna.



(a)

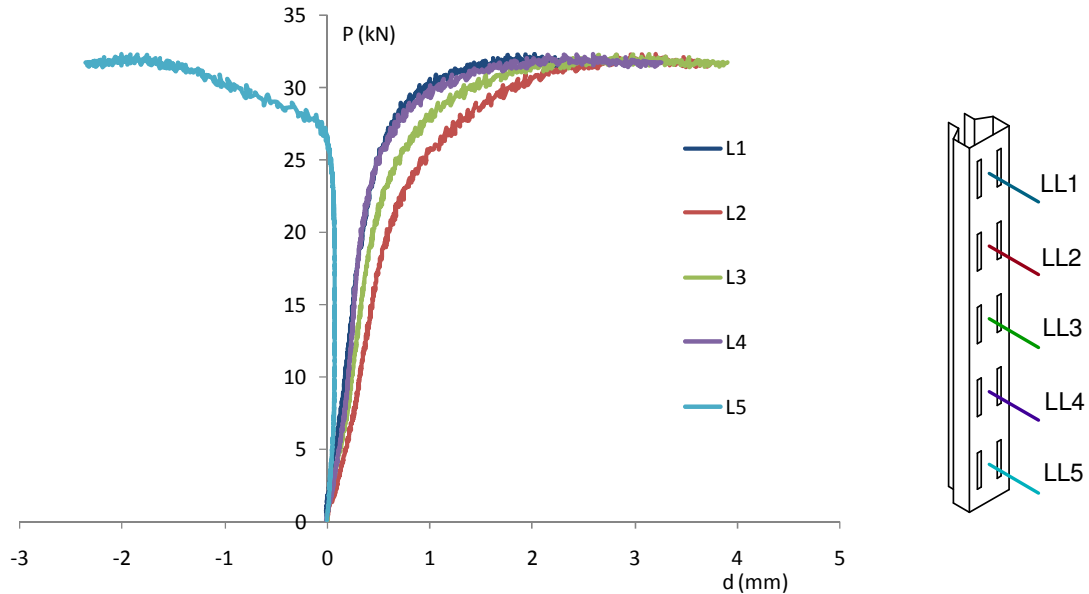


(b)

**Figura 5.22. Deslocamentos no protótipo CM-F80-3: (a) flanges de ligação; (b) alma.**

A figura 5.23 apresenta os resultados dos LVDTs posicionados na alma da coluna. Observa-se que todos indicam deslocamentos semelhantes da coluna até a carga de 25 kN, com deslocamentos de pequena magnitude para fora da seção. A partir deste valor ocorre reversão de tendência no LVDT LL5, que mostra deslocamentos para dentro da

seção, enquanto os outros mantêm deslocamentos para fora da mesma. Ocorre também significativo aumento nos deslocamentos observados. Este comportamento é influenciado pelo deslocamento dos flanges de ligação durante a ocorrência do modo distorcional que, ao se fecharem, projetam a alma para fora da seção. Já o comportamento discrepante apontado pelo LVDT LL5 pode ser explicado por influência da extremidade.



**Figura 5.23. Resultados dos LVDTs posicionados na alma do protótipo CM-F80-3.**

A figura 5.24 apresenta os resultados dos LVDT posicionados à meia altura dos flanges de ligação do protótipo. A figura evidencia o fechamento observado na seção, com LD deslocando-se para a esquerda e LE para a direita. Observa-se também que os deslocamentos sofrem aumento substancial a partir da carga de 25 kN, comprovando assim a associação dos deslocamentos observados na alma com os deslocamentos do flange da coluna.

A figura 5.25 apresenta os resultados das deformações medidas pelos extensômetros instalados na alma e nos flanges das colunas, à metade da sua altura. Pode-se observar nesta figura que nos estágios iniciais do ensaio existe boa correlação entre os resultados, indicando a compressão uniforme da seção. A partir da carga de 25 kN, o extensômetro instalado na alma começa a apresentar mudança de comportamento,

oriunda do deslocamento desta região para fora da seção, o que é coerente com as observações obtidas a partir das figuras 5.23 e 5.24.

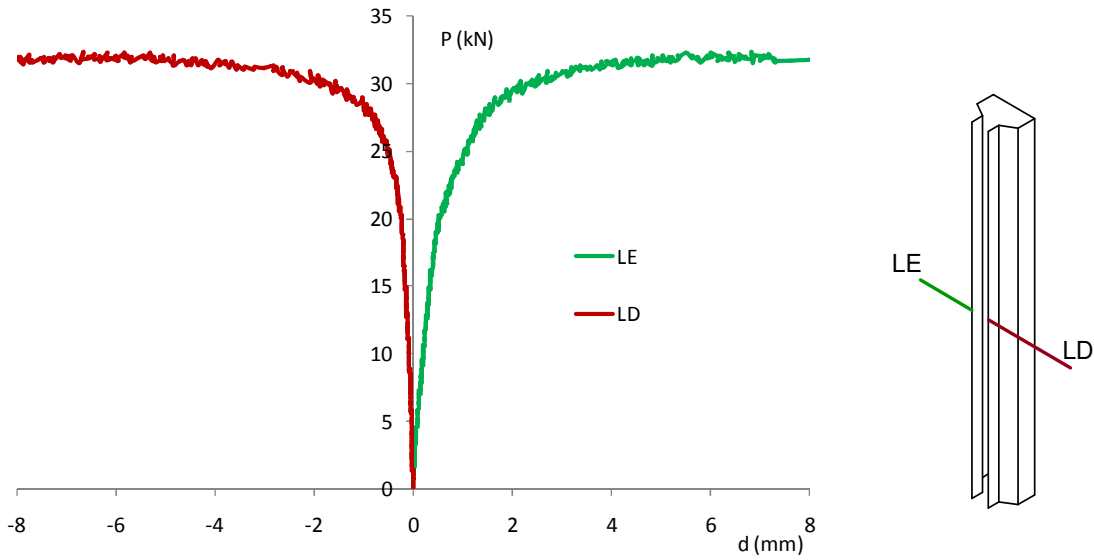


Figura 5.24. Resultados dos LVDTs posicionados nos flanges de ligação do protótipo CM-F80-3.

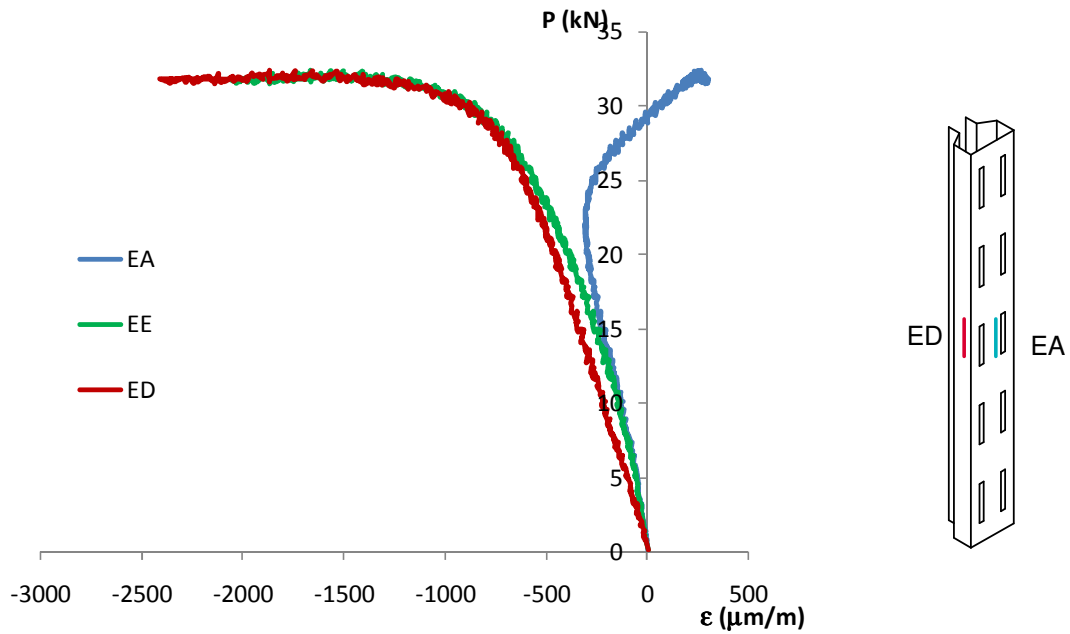


Figura 5.25. Resultados dos extensômetros no protótipo CM-F80-3.

Finalmente, a tabela 5.15 apresenta as cargas de colapso obtidas para os protótipos desta série. Assim como nas outras séries, existe boa correlação entre os resultados, com dispersão máxima de 1,99 kN entre os protótipos.

**Tabela 5.15. últimas dos protótipos da série CM-F80-3.**

Protótipo	$P_u$ (kN)
CM-F80-1	30,82
CM-F80-2	32,81
CM-F80-3	32,36
Média	32,00

#### 5.4.7 Considerações sobre os resultados experimentais

A tabela 5.16 apresenta as cargas últimas médias 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 dos diversos ensaios e de suas médias.

**Tabela 5.16. Cargas últimas médias para as séries ensaiadas.**

Série	L (mm)	Protótipo	$P_u$ (kN)	$P_{u \text{ Exp}}$ (kN)	Modo
CC-SF	384	1	41,52	40,82	D
		2	40,23		
		3	40,72		
CC-F60	384	1	36,75	36,95	D
		2	37,00		
		3	37,10		
CC-F80	384	1	37,89	38,21	D
		2	38,66		
		3	38,07		
CM-SF	1600	1	32,64	34,08	D
		2	34,76		
		3	34,84		
CM-F60	1536	1	26,13	27,71	D
		2			
		3	29,28		
CM-F80	640	1	30,82	32,00	D
		2	32,81		
		3	32,36		

Observa-se que a existência dos furos acarreta em redução da carga última das colunas, uma vez que a área das colunas perfuradas é menor que a área bruta. Para os

perfis com perfurações, observa-se uniformidade nos resultados, mesmo com variação no comprimento dos furos e, no caso das colunas médias, na variação da altura do protótipo. Observa-se ainda o domínio dos modo distorcional nas séries. Na análise de flambagem não linear, apresentada no próximo capítulo, as imperfeições medidas serviram de parâmetro na definição das amplitudes na introdução dos modos nos modelos numéricos.

Com relação aos resultados dos protótipos com furos de 60% de comprimento em relação aos de 80% observa-se um ganho de resistência do último em relação ao primeiro. Este aumento de resistência está associado a distribuição dos furos ao longo do comprimento da coluna. Destaca-se que a perda de material em função do tamanho dos furos é igual em todos os protótipos de mesmo comprimento, como observa-se comparando os resultados de CC-F60 e CC-F80. No entanto com relação aos resultados 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.

## **6 Comparação de resultados**

### **6.1 Introdução**

Neste capítulo será apresentada a comparação entre os resultados experimentais, apresentados no capítulo 5, e os resultados numéricos não lineares, obtidos com os modelos apresentados nos capítulos 2 e 3. Serão apresentadas as comparações dos deslocamentos na alma, no flange de ligação e também das tensões no modelo.

Na realização da análise de flambagem não linear da coluna é necessária a introdução de uma imperfeição inicial para induzir o modo. Esta imperfeição é inserida baseando-se nas imperfeições levantadas e também na observação dos modos desenvolvidos durante o procedimento experimental. Verificou-se que a escolha dos modos, bem como as amplitudes das imperfeições iniciais, é importante para a representação fiel do protótipo. No entanto, é possível a observação de uma tendência comum a todos eles, independentemente deste ajuste. Introduziram-se também as propriedades do aço obtidas nos ensaios de caracterização.

A análise numérica não linear segue o seguinte processo: primeiramente, na introdução da geometria da coluna, são consideradas as dimensões médias de seus elementos obtidos no levantamento das dimensões reais, apresentados nas tabelas 5.1 e 5.2. É feita, então, a análise não linear do protótipo, para a obtenção dos primeiros modos de flambagem, com a expansão dos dez primeiros valores. Introduzem-se as imperfeições no modelo a partir de modos selecionados dentre os dez expandidos, escolhidos em uma análise prévia, e faz-se a análise não linear conforme descrita no item 2.5.

### **6.2 Comparação dos resultados numéricos e experimentais**

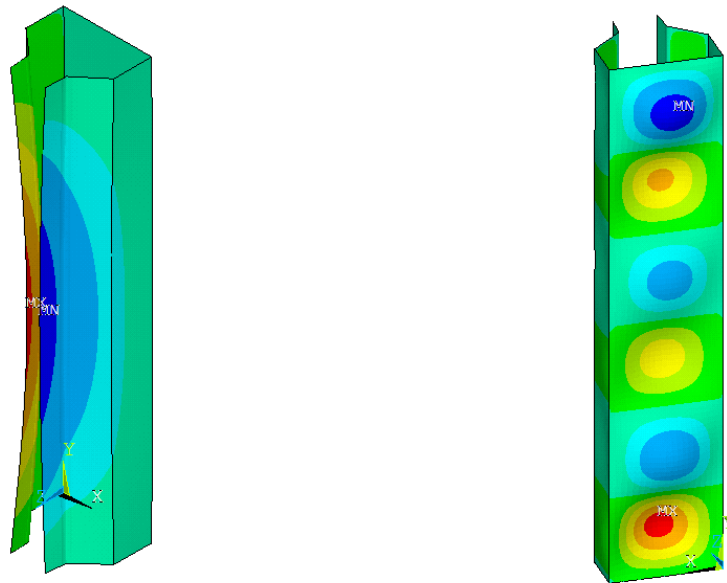
A apresentação da comparação dos resultados numéricos e experimentais será, então, feita da seguinte forma:

- Apresentação dos modos de flambagem utilizados para introduzir a imperfeição no protótipo, seguidos das amplitudes utilizadas na combinação dos mesmos;
- Apresentação dos gráficos com a comparação dos resultados e comentários gerais.

Assim como no capítulo anterior será apresentado um protótipo por série, sendo os demais apresentados no Apêndice C.

### 6.2.1 Série CC-SF

Neste item serão comparados os resultados experimentais apresentados no item 5.4.1 com resultados obtidos a partir da análise não linear do protótipo CC-SF-3. A figura 6.1 apresenta os modos de flambagem utilizados para introduzir a imperfeição no modelo, com suas respectivas amplitudes ( $\delta$ ). A escolha dos modos se faz a partir de observação durante o procedimento experimental e a amplitude do modo baseia-se nas imperfeições levantadas.



Modo 1:  $\delta = 0,4$  mm

Modo 3:  $\delta = 0,1$  mm.

**Figura 6.1. Modos de flambagem utilizados na introdução da imperfeição inicial para o protótipo CC-SF-3.**

Na figura 6.2 tem-se a comparação entre os deslocamentos experimentais obtidos pelos LVDTs posicionados na alma do protótipo e os resultados numéricos, indicados por EF e tomados na mesma posição dos LVDTs nos ensaios. Pode-se observar boa correlação entre os resultados, comprovando a eficiência do modelo numérico nesta avaliação. Pode-se ver que os resultados numéricos e experimentais na região próxima à meia altura da coluna (LL2 - LL5) apresentam melhor correlação. Nas extremidades, apesar dos resultados na parte superior da coluna (LL1) apresentarem dispersão, é interessante a observação de que na parte inferior (LL6) o modelo numérico captou com boa precisão o comportamento da região. Pode-se observar também a eficiência do modelo numérico na previsão da carga última da coluna.

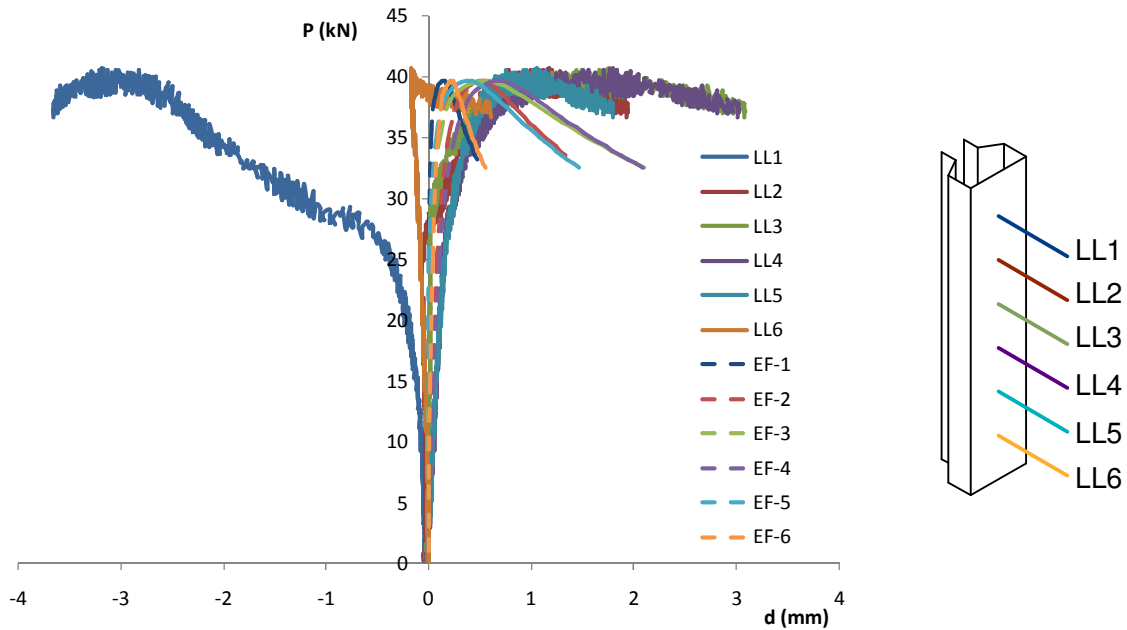


Figura 6.2. Comparação entre os resultados numéricos e experimentais dos deslocamentos na alma do protótipo CC-SF-3.

A figura 6.3 apresenta os resultados dos deslocamentos à meia altura dos flanges de ligação. Assim como no caso dos deslocamentos na alma da coluna pode-se observar boa correlação entre os resultados numéricos (LE-EF e LD-EF) e experimentais.

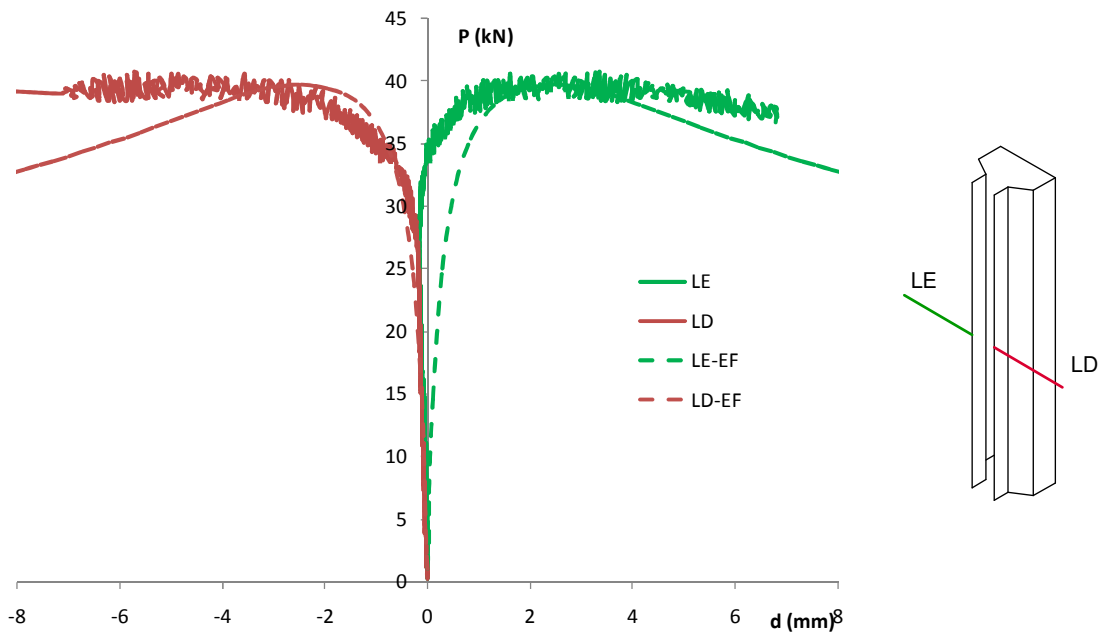
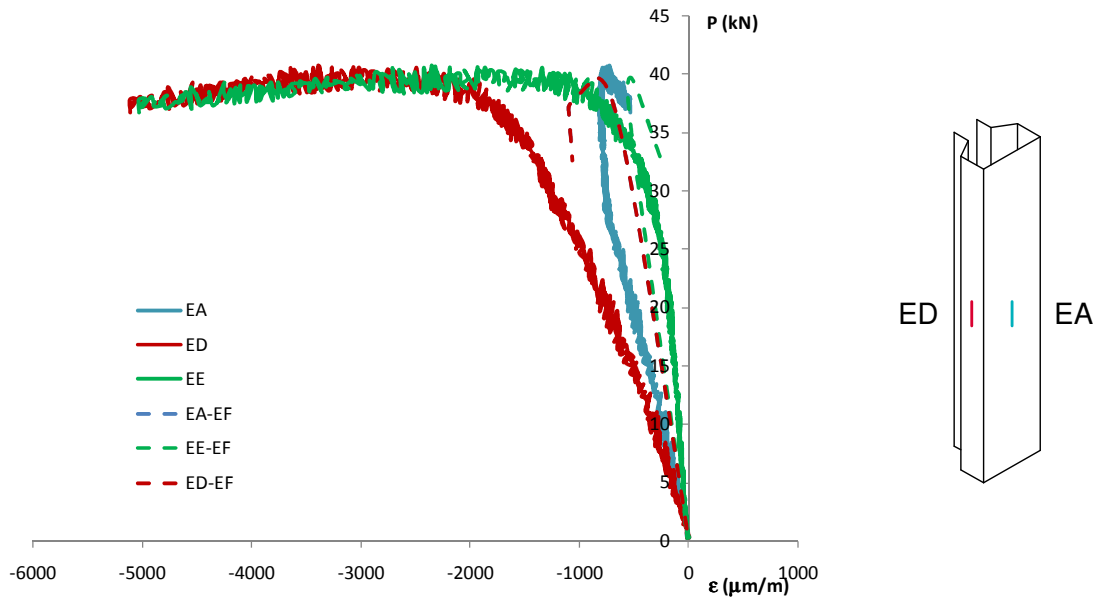


Figura 6.3. Comparação entre os resultados numéricos e experimentais dos deslocamentos nos flanges de ligação do protótipo CC-SF-3.

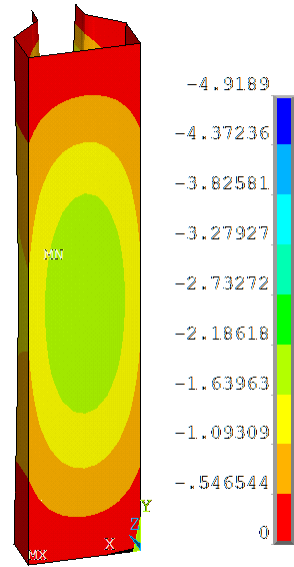
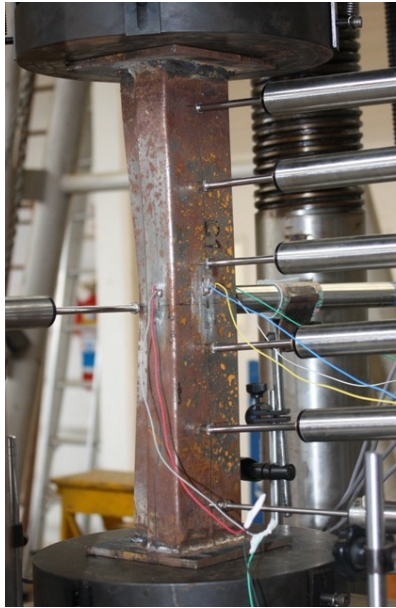


A figura 6.4 apresenta a comparação entre os resultados obtidos para as deformações à meia altura do protótipo nos flanges e na alma da coluna. Pode-se observar que existe uma boa correlação entre as deformações apontadas pelos extensômetros e os resultados numéricos (EA-EF, EE-EF e ED-EF) até o colapso da coluna. Esta similaridade nos resultados mais uma vez indica a capacidade do modelo numérico em representar o comportamento real da coluna.

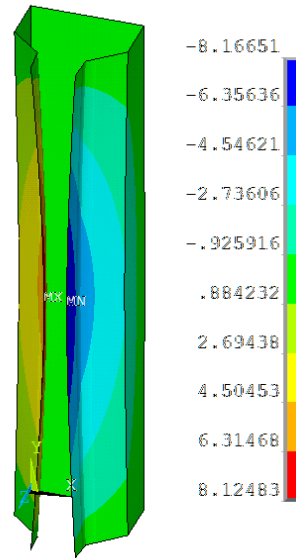
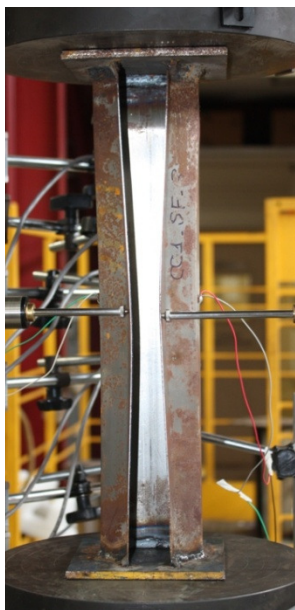


**Figura 6.4. Comparação entre as deformações numéricas e experimentais no protótipo CC-SF-3.**

A figura 6.5 compara as deformadas obtidas dos ensaios com as obtidas numericamente. Observa-se similaridade entre as deformadas, reafirmando as conclusões apresentadas anteriormente e indicando que o comportamento da coluna curta sem perfurações foi bem representada pelo modelo não linear em elementos finitos.



(a)



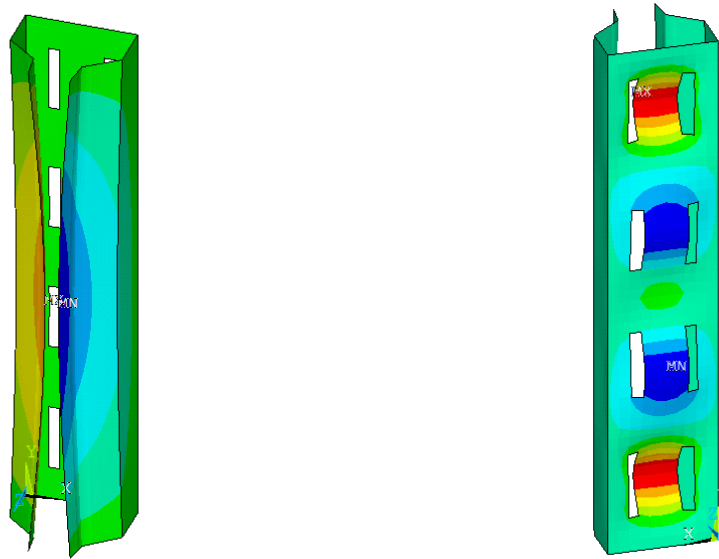
(b)

Figura 6.5. Deslocamentos no protótipo CC-SF-3 e no modelo numérico: (a) alma; (b) flange.

### 6.2.2 Série CC-F60

Neste item são comparados os resultados experimentais apresentados no item 5.4.2 com resultados obtidos a partir da análise não linear do protótipo CC-F60-1. A figura 6.6 apresenta os modos de flambagem utilizados para introduzir a imperfeição inicial no modelo, com suas respectivas amplitudes ( $\delta$ ). A escolha dos modos se faz a

partir de observação durante o procedimento experimental e a amplitude do modo baseia-se nas imperfeições do protótipo.

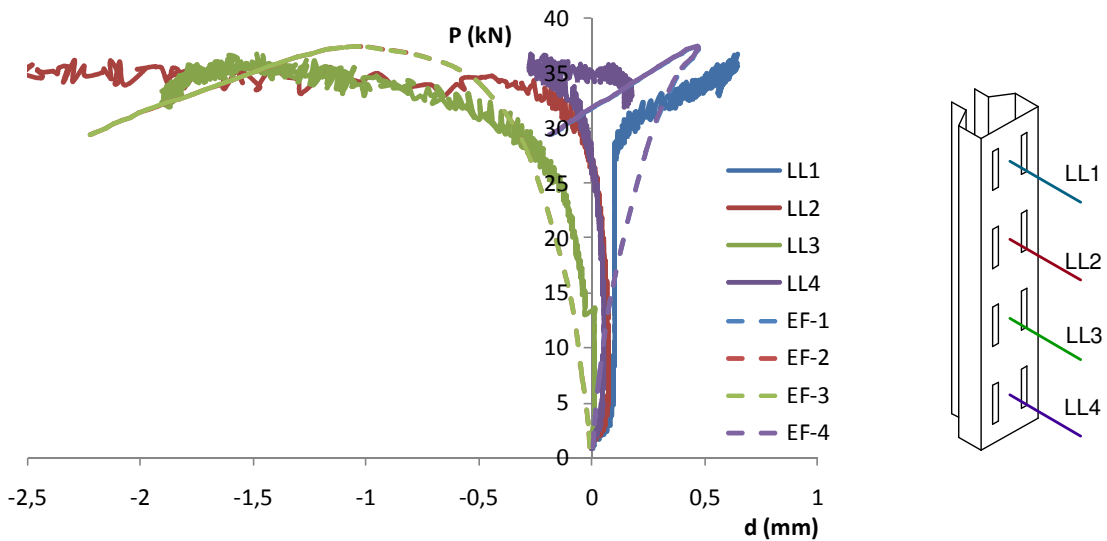


Modo 1:  $\delta = -0,5$  mm

Modo 2:  $\delta = -0,25$  mm.

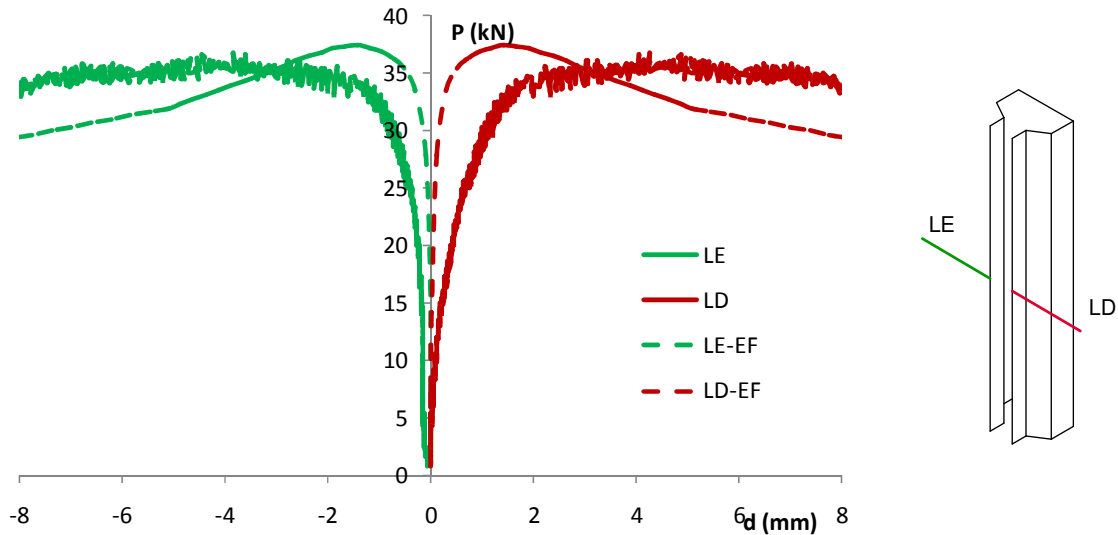
**Figura 6.6. Modos de flambagem utilizados na introdução da imperfeição inicial para o protótipo CC-F60-1.**

A comparação entre os deslocamentos na alma do modelo numérico com os resultados experimentais é apresentada na figura 6.7. Pode-se observar boa correlação entre os resultados numéricos e os deslocamentos medidos pelos transdutores no ensaio. Na figura os resultados numéricos EF-1 e EF4, bem como EF-2 e EF-3 estão sobrepostos.



**Figura 6.7. Comparação entre os resultados dos deslocamentos na alma do protótipo CC-F60-1**

A boa correlação entre os resultados numéricos e experimentais pode também ser observada no deslocamento dos flanges de ligação, apresentados na figura 6.8. Pode-se observar coerência nos deslocamentos ao longo do ensaio, com o modelo indicando a abertura da seção observada experimentalmente. Observa-se também a partir das figuras 6.7 e 6.8 que o modelo é bastante preciso na determinação da carga de colapso da coluna.



**Figura 6.8. Comparação entre os resultados dos deslocamentos nos flanges de ligação do protótipo CC-F60-1.**

As deformações na alma e nos flanges da coluna também são obtidas com boa precisão no modelo numérico. A figura 6.9 apresenta esta comparação, onde pode-se observar boa correlação entre os resultados até o colapso da estrutura.

A figura 6.10 apresenta os deslocamentos observados na alma e nos flanges do protótipo e sua comparação com os resultados do modelo numérico. Observa-se nesta figura que há similaridade entre as deformadas teórica e experimental, o que mais uma vez indica a viabilidade da análise numérica na avaliação da coluna curta com furos na alma de altura igual a 60% de sua largura.

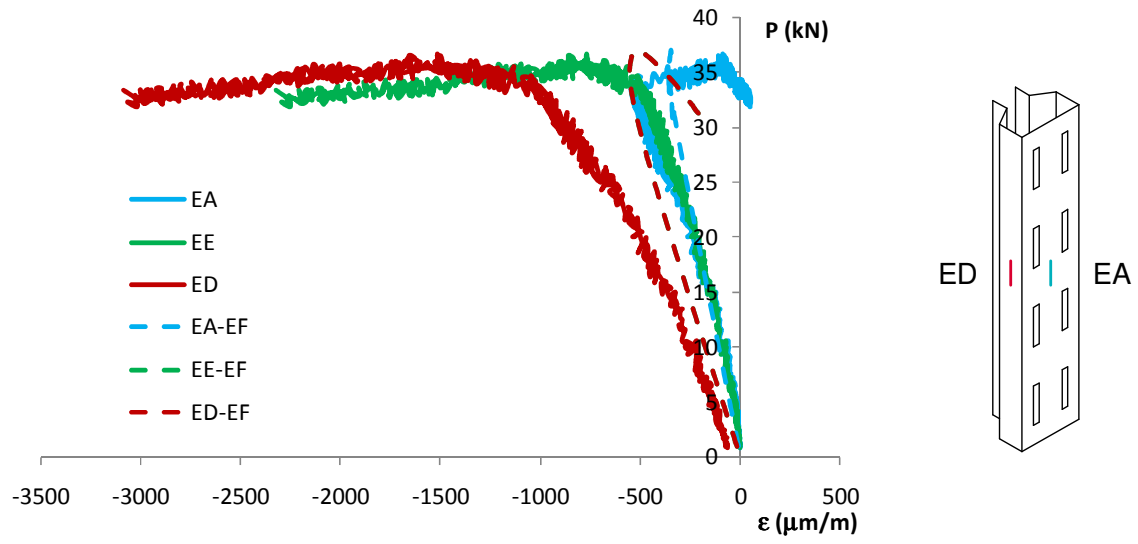
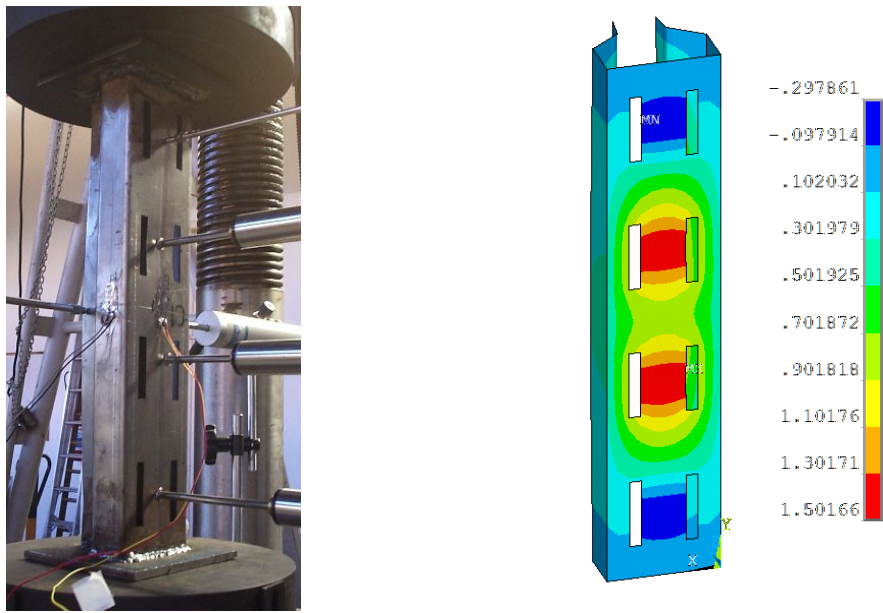
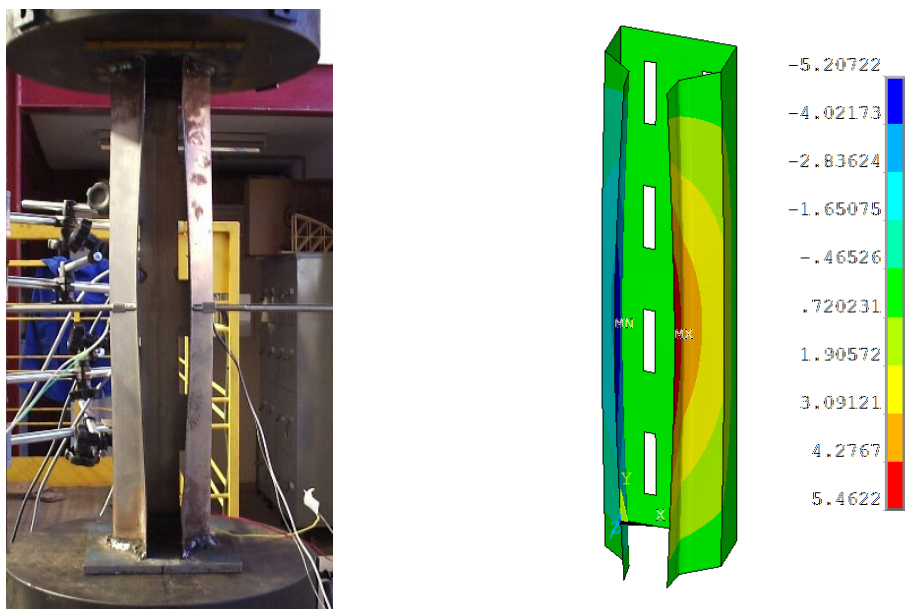


Figura 6.9. Comparação entre as deformações no protótipo CC-F60-1.



(a)



(b)

Figura 6.10. Deslocamentos no protótipo CC-F60-1 e no modelo numérico: (a) alma; (b) flange.

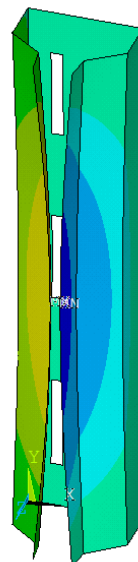
### 6.2.3 Série CC-F80

Este item apresenta a comparação entre os resultados numéricos e experimentais para o protótipo CC-F80-1, representando esta série. A partir da análise de flambagem elástica foram obtidos os modos utilizados na introdução da imperfeição inicial no modelo, apresentados na figura 6.11 com as suas respectivas amplitudes ( $\delta$ ).

A figura 6.12 apresenta a comparação entre os resultados dos deslocamentos na alma do perfil e os resultados numéricos. Observa-se na figura que existe boa correlação entre os resultados, com o modelo numérico apontando deslocamentos semelhantes nas regiões de LL1 e LL3, o que é esperado pela simetria da estrutura. Nos resultados experimentais, observa-se que a região LL3 apresenta considerável dispersão em relação aos demais resultados. Isto se justifica pela influência das condições de contorno na extremidade. Nesta figura os resultados numéricos EF-1 e EF-3 encontram-se superpostos.



Modo 3:  $\delta = -0,75$  mm



Modo 4:  $\delta = -0,5$  mm.

Figura 6.11. Modos de flambagem utilizados na introdução da imperfeição inicial para o protótipo CC-F80-1.

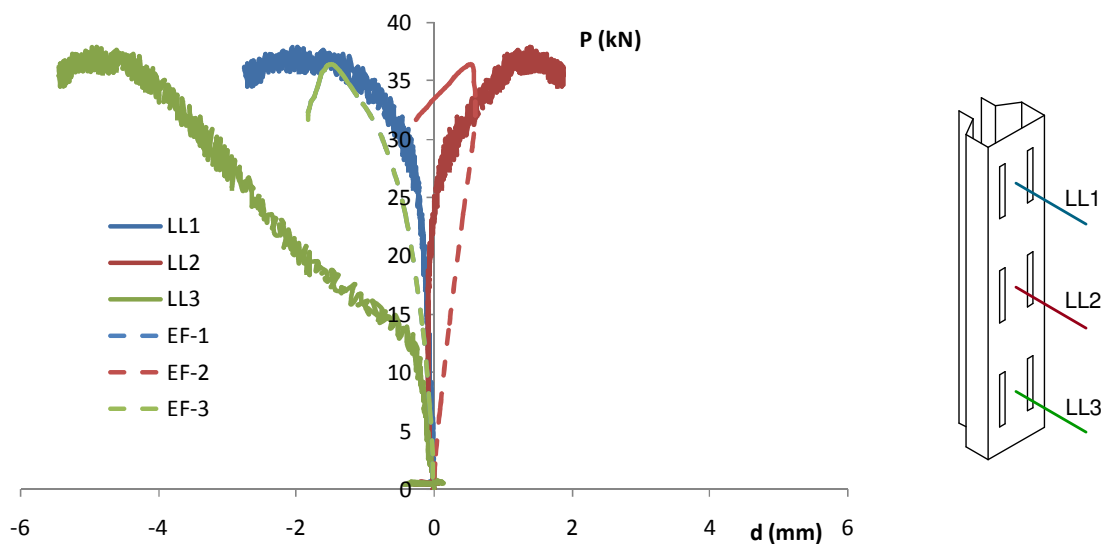
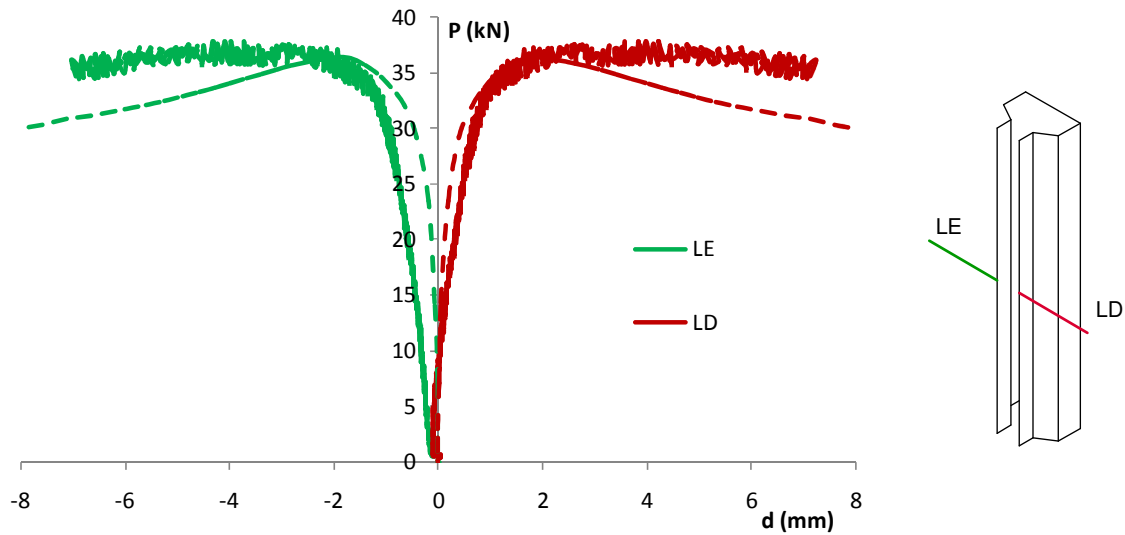


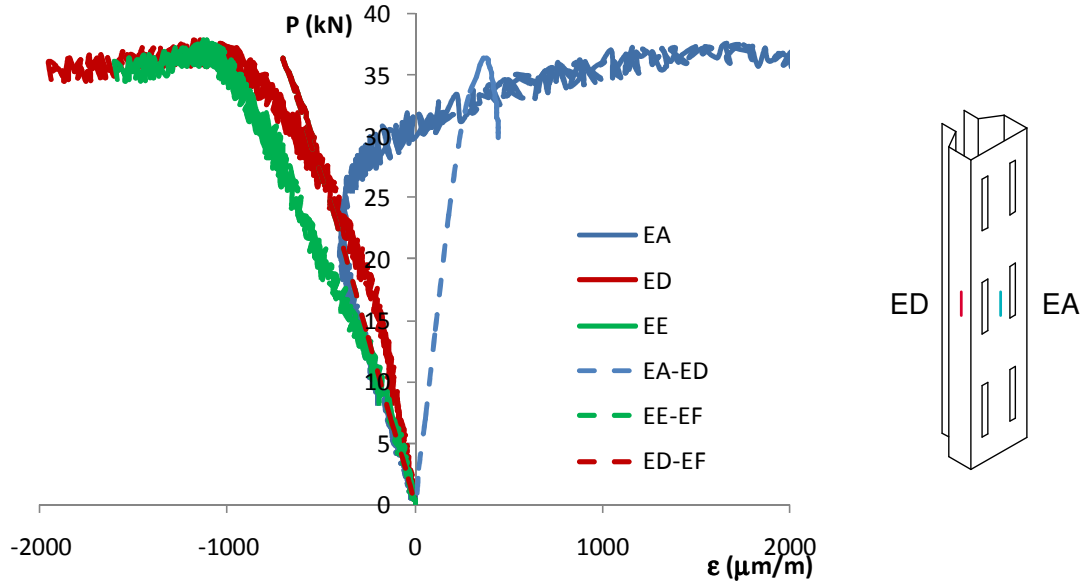
Figura 6.12. Comparação entre os resultados dos deslocamentos na alma do protótipo CC-F80-1.

Os deslocamentos nos flanges de ligação também apresentam boa correlação, conforme pode ser visto na figura 6.13. Observa-se que o modelo numérico capta a abertura da seção e descreve satisfatoriamente a trajetória de equilíbrio do protótipo. A partir dos resultados, observa-se que, mais uma vez, o modelo numérico é capaz de prever com precisão a carga de colapso das colunas.



**Figura 6.13.** Comparação entre os resultados dos deslocamentos nos flanges de ligação do protótipo CC-F80-1.

Os resultados dos extensômetros são comparados às deformações no modelo numérico na figura 6.14. Pode-se observar que, também neste caso, existe uma boa correlação entre os resultados.

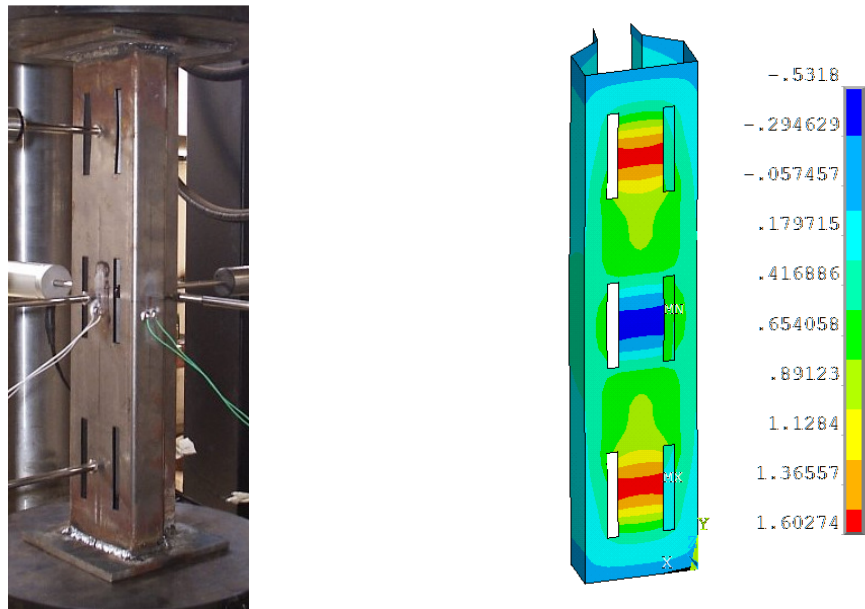


**Figura 6.14.** Comparação entre as deformações no protótipo CC-F80-1.

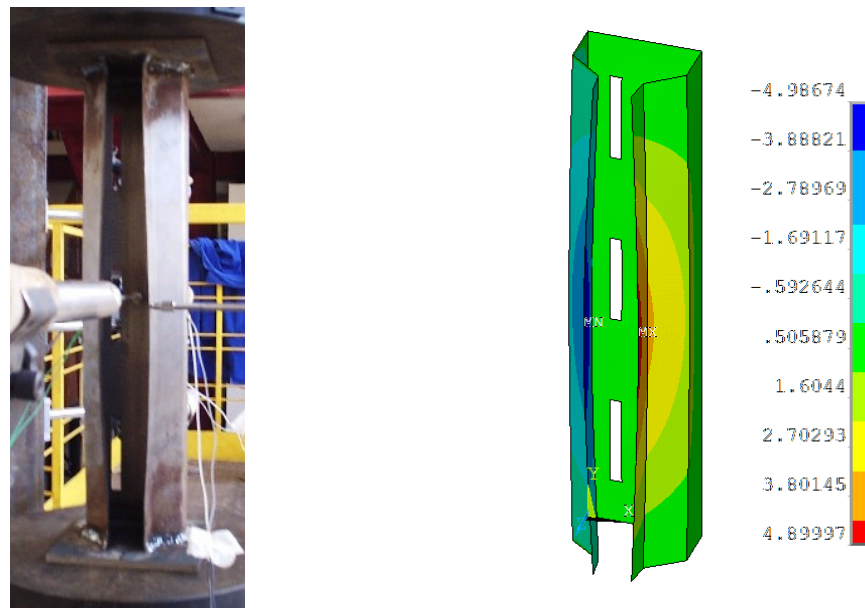
Finalmente, a figura 6.15 apresenta a comparação entre as deformadas numérica e experimental. Pode-se observar que existe semelhança entre os deslocamentos obtidos no modelo numérico e no protótipo experimental, o que mais uma vez indica a viabilidade



na análise numérica na simulação da coluna curta com a tipologia de perfuração adotada nesta série.



(a)

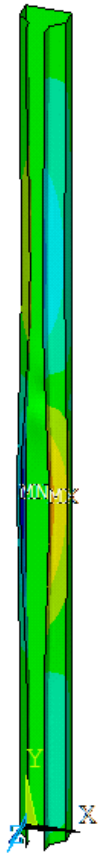


(b)

Figura 6.15. Deslocamentos no protótipo CC-F80-1 e no modelo numérico: (a) alma; (b) flange.

#### 6.2.4 Série CM-SF

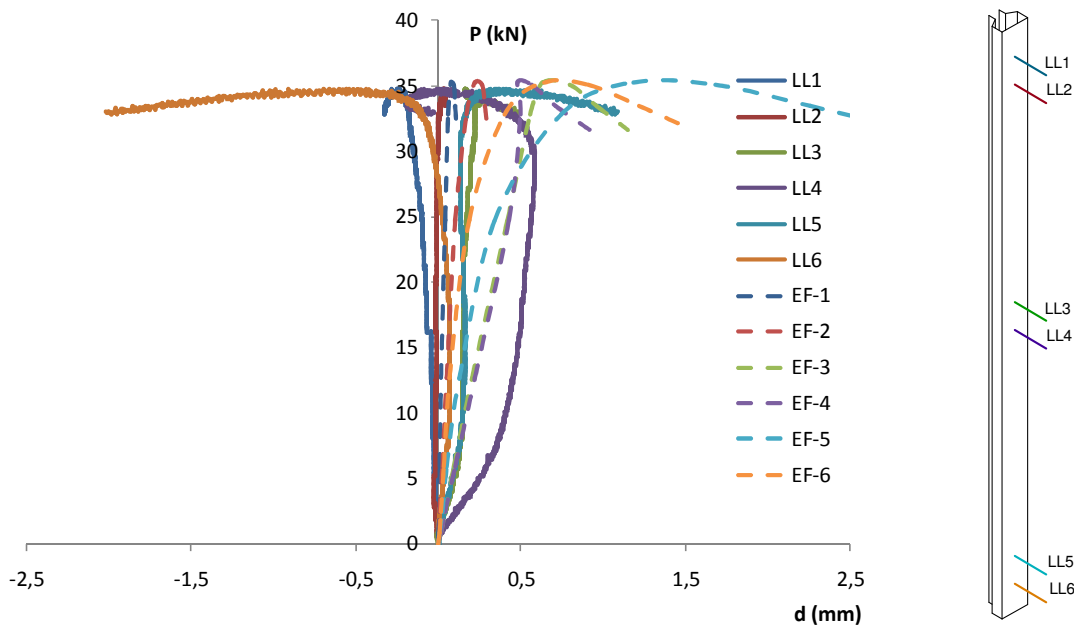
Este item apresenta os resultados para a série de colunas médias sem furos, CM-SF. Para representá-la serão apresentados os resultados do protótipo CM-SF-2. Na análise não linear destes protótipos foram inseridas as imperfeições a partir do modo apresentado na figura 6.16, juntamente à sua amplitude.



Modo 1:  $\delta = 0,5 \text{ mm}$

**Figura 6.16. Modo de flambagem utilizado na introdução da imperfeição inicial para o protótipo CM-SF-2.**

A figura 6.17 apresenta os deslocamentos na alma do perfil. Observa-se que existe boa correlação entre os resultados, com exceção dos transdutores próximos às extremidades (LL1 e LL6), afetados pelas condições de contorno.



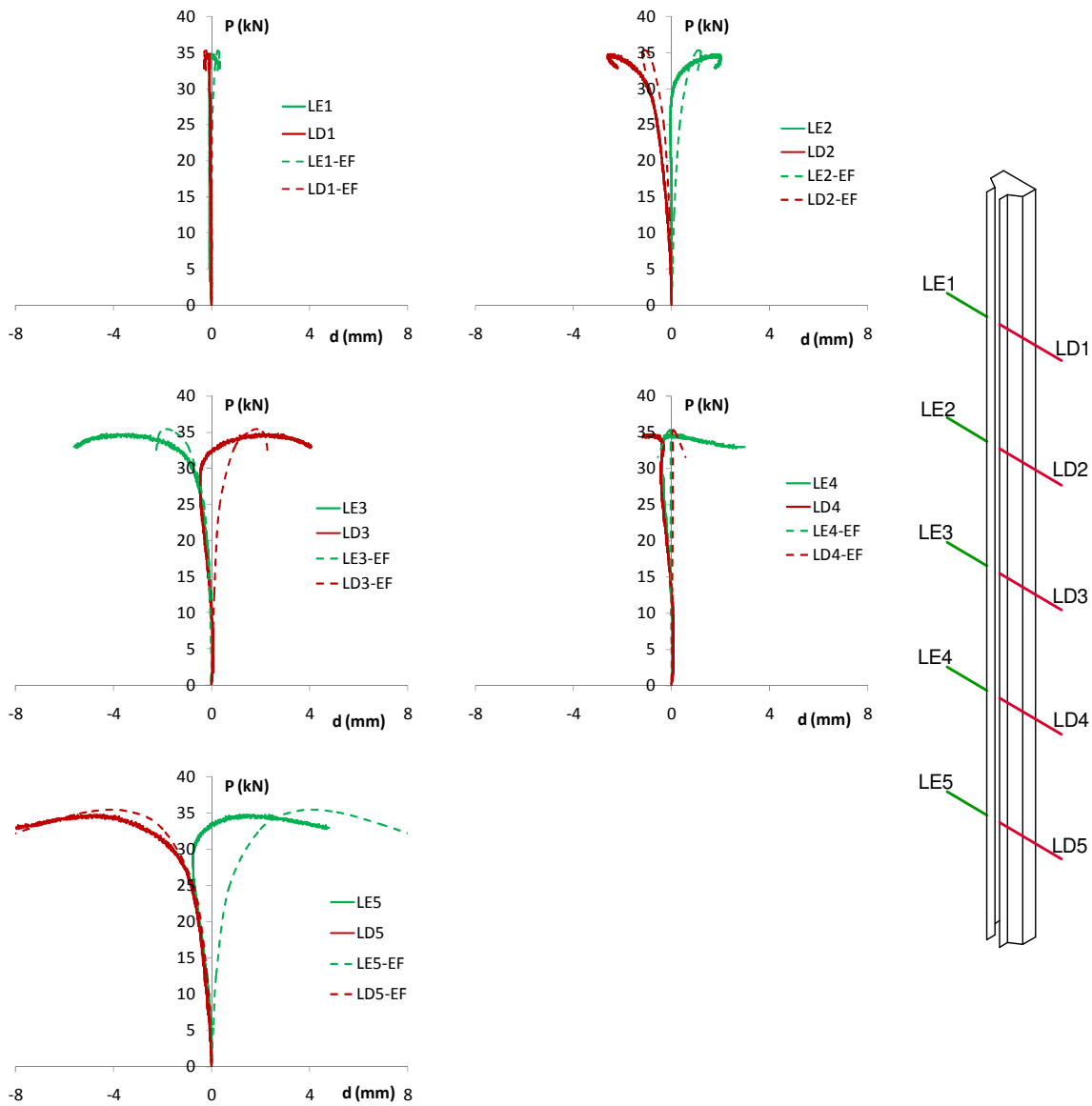
**Figura 6.17. Comparação entre os resultados dos deslocamentos na alma do protótipo CM-SF-2.**

Já a comparação entre os resultados dos deslocamentos observados nos flanges da coluna são apresentados na figura 6.18. Pode-se observar que o modelo numérico indicou de maneira correta os pequenos deslocamentos nos LVDTs LE1-LD1, o fechamento da seção com deslocamentos relativamente pequenos (aproximadamente 2 mm) nos LVDTs LE2-LD2, a abertura da seção à meia altura da coluna (LE3-LD3), o ponto de inflexão indicado pelos LVDTs (LE4-LD4) e o fechamento da seção com maiores deslocamentos (na ordem de 8 mm) na posição do par LE5-LD5, o que indica a capacidade do modelo numérico em captar a ocorrência do modo distorcional.

As deformações obtidas experimentalmente são comparadas às deformações no modelo numérico na figura 6.19. Observa-se que existe boa correlação entre os resultados numéricos e experimentais, e a carga última dos protótipos é prevista com boa precisão. Interessante observar que na posição em que estão instalados os extensômetros (meia altura da coluna) a abertura da seção é pequena, e não chega a mudar o comportamento dos extensômetros.

A figura 6.20 compara os deslocamentos no protótipo experimental com os deslocamentos observados no modelo numérico. Pode-se ver na figura que existe

similaridade nas deformadas, o que mais uma vez comprova a eficiência do modelo numérico na representação do comportamento da coluna.



**Figura 6.18. Comparação entre os resultados dos deslocamentos nos flanges de ligação do protótipo CM-SF-2.**

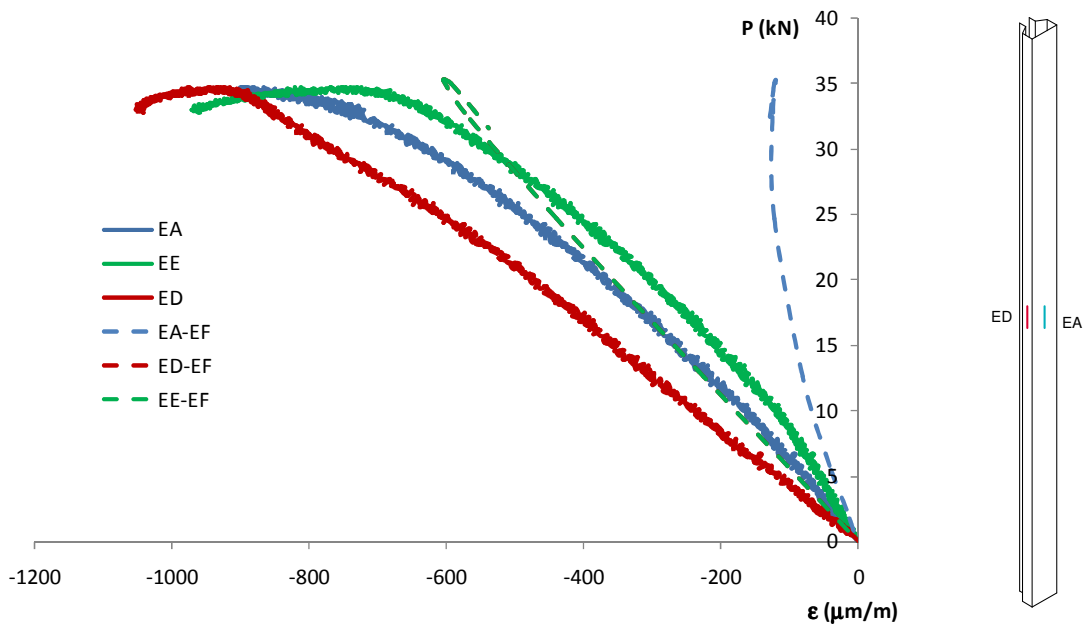
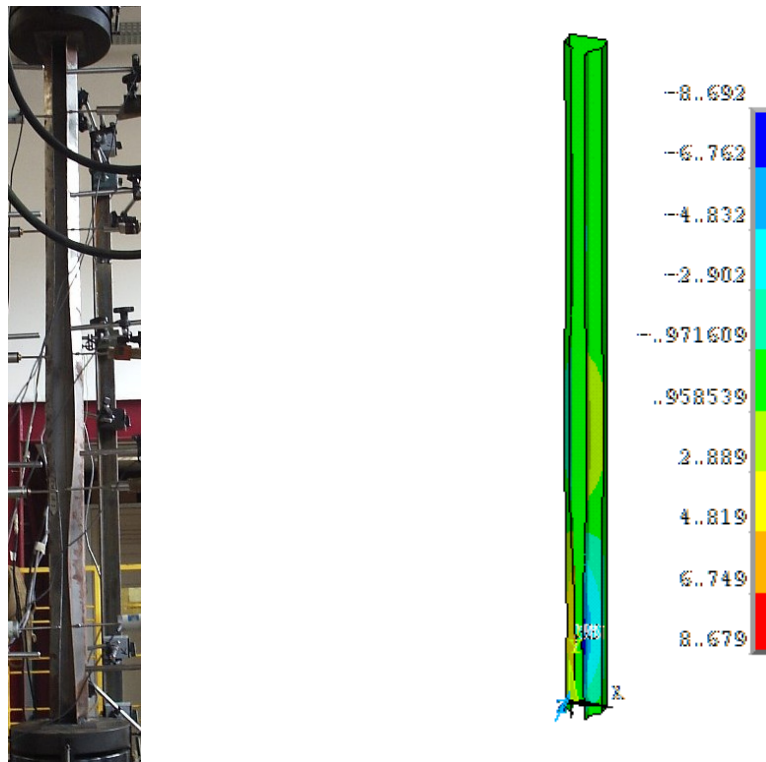
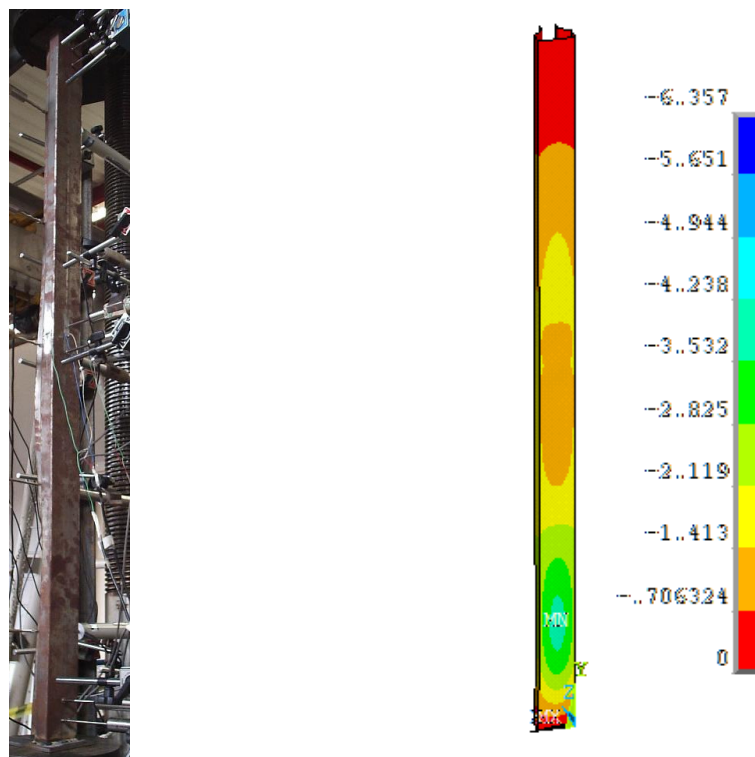


Figura 6.19. Comparação entre as deformações no protótipo CC-SF-2.



(a)

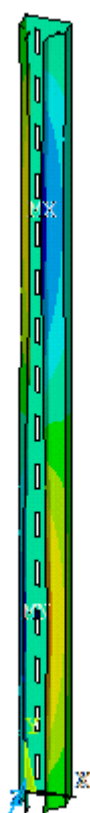


(b)

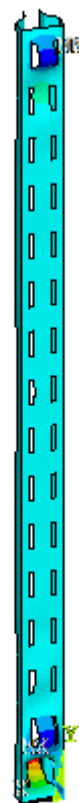
**Figura 6.20. Deslocamentos no protótipo CM-SF-2 e no modelo numérico: (a) flange; (b) alma.**

### 6.2.5 Série CM-F60

Este item apresenta os resultados para a série de colunas médias com furos na alma cujo comprimento é igual a 48 mm (60% da largura da alma), CM-F60. Para representá-la serão apresentados os resultados do protótipo CM-F60-3. Na análise não linear destes protótipos foram inseridas as imperfeições a partir dos modos apresentados na figura 6.21, juntamente às suas respectivas amplitudes.



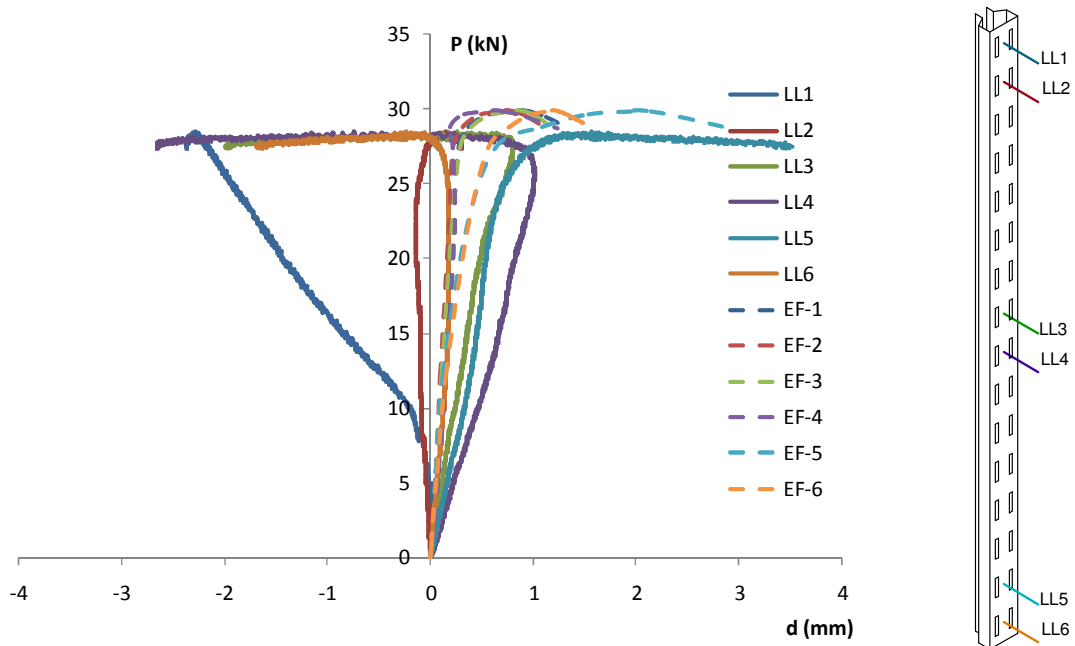
Modo 2:  $\delta = -0,5 \text{ mm}$



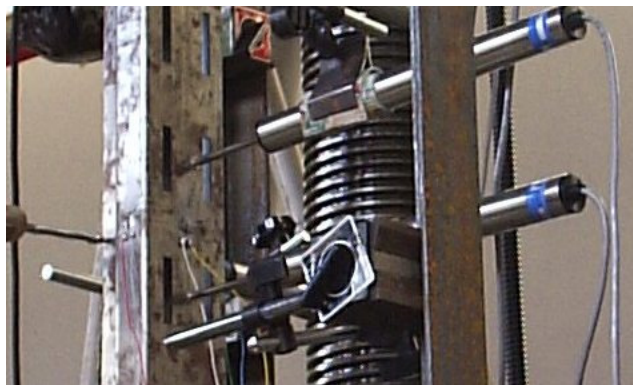
Modo 5:  $\delta = 0,5 \text{ mm}$

**Figura 6.21. Modos de flambagem utilizados na introdução da imperfeição inicial para o protótipo CM-F60-3.**

A figura 6.22 apresenta a comparação entre os resultados experimentais e numéricos para os deslocamentos na alma do perfil. Observa-se que existe boa correlação entre os resultados até a carga de colapso, com exceção da posição LL1 que é afetada pelas condições de extremidade. Observa-se que, neste caso, não existe boa correlação para os LVDT LL3 e LL4 apresentados na figura 6.22. A figura 6.23 apresenta o posicionamento destes transdutores posicionados à meia altura da seção. Observa-se que na região entre os furos há deslocamento para dentro da seção (sentido negativo), indicado pelos LVDTs mas não captada pelo modelo numérico, onde este deslocamento acompanhou a alma, que se deslocou para fora da seção.



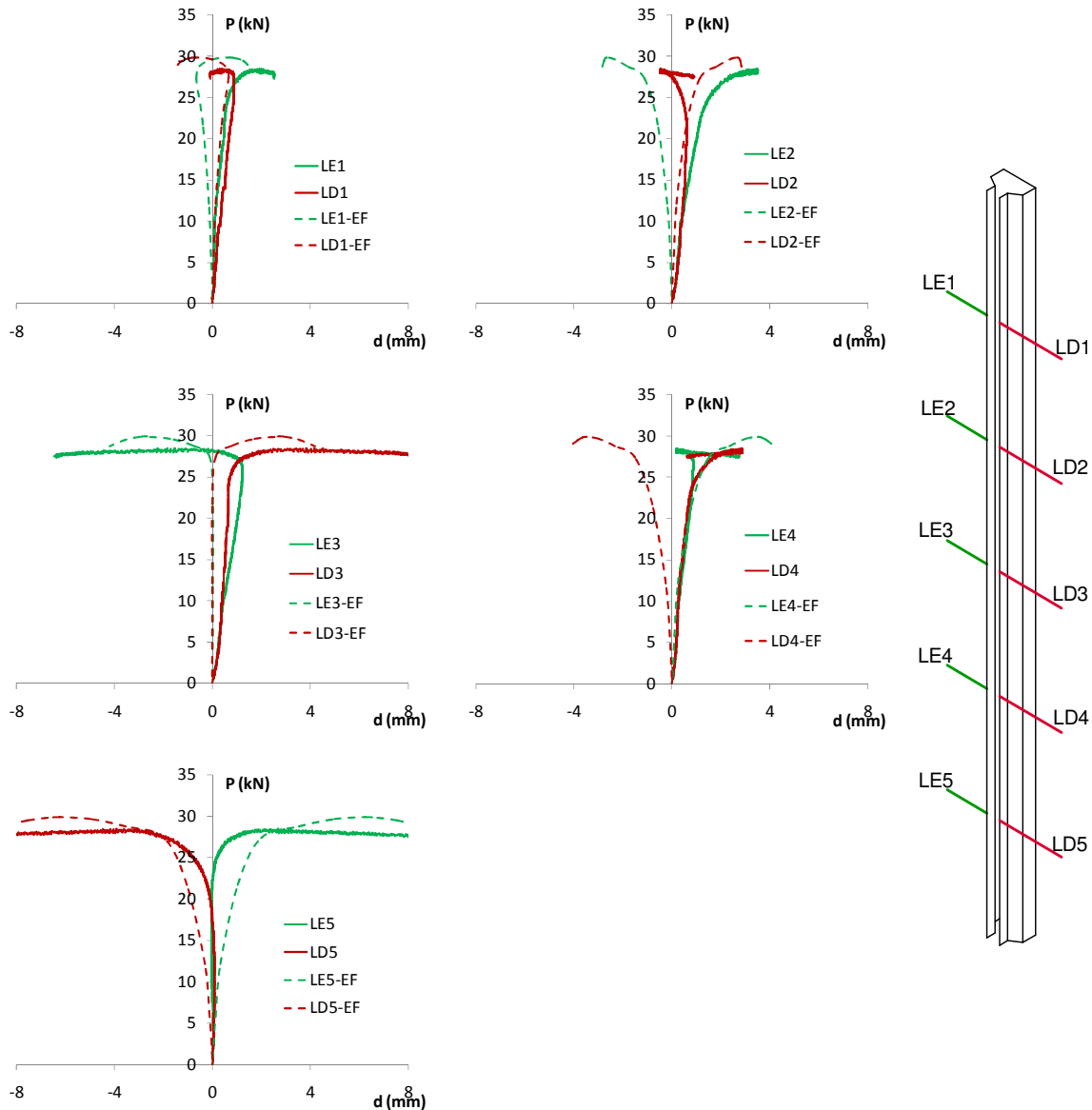
**Figura 6.22.** Comparação entre os resultados dos deslocamentos na alma do protótipo CM-F60-3.



**Figura 6.23.** Posicionamento dos LVDTs e extensômetros à meia altura da seção.

A figura 6.24 apresenta os deslocamentos no flange de ligação do protótipo. Pode-se observar que os seus resultados são coerentes para os cinco pares de LVDTs posicionados ao longo de sua altura. Observa-se boa correlação principalmente nos LVDTs LE3-LD3 e LE5-LD5, que são as regiões onde ocorrem a maior abertura e fechamento da seção, respectivamente.





**Figura 6.24. Comparação entre os resultados dos deslocamentos nos flanges de ligação do protótipo CM-F60-3.**

A figura 6.25 apresenta as deformações na seção. Observa-se na figura 6.23 que o extensômetro instalado na alma da coluna encontra-se fora da região afetada pelas perfurações, que se deslocou para fora da seção, o que resultou nas deformações de tração observadas neste extensômetro, o que veio ao encontro do resultado numérico.

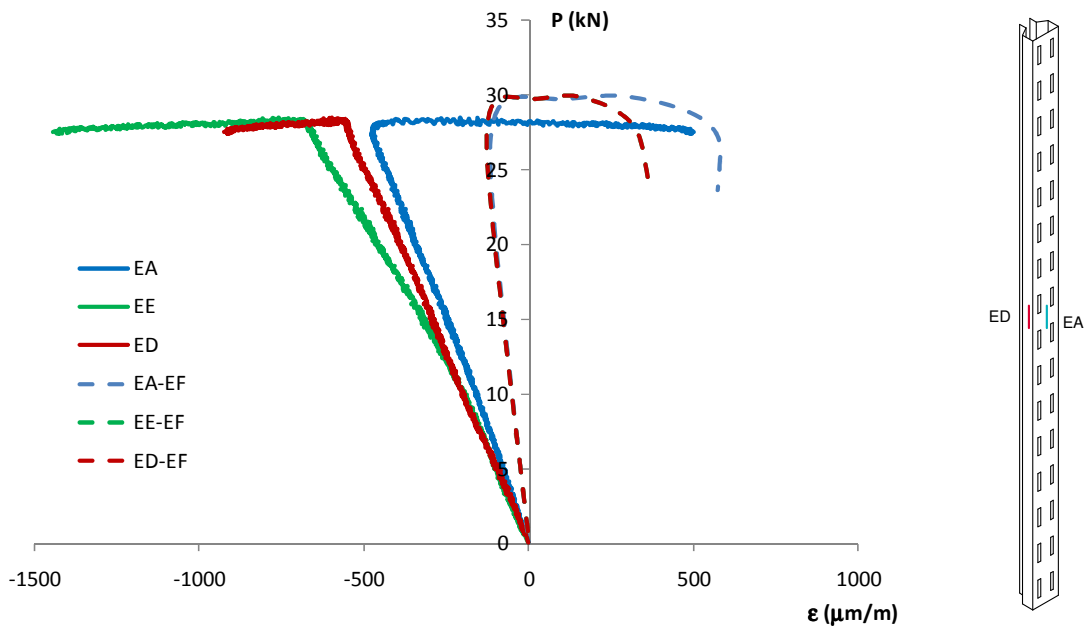
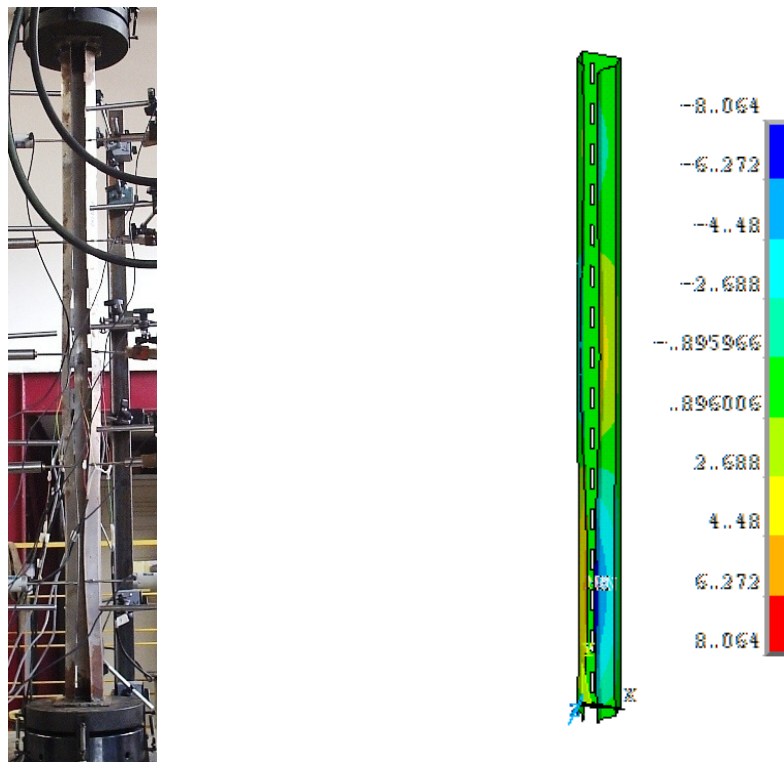
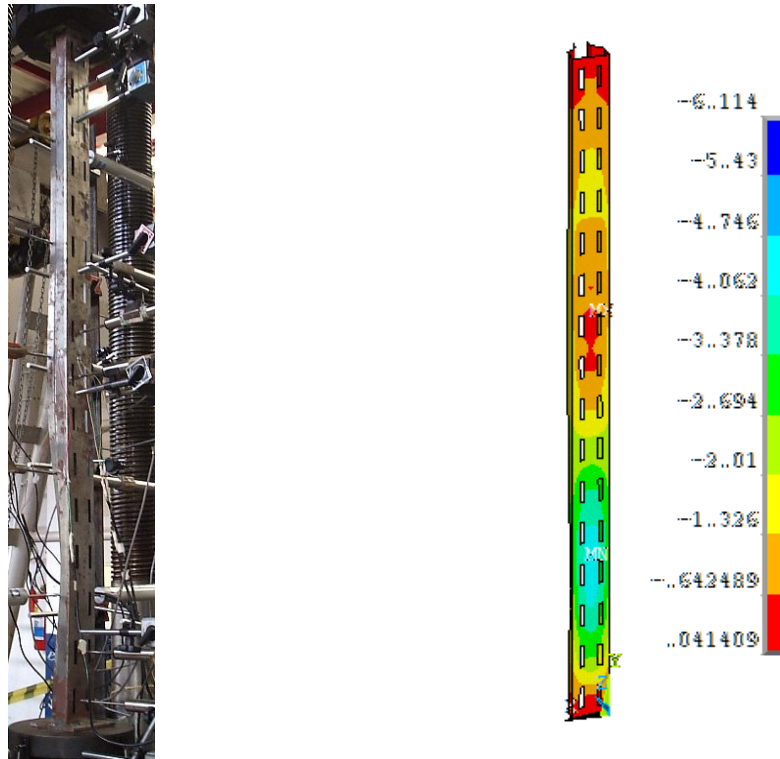


Figura 6.25. Comparação entre as deformações no protótipo CM-F60-3.

Finalmente, a figura 6.26 apresenta os deslocamentos observados experimentalmente e os resultados numéricos, que apresentam-se bastante semelhantes.



(a)

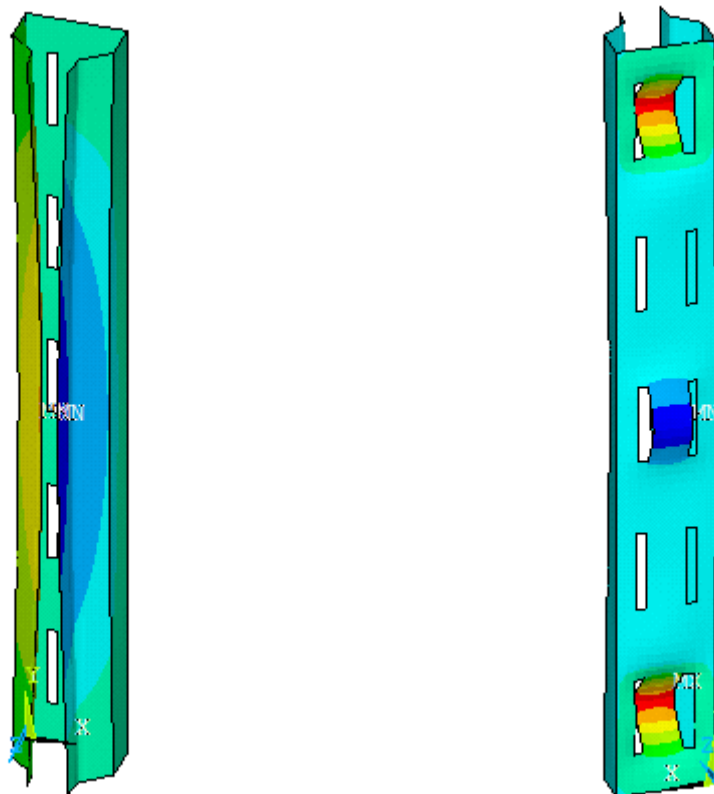


(b)

**Figura 6.26.**Deslocamentos no protótipo CM-F60-3 e no modelo numérico: (a) flange; (b) alma.

### 6.2.6 Série CM-F80

Neste item serão comparados os resultados numéricos e experimentais para a série CM-F80, que abrange as colunas médias com perfurações de 64 mm de comprimento na alma. Para representar esta série será apresentada aqui a comparação de resultados para o protótipo CM-F80-3. A figura 6.27 apresenta os modo de flambagem obtido na análise de estabilidade elástica utilizado para a introdução das imperfeições na análise não linear a a amplitude.



Modo 1:  $\delta = 0,5 \text{ mm}$

**Figura 6.27. Modo de flambagem utilizado na introdução da imperfeição inicial.**

A figura 6.28 apresenta a comparação entre os deslocamentos na alma do protótipo nas análises numérica e experimental. Pode-se observar que existe boa correlação entre os resultados obtidos para todos os transdutores, o que indica a capacidade do modelo numérico nesta previsão.

A figura 6.29 apresenta os resultados dos deslocamentos nos flanges de ligação da coluna, que apresentou o modo distorcional com a formação de uma meia onda e fechamento da seção. A figura mostra que o modelo numérico captou estes deslocamentos satisfatoriamente.

A figura 6.30 apresenta os resultados para as deformações à meia altura da coluna, na alma e nos flanges. Pode-se observar que os resultados numéricos têm boa

correlação com os resultados experimentais, principalmente na região dos flanges da seção.

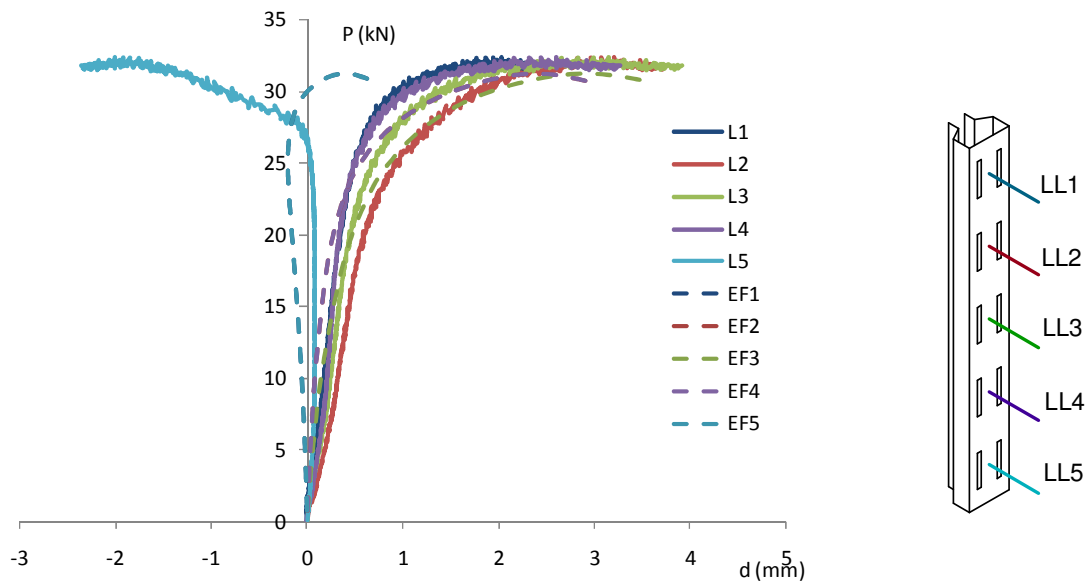


Figura 6.28. Comparação entre os resultados na alma do perfil CM-F80-3.

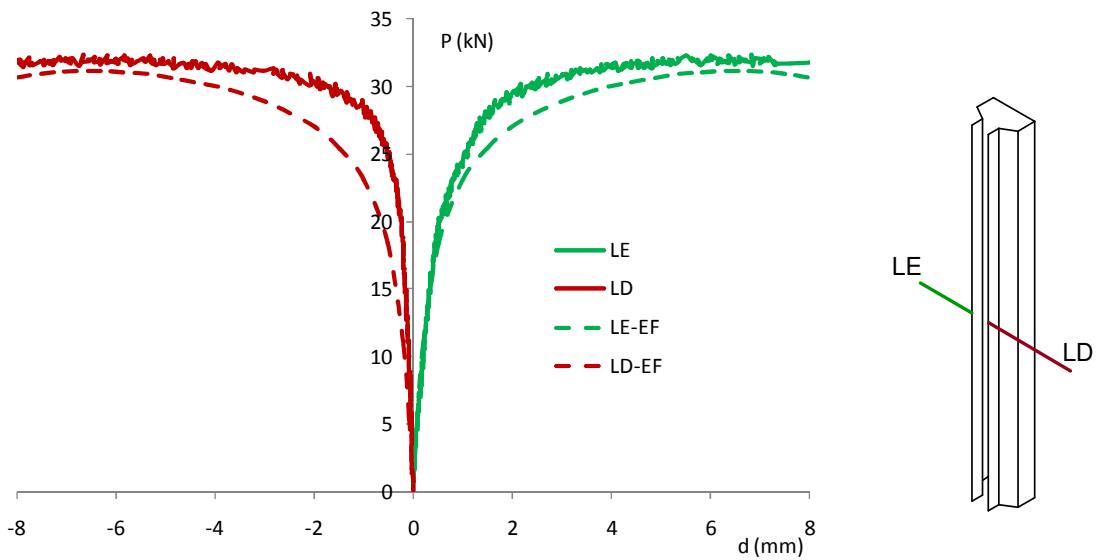
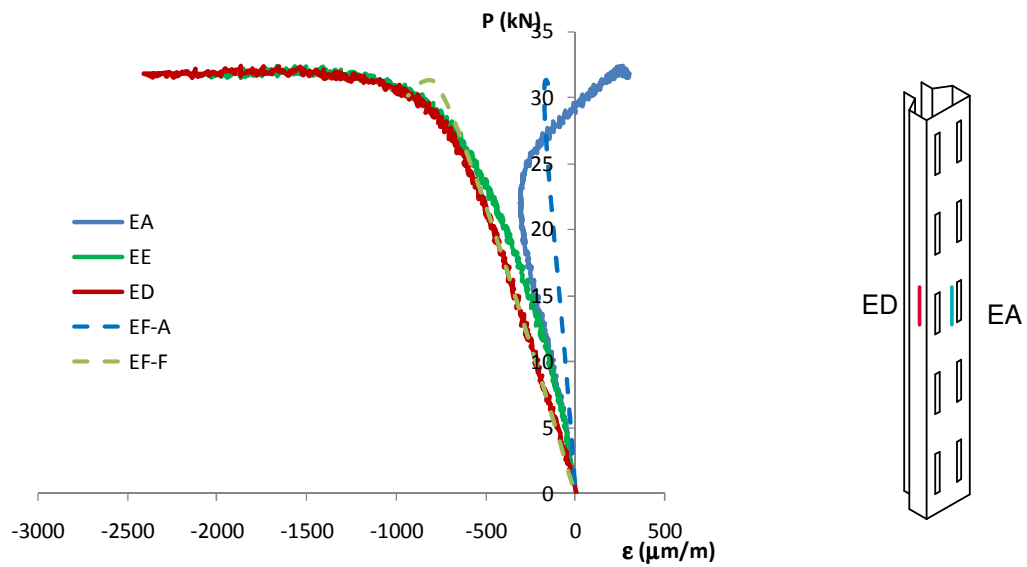
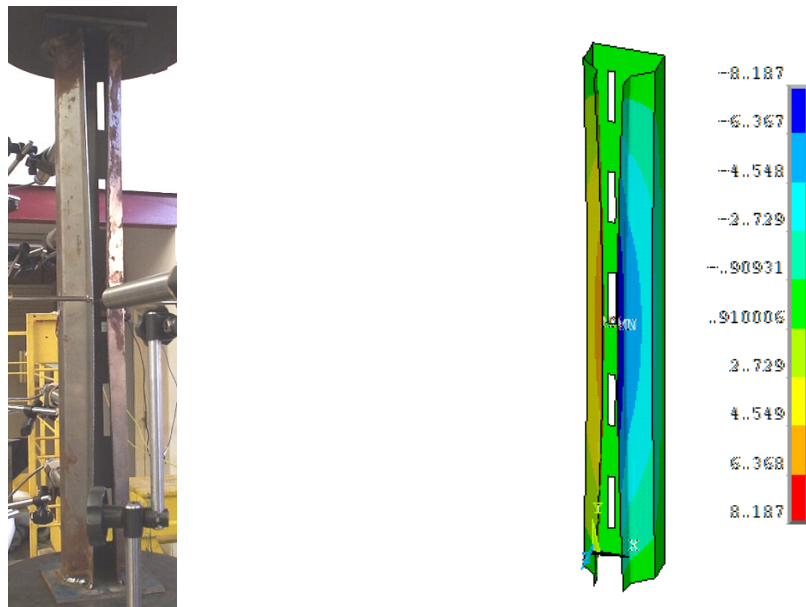


Figura 6.29. Comparação entre os resultados dos deslocamentos nos flanges de ligação do protótipo CM-F80-3.

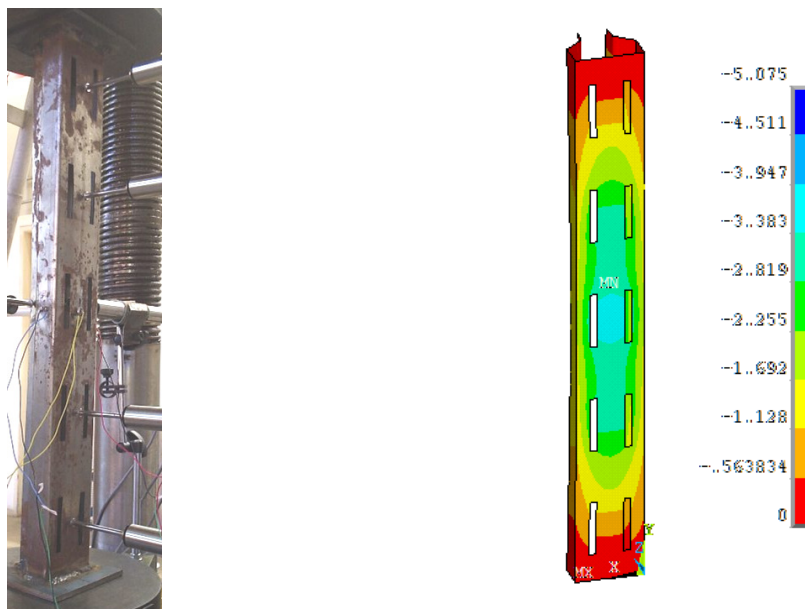


**Figura 6.30. Comparação entre as deformações no protótipo CM-F80-3.**

Finalmente, a figura 6.31 apresenta os deslocamentos na alma e nos flanges de ligação no protótipo experimental e no modelo numérico. Pode-se observar que existe coerência entre a deformada do modelo numérico e a deformada experimental.



(a)



(b)

Figura 6.31. Deslocamentos no protótipo CM-F80-3 e no modelo numérico: (a) flange; (b) alma.

### 6.2.7 Considerações sobre as comparações entre os resultados numéricos e experimentais

O gráfico apresentado na figura 6.32 apresenta a comparação entre as cargas últimas numéricas e experimentais. Observa-se que, em geral, existe boa correlação entre os valores, sendo as maiores dispersões 4,8% no modelo CC-F80 e 5,3% no modelo CM-F60. Ressalta-se que no ultimo caso houve a perda de um dos protótipos, enquanto o primeiro apresenta forte influência do modo localizado de placa em suas extremidades.

Os protótipos ensaiados apresentam grande sensibilidade às imperfeições. Por isto, a introdução da imperfeição a partir dos modos seguiu as observações visuais e as medidas tomadas durante o levantamento das imperfeições.

A tabela 6.1 apresenta os modos e as amplitudes para a introdução das imperfeições nos protótipos, apresentados neste capítulo e no Apêndice C. Os modos foram obtidos a partir de análise elástica de flambagem. Ressalta-se que em diversos protótipos foi necessária a combinação linear entre os modos observados.

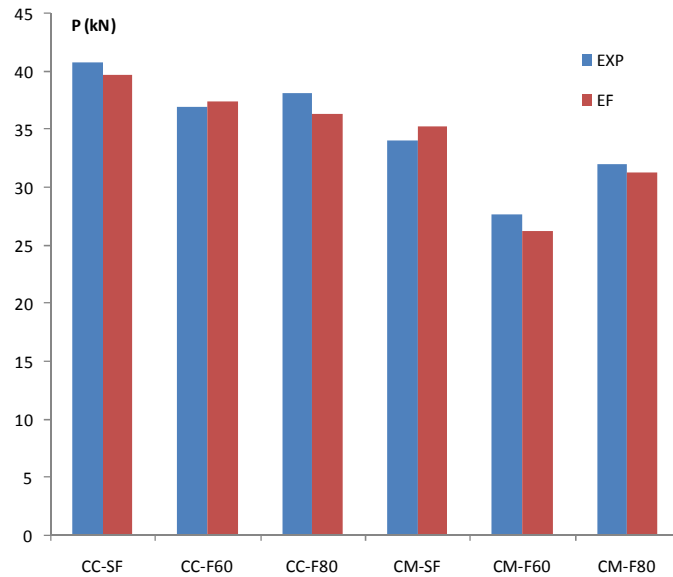


Figura 6.32. Comparação entre as cargas últimas experimental e numérica via elementos finitos.

Tabela 6.1. Modos e amplitudes induzidos.

	Modos	Amplitudes
CC-SF-1	1 e 3	1 mm e 1 mm
CC-SF-2	1	0,5 mm
CC-SF-3	1 e 3	0,4 mm e 0,1 mm
CC-F60-1	1 e 2	-0,5 mm e -0,25 mm
CC-F60-2	1 e 5	1 mm e -1 mm
CC-F60-3	1 e 5	1 mm e -1 mm
CC-F80-1	3 e 4	-0,75 mm e -0,5 mm
CC-F80-2	3 e 5	-0,25 mme 0,5 mm
CC-F80-3	3 e 4	0,75 mm e 0,5 mm
CM-SF-1	5	-0,5 mm
CM-SF-2	1	0,5 mm
CM-SF-3		
CM-F60-1	1,2 e 5	0,5 mm, -1 mm e 1 mm
CM-F60-3	2 e 5	-0,5 mm e 0,5 mm
CM-F80-1	1	0,5 mm
CM-F80-2	1	1 mm
CM-F80-3	1	0,25 mm



## 7 Comparações teóricas

### 7.1 Introdução

Neste capítulo é apresentada a avaliação das seções do tipo rack com e sem perfurações pelas prescrições da NBR14762, Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio. Para este fim, será utilizado o Método da Resistência Direta, apresentado no Anexo C da Norma.

O Método da Resistência Direta considera a avaliação da estabilidade elástica da seção e da coluna para o cálculo da capacidade resistente. Neste capítulo, a análise da estabilidade para as colunas com e sem perfurações foram feita pelo método dos elementos finitos, conforme apresentado no capítulo 3. As forças axiais de compressão resistentes obtidas para os diversos protótipos ensaiados foram então comparadas às cargas últimas experimental e numérica.

### 7.2 O Método da Resistência Direta

O Método da Resistência Direta (MRD) permite a avaliação direta da resistência de barras submetidas à compressão centrada e à flexão simples, sem considerar o Método da Largura Efetiva e o Método da Seção Efetiva, também indicados na NBR 14762. No entanto, o MRD considera a avaliação da estabilidade linear da seção. Para a seção sem perfurações, existem programas de análise da estabilidade elástica, entre eles o CUFSM (faixas finitas) e o GBTul (Teoria Generalizada de Vigas) descritos e utilizados anteriormente neste trabalho. No entanto, a avaliação da estabilidade elástica de elementos com perfurações não é prevista nos referidos programas. Uma alternativa, empregada neste trabalho, é a realização desta avaliação pelo método dos elementos finitos. Existem pesquisas (Lecce (2007)), onde o método das faixas finitas é utilizado para a avaliação da estabilidade de elementos com perfurações.

A seguir são apresentadas as equações do MRD para a consideração dos modos isolados. A avaliação da resistência da barra submetida à compressão centrada,  $N_{c,Re}$ , à flambagem global por flexão, torção ou flexo-torção é prevista pelas expressões 7.1, 7.2 e 7.3, contidas na NBR 14762.

$$N_{c,Re} = \left(0,658^{\lambda_0^2}\right) Af_y \quad \text{para } \lambda_0 \leq 1,5 \quad 7.1$$

$$N_{c,Re} = \left( \frac{0,658}{\lambda_0^2} \right) A f_y \text{ para } \lambda_0 > 1,5 \quad 7.2$$

Onde

$$\lambda_0 = \left( \frac{A f_y}{N_e} \right)^{0,5} \quad 7.3$$

$A$  é a área bruta da seção transversal da barra;

$f_y$  é a tensão de escoamento do aço.

$N_e$  é a força axial de flambagem global elástica.

$\lambda_0$  é o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global.

As expressões 7.4, 7.5 e 7.6 são utilizadas para a previsão da resistência da seção em relação à flambagem local.

$$N_{c,RI} = A f_y \text{ para } \lambda_l \leq 0,776 \quad 7.4$$

$$N_{c,RI} = \left( 1 - \frac{0,15}{\lambda_l^{0,8}} \right) \frac{N_{c,Re}}{\lambda_l^{0,8}} \text{ para } \lambda_l > 0,776 \quad 7.5$$

onde

$$\lambda_l = \left( \frac{A f_y}{N_l} \right)^{0,5} \quad 7.6$$

$N_l$  é a força axial de flambagem local elástica.

$\lambda_l$  é o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem local.

O cálculo da resistência da seção à flambagem distorcional é feito com as expressões 7.7, 7.8 e 7.9. Estas expressões estão contidas na NBR 14762.

$$N_{c,Rdist} = A f_y \text{ para } \lambda_{dist} \leq 0,561 \quad 7.7$$

$$N_{c,Rdist} = \left( 1 - \frac{0,25}{\lambda_{dist}^{1,2}} \right) \frac{A f_y}{\lambda_{dist}^{1,2}} \text{ para } \lambda_{dist} > 0,561 \quad 7.8$$

onde 7.9

$$\lambda_{dist} = \left( \frac{Af_y}{N_{dist}} \right)^{0,5}$$

$N_{dist}$  é a força axial de flambagem distorcional elástica.

$\lambda_{disto}$  é o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem distorcional.

Para a utilização destas expressões, os valores de  $N_l$  e  $N_{dist}$ , que são as forças axiais de flambagem local e distorcional elásticas na seção devem ser determinadas por meio da análise de estabilidade elástica. Já o valor de  $N_e$ , que é a a força axial de flambagem global elástica da coluna no comprimento considerado, pode ser determinada por meio da análise de estabilidade elástica ou por expressões apresentadas pela NBR14762.

Além das expressões para os modos isolados apresentadas anteriormente, existem ainda expressões que consideram a possível interação entre os modos de flambagem, o que, em geral, leva à redução da resistência da seção (Silvestre et al. (2011), Santos et al. (2012), Dinis et al. (2012)). Para a interação entre os modos local e global, a força axial resistente,  $N_{c,Rle}$ , é determinada por meiodas expressões 7.10, 7.11 e 7.12. Estas expressões estão contidas na NBR 14762.

$$N_{c,Rle} = N_{c,Re} \text{ para } \lambda_l \leq 0,776 \quad 7.10$$

$$N_{c,Rle} = \left( 1 - \frac{0,15}{\lambda_{le}^{0,8}} \right) \frac{N_{c,Re}}{\lambda_{le}^{0,8}} \text{ para } \lambda_l > 0,776 \quad 7.11$$

onde

$$\lambda_{le} = \left( \frac{N_{c,Re}}{N_l} \right)^{0,5} \quad 7.12$$

Para a interação entre os modos local e distorcional, a força axial resistente,  $N_{c,Rldist}$ , é determinada por meiodas expressões indicadas são as 7.13, 7.14 e 7.15.

$$N_{c,Rldist} = N_{c,Rdist} \text{ para } \lambda_{ldist} \leq 0,776 \quad 7.13$$

$$N_{c,Rldist} = \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_{ldist}^{0,8}}\right) \frac{N_{c,Rdist}}{\lambda_{ldist}^{0,8}} \text{ para } \lambda_{ldist} > 0,776 \quad 7.14$$

onde

$$\lambda_{ldist} = \left(\frac{N_{c,Rdist}}{N_l}\right)^{0,5} \quad 7.15$$

Para os modos distorcional e global, a força axial resistente,  $N_{c,Rldiste}$ , é determinada por meio das expressões 7.16, 7.17 e 7.18.

$$N_{c,Rdiste} = N_{c,Re} \text{ para } \lambda_{diste} \leq 0,561 \quad 7.16$$

$$N_{c,Rdiste} = \left(1 - \frac{0,25}{\lambda_{diste}^{1,2}}\right) \frac{N_{c,Re}}{\lambda_{diste}^{1,2}} \text{ para } \lambda_{diste} > 0,561 \quad 7.17$$

onde

$$\lambda_{diste} = \left(\frac{N_{c,Re}}{N_{dist}}\right)^{0,5} \quad 7.18$$

Finalmente, para a interação local-distorcional-global, a força axial resistente,  $N_{c,Rldiste}$ , é determinada por meio das expressões são 7.19, 7.20 e 7.21.

$$N_{c,Rldiste} = N_{c,Rdiste} \text{ para } \lambda_{ldiste} \leq 0,776 \quad 7.19$$

$$N_{c,Rldiste} = \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_{ldiste}^{0,8}}\right) \frac{N_{c,Rdiste}}{\lambda_{ldiste}^{0,8}} \text{ para } \lambda_{ldiste} > 0,776 \quad 7.20$$

onde

$$\lambda_{ldiste} = \left(\frac{N_{c,Rdiste}}{N_l}\right)^{0,5} \quad 7.21$$

Neste trabalho, foram avaliadas as resistências dos protótipos ensaiados com as expressões apresentadas e as cargas críticas determinadas por meio da análise de estabilidade via elementos finitos. Os resultados foram comparados à resistência última experimental.

### 7.3 Análise da capacidade resistente da seção

Este item apresenta a comparação entre os resultados das resistências à compressão das séries ensaiadas experimental ( $P_{uExp}$ ), numérico via elementos finitos ( $P_{uEF}$ ) e a partir do Método da Resistência Direta ( $P_{uR}$ ). Duas maneiras foram consideradas para o cálculo da resistência experimental. Na primeira delas, considerou-se a área bruta da seção ( $A$ ), enquanto na outra considerou-se a área da seção mais afetada pelos furos, aqui chamada área líquida ( $A_{net}$ ), que seria uma adaptação da NBR 14762 para consideração de elementos perfurados. Foram consideradas as prescrições da NBR14762 com os modos isolados e também considerando os modos em interação. As análises realizadas podem ser resumidas em:

A análise 1 considera as prescrições da NBR14762 e a área bruta da seção. A análise 2 considera a área líquida e as mesmas prescrições da norma. Já a análise 3 considera a possibilidade dos modos em interação e considera a área bruta, e a análise 4 considera os modos em interação e a área líquida.

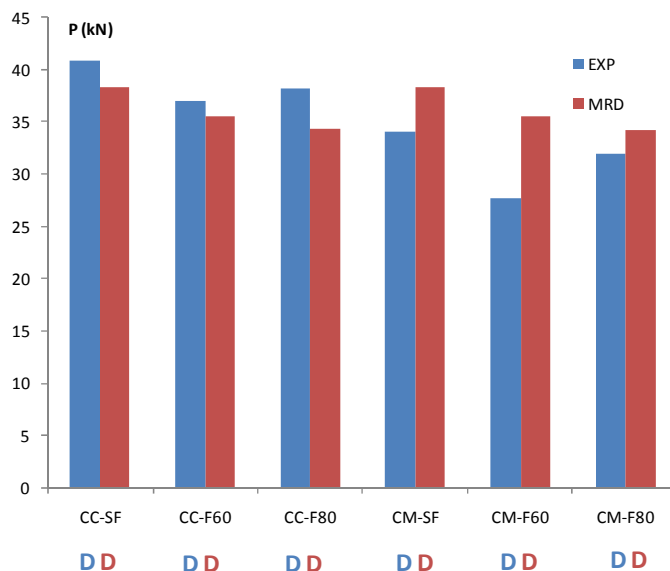
#### 7.3.1 Método da Resistência Direta considerando os modos de forma isolada

A seguir, apresentam-se os resultados das análises 1 e 2 para os modos isolados (equações 7.1 a 7.9). A tabela 7.1 apresenta os resultados obtidos com a área da seção bruta, enquanto a tabela 7.2 apresenta os resultados obtidos com a área da seção líquida. Os gráficos apresentados nas figuras 7.1 e 7.2 comparam os resultados obtidos pelo MRD com os resultados experimentais.

**Tabela 7.1. Comparação entre os resultados via MRD para modos isolados e os resultados numéricos e experimentais considerando-se a área da seção bruta.**

Série	L(mm)	$P_{uExp}$ (kN)	Modo <sub>Exp</sub>	$P_{uEF}$ (kN)	Modo <sub>EF</sub>	Dif (%)	$P_{uR}$ (kN)	Modo <sub>R</sub>	Dif (%)
CC-SF	384	40,82	D1	39,7	D1	2,74	38,39	D	-6,33
CC-F60	384	36,95	D1	37,47	D1	-1,41	35,56	D	-3,91
CC-F80	384	38,21	D1	36,38	D1	4,79	34,29	D	-11,43
CM-SF	1600	34,08	D3	35,25	D3	-3,43	38,39	D	11,23
CM-F60	1536	27,71	D3	26,24	D3	5,30	35,56	D	22,08
CM-F80	640	32,00	D1	31,3	D1	2,19	34,28	D	6,65

$P_{uExp}$	Carga última experimental	Modo <sub>EF</sub>	Modo crítico no modelo numérico
Modo <sub>Exp</sub>	Modo experimental	$P_{uR}$	Carga resistente pelo MRD
$P_{uEF}$	Carga última do modelo numérico	Modo <sub>R</sub>	Modo crítico MRD
D1	Modo distorcional com uma meia onda	D	Modo distorcional
D3	Modo distorcional com três meias ondas		

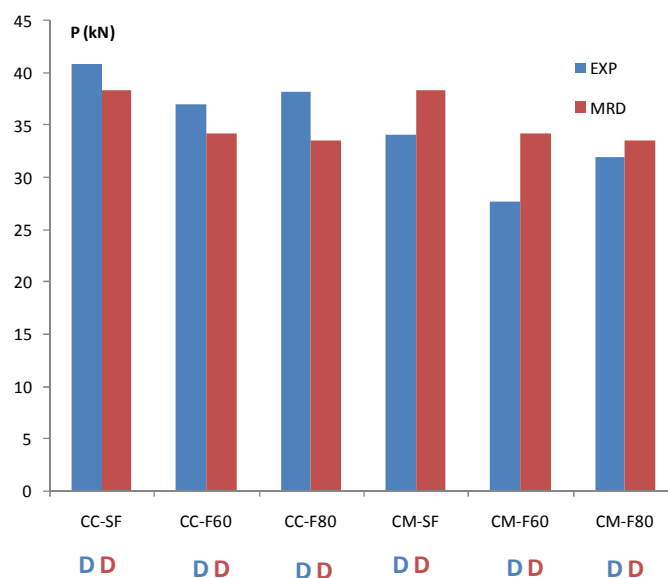


**Figura 7.1. Comparação entre os resultados via MRD e experimentais considerando-se a seção bruta e ocorrência dos modos isolados.**

**Tabela 7.2. Comparação entre os resultados via MRD para modos isolados e os resultados numéricos e experimentais considerando-se a área da seção líquida.**

Série	L(mm)	$P_{u\text{Exp}}$ (kN)	Modo <sub>Exp</sub>	$P_{u\text{EF}}$ (kN)	Modo <sub>EF</sub>	Dif (%)	$P_{u\text{R}}$ (kN)	Modo <sub>R</sub>	Dif (%)
CC-F60	384	36,95	D1	37,47	D1	-1,41	34,19	D	-8,07
CC-F80	384	38,21	D1	36,38	D1	4,79	33,59	D	-13,75
CM-F60	1536	27,71	D3	26,24	D3	5,30	34,19	D	18,95
CM-F80	640	32,00	D1	31,30	D1	2,19	33,59	D	4,73

$P_{u\text{Exp}}$	Carga última experimental	Modo <sub>EF</sub>	Modo crítico no modelo numérico
Modo <sub>Exp</sub>	Modo experimental	$P_{u\text{R}}$	Carga resistente pelo MRD
$P_{u\text{EF}}$	Carga última do modelo numérico	Modo <sub>R</sub>	Modo crítico MRD
D1	Modo distorcional com uma meia onda	D	Modo distorcional
D3	Modo distorcional com três meias ondas		



**Figura 7.2. Comparação entre os resultados via MRD e experimentais considerando-se a seção líquida e a ocorrência dos modos isolados.**

A partir das tabelas apresentadas, observa-se que quando consideram-se os modos de forma isolada, em todas as série o modo dominante é o modo distorcional. Para as séries de colunas sem perfurações, observa-se, portanto, que tanto para o comprimento  $L=384$  mm quanto para o comprimento  $L=1600$  mm não há variação na resistência calculada pelo MRD. No entanto, ao passo que a coluna curta apresenta uma dispersão de 6,33% a favor da segurança, para a coluna média ocorre uma dispersão de 11,23% contra a segurança. Neste caso observa-se que no comprimento de 1600 mm as análise experimental e numérica indicam a proximidade entre o modo distorcional e global, a consideração dos modos isolados não conduzem a bons resultados.

Para as colunas com perfurações de comprimento igual a 60% da largura da alma (CC-F60 e CM-F60) pode-se observar que na coluna de  $L=384$  mm, a dispersão é de 3,91% quando considera-se a área da seção bruta e 8,07% para a seção líquida, ambos a favor da segurança. Observa-se, portanto, que a consideração da seção líquida levou a resultados mais conservadores. Para as colunas de  $L=1536$  mm, tanto a área bruta quanto a área líquida levaram a valores contrários a segurança (22,08% e 18,95%, respectivamente). Neste caso, o protótipo CC-F60, experimentalmente e numericamente, indicaram o modo distorcional, enquanto o protótipo CM-F60 indicam a proximidade

entre os modos distorcional e global e possível acoplamento, o que justifica as altas dispersões.

Para as colunas com furos de comprimento igual a 80% da largura da alma (CC-F80 e CM-F80), no comprimento  $L=384$  mm tanto a área bruta quanto a área líquida levaram a valores conservadores (11,43% e 13,75%). No entanto, para o comprimento  $L=640$  mm a seção bruta e a seção líquida levaram a valores de resistência contrários à segurança, respectivamente 6,65% e 4,73%. Neste caso destaca-se que as análises numéricas da coluna curta (CC-F80) indicaram a ocorrência dos modos distorcional e local muito próximos, o que foi confirmado pelo experimento. Isto justifica a elevada dispersão. No modelo CM-F80 o modo local não foi observado.

### 7.3.2 Método da Resistência Direta considerando os modos em interação

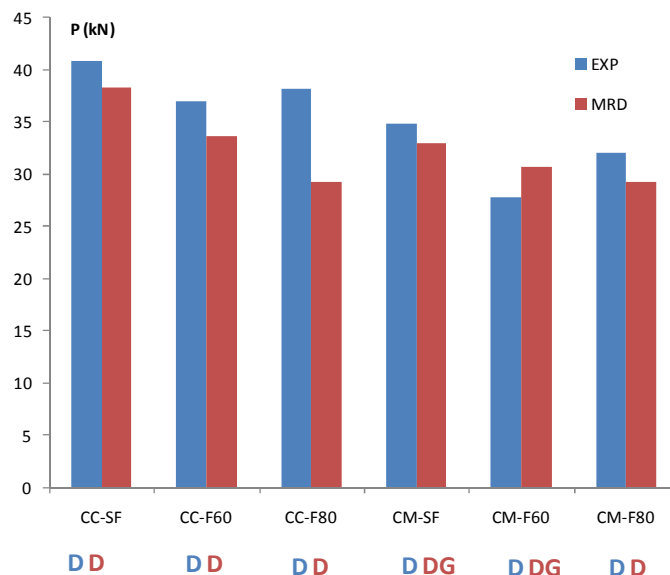
As dispersões observadas nas análises considerando os modos isoladamente justificam a consideração da interação entre os modos (equações 7.10 a 7.21). A tabela 7.3 apresenta os resultados obtidos com a área da seção bruta, enquanto a tabela 7.4 apresenta os resultados obtidos com a área da seção líquida. Os gráficos apresentados nas figuras 7.3 e 7.4 apresentam as comparações entre os resultados obtidos pelo Método da Resistência Direta com a consideração dos modos em interação e os resultados experimentais.

**Tabela 7.3. Comparação entre os resultados via MRD para modos em interação e os resultados numéricos e experimentais considerando-se a área da seção bruta.**

	L(mm)	$P_{u\text{Exp}}$ (kN)	Modo <sub>Exp</sub>	$P_{u\text{EF}}$ (kN)	Modo <sub>EF</sub>	Dif (%)	$P_{u\text{R}}$ (kN)	Modo <sub>R</sub>	Dif (%)
CC-SF	384	40,82	D1	39,7	D1	2,74	38,39	D	-6,33
CC-F60	384	36,95	D1	37,47	D1	-1,41	33,65	LD	-9,81
CC-F80	384	38,21	D1	36,38	D1	4,79	29,27	LD	-30,54
CM-SF	1600	34,08	D3	35,25	D3	-3,43	32,94	DG	-3,46
CM-F60	1536	27,71	D3	26,24	D3	5,30	30,65	LDG	9,59
CM-F80	640	32,00	D1	31,3	D1	2,19	29,27	LD	-9,33

$P_{u\text{Exp}}$	Carga última experimental	Modo <sub>EF</sub>	Modo crítico no modelo numérico
Modo <sub>Exp</sub>	Modo experimental	$P_{u\text{R}}$	Carga resistente pelo MRD
$P_{u\text{EF}}$	Carga última do modelo numérico	Modo <sub>R</sub>	Modo crítico MRD
D1	Modo distorcional com uma meia onda	D	Modo distorcional
D3	Modo distorcional com três meias ondas		





**Figura 7.3. Comparação entre os resultados via MRD e experimentais considerando-se a seção bruta e a ocorrência dos modos em interação.**

**Tabela 7.4. Comparação entre os resultados via MRD para modos em interação e os resultados numéricos e experimentais considerando-se a área da seção líquida.**

	L(mm)	$P_{u\text{Exp}}$ (kN)	Modo <sub>Exp</sub>	$P_{u\text{EF}}$ (kN)	Modo <sub>EF</sub>	Dif (%)	$P_{u\text{R}}$ (kN)	Modo <sub>R</sub>	Dif (%)
CC-F60	384	36,95	D1	37,47	D1	-1,41	32,76	LD	-12,79
CC-F80	384	38,21	D1	36,38	D1	4,79	28,87	LD	-32,35
CM-F60	1536	27,71	D3	26,24	D3	5,30	29,92	LDG	7,39
CM-F80	640	32,00	D1	31,30	D1	2,19	28,87	LD	-10,84

$P_{u\text{Exp}}$  Carga última experimental

Modo<sub>Exp</sub> Modo experimental

$P_{u\text{EF}}$  Carga última do modelo numérico

D1 Modo distorcional com uma meia onda

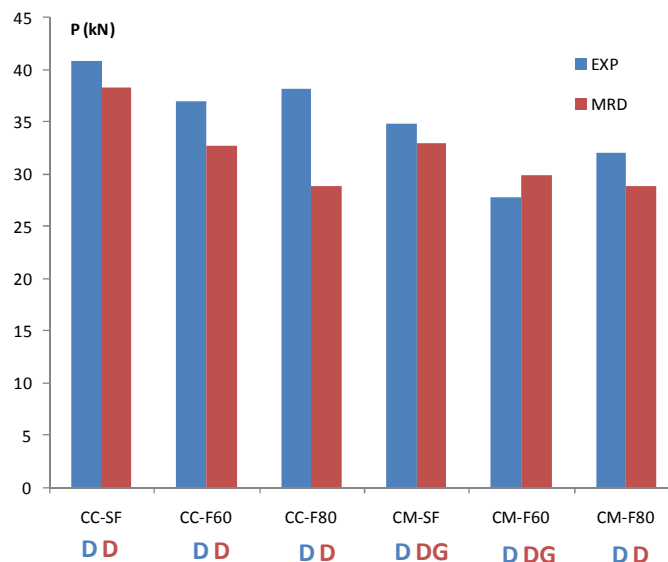
D3 Modo distorcional com três meias ondas

Modo<sub>EF</sub> Modo crítico no modelo numérico

$P_{u\text{R}}$  Carga resistente pelo MRD

Modo<sub>R</sub> Modo crítico MRD

D Modo distorcional



**Figura 7.4. Comparação entre os resultados via MRD e experimentais considerando-se a seção bruta e a ocorrência dos modos em interação.**

Como observado nas tabelas 7.1 e 7.2, que consideram os modos isolados, os resultados de CM-SF (tabela 7.3) com a consideração da interação entre os modos distorcional e global (DG), houve aproximação do resultado teórico com o resultado experimental, ou seja, observa-se dispersão, a favor da segurança, de 3,46%.

O mesmo ocorre no caso da coluna média CM-F60 ( $L=1536$  mm), conforme observado nas tabelas 7.3 e 7.4. A consideração da interação entre os modos indica a ocorrência dos modos local, distorcional e global (LDG), com aproximação de seus resultados com o resultado experimental, porém, contra a segurança. A consideração da área líquida leva a um valor 7,39% contra a segurança e da área bruta a um valor 9,59% na mesma direção. Estes valores ainda elevados podem ser explicados pelos resultados experimentais deste protótipo terem sido afetados pela ausência de um dos ensaios, cujo protótipo se perdeu durante a execução do mesmo (Tabela 5.12).

### 7.3.3 Análise dos resultados obtidos via Método da Resistência Direta

As tabelas 7.5 e 7.6 apresentam os resultados obtidos com as equações 7.1 a 7.21 para as séries ensaiadas, considerando-se a área bruta e a área líquida. As análises numéricas e experimentais indicaram que, nas colunas, não ocorre modo local próximo

ao modo distorcional. Desta forma, a interação entre estes modos não ocorre, devendo considerar-se a força axial resistente ao modo distorcional da seção como a resistência da coluna, o que leva a dispersões de -3,91% para a coluna CC-F60 e -11,43% para a coluna CC-F80 quando se considera a área bruta e, quando se considera a área líquida, -8,07% para a coluna CC-F60 e -13,75% para a coluna CC-F80, conforme mostram a tabela 7.7 e 7.8 e ilustram as figuras 7.5 e 7.6.

**Tabela 7.5. Valores obtidos pelo MRD com a consideração da área bruta.**

	L(mm)	N <sub>C,y</sub> (kN)	N <sub>C,Re</sub> (kN)	N <sub>C,Rl</sub> (kN)	N <sub>C,Rdist</sub> (kN)	N <sub>C,Rle</sub> (kN)	N <sub>C,Rldist</sub> (kN)	N <sub>C,Rdiste</sub> (kN)	N <sub>C,Rldiste</sub> (kN)	N <sub>C,Rk</sub> (kN)	Modo
CC-SF	384	61,78	60,8	54,71	38,39		38,39			38,39	D
CC-F60	384	57,80	60,8	48,79	35,56		33,65			33,65	LD
CC-F80	384	57,80	60,8	43,22	34,29		29,27			29,27	LD
CM-SF	1600	61,78	46,95	54,71	38,39	45,4	38,39	32,94	32,94	32,94	DG
CM-F60	1536	57,80	47,93	48,76	35,56	41,22	33,65	31,03	30,35	30,65	LDG
CM-F80	640	57,80	59,11	43,22	34,28		29,27			29,27	LD

**Tabela 7.6. Valores obtidos pelo MRD com a área líquida.**

	L(mm)	N <sub>C,y</sub> (kN)	N <sub>C,Re</sub> (kN)	N <sub>C,Rl</sub> (kN)	N <sub>C,Rdist</sub> (kN)	N <sub>C,Rle</sub> (kN)	N <sub>C,Rldist</sub> (kN)	N <sub>C,Rdiste</sub> (kN)	N <sub>C,Rldiste</sub> (kN)	N <sub>C,Rk</sub> (kN)	Modo
CC-F60	384	57,80	58,38	46,92	34,19		32,76			32,76	LD
CC-F80	384	57,80	58,38	42,13	33,59		28,87			28,87	LD
CM-F60	1536	57,80	45,07	46,92	34,19	39,53	32,76	29,97	29,92	29,92	LDG
CM-F80	640	57,80	56,61	42,13	33,59		28,87			28,87	LD

**Tabela 7.7. Comparação entre os resultados via MRD para modos em interação e os resultados numéricos e experimentais considerando-se a área da seção bruta excetuando-se o modo local da análise.**

Série	L(mm)	P <sub>u Exp</sub> (kN)	Modo <sub>Exp</sub>	P <sub>u EF</sub> (kN)	Modo <sub>EF</sub>	Dif (%)	P <sub>u R</sub> (kN)	Modo <sub>R</sub>	Dif (%)
CC-SF	384	40,82	D1	39,70	D1	2,74	38,39	D	-6,33
CC-F60	384	36,95	D1	37,47	D1	-1,41	35,56	D	-3,91
CC-F80	384	38,21	D1	36,38	D1	4,79	34,29	D	-11,43
CM-SF	1600	34,08	D3	35,25	D3	-3,43	32,94	DG	-3,46
CM-F60	1536	27,71	D3	26,24	D3	5,30	31,03	DG	10,70
CM-F80	640	32,00	D1	31,30	D1	2,19	34,28	D	6,65

P<sub>u Exp</sub> Carga última experimental

Modo<sub>Exp</sub> Modo experimental

P<sub>u EF</sub> Carga última do modelo numérico

D1 Modo distorcional com uma meia onda

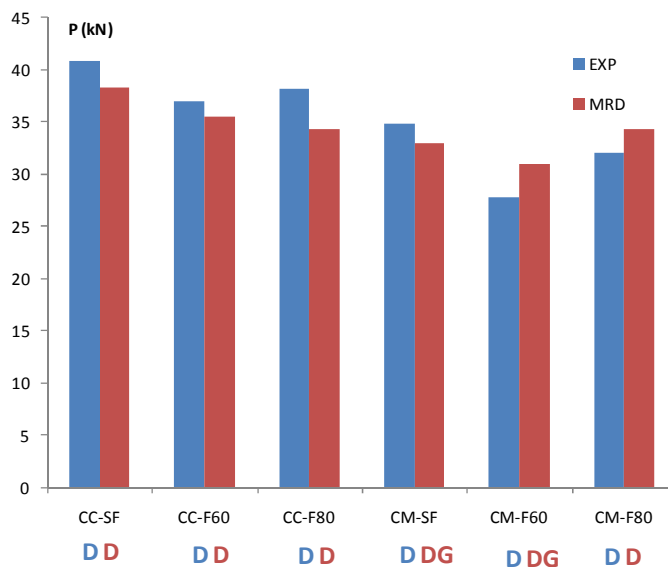
D3 Modo distorcional com três meias ondas

Modo<sub>EF</sub> Modo crítico no modelo numérico

P<sub>u R</sub> Carga resistente pelo MRD

Modo<sub>R</sub> Modo crítico MRD

D Modo distorcional

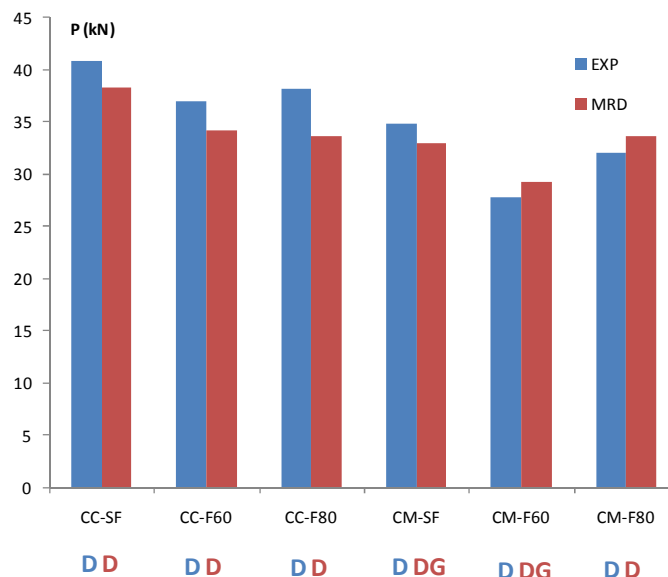


**Figura 7.5. Comparação entre os resultados via MRD e experimentais considerando-se a seção bruta e a ocorrência dos modos em interação excetuando-se o modo local da análise.**

**Tabela 7.8. Comparação entre os resultados via MRD para modos em interação e os resultados numéricos e experimentais considerando-se a área da seção líquida excetuando-se o modo local da análise.**

Série	L(mm)	$P_{u\text{Exp}}$ (kN)	Modo <sub>Exp</sub>	$P_{u\text{EF}}$ (kN)	Modo <sub>EF</sub>	Dif (%)	$P_{u\text{R}}$ (kN)	Modo <sub>R</sub>	Dif (%)
CC-F60	384	36,95	D1	37,47	D1	-1,41	34,19	D	-8,07
CC-F80	384	38,21	D1	36,38	D1	4,79	33,59	D	-13,75
CM-F60	1536	27,71	D3	26,24	D3	5,30	29,27	DG	5,33
CM-F80	640	32,00	D1	31,30	D1	2,19	33,59	D	4,73

$P_{u\text{Exp}}$	Carga última experimental	Modo <sub>EF</sub>	Modo crítico no modelo numérico
Modo <sub>Exp</sub>	Modo experimental	$P_{u\text{R}}$	Carga resistente pelo MRD
$P_{u\text{EF}}$	Carga última do modelo numérico	Modo <sub>R</sub>	Modo crítico MRD
D1	Modo distorcional com uma meia onda	D	Modo distorcional
D3	Modo distorcional com três meias ondas		



**Figura 7.6. Comparação entre os resultados via MRD e experimentais considerando-se a seção líquida e a ocorrência dos modos em interação excetuando-se o modo local da análise.**

Da mesma forma, para as colunas médias CM-F60 e CM-F80, não foi detectada a ocorrência do modo local nas análises numéricas e experimentais, como apresenta as tabelas 7.7 e 7.8. Excluindo-se as interações onde aparece este modo, ocorre melhor correlação entre os resultados experimentais e os obtidos pelo MRD. Quando se considera a área bruta (tabela 7.7), as dispersões são de 10,70% para a coluna CM-F60 e 6,65% para a coluna CM-F80. Quando se utiliza a área líquida (tabela 7.8) as dispersões são de 5,33% para a coluna CM-F60 e 4,73% para a coluna CM-F80.

Os resultados indicam que o modo distorcional é dominante quando em interação ao modo local, assim nos casos das colunas curtas a consideração do modo distorcional sem o local (tabela 7.7 e 7.8) conduz a melhores resultados. Para as colunas CM-SF e CM-F60 observa-se que o modo global de flexão em interação com o distorcional indicam melhores resultados conforme apresentado nas tabelas 7.7 e 7.8. Observa-se ainda que apesar dos resultados experimentais e numéricos serem mais próximos para o caso da tabela 7.7, consideração da área bruta, os valores obtidos com a área líquida apresentam boa correlação e são coerentes com a consideração da influência dos furos no comportamento de elementos comprimidos.

Assim, a partir dos resultados apresentados observa-se que a consideração da interação entre os modos de flambagem é fundamental para a correta avaliação da carga

axial resistente de colunas com perfurações pelo método da resistência direta. No entanto, deve-se avaliar a possibilidade da ocorrência dos modos, a fim de evitar a consideração de interações entre modos indevidos para a coluna considerada.

Uma outra consideração que deve ser feita é a ocorrência do Modo Localizado de Placa (MLP) na região entre os furos nas colunas com perfurações. Este modo não é considerado nas expressões do Método da Resistência Direta utilizadas nesta análise. Sua ocorrência nas análises experimentais, nas regiões próximas às extremidades dos protótipos justifica a dispersão observada entre os resultados experimentais e via MRD, principalmente no protótipo CC-F80, que é aquele mais susceptível à sua ocorrência.

## 8 Considerações finais

A resistência e o comportamento de seções formadas a frio têm sido objeto de diversos estudos. A ocorrência dos modos local, distorcional e global, de forma isolada ou em interação demandam pesquisas para seu completo entendimento. Neste trabalho foram analisadas seções formadas a frio do tipo rack, com perfurações ao longo de seu comprimento, com o objetivo de avaliar a ocorrência dos modos de flambagem, isolados ou em interação. Para isto foram utilizados métodos numéricos, experimentais e teóricos.

No desenvolvimento de um modelo via elementos finitos para a análise foi utilizado o software comercial ANSYS. Desenvolveu-se um procedimento para a construção do modelo numérico, calibrado a partir de resultados obtidos pela Teoria Generalizada de Vigas (GBT), através do software GBTul. As análises indicaram que o elemento SHELL181, da biblioteca do ANSYS, com a integração completa em seus nós, é adequado para a análise. Foi ainda observado que o refinamento da malha com a utilização de elementos quadráticos de comprimento igual a 10% da largura da alma da seção conduz a bons resultados. Foram ainda escolhidas as condições de contorno para o modelo. A partir das comparações realizadas, o modelo numérico via elementos finitos mostrou-se adequado para a análise.

O modelo desenvolvido foi então utilizado para a análise da estabilidade da seção. Este estudo foi feito para as seções com e sem perfurações. A partir dos resultados de diversas seções, foi escolhida aquela que atendesse aos pré-requisitos deste trabalho. A análise de estabilidade da seção escolhida norteou a definição da geometria dos protótipos utilizados na etapa experimental deste trabalho, a partir da ocorrência dos modos local, distorcional e global em seus diversos comprimentos. Para isto, foram identificados os modos de flambagem e as faixas de comprimentos da coluna em que eles ocorrem, sendo feita a escolha do comprimento dos protótipos experimentais buscando a ocorrência dos modos de forma isolada ou em interação.

Uma vez escolhida a geometria dos protótipos, foi definido o programa experimental, composto por ensaios de compressão centrada de seis séries de colunas, de comprimentos e perfurações variadas, 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.

A instrumentação utilizada em cada um dos protótipos foi definida buscando identificar a ocorrência dos modos em cada protótipo, e o procedimento adotado mostrou-se adequado para as séries ensaiadas. Da mesma forma, a aplicação da carga com controle de deslocamentos atendeu aos objetivos do ensaio, mostrando-se, portanto, adequada.

O levantamento das imperfeições realizado não apontou, em nenhum dos protótipos ensaiados, variações dimensionais que comprometessem a viabilidade de sua utilização. Além disto, na análise de flambagem não linear realizada posteriormente aos ensaios, as imperfeições medidas serviram de parâmetro na definição das amplitudes utilizadas na introdução dos modos nos modelos numéricos.

Os resultados experimentais indicaram que a existência dos furos acarreta em redução da carga última das colunas, uma vez que a área das colunas perfuradas é menor que a área bruta. Além disto, para os perfis com perfurações, observa-se uniformidade nos resultados, mesmo com variação no comprimento dos furos e, no caso das colunas médias, na variação da altura do protótipo. Observa-se ainda o domínio do modo distorcional nas séries.

Com relação aos resultados dos protótipos com furos de 60% de comprimento em relação aos de 80% observa-se um ganho de resistência do último em relação ao primeiro. Este aumento de resistência está associado à distribuição dos furos ao longo do comprimento da coluna. Destaca-se que a perda de material em função do tamanho dos furos é igual em todos os protótipos de mesmo comprimento, como observa-se comparando os resultados de CC-F60 e CC-F80. No entanto com relação aos resultados



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.

A análise de flambagem não linear realizada apresentou boa correlação com os resultados experimentais, indicando a sua viabilidade na avaliação do comportamento pós flambagem dos protótipos. No entanto, os protótipos ensaiados apresentam grande sensibilidade às imperfeições. Por isto, a introdução da imperfeição a partir dos modos seguiu as observações visuais durante os ensaios e as medidas tomadas no levantamento das imperfeições. Ressalta-se que em diversos protótipos foi necessária a combinação linear entre os modos determinados em análise de flambagem elástica realizada previamente.

As cargas últimas numéricas apresentaram boa correlação com os resultados das cargas últimas experimentais. Além disto, os modos de flambagem indicados na análise numérica não linear foram compatíveis aos modos de flambagem observados experimentalmente. Observa-se em todos os protótipos o domínio do modo distorcional.

Os resultados numéricos e experimentais foram então comparados a resultados teóricos, obtidos a partir do Método da Resistência Direta (MRD), com adaptações para a seção perfurada. Foram feitas comparações considerando a área bruta e a área líquida da seção. Primeiramente, considerou-se apenas a ocorrência dos modos global, local e distorcional de forma isolada, conforme previsto na NBR 14762. Os resultados não apresentaram boa correlação no caso das colunas médias, indicando a necessidade da consideração da interação entre os modos.

Ao considerar-se a interação entre os modos, observou-se melhoria na correlação nos resultados das colunas médias, mas para as colunas curtas CC-F60 e CC-F80 ocorreu o contrário, inclusive com a indicação da ocorrência da interação entre os modos local e distorcional, o que não foi observado nas análises numérica e experimental, que indicam que o modo distorcional é dominante quando em interação ao modo local. Assim nos casos das colunas curtas a consideração do modo distorcional sem a consideração do modo local conduz a melhores resultados, uma vez que o modo distorcional domina e inibe o modo local. Para as colunas CM-SF e CM-F60 observa-se que o modo global de flexão em interação com o distorcional levam a melhores resultados. Observa-se ainda que apesar dos resultados experimentais e numéricos serem mais próximos quando se

considera a área bruta, os valores obtidos com a área líquida apresentam boa correlação e são coerentes com a consideração da influência dos furos no comportamento de elementos comprimidos.

Assim, a partir dos resultados apresentados observa-se que a consideração da interação entre os modos de flambagem é fundamental para a correta avaliação da carga axial resistente de colunas com perfurações pelo método da resistência direta. No entanto, deve-se avaliar a possibilidade da ocorrência dos modos, a fim de evitar a consideração de interações entre modos indevidos para a coluna considerada.

Para a continuidade deste estudo, sugere-se:

- Avaliação da influência do posicionamento dos furos ao longo do comprimento do perfil na resistência e no comportamento das seções. Isto pode ser feito através das ferramentas numéricas desenvolvidas neste estudo.

- Otimização da distribuição das perfurações ao longo do comprimento da coluna, em termos de seu comportamento e resistência.

- Aplicação dos métodos apresentados neste trabalho na avaliação de colunas com dimensões e arranjos de perfurações utilizadas comercialmente.

- Estudo de seções em que ocorram os acoplamentos local-distorcional (LD) e distorcional-global (DG), para avaliação da influência dos furos nestes fenômenos.

- Estudo paramétrico para a avaliação da influência das variações de esbeltez e comprimento da coluna e tipologia das perfurações.

- Análise da influência do Modo Localizado de Placa (MLP) no comportamento e na resistência de perfis formados a frio perfurados submetidos à compressão.

## Referências Bibliográficas

Affolter, Ch., Piskoty, G., Wullschleger, L., Weisse, B. (2009) Collapse of a high storage rack. *Engineering Failure Analysis* 16 (2009) 1846–1855.

Águia (2011). *Águia Sistemas de Armazenagem*, catálogo, Ponta Grossa – PR.

AISI (1996). *Cold Formed Steel Design Manual*. American Iron and Steel Institute, Washington, DC.

ANSYS (2010). *User's Manual for revision 11*. Swanson Analysis Systems Inc. Inc., Houston, PA.

Basaglia, C., Camotim, D. Silvestre, N. (2009). GBT-based local, distortional and global buckling analysis of thin-walled steel frames. *Thin-Walled Structures* 47 (2009) 1246–1264.

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

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

Becque, J. (2008). *The interaction of local and overall buckling of cold formed stainless steel columns*. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia Civil. Universidade de Sydney.

Bonada, J., Casafont, M., Roure, F., Pastor, M. (2012). Selection of initial geometrical imperfections in nonlinear FE analysis of cold formed steel rack columns. *Thin-Walled Structures* 51 (2012) 99-111.

Camotim, D., Silvestre, N., Dinis, P. B. (2005). Numerical analysis of cold-formed steel members. *Steel Structures* 5 (2005) 63-78.

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

Campos, S. R. (2003). Estudo Teórico-Experimental de Sistemas Estruturais de Armazenagem Industrial Tipo Drive-in. Dissertação de mestrado, UFOP.

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

Casafont, M., Pastor, M.M., Roure, F., Pekoz, T.(2011a). An experimental investigation of distortional buckling of steel storage rack columns. *Thin-Walled Structures* 49 (2011) 933-946.

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

Chodraui, G. M. B., Malite, M. (2007) Flambagem por distorção da seção transversal em perfis de aço formados a frio submetidos à Compressão centrada e flexão. *Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos*, v. 9, n. 37, p. 27-47.

Davies J. M.; Leach, P. e Taylor A. (1997). The Design of Perforated Cold-Formed Steel Sections Subject to Axial Load and Bending. *Thin Walled Structures*, v. 29 (1-4), p. 141-157.

Dinis, P. B., Batista, E. M., Camotim, D., Santos, E. S. (2012). Local-distortional-global interaction in lipped channel columns: experimental results, numerical simulations and design considerations. *Thin-Walled Structures* 61 (2012) 2-13.

Eccher, G.(2007). Isoparametric Spline Finite Strip Analysis of Perforated Thin Walled Steel Structures. Tese de Doutorado. Universidade de Sydney.

Filliatraut, A., Higgins, P. S., Wanitkorkul, A. (2006). Experimental stiffness and seismic response of pallet-type steel storage rack connections. *Practice Periodical of Structural Design and Construction*. 11 (2006) 161-170.

Filliatraut, A., Higgins, P. S., Wanitkorkul, A., Courtwright, J. (2007). Experimental stiffness of pallet-type steel storage rack teardrop connections. *Practice Periodical of Structural Design and Construction*. 12 (2007) 210-215.

Freitas, A. M. S., Freitas, M. S. R., Souza, F. T. (2005). Analysis of steel storage rack columns. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 61, p. 1135 –1146.

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

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

Hancock, G. J., Kwon, Y. B., Bernard, E. S. (1994). Strength design curves for thin-walled sections undergoing distortional buckling. *Journal of Constructional Steel Research*. 31 (1994) 169-186.

Hancock, G. J., Teh, L. H., Clarke, M.J. (2004). Analysis and design of double-sided high-rise steel pallet rack frames. *Journal of Structural Engineering*. 130 (2004) 1011-1021.

Hancock, G.J., Yap, D. C. Y.(2006). Interaction Buckling and Postbuckling in the Distortional Mode of Thin Walled Sections. Relatório de pesquisa R870. Escola de Engenharia Civil. Universidade de Sydney.

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

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

Instron (2008). Partner Operating Help - Version 8.4a.

Karman, v., Sechler, E. E., Donnell, L. H. (1932). The Strength of Thin Walled Plates in Compression. Transactions of ASME v. 54, MP 54-5.

Koen, D. (2008). Structural capacity of light gauge steel storage rack uprights. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia Civil. Universidade de Sydney.

Kwon, Y. B., Chung, H. S., Kim, G. D. (2006). Experiments of cold-formed steel connections and portal frames. Journal of Structural Engineering. 132 (2006) 600-607.

Lau, S. C. W., Hancock, G. J. (1986). Buckling of thin flat-walled structures by a spline finite strip method. Thin-Walled Structures, Vol. 4, p. 269-294.

Lecce, M. (2006). Distortional Buckling of Stainless Steel Sections. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia Civil. Universidade de Sydney.

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

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

Moen, C.D., Schaffer, B. W. (2008). Experiments on cold-formed steel columns with holes. *Thin-Walled Structures* 46 (2008) 1164–1182.

Moen, C.D., Schaffer, B. W. (2009a). Elastic buckling of cold-formed steel columns and beams with holes. *Engineering Structures* 31 (2009) 2812-2824.

Moen, C.D., Schaffer, B. W. (2009b). Elastic buckling of thin plates with holes in compression or bending. *Thin-Walled Structures* 47 (2009) 597-1607.

Moen, C.D., Takeru, I, Schaffer, B.W. (2008). Prediction of residual stresses and strains in cold-formed steel members. *Thin-Walled Structures* 46 (2008) 1274–1289.

Nagahama, K. (2003) Análise da estabilidade local em perfis de seção aberta em aço e em resina reforçada com fibra de vidro. Tese de doutorado. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

NBR 14762:01(2010) – Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio.

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

Oliveira, A. M., (2000). Análise Teórico-Experimental de Sistemas Estruturais de Armazenamento (Rack`s). Dissertação de Mestrado, UFOP.

Pérez, S.V.S (2003). Análise experimental da instabilidade distorcional em perfis de paredes finas e seção aberta, sob força de compressão excêntrica. Tese de doutorado. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Rasmussen, K. J. R., Gilbert, B. (2009a). Experimental test on steel storage rack components. Relatório de pesquisa R899. Escola de Engenharia Civil. Universidade de Sydney.

Rasmussen, K. J. R., Gilbert, B. (2009b). Stiffness tests, failure tests and load transfer in steel drive-in storage racks. Relatório de pesquisa R900. Escola de Engenharia Civil. Universidade de Sydney.

Rasmussen, K. J. R., Gilbert, B. (2009c). Finite Element modelling of steel drive-in rack structures. Relatório de pesquisa R901. Escola de Engenharia Civil. Universidade de Sydney.

Rasmussen, K. J. R., Gilbert, B. (2010). Analysis-Based 2d Design of Steel Storage Racks. Relatório de pesquisa R908. Escola de Engenharia Civil. Universidade de Sydney.

Rasmussen, K. J. R., Hua, V. (2006). The behaviour of drive-in racks under horizontal impact load. Relatório de pesquisa R871. Escola de Engenharia Civil. Universidade de Sydney.

RMI (1997). Specification for Design, Testing, and Utilization of Industrial Steel Storage Racks, Rack Manufacturers Institute, Charlotte, NC.

Santos, E. S. (2010). Análise da estabilidade e da resistência de perfis de aço formados a frio sujeitos à interação entre os modos de flambagem local, distorcional e global. Dissertação de Mestrado. COPPE, UFRJ.

Santos, E. S., Batista, E. M., Camotim, D. (2012). Experimental investigation concerning lipped channel columns undergoing local-distortional-global buckling mode interaction. *Thin-Walled Structures* 54 (2012) 19-34.



Schaffer, B., Pekoz, T. (1998). Direct strength prediction of cold-formed steel members using numerical elastic buckling solutions. 14th International Specialty Conference on Cold Formed Steel Structures, St Louis, Missouri.

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

Schaffer, B. (2006). Designing cold-formed steel using the direct strength method. 18th International Specialty Conference on Cold Formed Steel Structures, Orlando, Florida.

Schaffer, B. W., Li, Z. (2010). Buckling analysis of cold-formed steel members with general boundary conditions using CUFSM: conventional and constrained finite strip methods. 20th International Specialty Conference on Cold Formed Steel Structures, St. Louis, Missouri.

Schaffer, B., Ádani, S. (2006). Buckling analysis of cold-formed steel members using CUFSM: conventional and constrained methods. 18th International Specialty Conference on Cold Formed Steel Structures, Orlando, Florida.

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

Schardt, R. (1994). Generalized Beam Theory – An Adequate method for Coupled Stability Problems. *Thin-Walled Structures*, 19, p. 161-180.

Silvestre, N., Camotim, D. (2002a). First Order Generalized Beam Theory – An adequate Method for Coupled Stability Problems. *Thin-Walled Structures*. 40, 755-789.

Silvestre, N., Camotim, D. (2002b). Second Order Generalized Beam Theory – An adequate Method for Coupled Stability Problems. *Thin-Walled Structures*. 40, 791-820.

Souza, F. T, (2011). Análise teórico-experimental dos modos de flambagem em seções do tipo rack com perfurações submetidos à compressão centrada. Exame de Qualificação ao Doutorado, UFOP.

Vazquez, E. G. (2002) 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.

Yao, Z., Rasmussen, K.J.R. (2010). Material and Geometric Non-Linear Isoparametric Spline Finite Strip Analysis of Perforated Thin-Walled Steel Structures. Relatório de pesquisa R910. Escola de Engenharia Civil. Universidade de Sydney.

## **Apêndices**

# A Levantamento de Imperfeições

Tab. A.1. Dimensões dos protótipos Coluna Curta (CC)

Protótipo	$b_w$	$b_f$	$b_s$	$b_r$	$b_{ft}$	$\theta$	$x_i$	$x_e$	$d_{hb}$	$d_{hh}$	$b_h$	$t$
CC-SF-1	80	34,8	30,5	17,8	69,3	38,3	37	33,8				1,25
	79,8	33,5	30,2	17,2	68,9	39	36,8	33,2				1,35
	79,5	34	29,2	17,4	69,3	38,8	35,8	32,7				1,25
	79,8	34,1	30,0	17,5	69,2	38,7	36,5	33,2				1,3
CC-SF-2	79,6	34,1	31,6	17,4	69,6	40,2	34,9	32,6				1,2
	79,5	34,5	29,1	17,3	69,3	39,3	34	30,4				1,2
	79,6	35	29,2	18,9	68,7	39,6	34,2	30,3				1,2
	79,6	34,5	30,0	17,9	69,2	39,7	34,4	31,1				1,2
CC-SF-3	80,2	34,8	30	18,8	68,2	41,7	36,5	33,9				1,25
	80,3	34	30,3	18,8	68,3	41,3	37,9	35,1				1,25
	80,6	34	31,4	18,8	69,3	41,3	39,9	37,8				1,2
	80,4	34,3	30,6	18,8	68,6	41,4	38,1	35,6				1,2
CC-F60-1	79,8	33	28,9	18	68,8	38,7	33,6	29,3	16,3	32,1	7,9	1,2
	79,9	33	29	18	68,1	38,5	33,9	29,2	16,1	32	7,95	1,2
	80	33	29,8	18	68,1	39	34,7	30,3	15,9	32	7,95	1,2
	79,9	33,0	29,2	18,0	68,3	38,7	34,1	29,6	16,1	32,0	7,9	1,2
CC-F60-2	79,5	34,8	30,2	17,4	69,7	37,6	35,4	32	15,6	32	7,9	1,2
	79,4	34,6	30,2	17,9	69,2	37,7	34,7	31,6	15,6	32	7,95	1,2
	79,2	34,5	29,3	18,1	69,4	35,6	35,6	31,7	16	32	8	1,2
	79,4	34,6	29,9	17,8	69,4	37,0	35,2	31,8	15,7	32,0	8,0	1,2
CC-F60-3	79,9	34,5	30,1	17,6	69	37,9	35,4	31,6	15,6	32	7,9	1,2
	80	34,6	30	17,5	69,1	37,5	35,2	31,8	15,6	32,1	7,95	1,2
	80,3	34,2	29,8	17,7	68,8	38	34,7	31,8	16	32	8	1,2
	80,1	34,4	30,0	17,6	69,0	37,8	35,1	31,7	15,7	32,0	8,0	1,2
CC-F80-1	81,7	32,1	31,2	17,5	67,6	36,1	34,8	30,5	16,5	32	7,9	1,3
	81,9	32,1	30,5	17,9	66,6	37,4	34,9	29,5	16,5	32,1	8	1,25
	81,9	32,1	30,2	18,5	65,8	38,2	35	31,5	16,9	32	7,9	1,25
	81,8	32,1	30,6	18,0	66,7	37,2	34,9	30,5	16,6	32,0	7,9	1,3
CC-F80-2	81,7	32,1	29,6	18	66,1	41,3	38,3	34,8	17,5	32	8,1	1,4
	82,8	31,1	30,5	18,1	66,6	39,6	38,6	34,1	17,1	32	7,9	1,2
	83,3	32,7	30,5	17,6	67,4	38,3	39,3	36,2	17,3	32,1	8	1,2
	82,6	32,0	30,2	17,9	66,7	39,7	38,7	35,0	17,3	32,0	8,0	1,3
CC-F80-3	82	32,9	31,6	17,7	66,1	37,7	35	31,6	16,6	32,1	8	1,25
	82,4	32,1	30,8	17,7	66,1	35,8	35,5	35,5	17,1	32	7,9	1,25
	82,9	32,8	30,1	17,7	66,2	38,6	37,2	34,7	17,6	32,1	7,9	1,2
	82,4	32,6	30,8	17,7	66,1	37,4	35,9	33,9	17,1	32,1	7,9	1,2

**Tab. A.2. Dimensões dos Protótipos Coluna Média (CM)**

Protótipo	$b_w$	$b_f$	$b_s$	$b_r$	$b_{ft}$	$\theta$	$x_i$	$x_e$	$d_{hb}$	$d_{hh}$	$b_h$	$t$
CM-SF-1	80,1	32,2	29,3	18,4	68,4	42	37,5	34,5				1,18
	80,2	31,7	29,2	18,3	68,5	40,9	37,4	34,3				1,19
	80	31,5	29,3	18,2	69	41,5	37,1	35,8				1,18
	79,9	32,5	30	18,2	69,4	41,6	38	35,1				1,18
	80,3	32,7	29,6	18,4	68,9	39,6	37,1	34,1				1,17
	80,6	31,8	29,8	18,3	69,6	39,2	37,5	34,3				1,2
	80,2	32,1	29,5	18,3	69,0	40,8	37,4	34,7				1,18
CM-SF-2	82,2	31,3	30	17,7	68,4	40,6	40,7	36,8				1,16
	82,1	31,2	29,2	18,7	68,6	41,1	39,4	36,5				1,15
	81,6	31,8	29	18,5	69	41,4	39,4	37				1,17
	81,1	31,2	29,6	18,5	69,3	41,8	38,4	35,6				1,15
	81,1	31,8	29,4	18,3	68,8	39	38	35,4				1,16
	81,3	32	29,9	18	68,8	38,9	38,8	35,5				1,16
	81,6	31,6	29,5	18,3	68,8	40,5	39,1	36,1				1,16
CM-SF-3	79,6	32,1	29,6	18,5	71,3	40,1	38,3	36,2				1,19
	79,9	32,1	28,5	18,3	70,3	41,5	37,9	34,9				1,2
	79,9	32	29,8	19,2	69,8	40,8	38,2	35				1,21
	79,8	32,2	29,7	18,6	69,3	40,6	37,4	34,5				1,19
	80,5	32,2	29,4	18,3	68,8	39,6	37,3	32,7				1,19
	81	32,1	31,4	19,1	66,9	37,2	35,8	31				1,2
	80,1	32,1	29,7	18,7	69,4	40,0	37,5	34,1				1,20
CM-F60-1	81,1	34,1	29	18,3	68,4	38,7	37	32,9	16,4	32,1	7,9	1,18
	80,9	33,3	29,7	18,1	68,9	40,7	36,2	32,5	16,3	32	8	1,2
	80,6	33,6	30	18,5	68,4	41,2	36,3	32,8	16,3	32	8	1,2
	80,7	33,4	31	18,4	69	41,3	36,1	32,7	16,3	32	8	1,2
	80,9	33,6	30	18,3	69,1	41,1	35,8	32,6	16,4	32	8	1,19
	81,4	32,6	30,1	18,2	68,4	40,9	35,9	31,9	16,5	32	8	1,2
	80,9	33,4	30,0	18,3	68,7	40,7	36,2	32,6	16,4	32,0	8,0	1,20
CM-F60-2	82,6	31,7	30,7	19,4	67,7	38,3	38,8	34,7	17,4	32,1	8	1,2
	82	31,7	31,1	18,8	68	39,7	36,9	33,1	17,1	32	7,9	1,19
	81,5	31,2	30,2	18,9	68,8	41,1	37,3	34	17	32	8	1,21
	81,7	32	31,1	18,6	68,4	40,6	37,3	34,3	16,8	32	8,1	1,19
	81,6	32,2	30,2	18,4	68	39,1	36,8	33,3	17	32	8	1,19
	81,7	31,9	29,8	19,7	68	39,2	36,8	33	16,7	32,1	7,9	1,21
	81,9	31,8	30,5	19,0	68,2	39,7	37,3	33,7	17,0	32,0	8,0	1,20

CM-F60-3	82,5	32,7	30,3	17,8	67	39,1	39,3	34,9	16,9	32,2	7,9	1,22
	82,1	31,6	29,5	18,5	68,3	40,6	38,3	35,2	16,6	32,1	7,9	1,18
	81,6	32,6	30	19	69,1	43,8	39,3	35,6	16,7	32	7,9	1,19
	81	32	30,8	19,6	68,4	42,6	39	34,9	16,6	32	7,9	1,19
	81,9	31,4	29,8	19,3	68,1	43,3	38,3	34,9	16,4	32,1	8	1,2
	82,2	31,3	29,9	16,7	68,4	44	38,5	35,7	16,9	32	7,9	1,2
	81,9	31,9	30,1	18,5	68,2	42,2	38,8	35,2	16,7	32,1	7,9	1,20
CM-F80-1	80,5	32,3	27	17,5	69,1	37,5	36,2	32,6	15,7	32	8	1,16
	80,6	33	26	18	69,2	37,4	36,9	32,8	16,2	32	8	1,15
	80,7	32,8	26,5	18	69,2	37,6	36,7	32,8	16,3	32	8	1,15
	80,8	32,2	27	18	69,6	37,6	37	32,9	15,9	32	8	1,15
	81	33	27	18	69,3	37,9	37,4	34	16,3	32	7,8	1,15
	80,7	32,7	26,7	17,9	69,3	37,6	36,8	33,0	16,1	32,0	8,0	1,15
CM-F80-2	79,5	31,9	28	18,5	69,6	38,9	35	31,3	15,6	32	7,9	1,18
	79,5	32	27	18	69,3	38,7	34,4	30,8	16,2	32	8	1,15
	79,9	32,1	27	18,5	69,2	38,9	34,4	30,4	16	32	7,9	1,16
	79,5	32,5	27	18	69,2	39,3	34,5	30,4	16,1	32,1	7,8	1,16
	79,5	32,5	28	18	69,3	38,4	34,3	31	16,2	32,1	7,9	1,17
	79,6	32,2	27,4	18,2	69,3	38,8	34,5	30,8	16,0	32,0	7,9	1,16
CM-F80-3	79,8	32,7	28	18	69,1	40,2	36	31,8	16,2	32,1	8	1,15
	79,7	32,2	28	18	68,8	39,9	34,5	30,6	16,2	32	8	1,15
	79,6	33,2	28	18	68,8	39,9	34,3	29,8	15,8	32	7,9	1,15
	79,5	32,2	27,5	18	68,5	39,6	35,2	29,4	15,8	32	7,8	1,15
	79,5	32	27,5	18,5	68,5	39,6	34,3	29,8	16,6	32	7,9	1,15
	79,6	32,5	27,8	18,1	68,7	39,8	34,9	30,3	16,1	32,0	7,9	1,15

## B Resultados experimentais dos protótipos

### B.1. Série CC-SF

#### B.1.1. Protótipo CC-SF-1

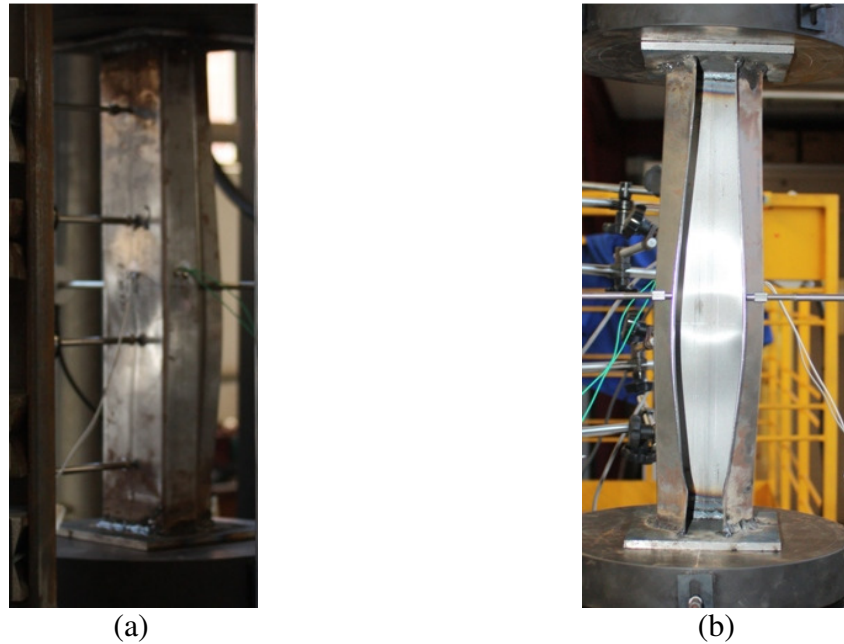


Fig. B.1. Deslocamentos no protótipo: (a) Alma; (b) Flange de Ligação.

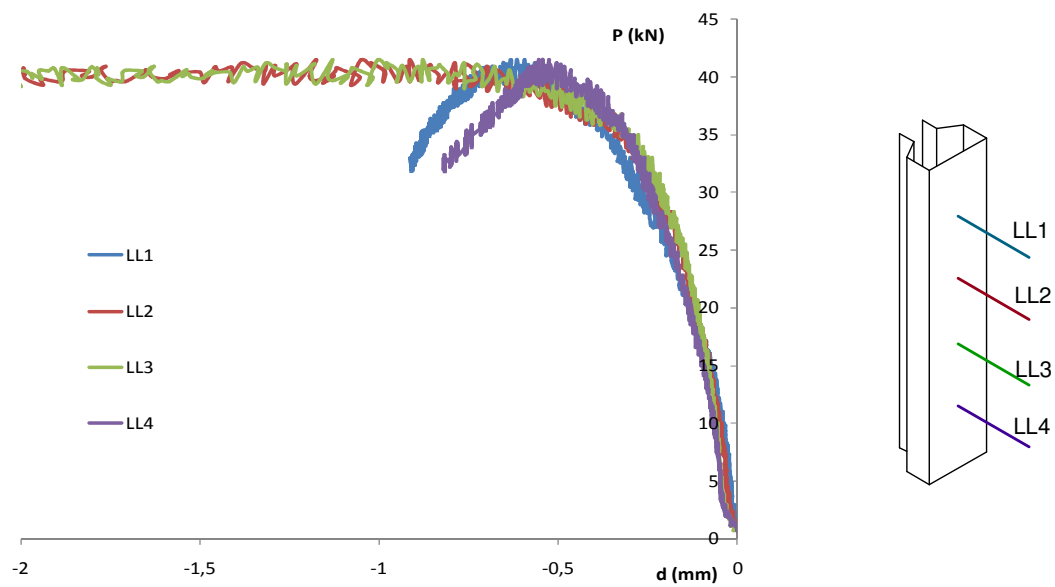
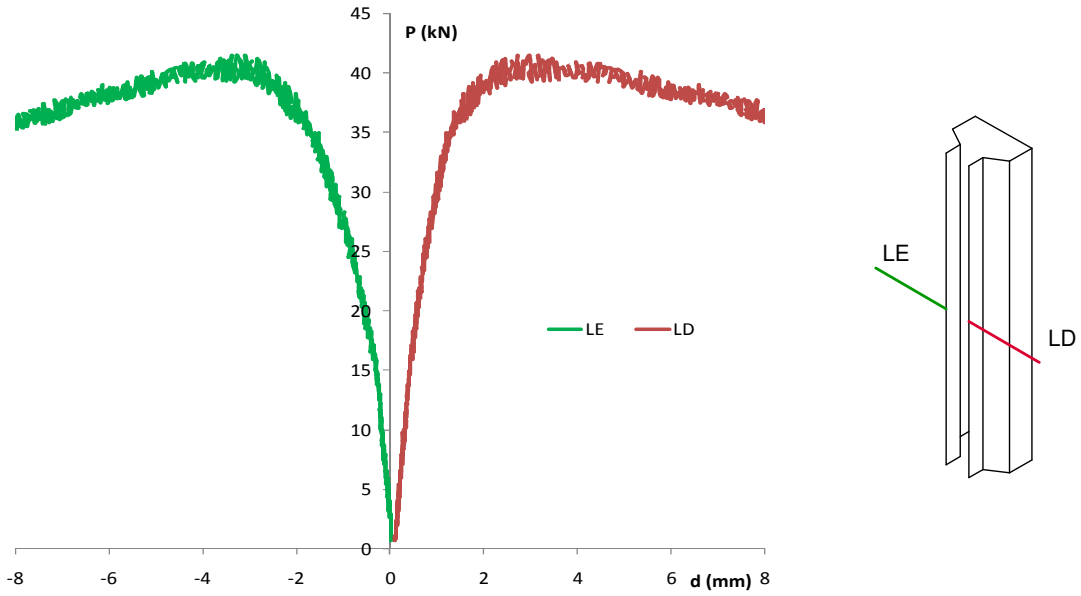
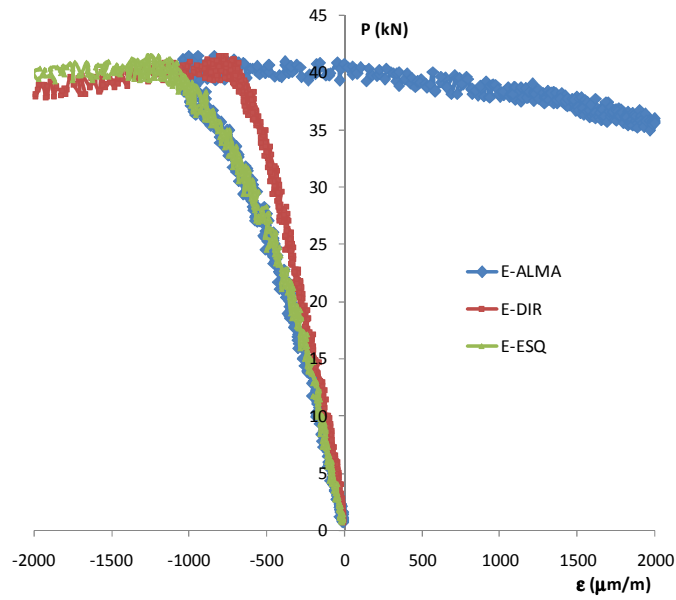


Fig. B.2. Deslocamentos na alma do protótipo.



**Fig. B.3. Deslocamentos no flange de ligação do protótipo.**



**Fig. B.4. Deformações no protótipo.**



### B.1.2. Protótipo CC-SF-2

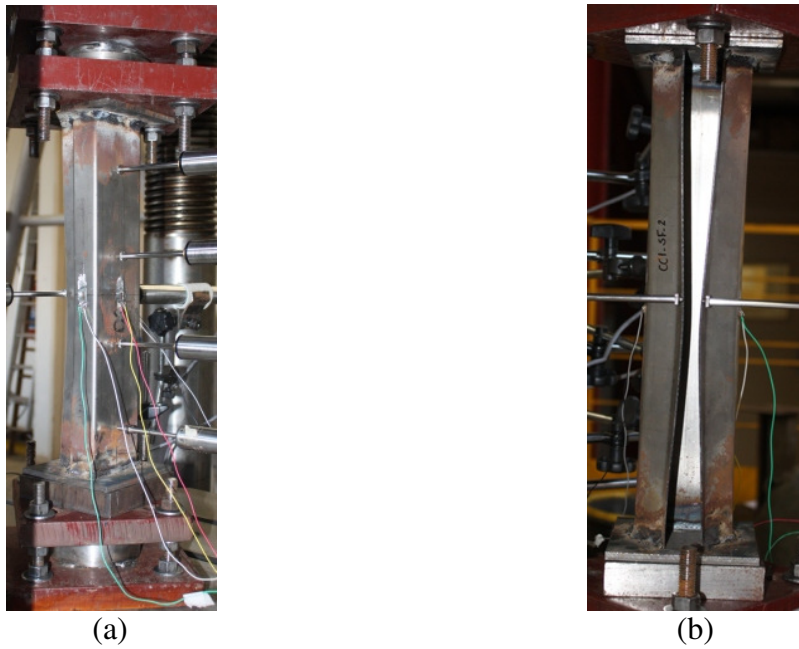


Fig. B.5. Deslocamentos no protótipo: (a) Alma; (b) Flange de Ligação.

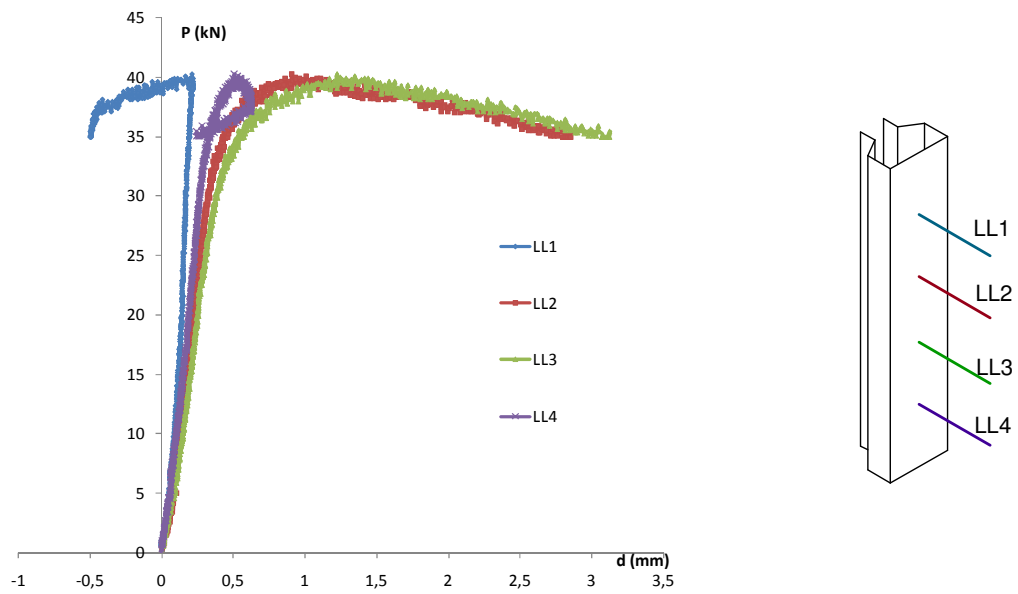
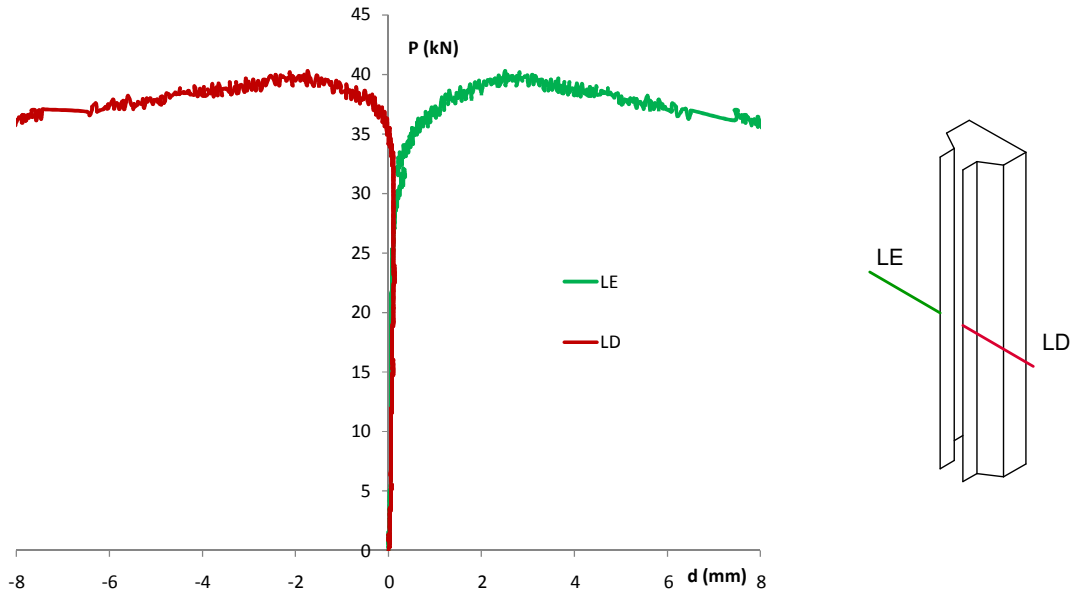
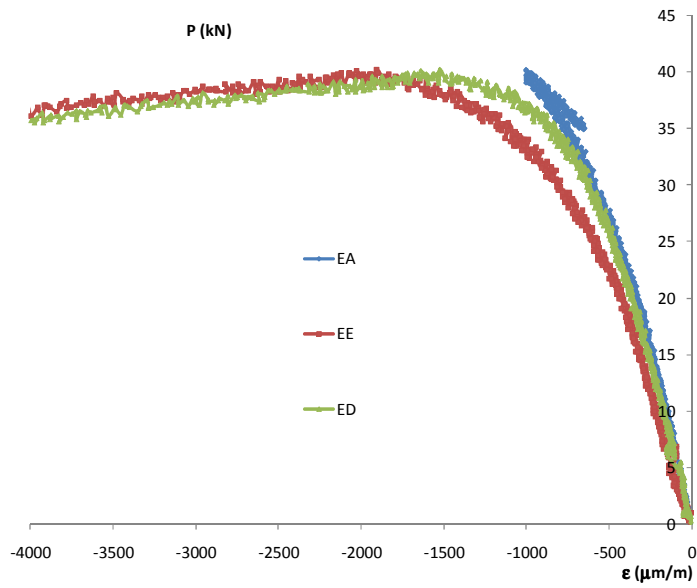


Fig. B.6. Deslocamentos na alma do protótipo.



**Fig. B.7. Deslocamentos no flange de ligação do protótipo.**



**Fig. B.8. Deformações no protótipo.**

## B.2. Série CC-F60

### B.2.1. Protótipo CC-F60-2

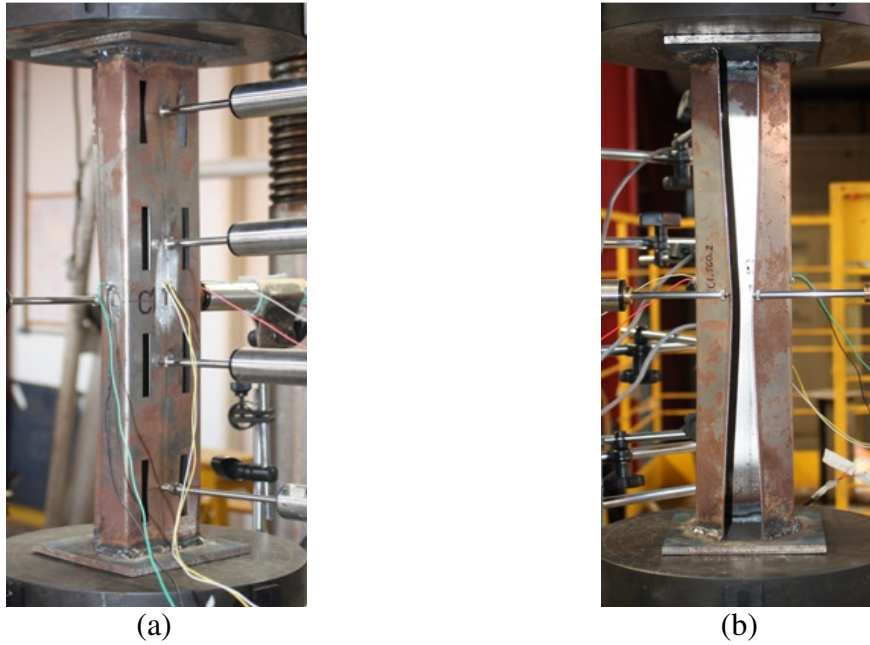


Fig. B.9. Deslocamentos no protótipo: (a) Alma; (b) Flange de Ligação.

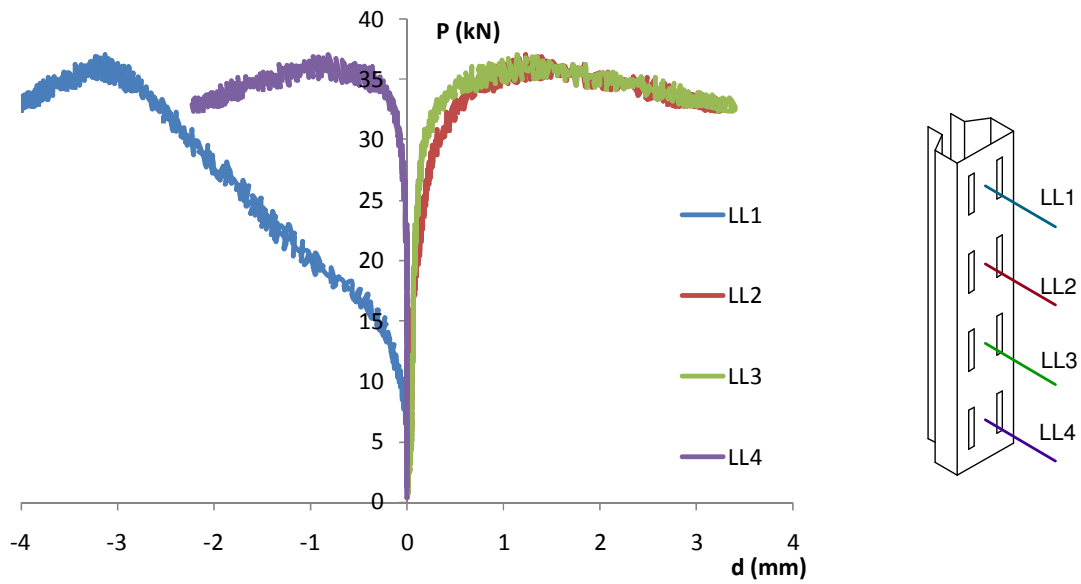


Fig. B.10. Deslocamentos na alma do protótipo.

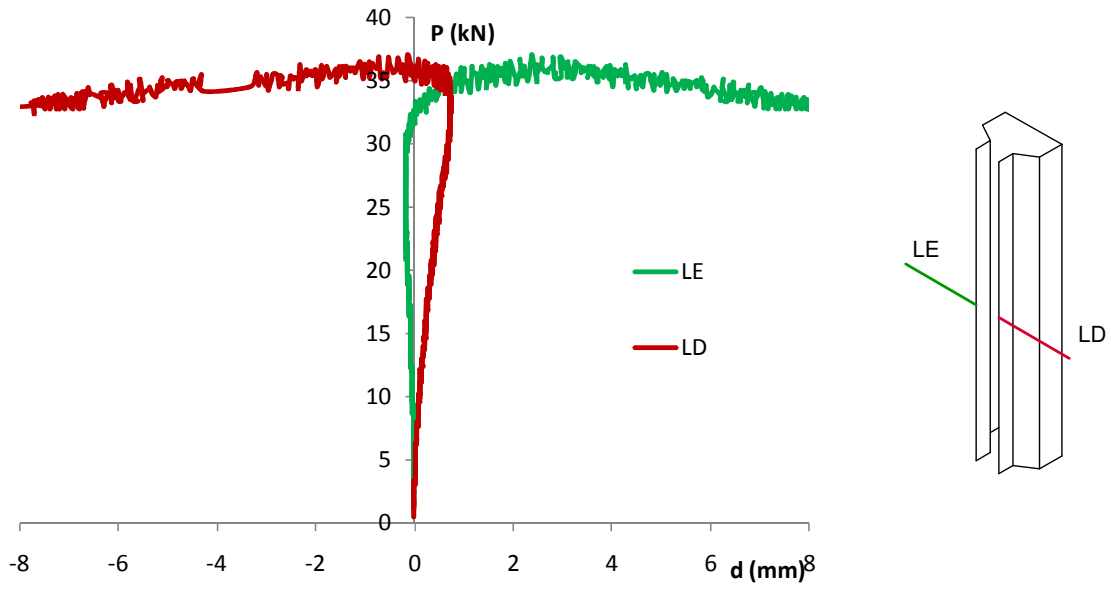


Fig. B.11. Deslocamentos no flange de ligação do protótipo.

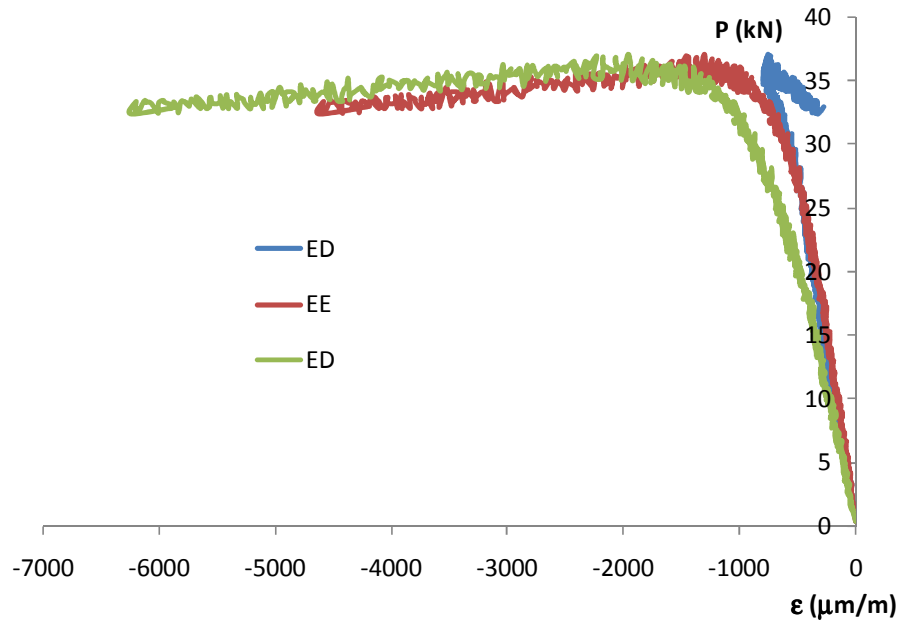


Fig. B.12. Deformações no protótipo.

### B.2.2. Protótipo CC-F60-3

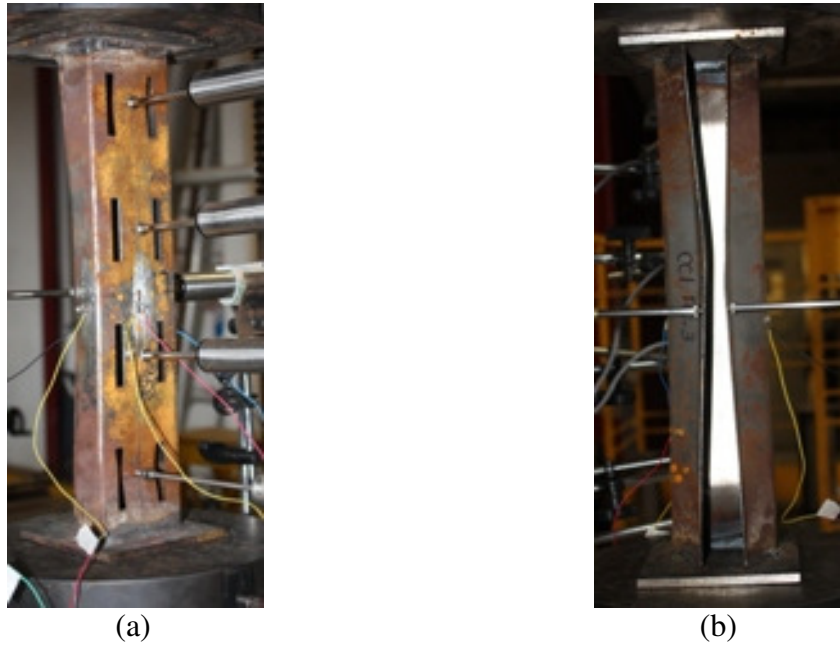


Fig. B.13. Deslocamentos no protótipo: (a) Alma; (b) Flange de Ligação.

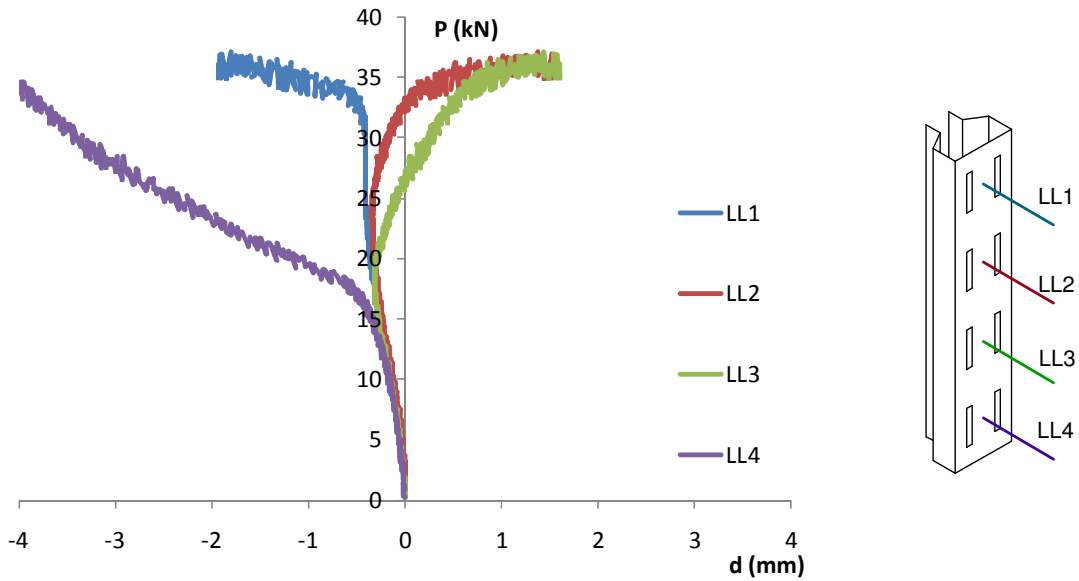


Fig. B.14. Deslocamentos na alma do protótipo.

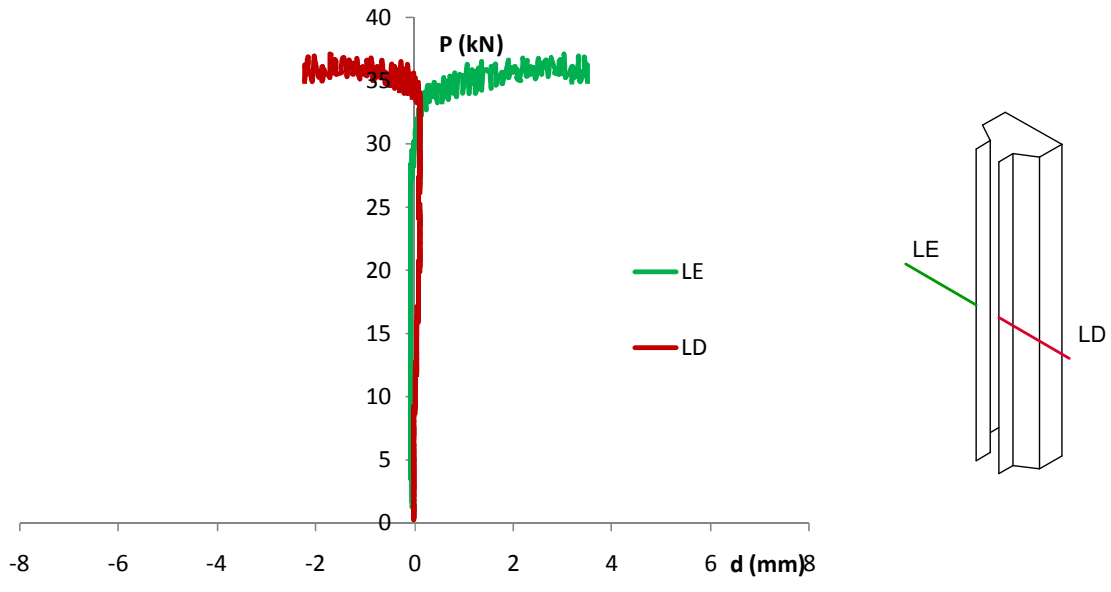


Fig. B.15. Deslocamentos no flange de ligação do protótipo.

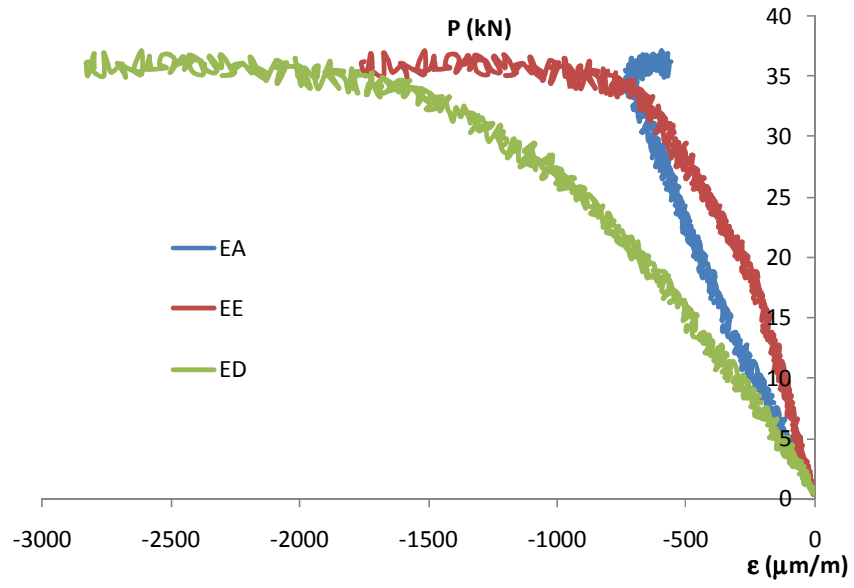


Fig. B.16. Deformações no protótipo.

### B.3. Série CC-F80

#### B.3.1. Protótipo CC-F80-2

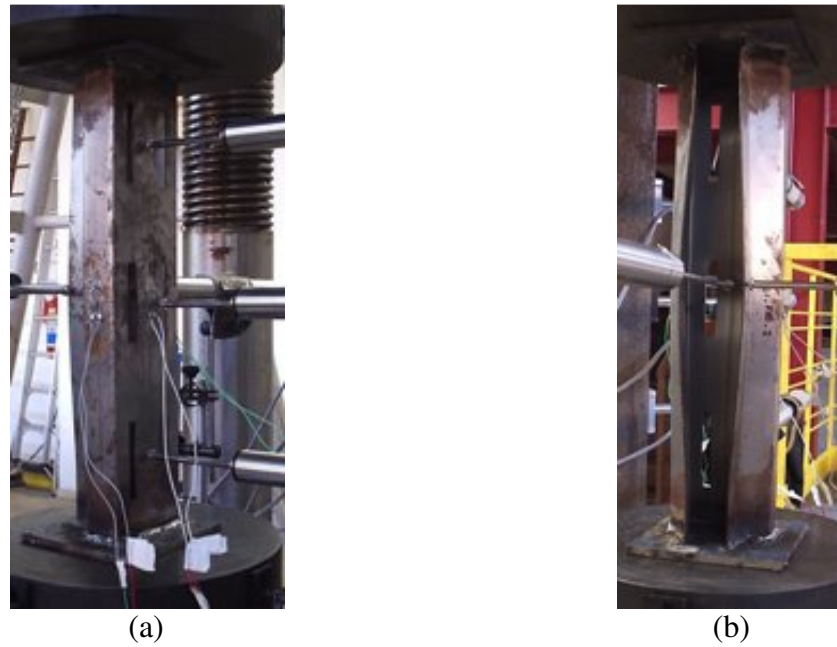


Fig. B.17. Deslocamentos no protótipo: (a) Alma; (b) Flange de Ligação.

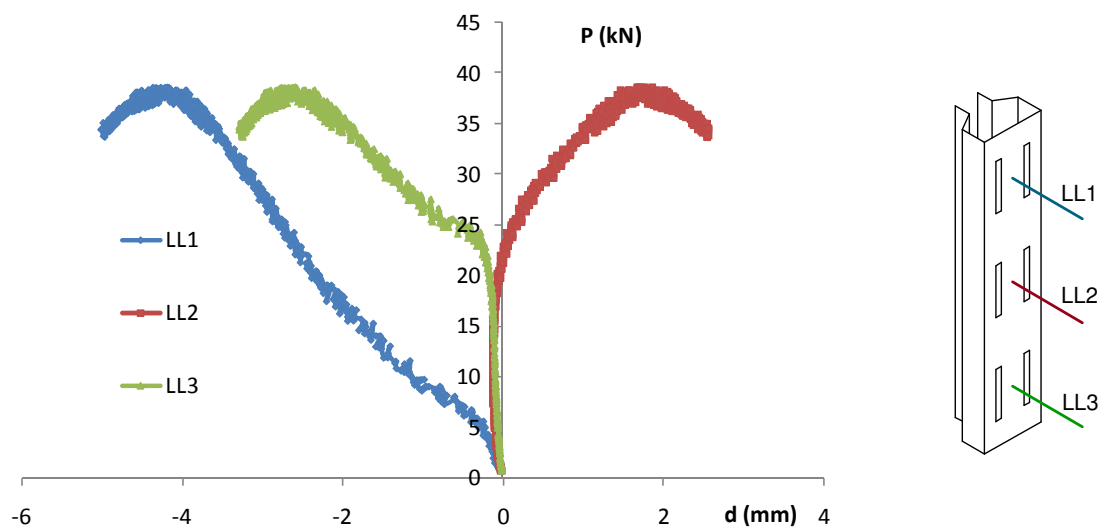


Fig. B.18. Deslocamentos na alma do protótipo.

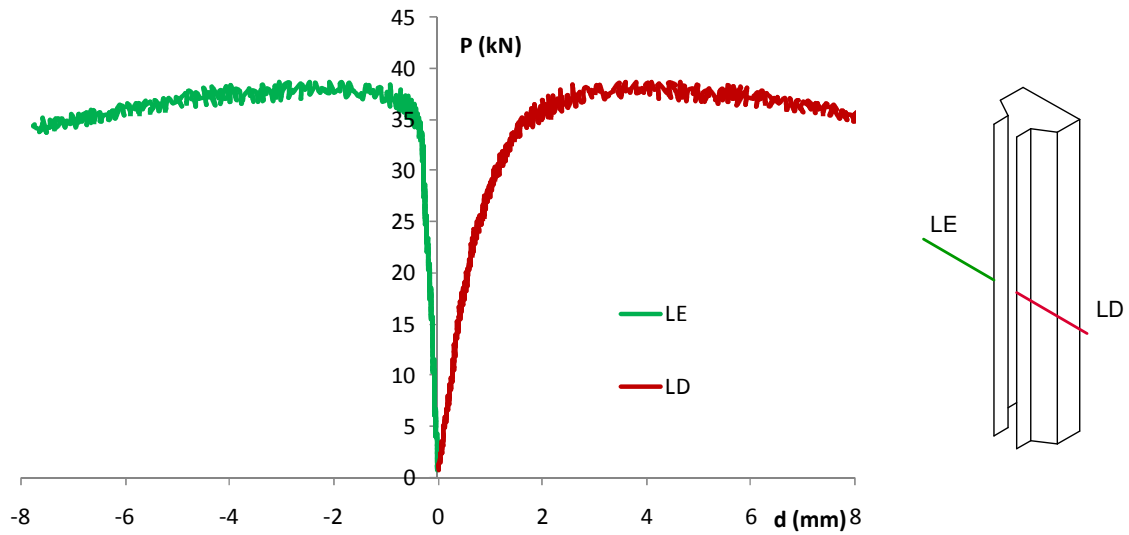


Fig. B.19. Deslocamentos no flange de ligação do protótipo.

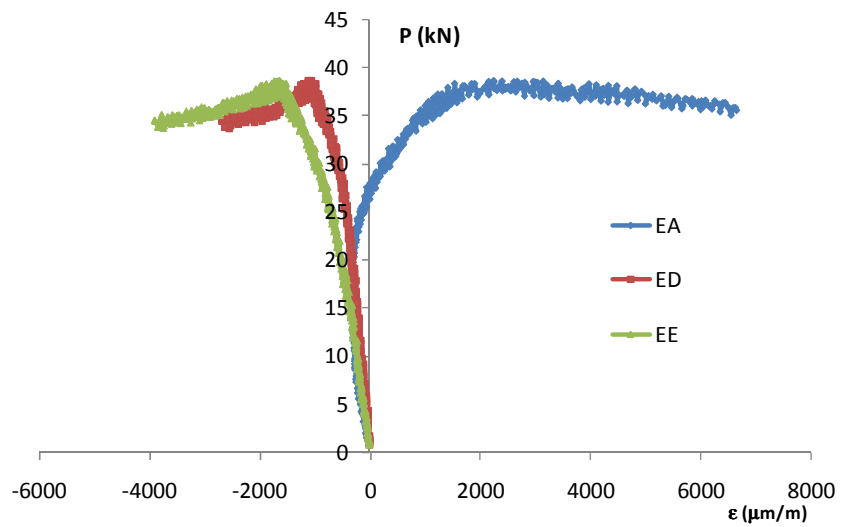


Fig. B.20. Deformações no protótipo.



### B.3.2. Protótipo CC-F80-3

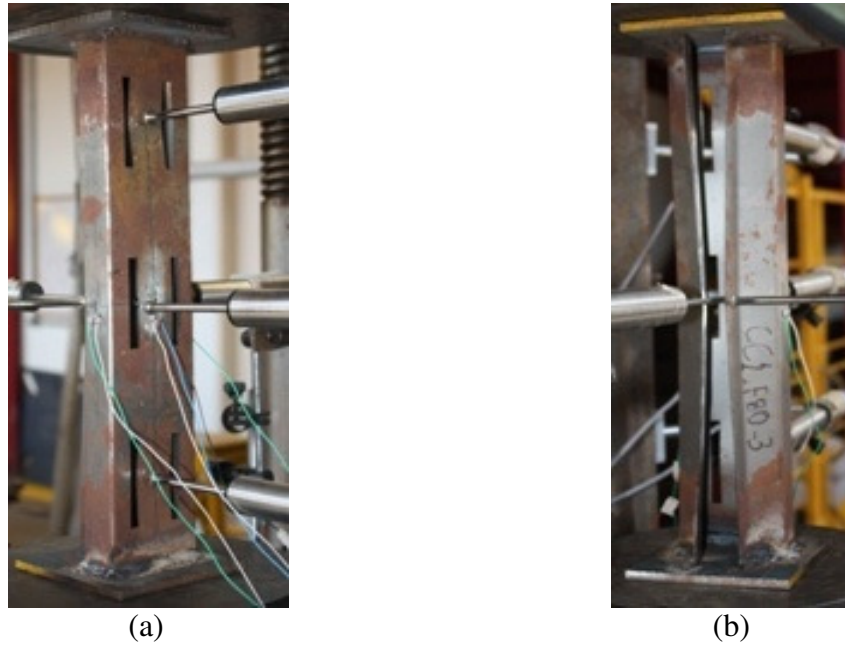


Fig. B.21. Deslocamentos no protótipo: (a) Alma; (b) Flange de Ligação.

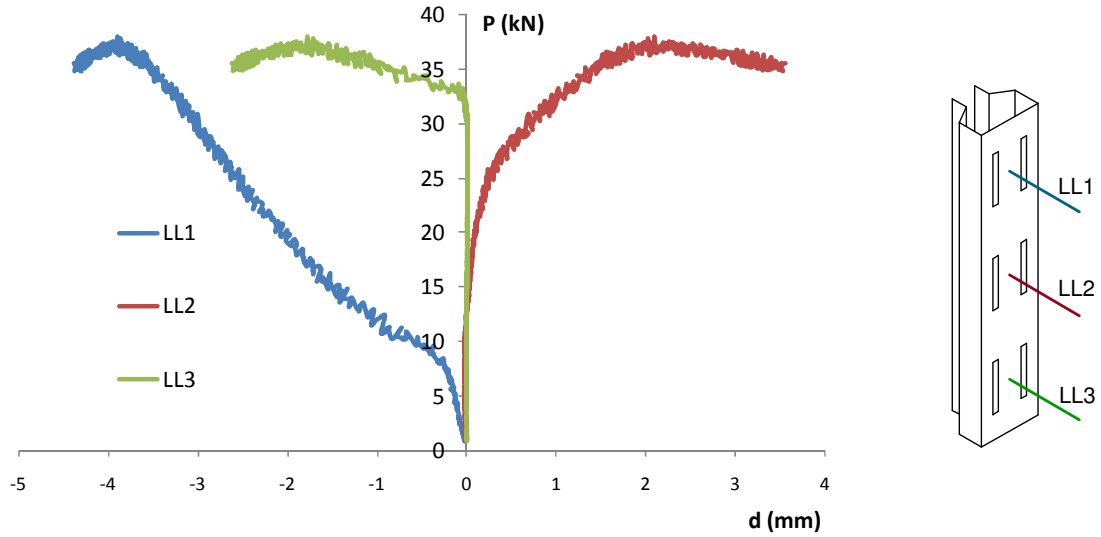
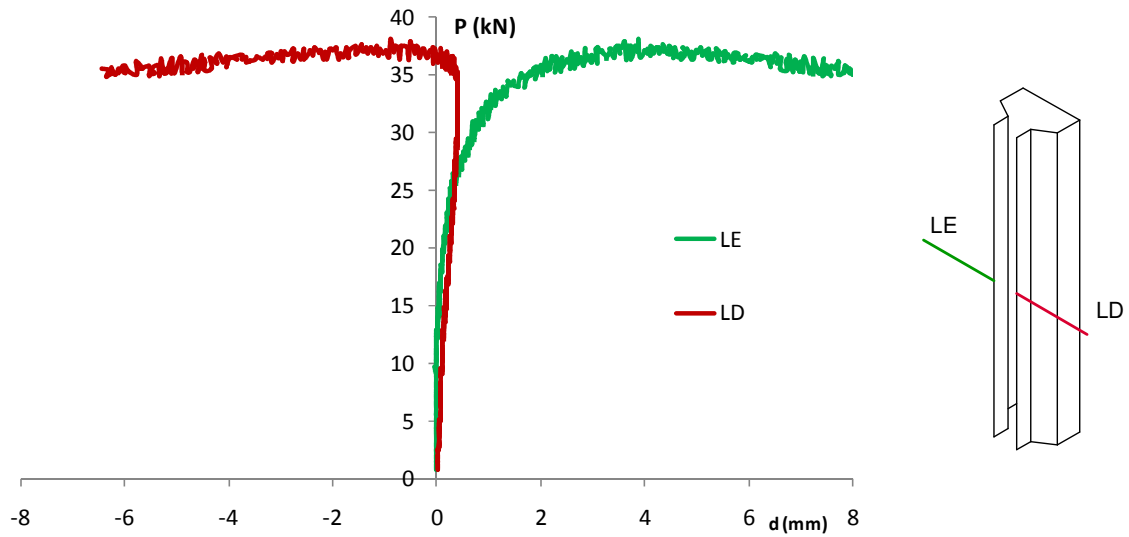
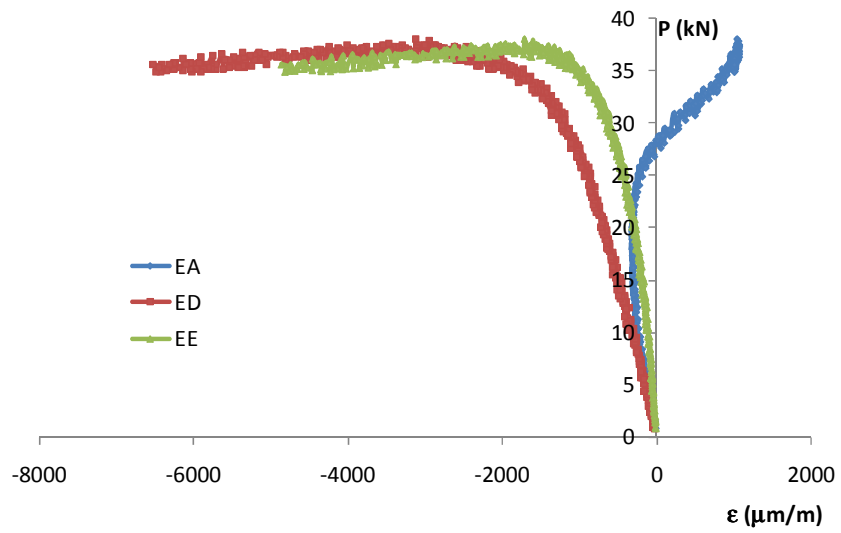


Fig. B.22. Deslocamentos na alma do protótipo.



**Fig. B.23. Deslocamentos no flange de ligação do protótipo.**



**Fig. B.24. Deformações no protótipo.**

## B.4. Série CM-SF

### B.4.1. Protótipo CM-SF-1

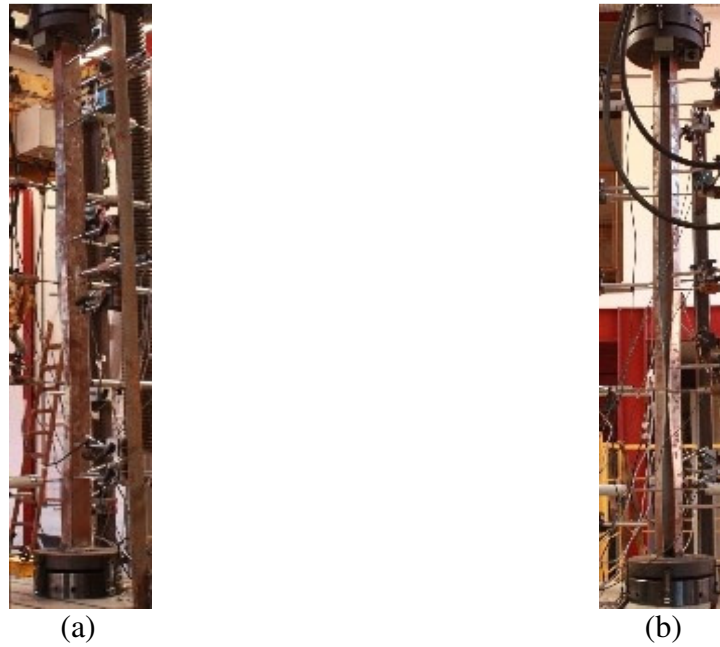


Fig. B.25. Deslocamentos no protótipo: (a) Alma; (b) Flange de Ligação.

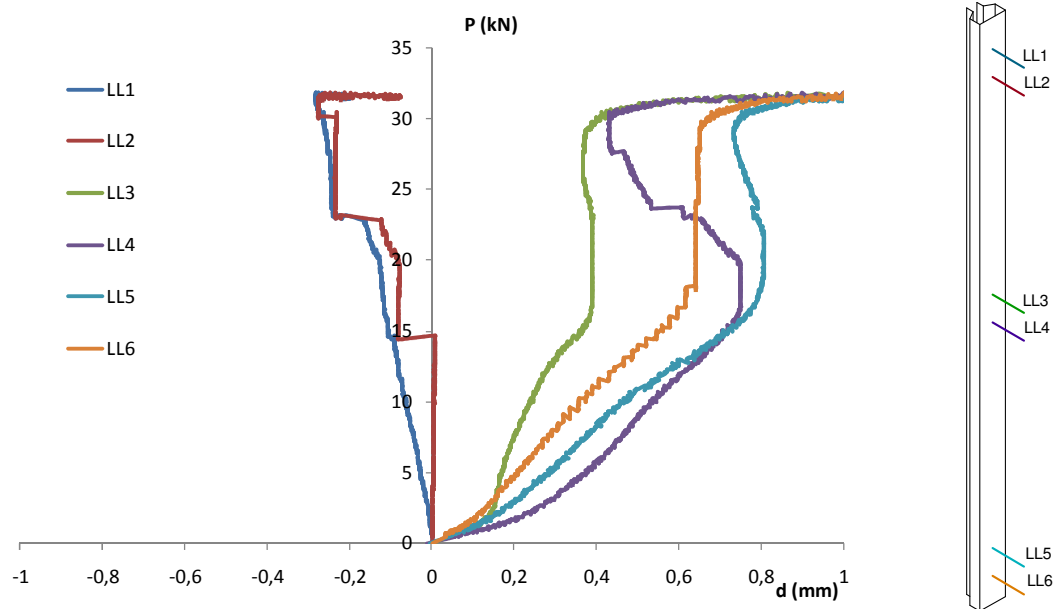
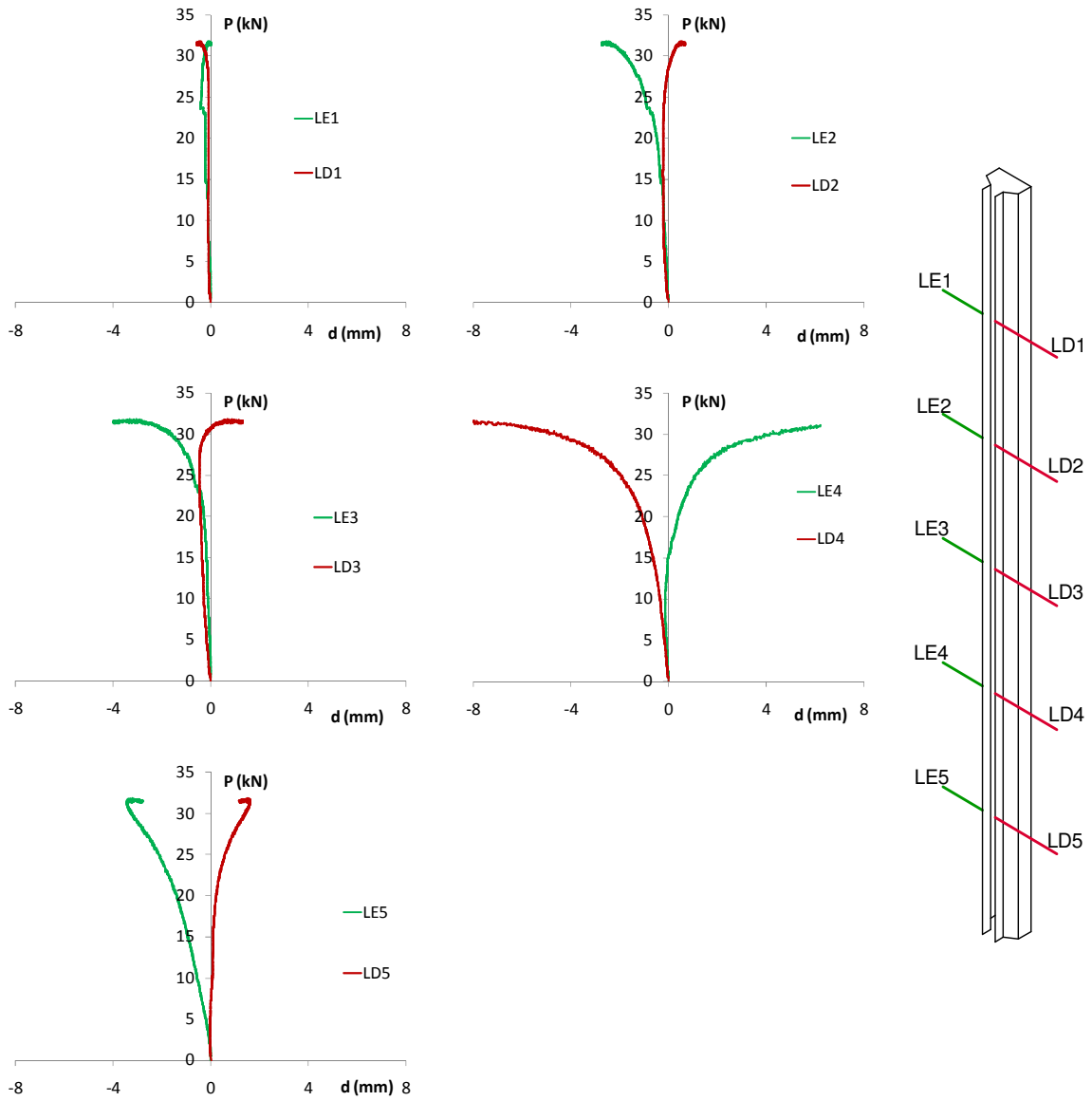
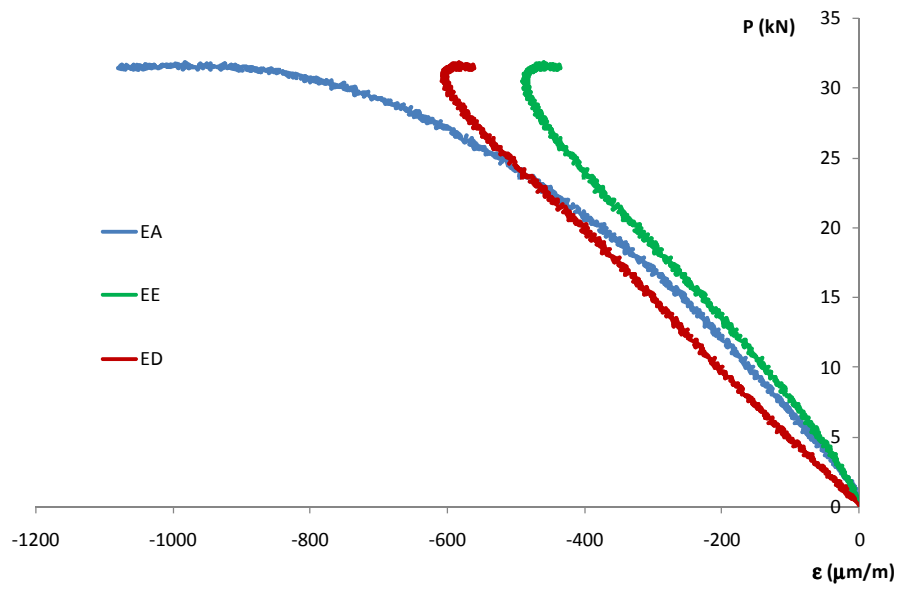


Fig. B.26. Deslocamentos na alma do protótipo.



**Fig. B.27. Deslocamentos no flange de ligação do protótipo.**



**Fig. B.28. Deformações no protótipo.**

### B.4.2. Protótipo CM-SF-3

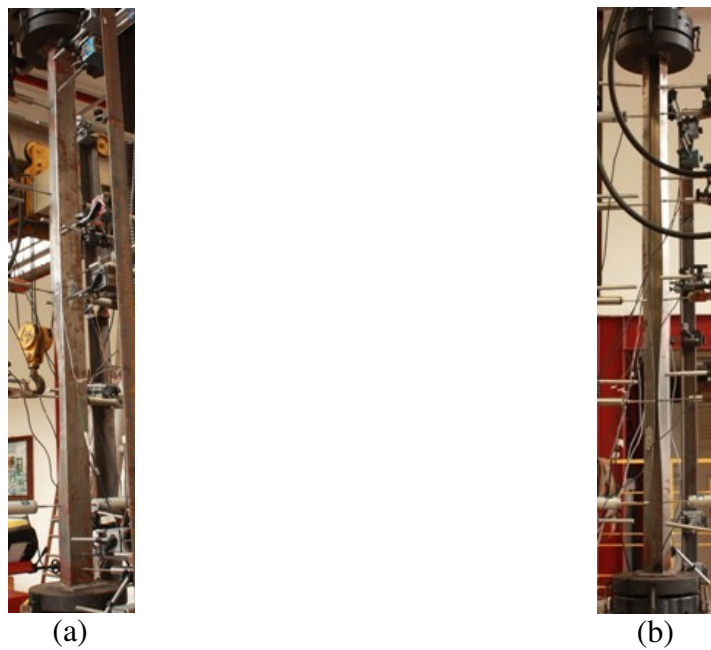


Fig. B.29. Deslocamentos no protótipo: (a) Alma; (b) Flange de Ligação.

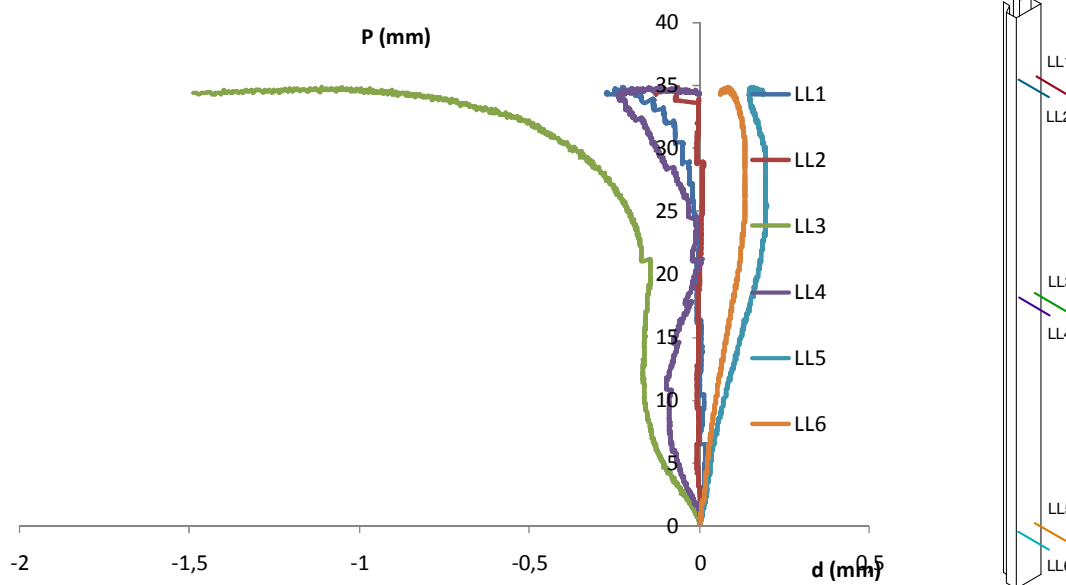


Fig. B.30. Deslocamentos na alma do protótipo.

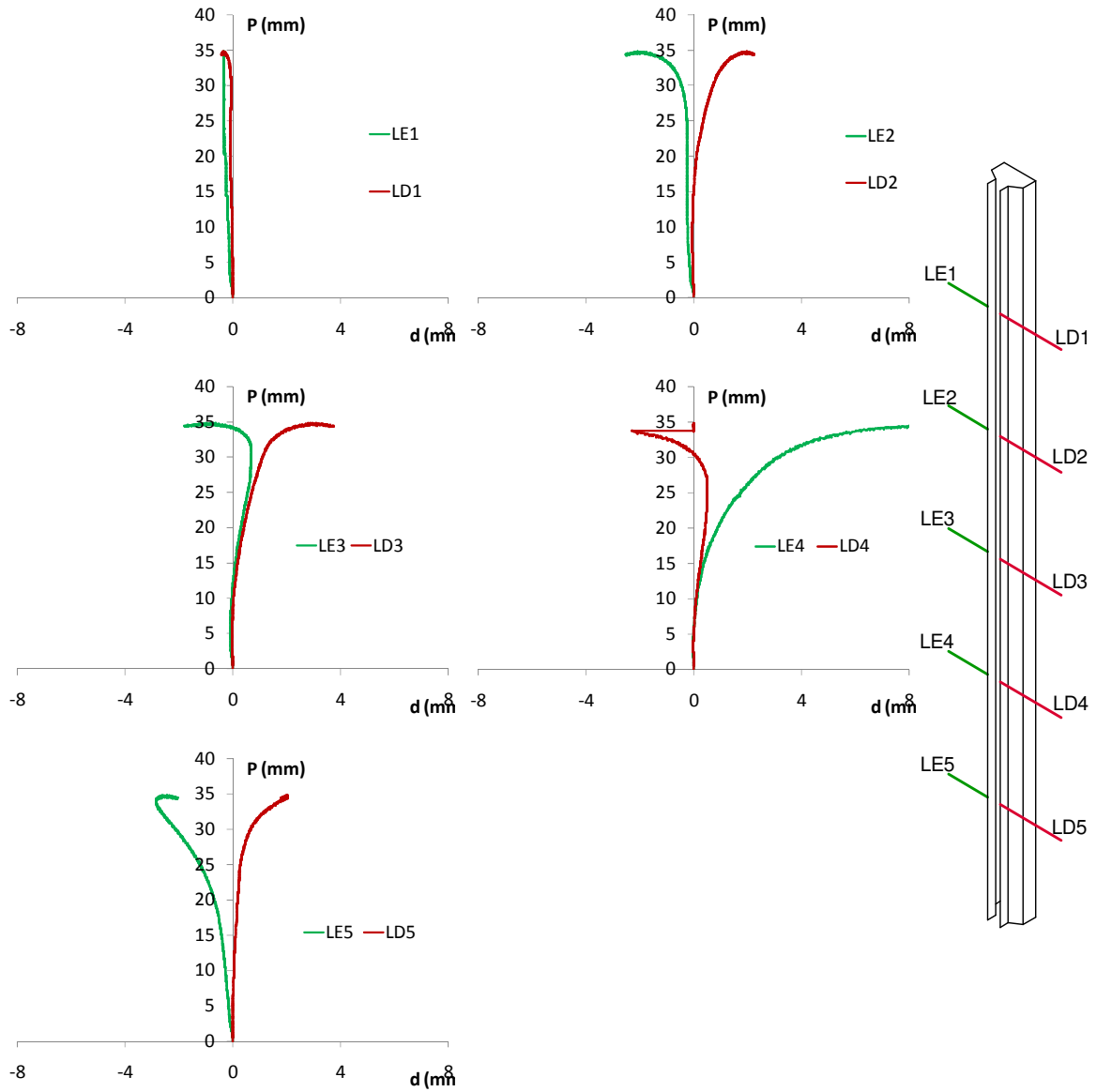
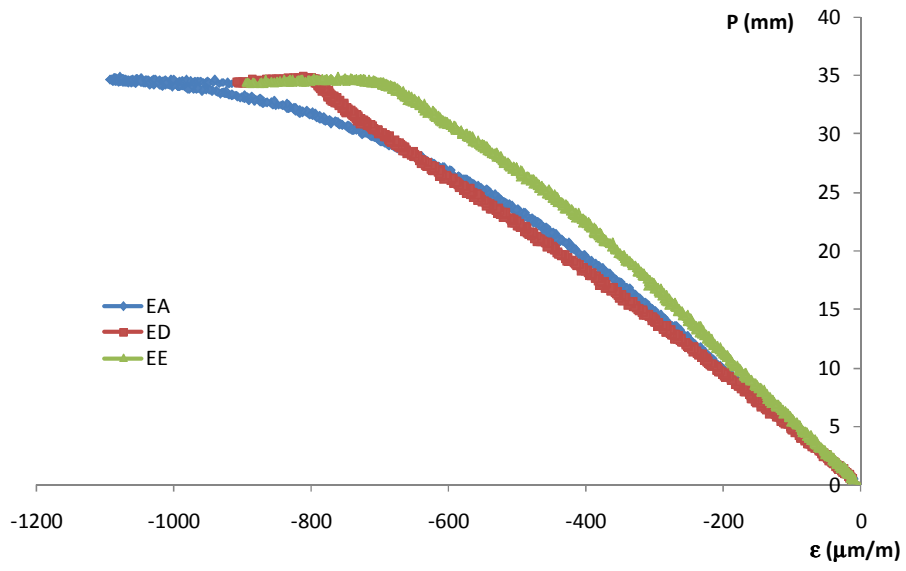


Fig. B.31. Deslocamentos no flange de ligação do protótipo.



**Fig. B.32. Deformações no protótipo.**



## B.5. Série CM-F60

### B.5.1. Protótipo CM-F60-1

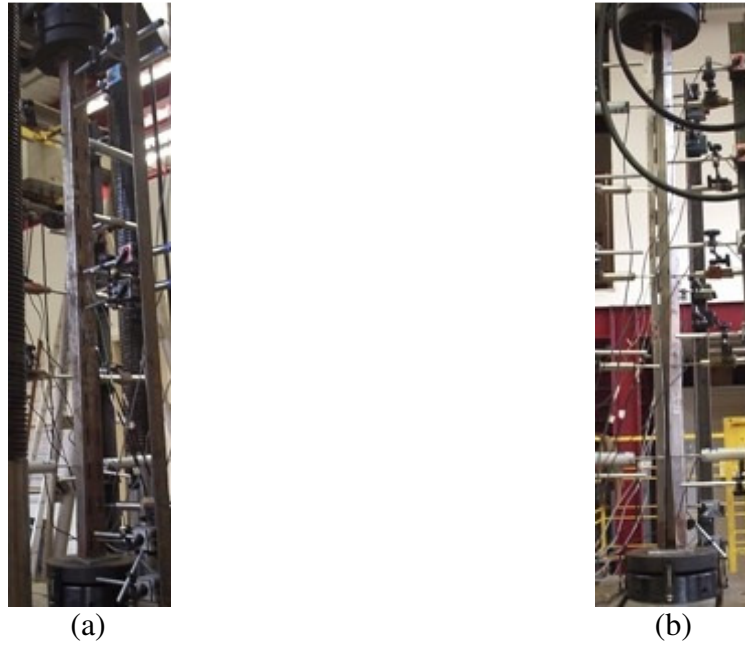


Fig. B.33. Deslocamentos no protótipo: (a) Alma; (b) Flange de Ligação.

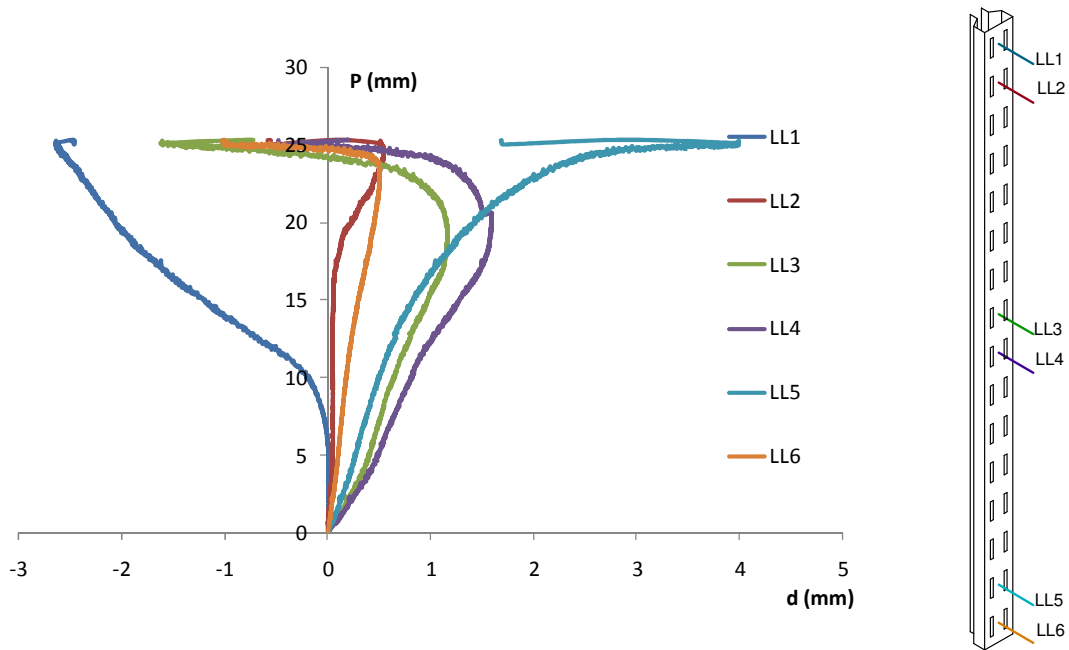


Fig. B.34. Deslocamentos na alma do protótipo.

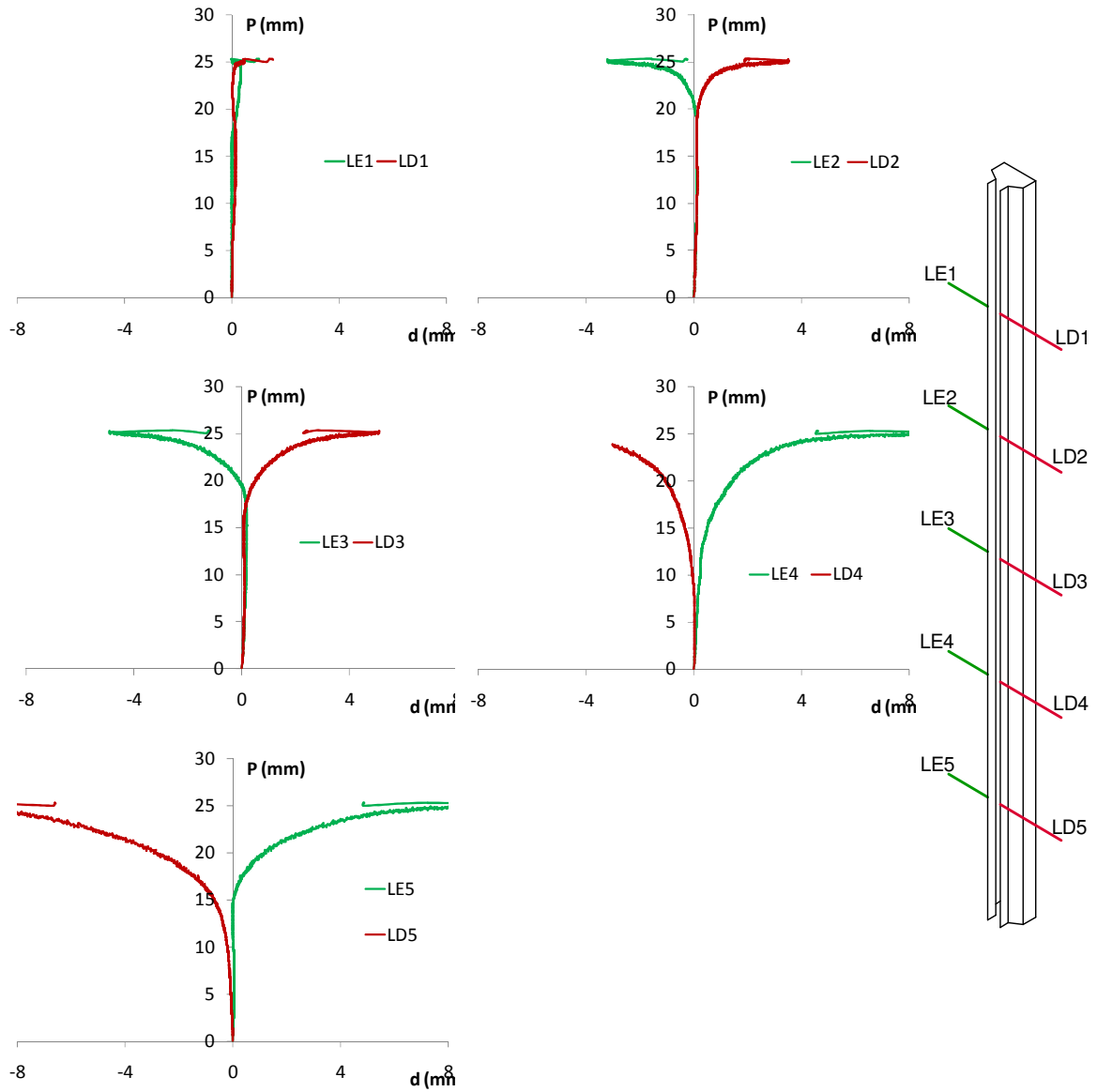
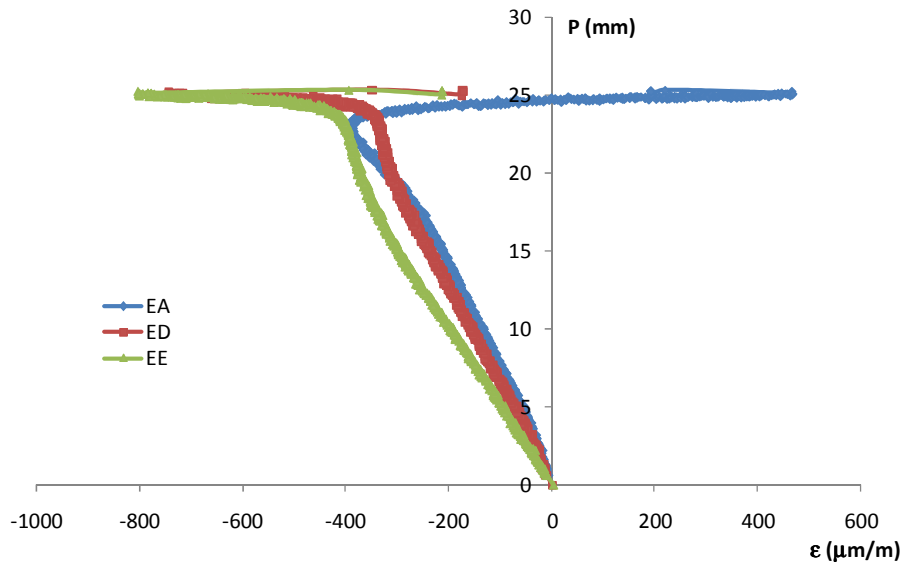


Fig. B.35. Deslocamentos no flange de ligação do protótipo.



**Fig. B.36. Deformações no protótipo.**

## B.6. Série CM-F80

### B.6.1. Protótipo CM-F80-1

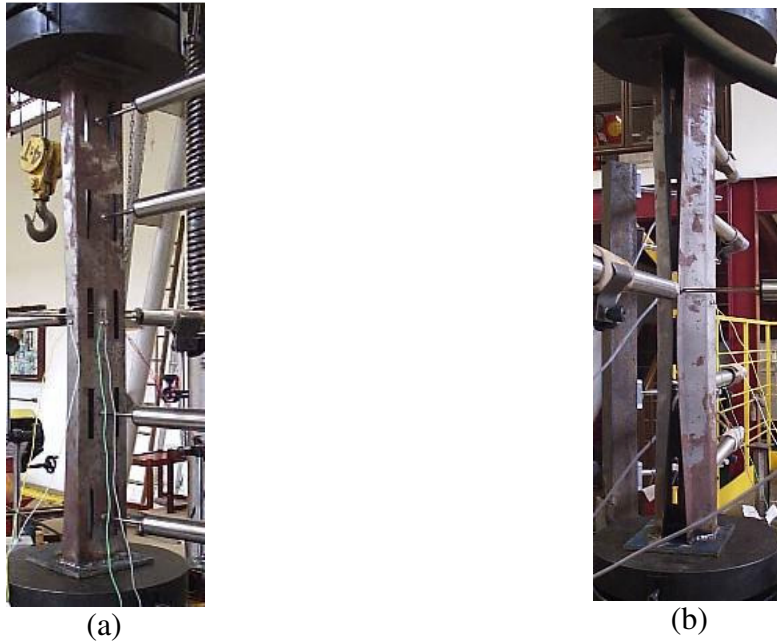


Fig. B.37. Deslocamentos no protótipo: (a) Alma; (b) Flange de Ligação.

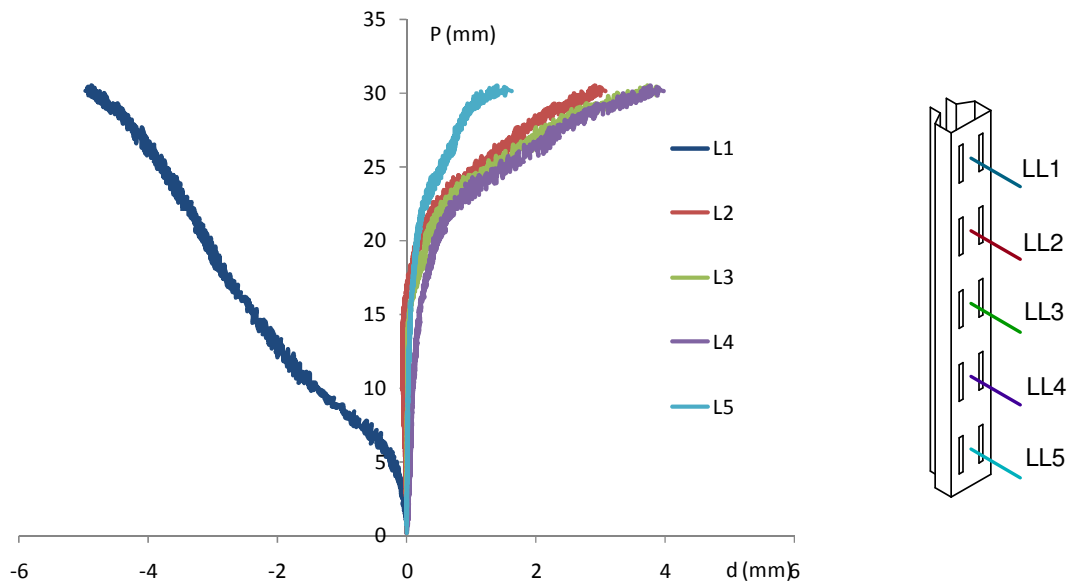


Fig. B.38. Deslocamentos na alma do protótipo.

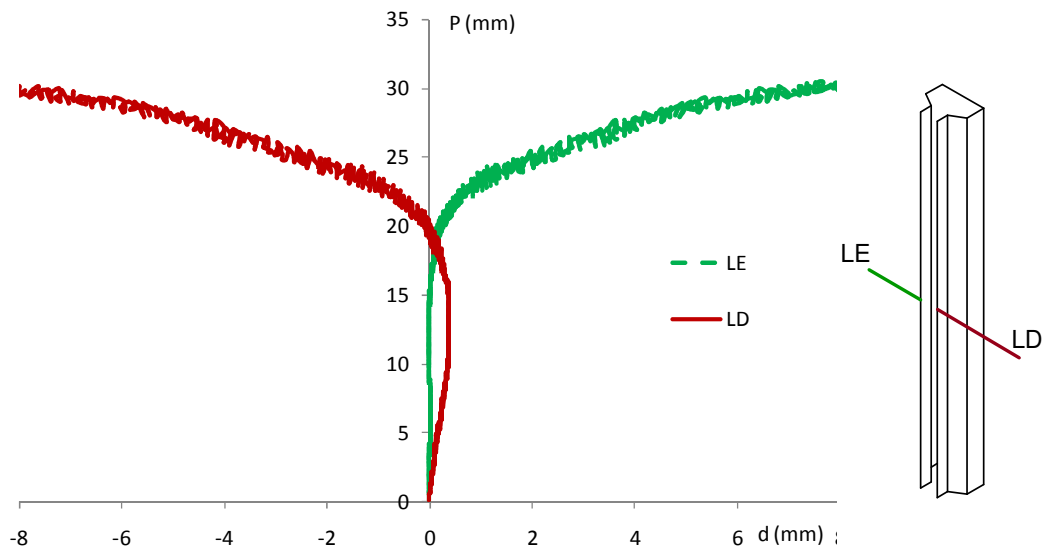


Fig. B.39. Deslocamentos no flange de ligação do protótipo.

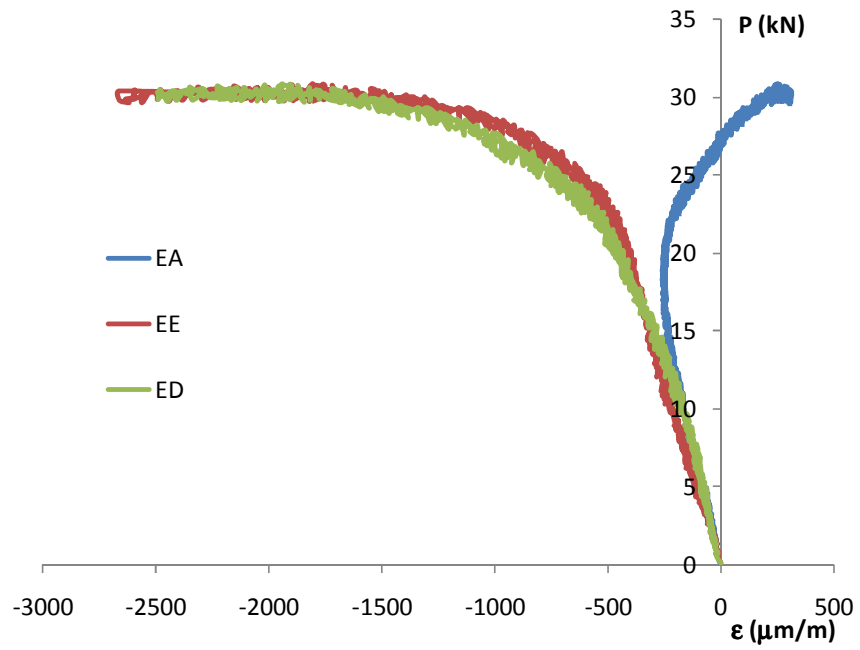


Fig. B.40. Deformações no protótipo.

### B.6.2. Protótipo CM-F80-2

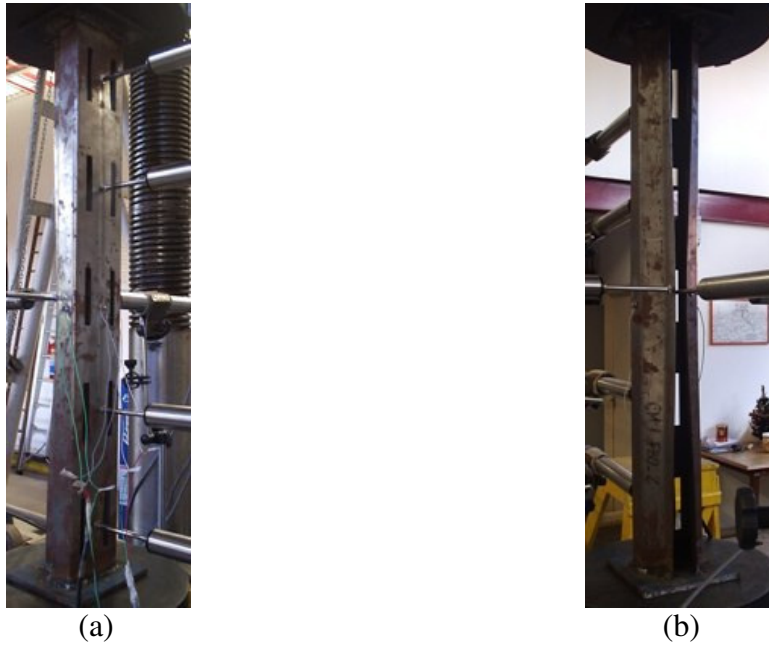


Fig. B.41.Deslocamentos no protótipo: (a) Alma; (b) Flange de Ligação.

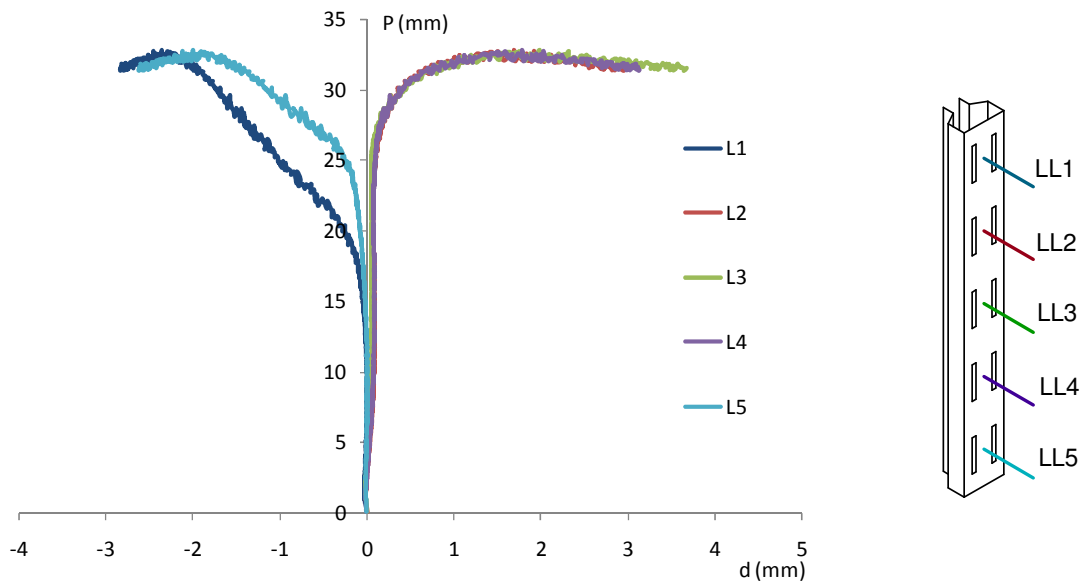


Fig. B.42.Deslocamentos na alma do protótipo.

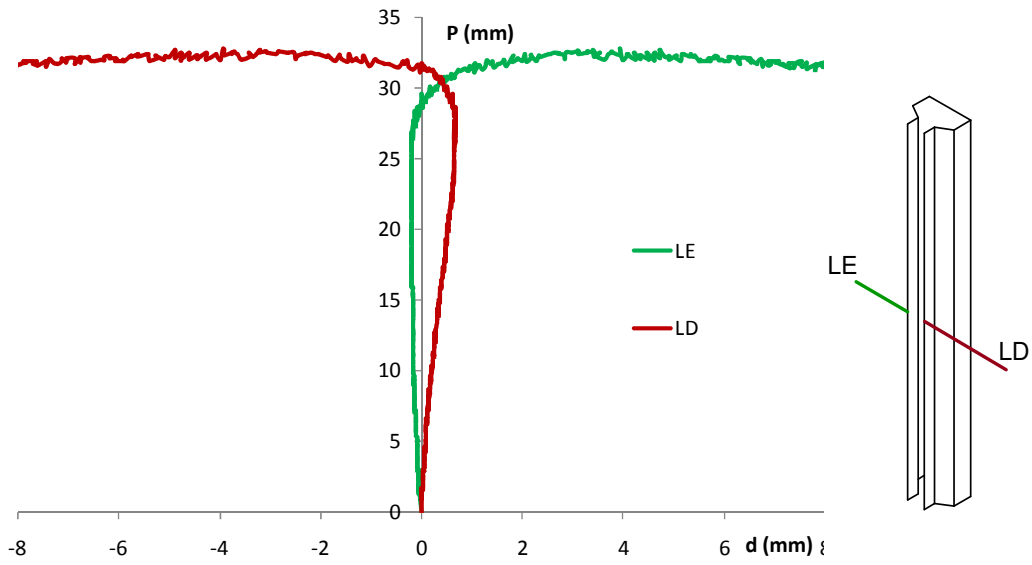


Fig. B.43. Deslocamentos no flange de ligação do protótipo.

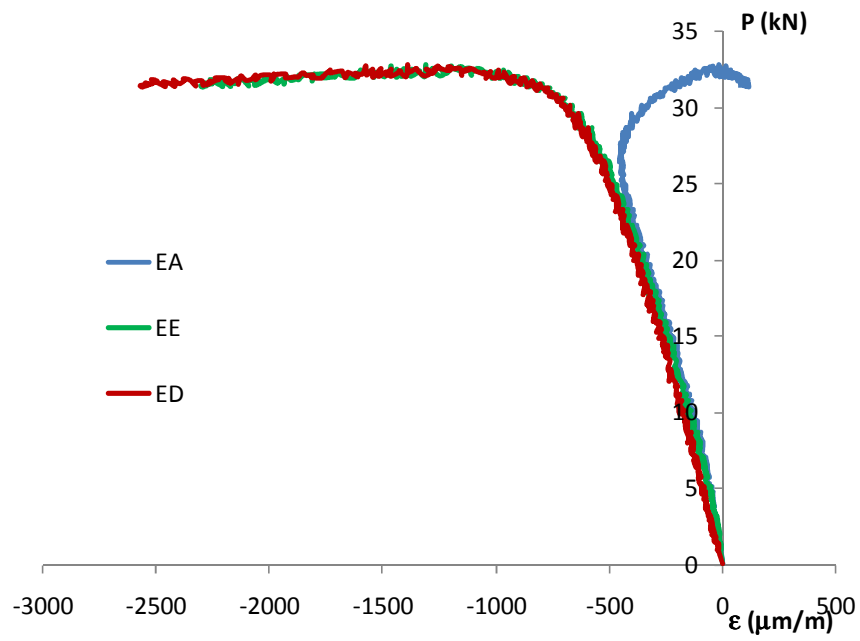


Fig. B.44. Deformações no protótipo.

## C Comparação de resultados dos protótipos.

### C.1. Série CC-SF

#### C.1.1. Protótipo CC-SF-1

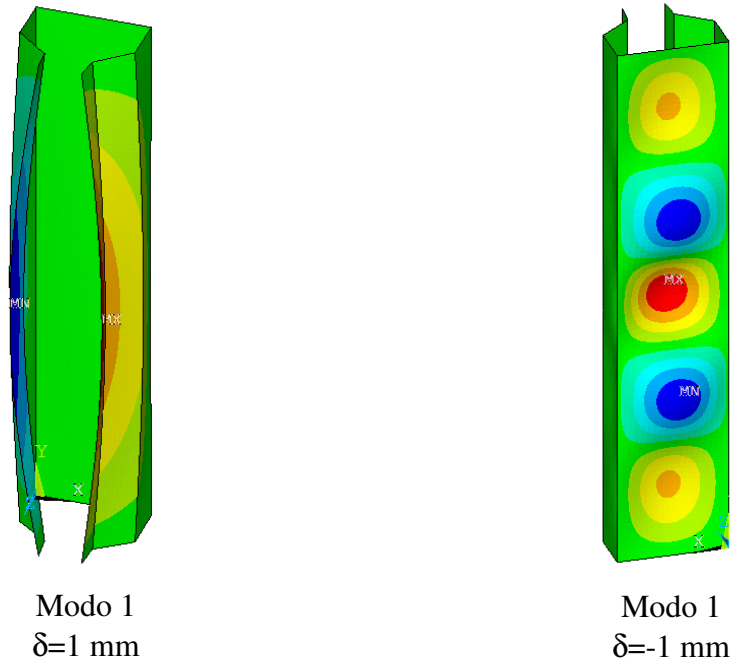


Fig. C.1. Modos utilizados para a imperfeição inicial e suas amplitudes.

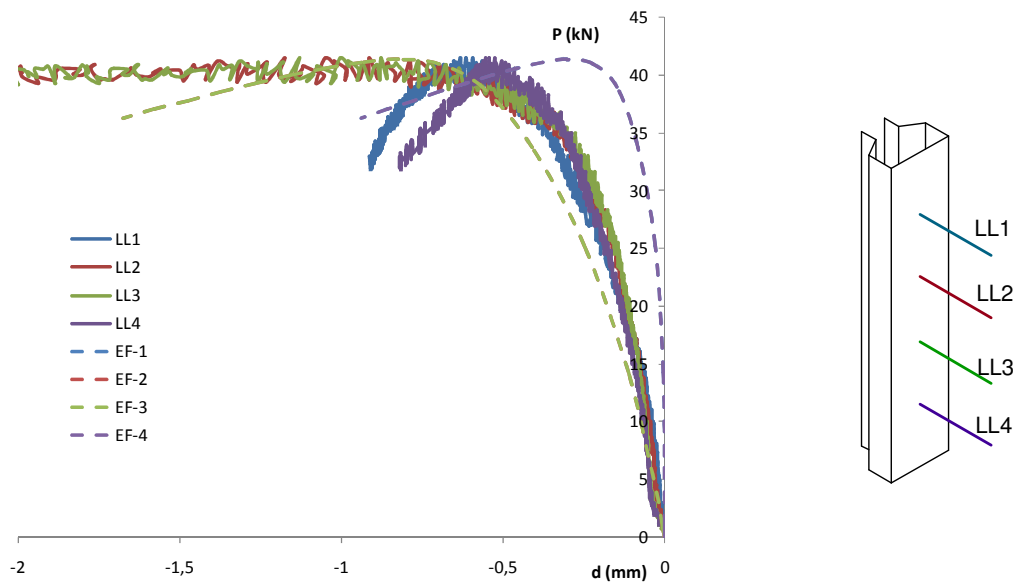
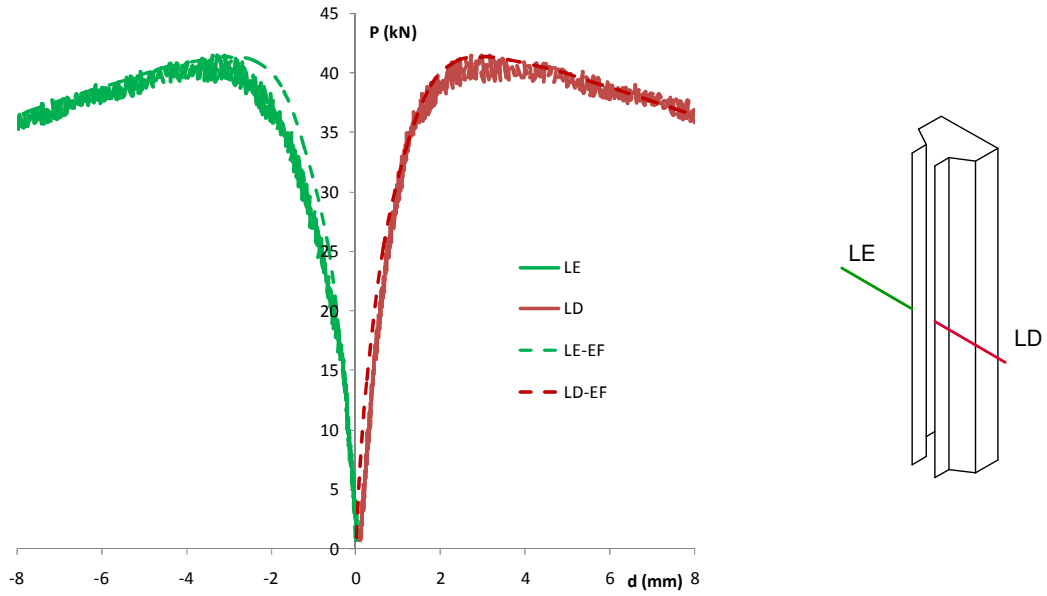
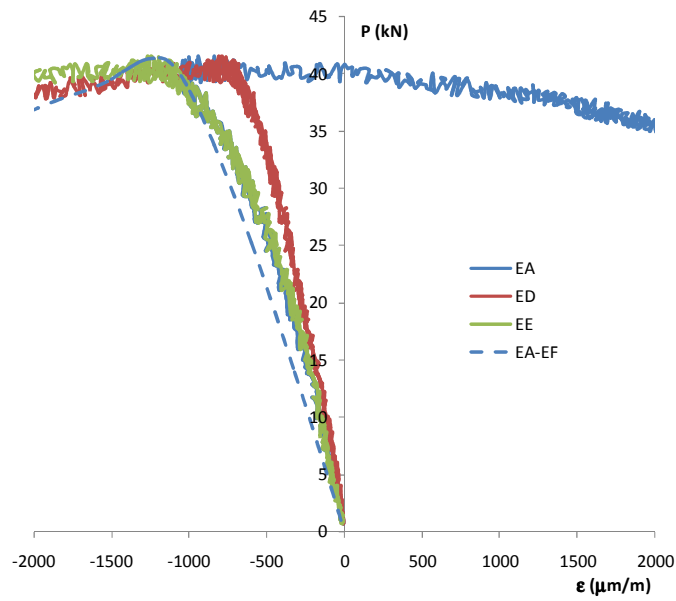


Fig. C.2. Comparação entre os deslocamentos na alma e os resultados numéricos.

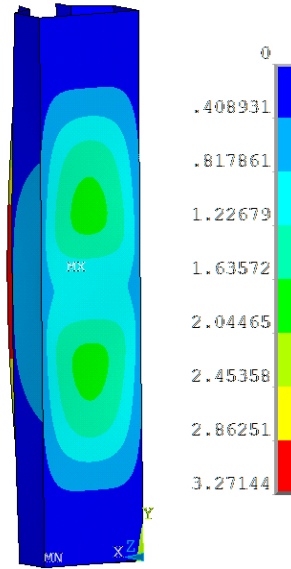
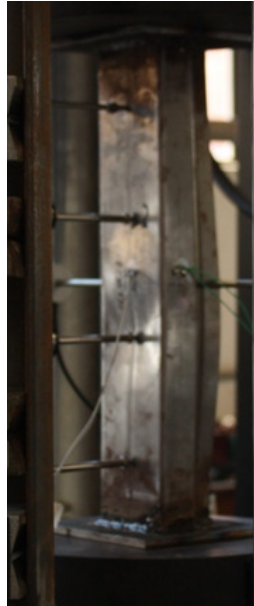




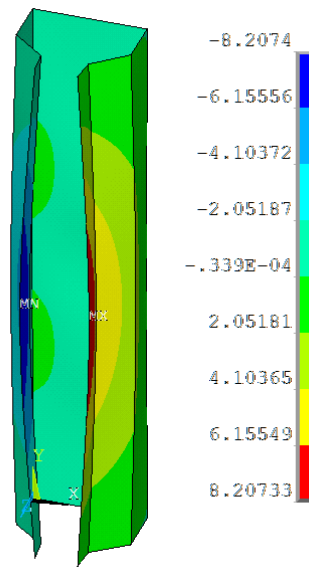
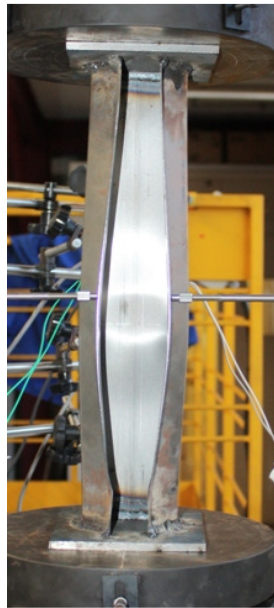
**Fig. C.3.** Comparação entre os deslocamentos no flange de ligação e os resultados numéricos.



**Fig. C.4.** Comparação entre as deformações no protótipo e os resultados numéricos.



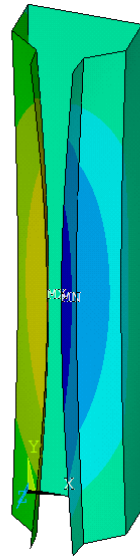
(a)



(b)

Fig. C.5. Comparação dos deslocamentos experimentais e numéricos.

### C.1.2. Protótipo CC-SF-2



Modo 1  
 $\delta=0,5$  mm

Fig. C.6. Modo utilizado para a imperfeição inicial e sua amplitude.

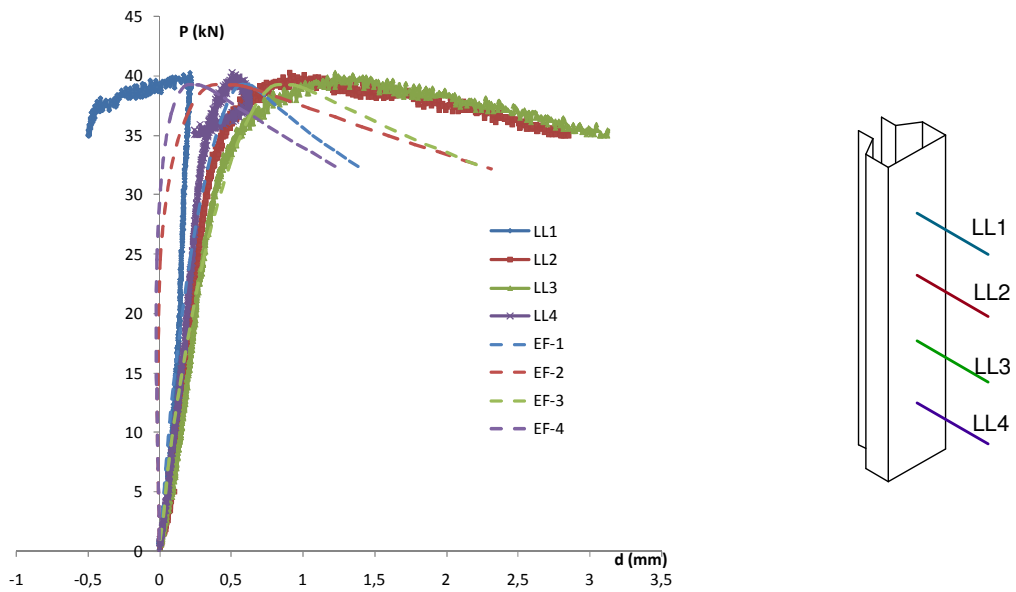


Fig. C.7. Comparação entre os deslocamentos na alma e os resultados numéricos.

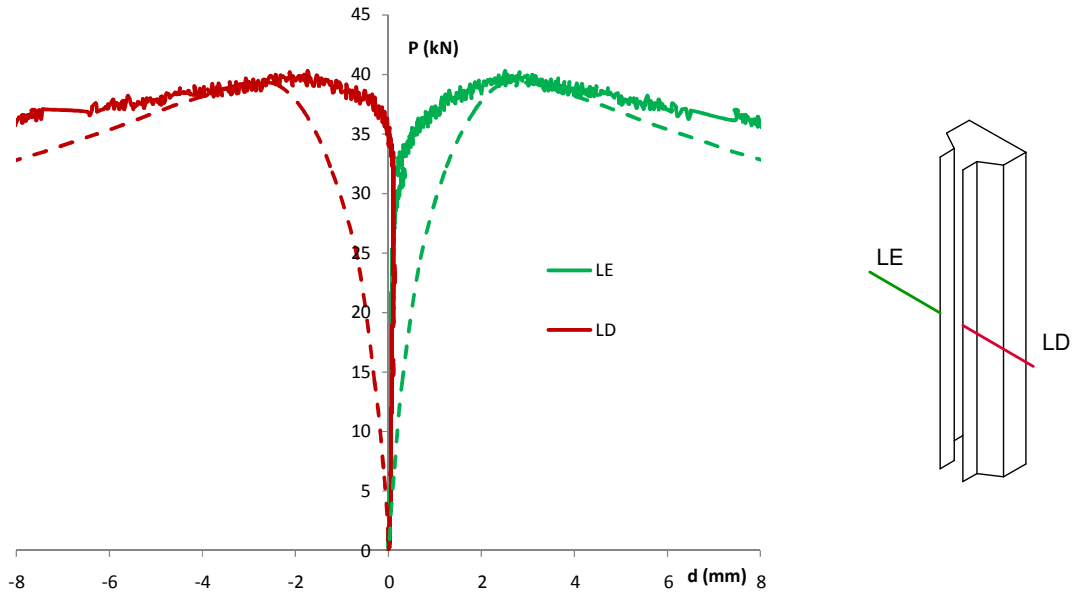


Fig. C.8. Comparação entre os deslocamentos no flange de ligação e os resultados numéricos.

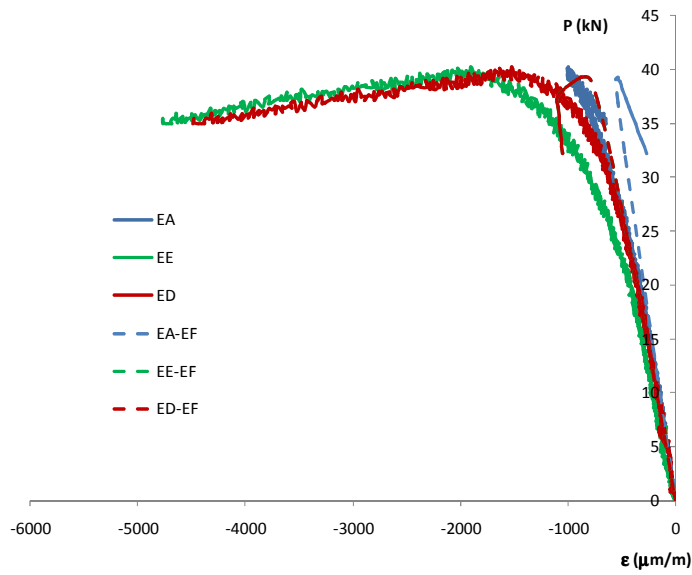
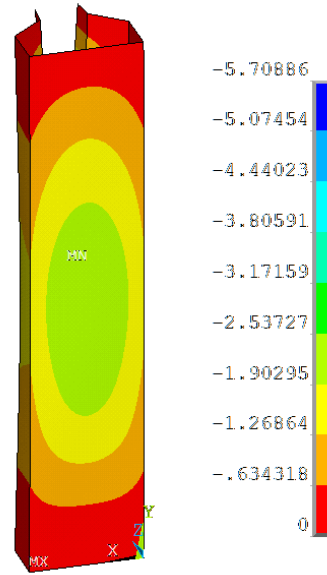
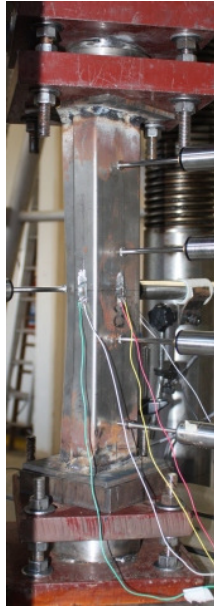
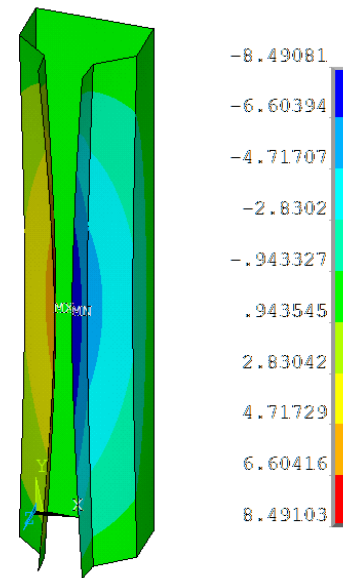
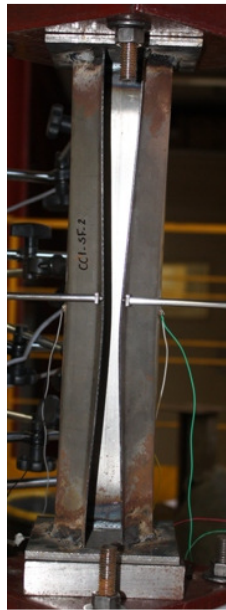


Fig. C.9. Comparação entre as deformações no protótipo e os resultados numéricos.  
Fig.



(a)

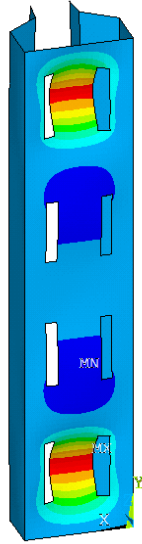


(b)

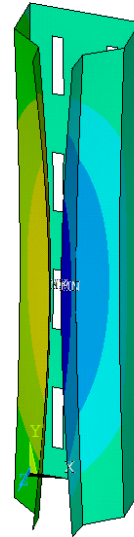
Fig. C.10. Comparação dos deslocamentos experimentais e numéricos.

## C.2. Série CC-F60

### C.2.1. Protótipo CC-F60-2



Modo 1  
 $\delta=1$  mm



Modo 5  
 $\delta=-1$  mm

Fig. C.11. Modos utilizados para introduzir a imperfeição inicial e suas amplitudes.

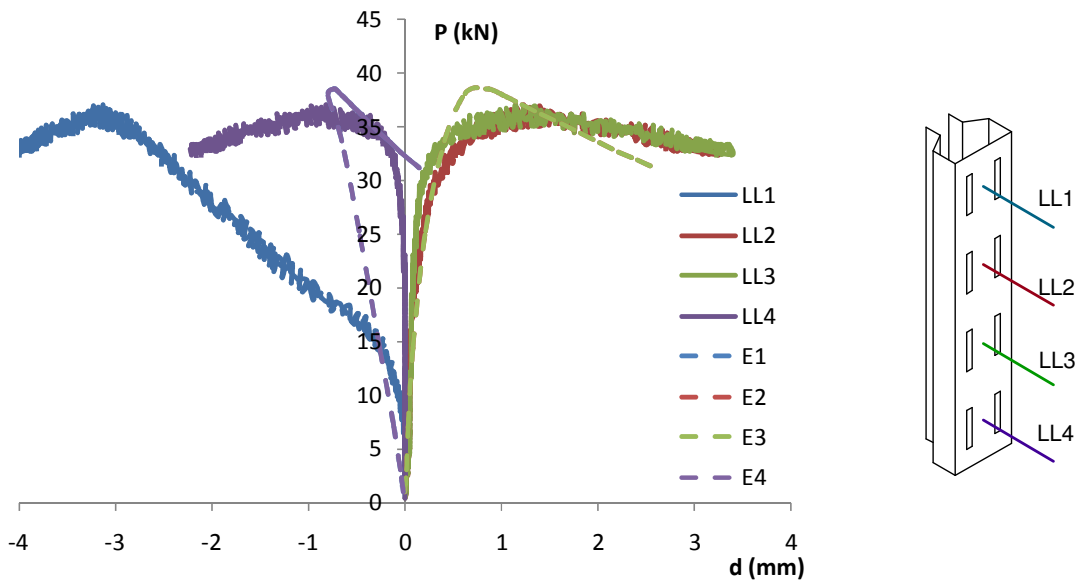


Fig. C.12. Comparação entre os deslocamentos na alma e os resultados numéricos.

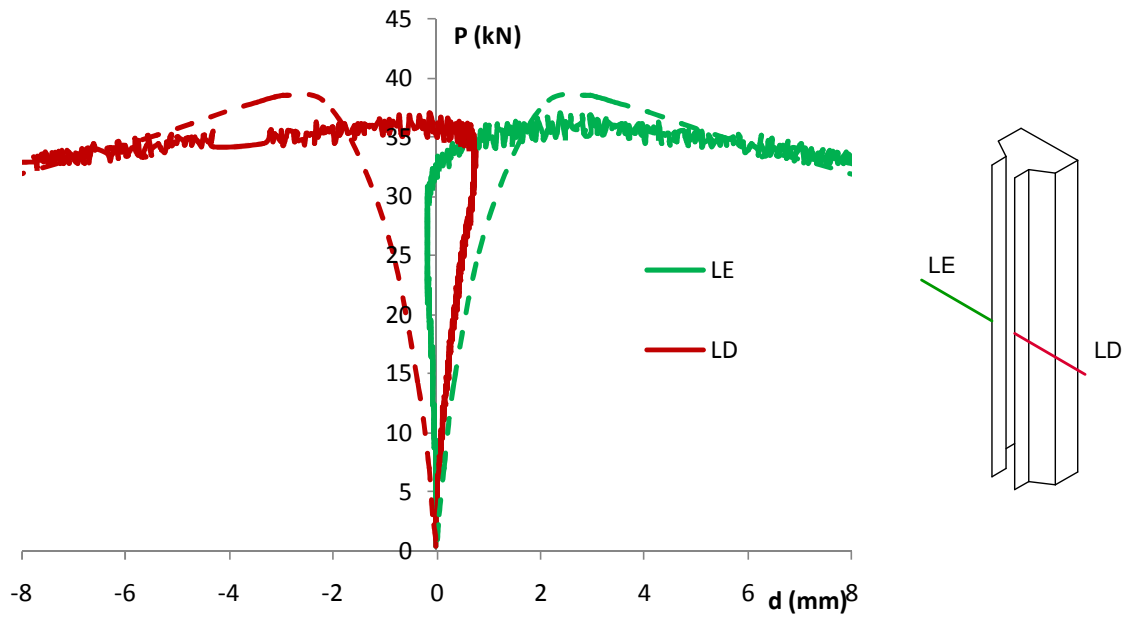


Fig. C.13. Comparação entre os deslocamentos no flange de ligação e os resultados numéricos.

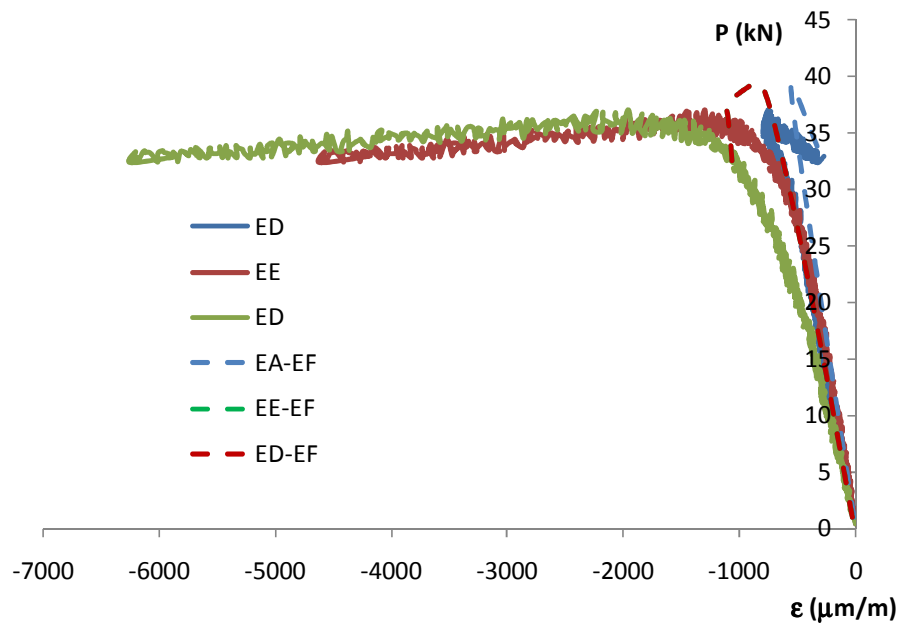
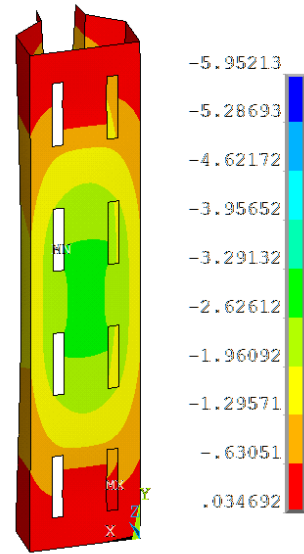
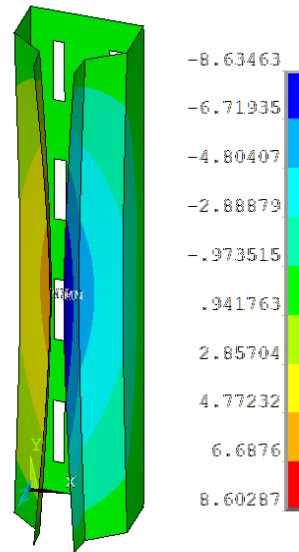
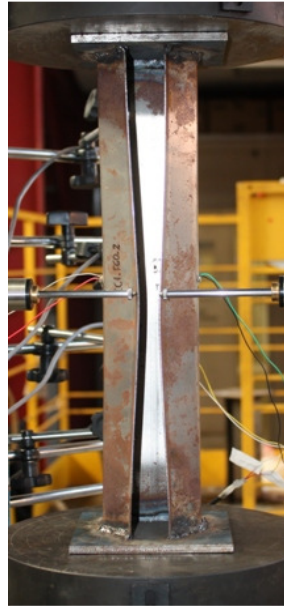


Fig. C.14. Comparação entre as deformações no protótipo e os resultados numéricos.



(a)



(b)

**Fig. C.15. Comparação dos deslocamentos experimentais e numéricos.**



### C.2.2. Protótipo CC-F60-3

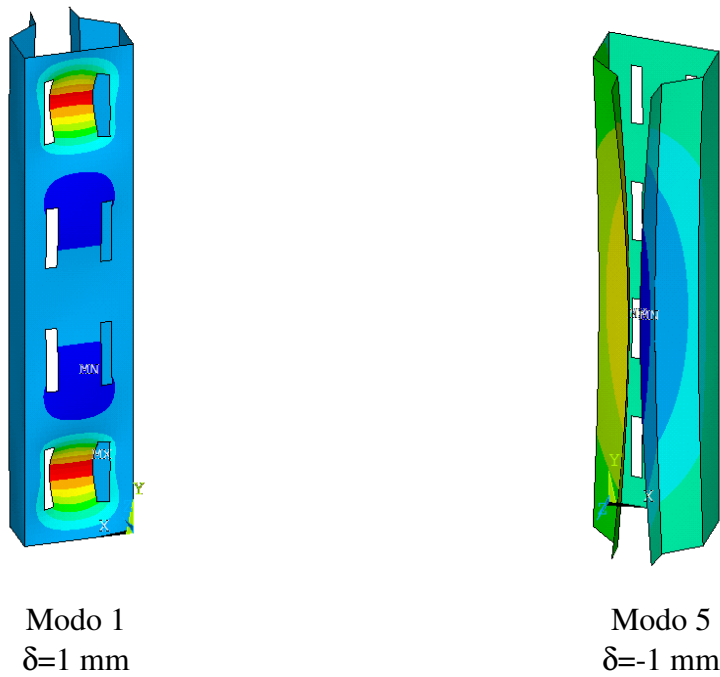


Fig. C.16. Modos utilizados para introduzir a imperfeição inicial e suas amplitudes.

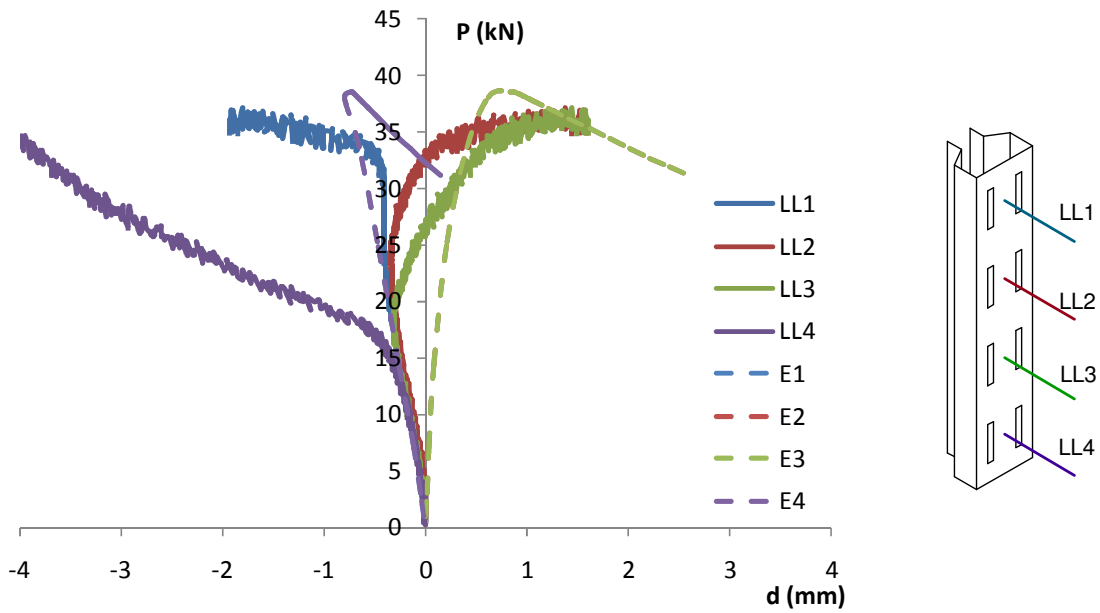


Fig. C.17. Comparação entre os deslocamentos na alma e os resultados numéricos.

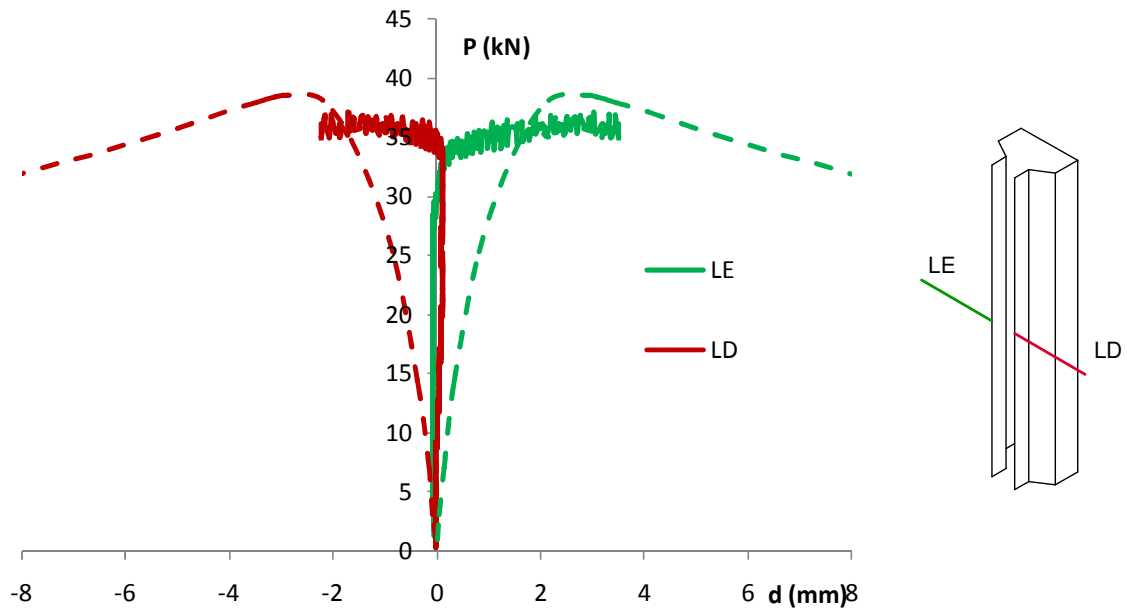


Fig. C.18. Comparação entre os deslocamentos no flange de ligação e os resultados numéricos.

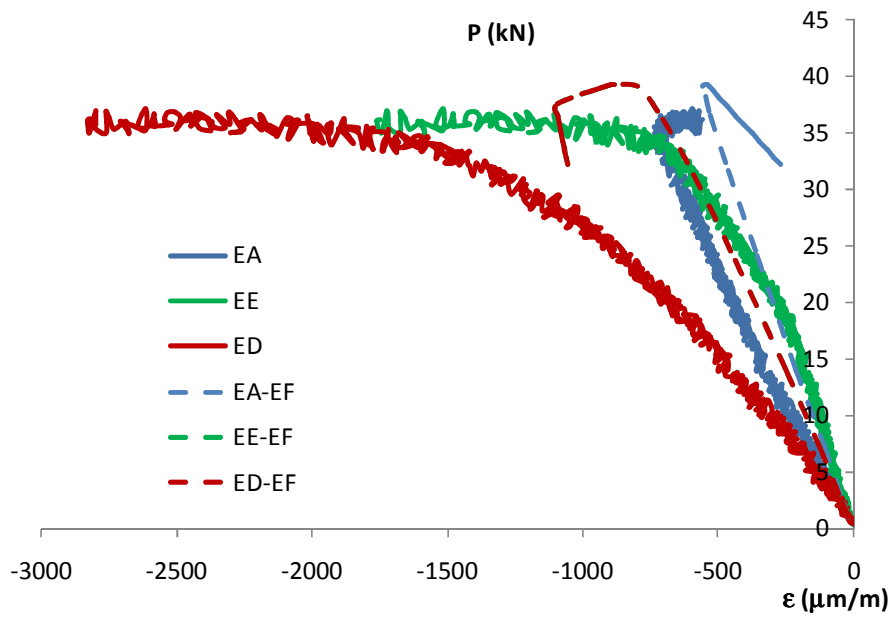
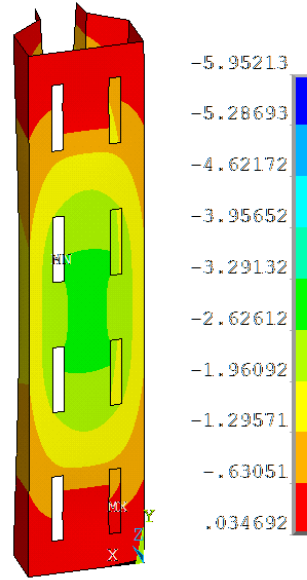
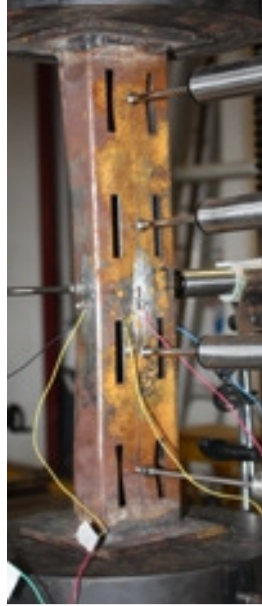
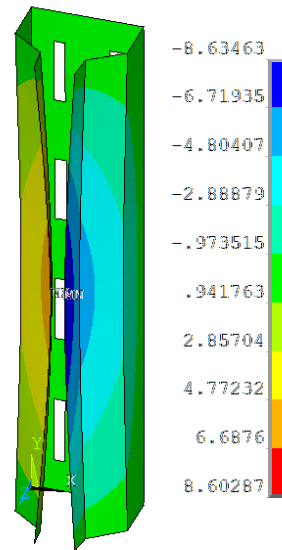


Fig. C.19. Comparação entre as deformações no protótipo e os resultados numéricos.



(a)



(b)

**Fig. C.20. Comparação dos deslocamentos experimentais e numéricos.**

### C.3. Série CC-F80

#### C.3.1. Protótipo CC-F80-2

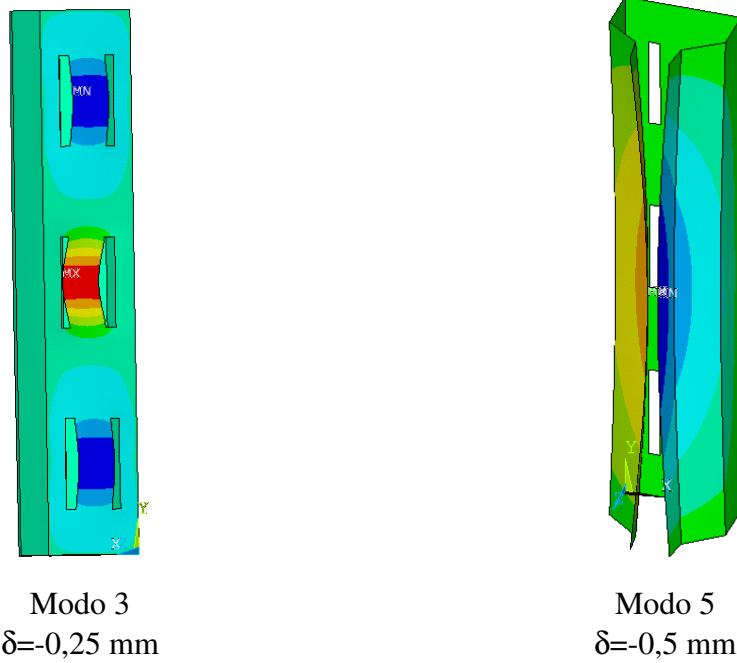


Fig. C.21. Modos utilizados para introduzir a imperfeição inicial e suas amplitudes.

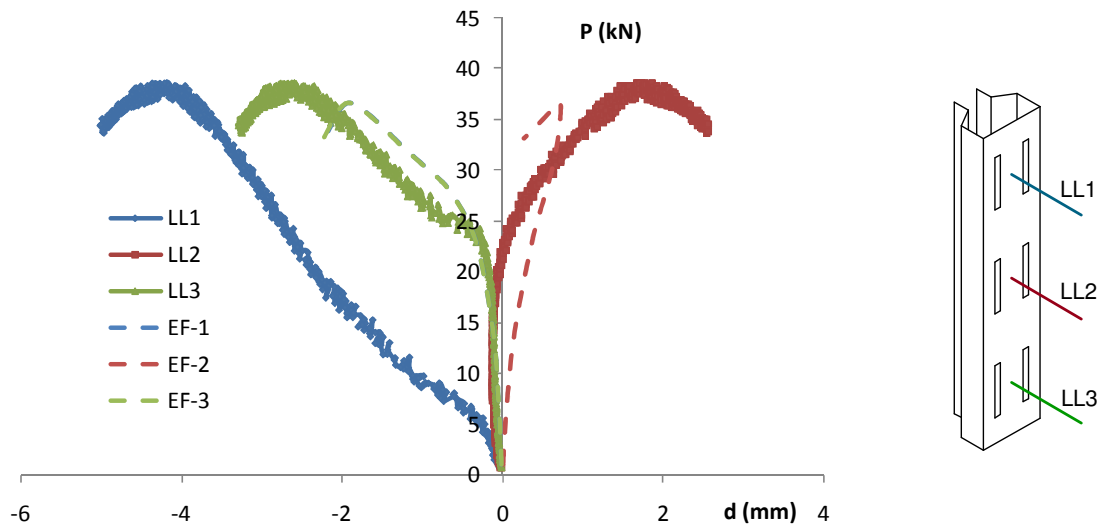


Fig. C.22. Comparação entre os deslocamentos na alma e os resultados numéricos.

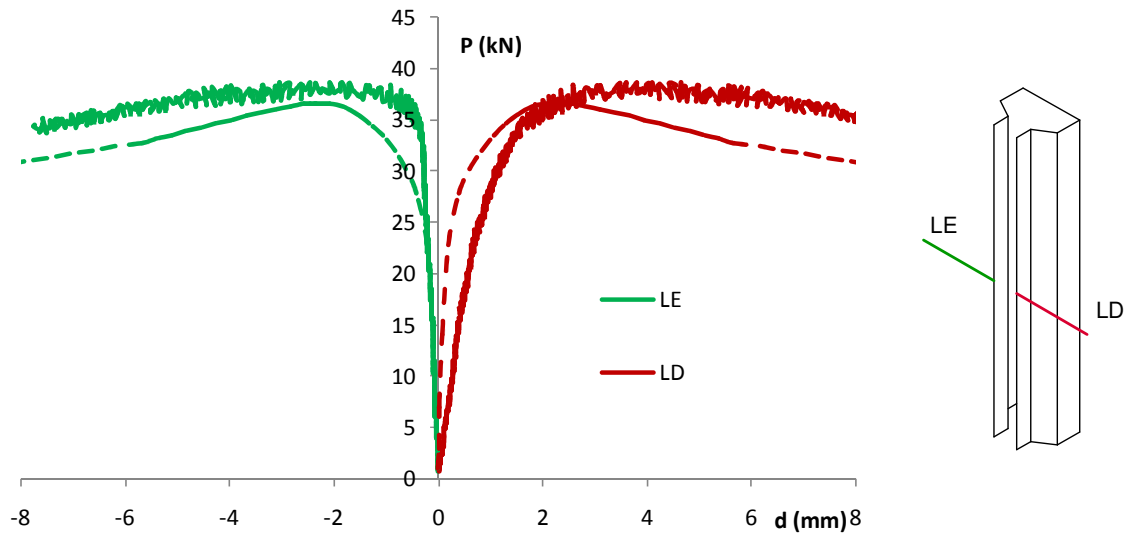


Fig. C.23. Comparação entre os deslocamentos no flange de ligação e os resultados numéricos.

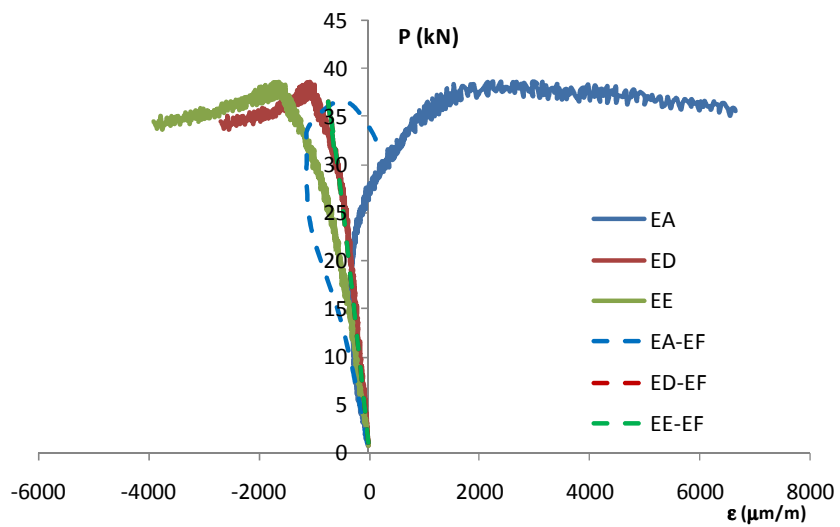
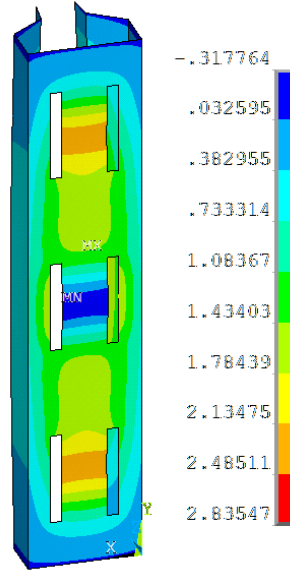
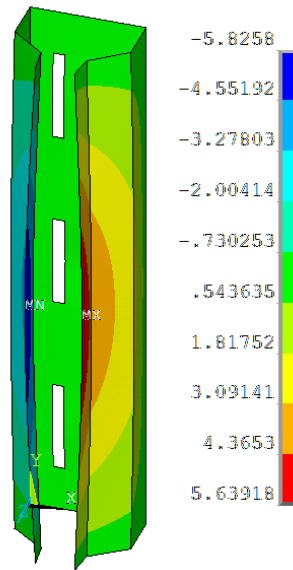


Fig. C.24. Comparação entre as deformações no protótipo e os resultados numéricos.



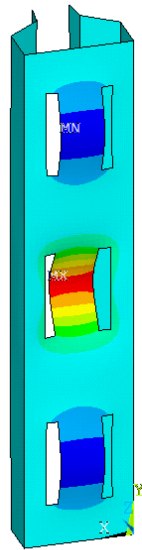
(a)



(b)

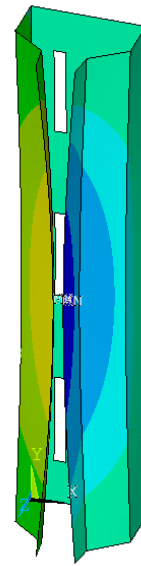
**Fig. C.25. Comparação dos deslocamentos experimentais e numéricos.**

### C.3.2. Protótipo CC-F80-3



Modo 3

$\delta = 0,75 \text{ mm}$



Modo 4

$\delta = 0,5 \text{ mm}$ .

Fig. C.26. Modos utilizados para introduzir a imperfeição inicial e suas amplitudes.

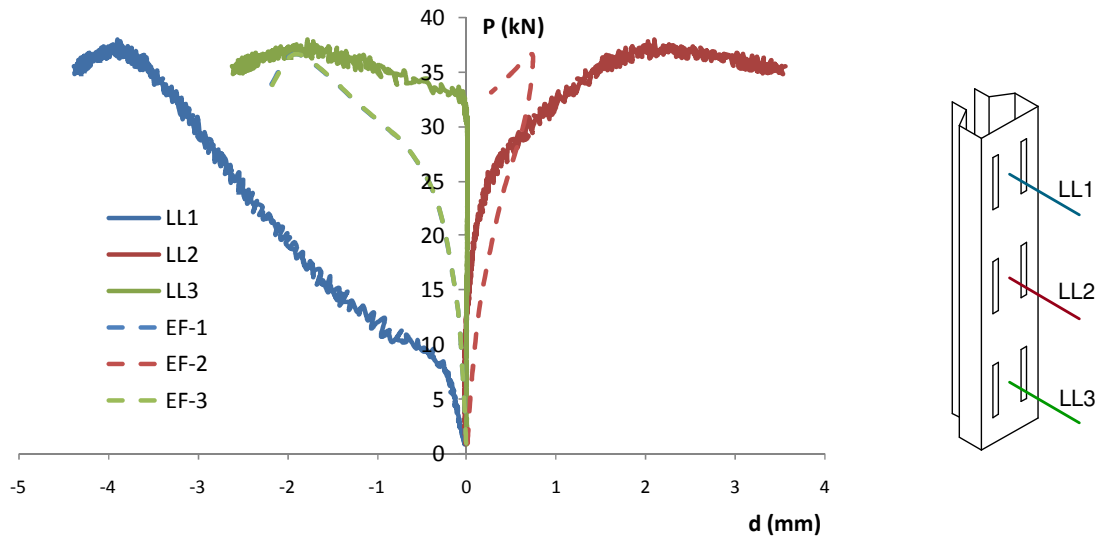


Fig. C.27. Comparação entre os deslocamentos na alma e os resultados numéricos.

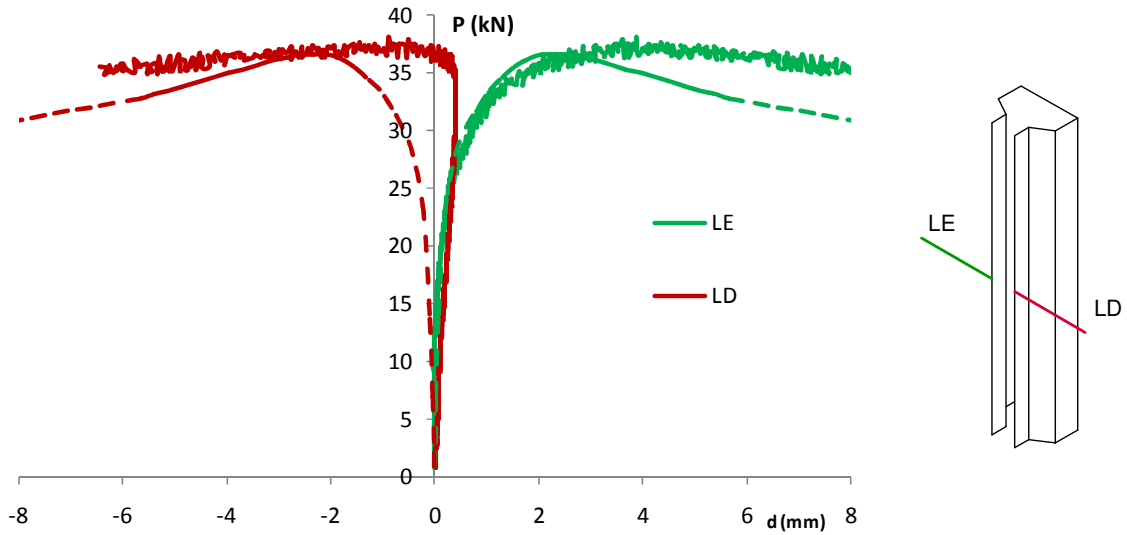


Fig. C.28. Comparação entre os deslocamentos no flange de ligação e os resultados numéricos.

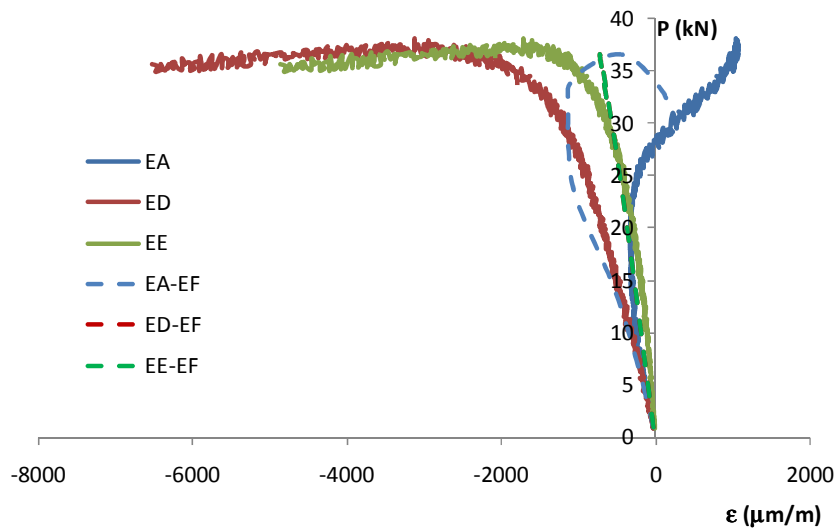
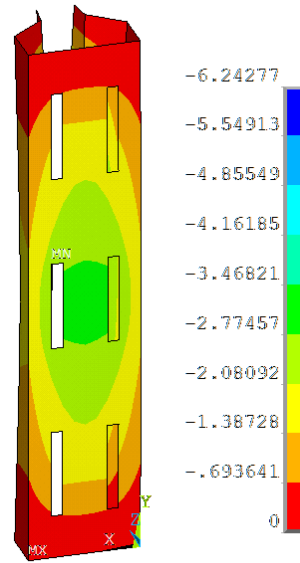
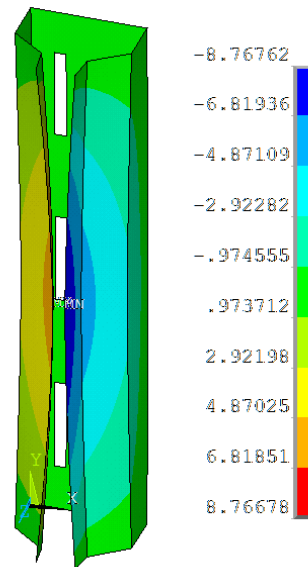
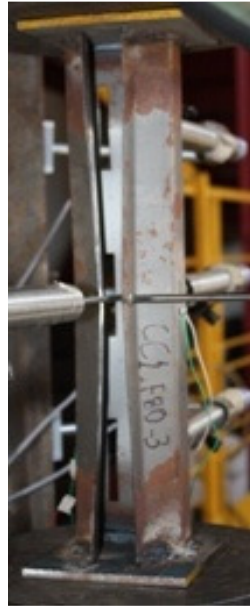


Fig. C.29. Comparação entre as deformações no protótipo e os resultados numéricos.





(a)



(b)

**Fig. C.30. Comparação dos deslocamentos experimentais e numéricos.**

## C.4. Série CM-SF

### C.4.1. Protótipo CM-SF-1



Modo 5  
 $\delta = -0,5 \text{ mm}$

Fig. C.31. Modos utilizados para introduzir a imperfeição inicial e suas amplitudes.

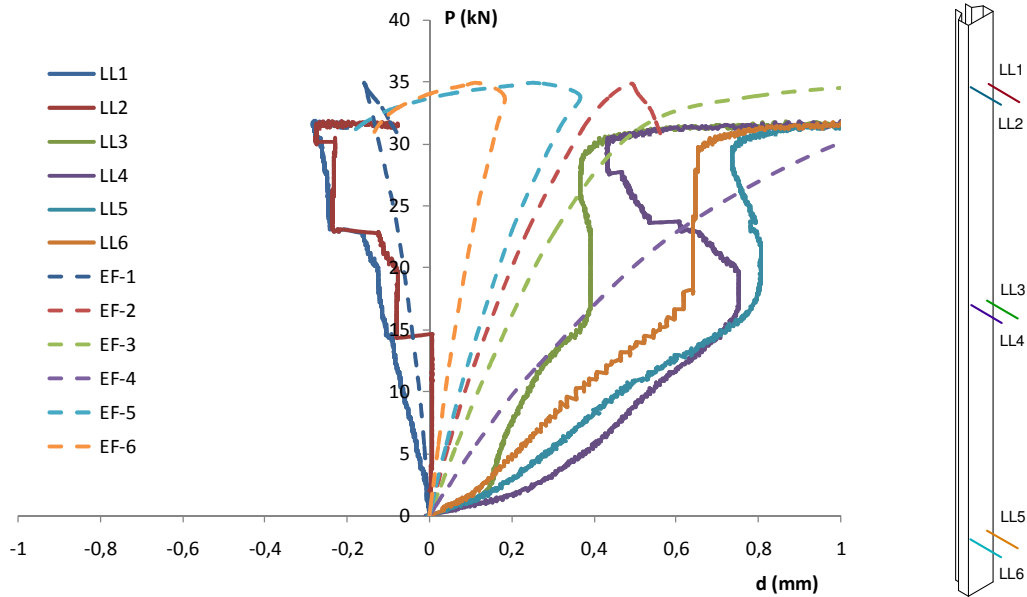


Fig. C.32. Comparação entre os deslocamentos na alma e os resultados numéricos.

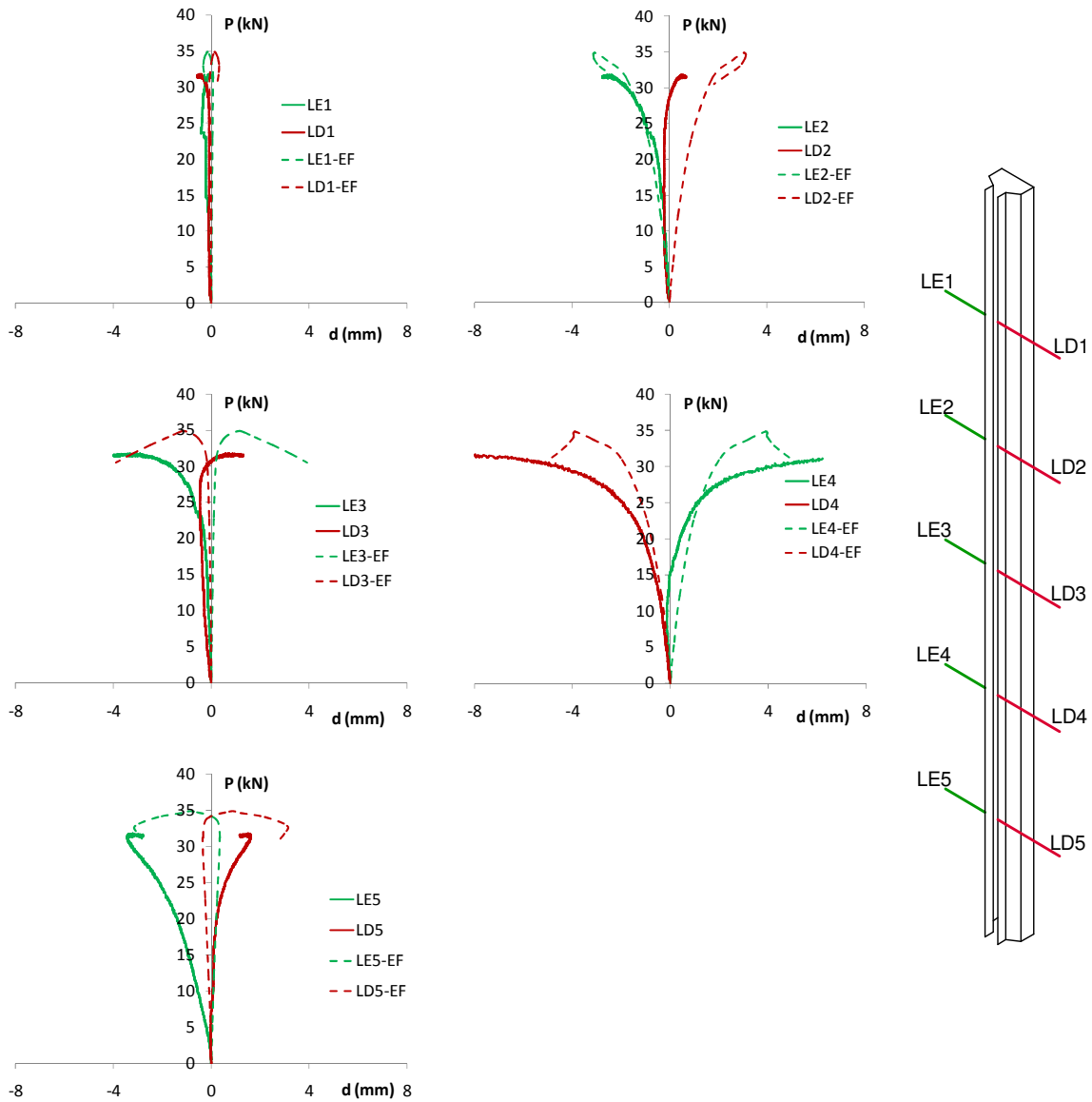


Fig. C.33. Comparação entre os deslocamentos no flange de ligação e os resultados numéricos.

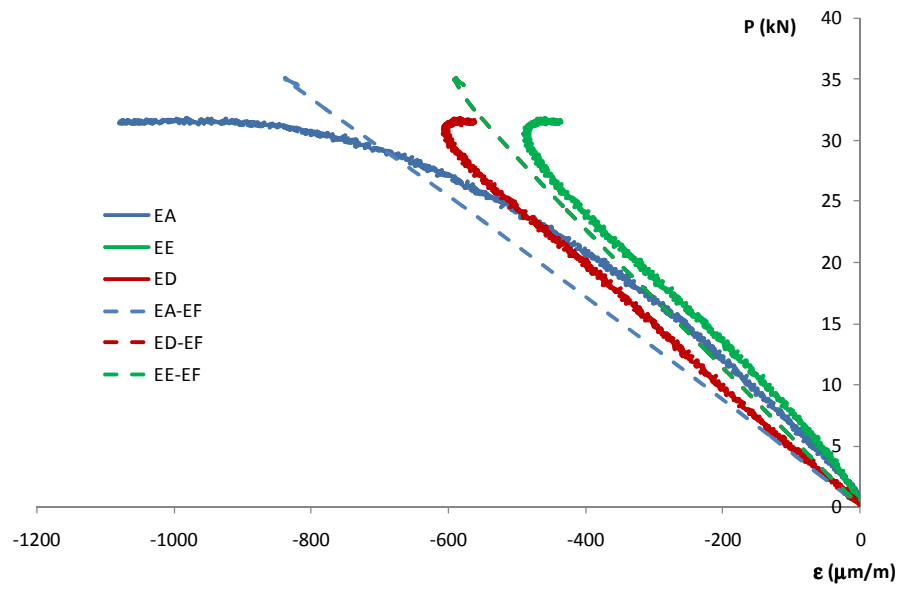
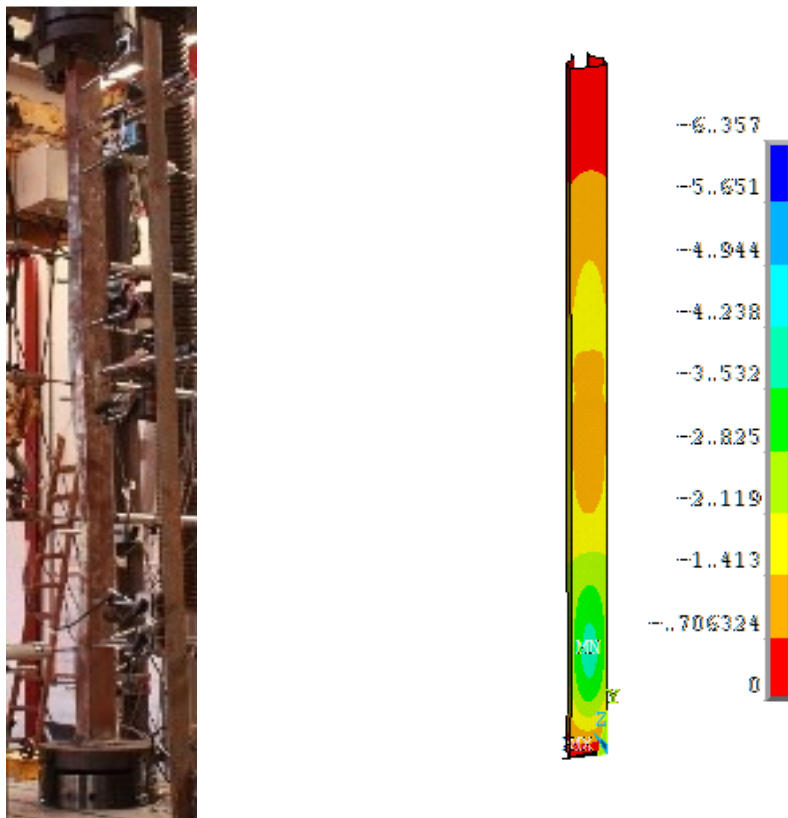
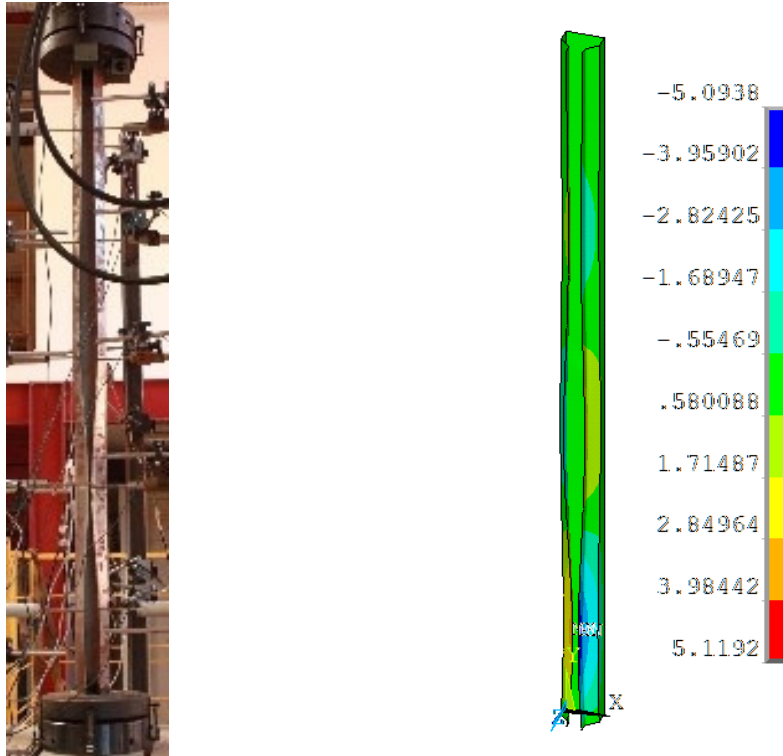


Fig. C.34. Comparação entre as deformações no protótipo e os resultados numéricos.



(a)



(b)

Fig. C.35. . Comparação dos deslocamentos experimentais e numéricos.

### C.4.2. Protótipo CM-SF-3



Fig. C.36. Modos utilizados para introduzir a imperfeição inicial e suas amplitudes.

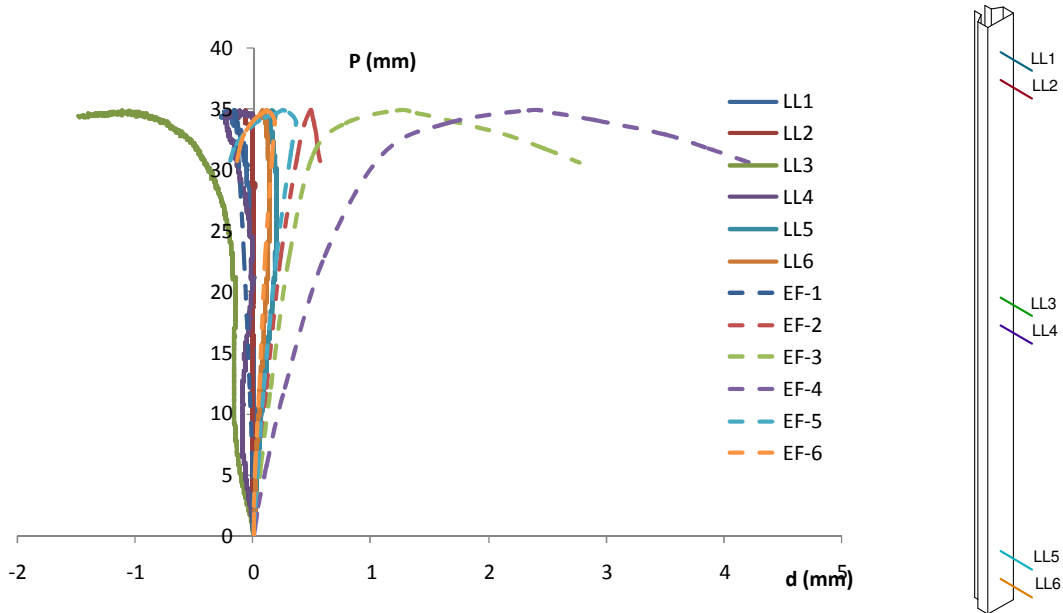
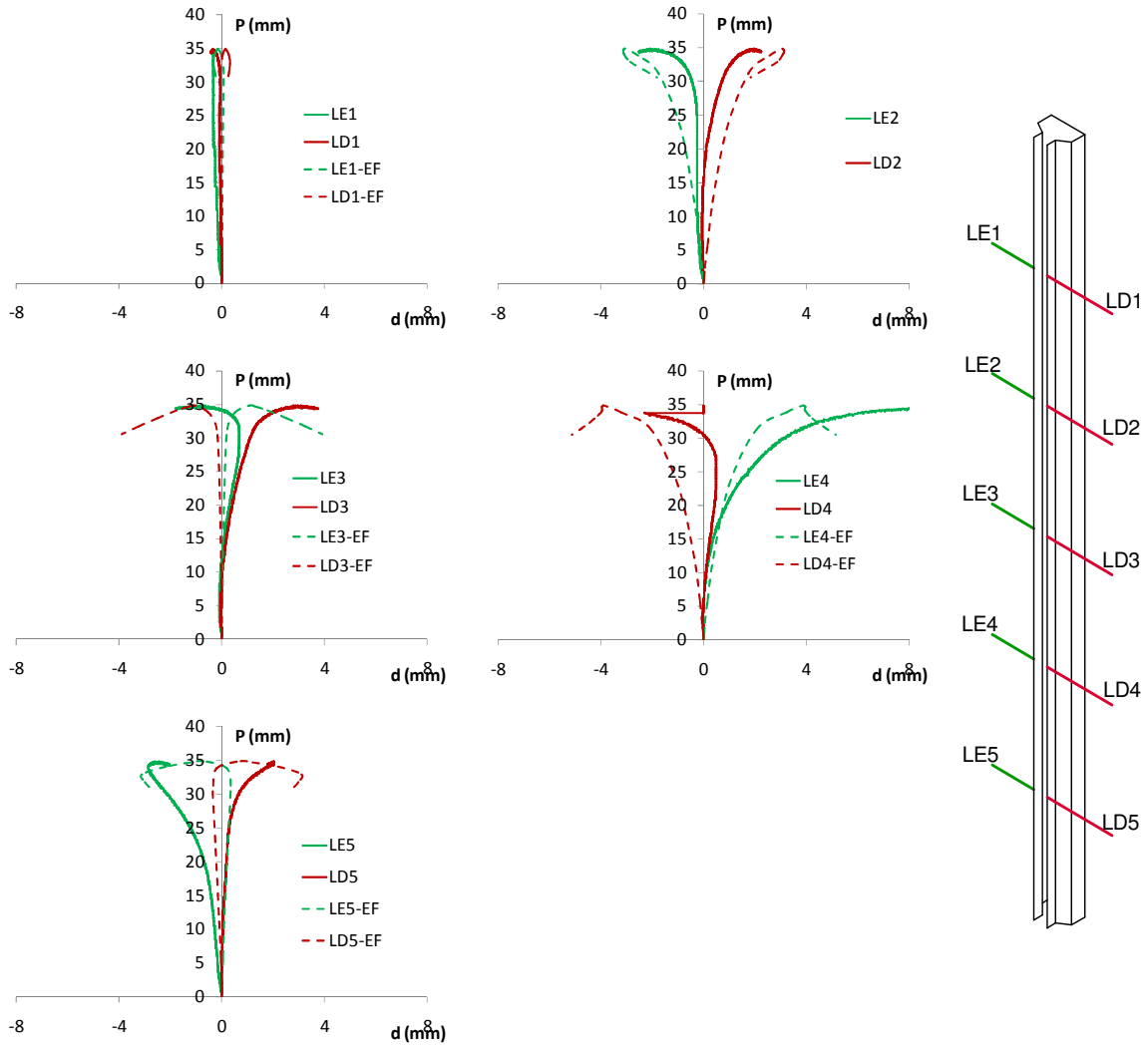


Fig. C.37. Comparação entre os deslocamentos na alma e os resultados numéricos.



**Fig. C.38. Comparação entre os deslocamentos no flange de ligação e os resultados numéricos.**

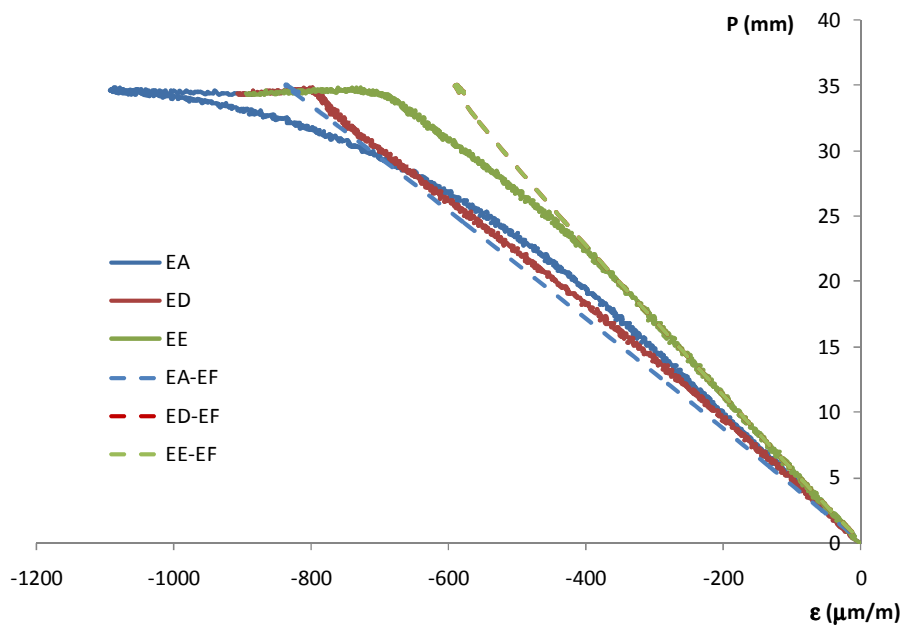
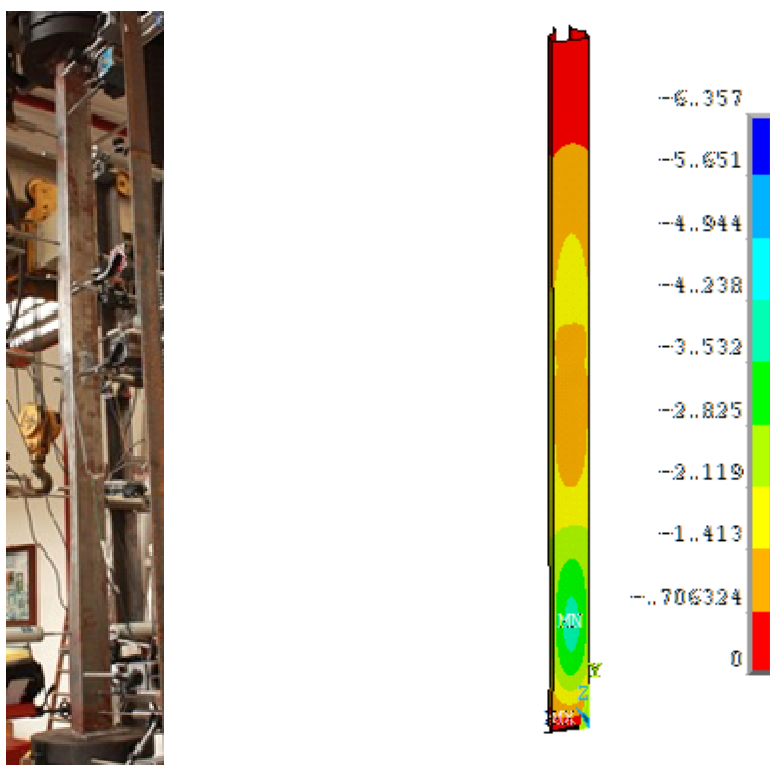


Fig. C.39. Comparação entre as deformações no protótipo e os resultados numéricos.



(a)





(b)

**Fig. C.40. Comparação dos deslocamentos experimentais e numéricos.**

## C.5. Série CM-F60

### C.5.1. Protótipo CM-F60-1

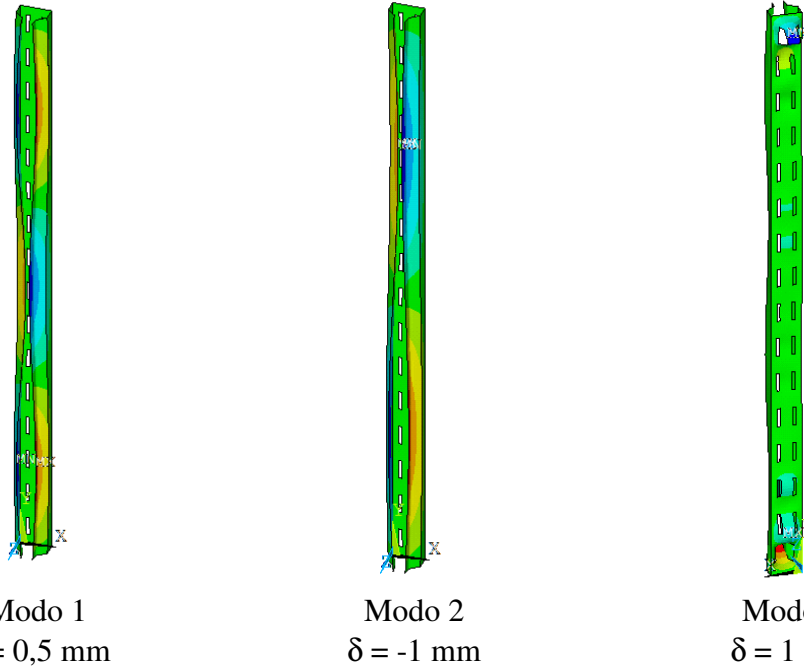


Fig. C.41. Modos utilizados para introduzir a imperfeição inicial e suas amplitudes.

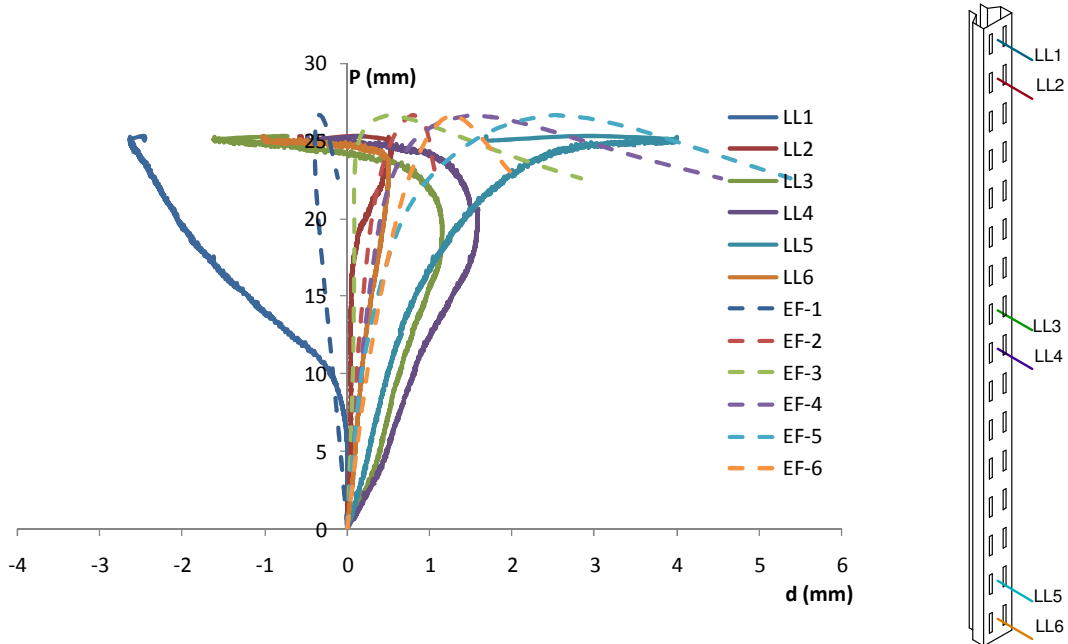
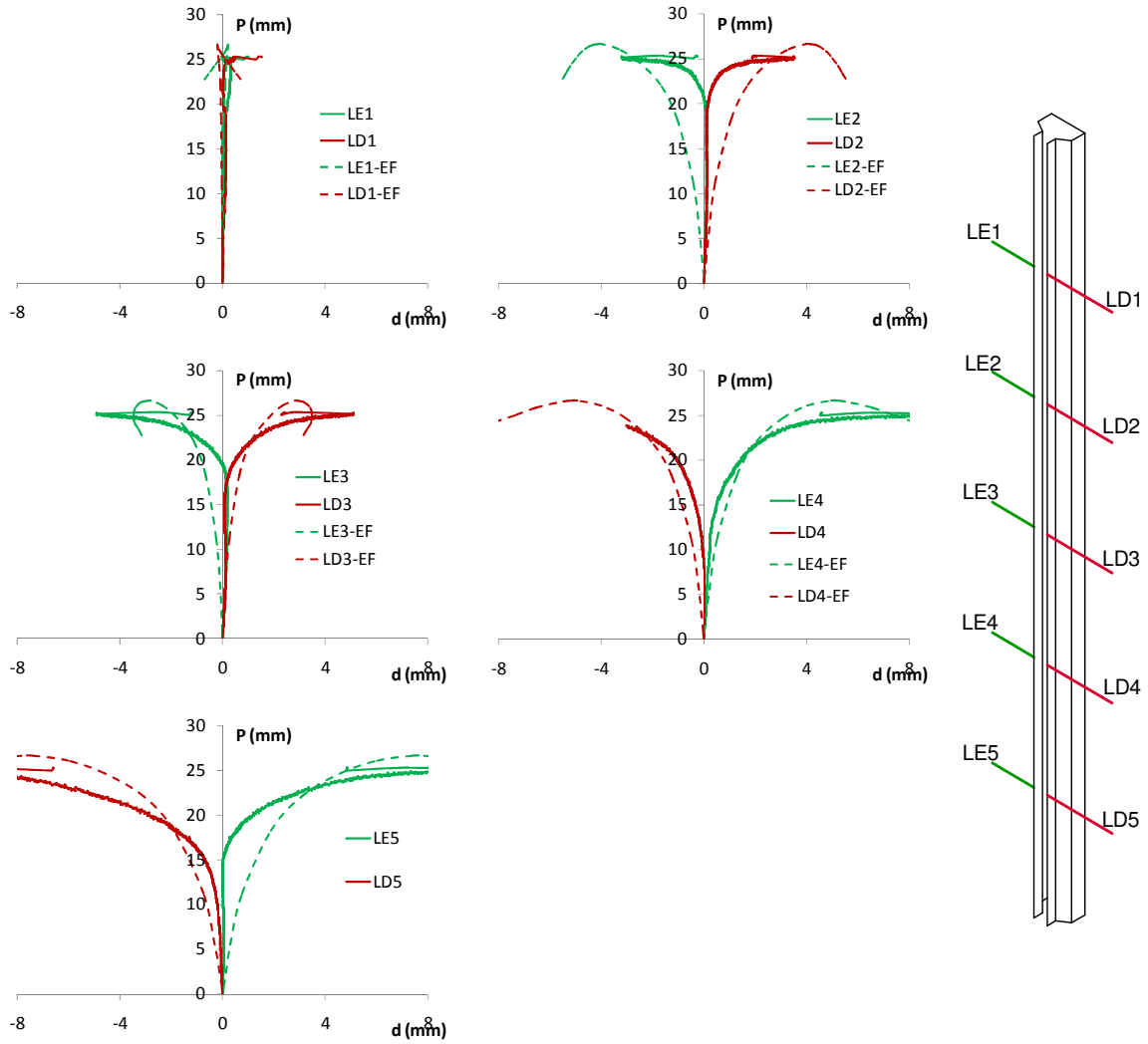


Fig. C.42. Comparação entre os deslocamentos na alma e os resultados numéricos.



**Fig. C.43. Comparação entre os deslocamentos no flange de ligação e os resultados numéricos.**

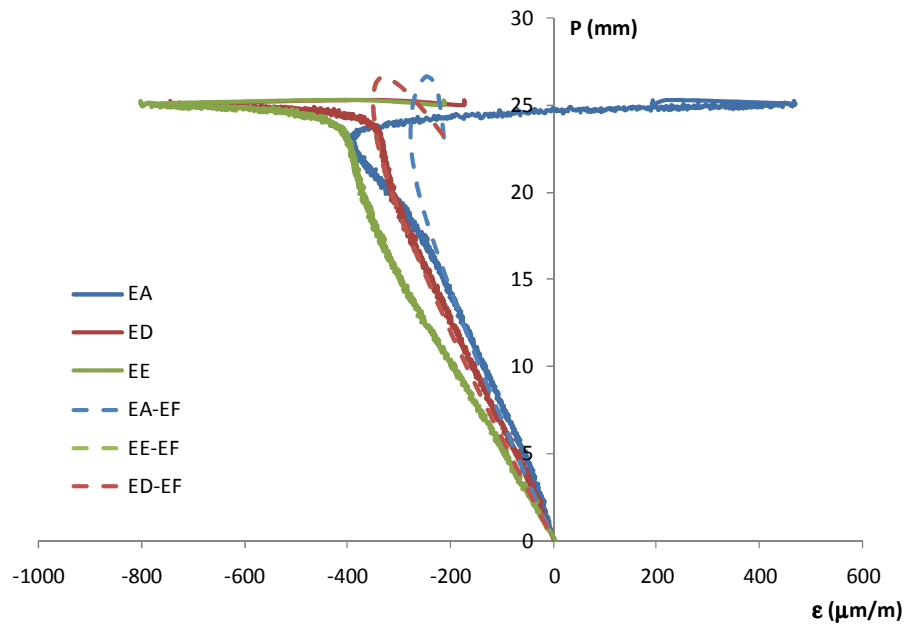
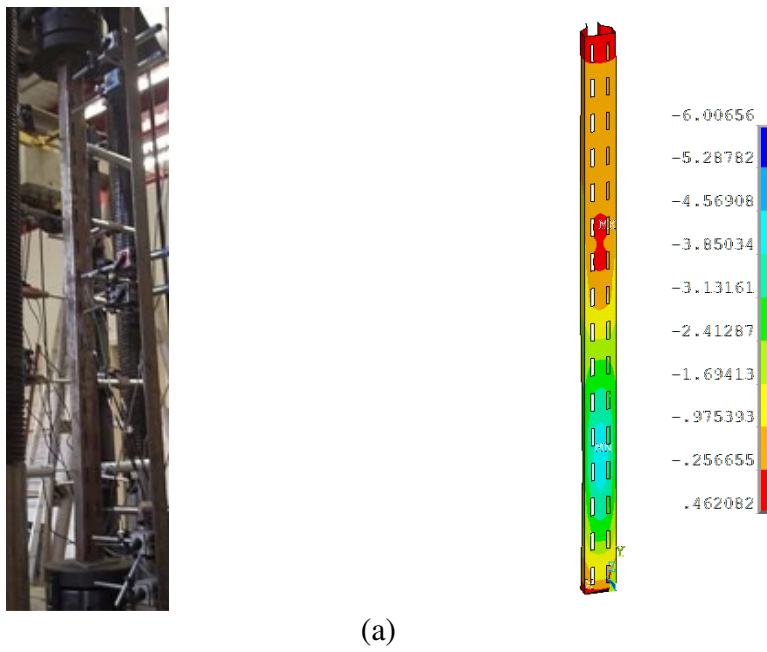
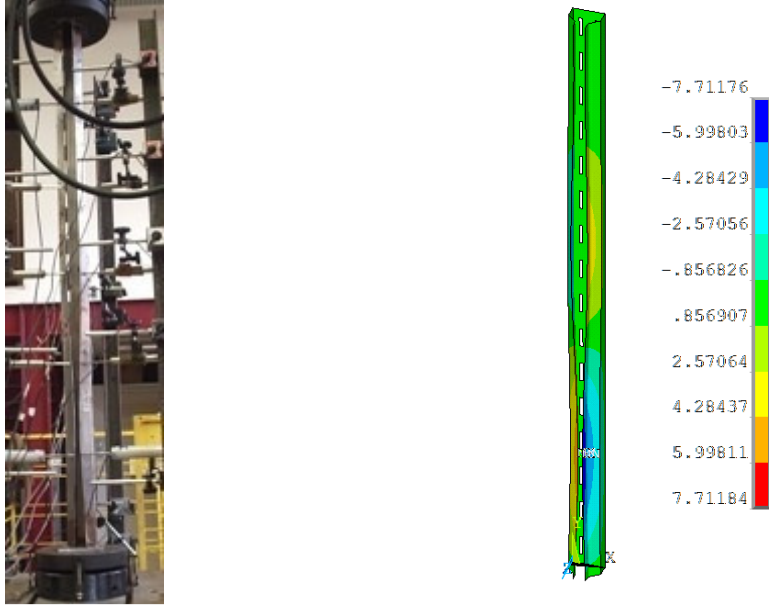


Fig. C.44. Comparação entre as deformações no protótipo e os resultados numéricos.





(b)

**Fig. C.45. Comparação dos deslocamentos experimentais e numéricos.**

## C.6. Série CM-F80

### C.6.1. Protótipo CM-F80-1



Modo 1  
 $\delta = 1 \text{ mm}$

**Fig. C.46. Modos utilizados para introduzir a imperfeição inicial e suas amplitudes.**

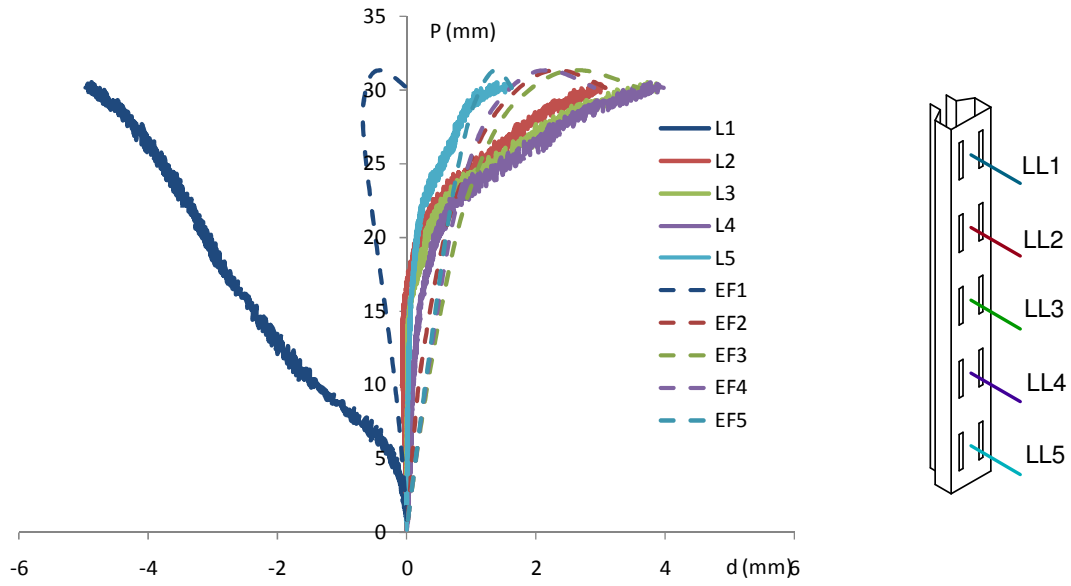


Fig. C.47. Comparação entre os deslocamentos na alma e os resultados numéricos.

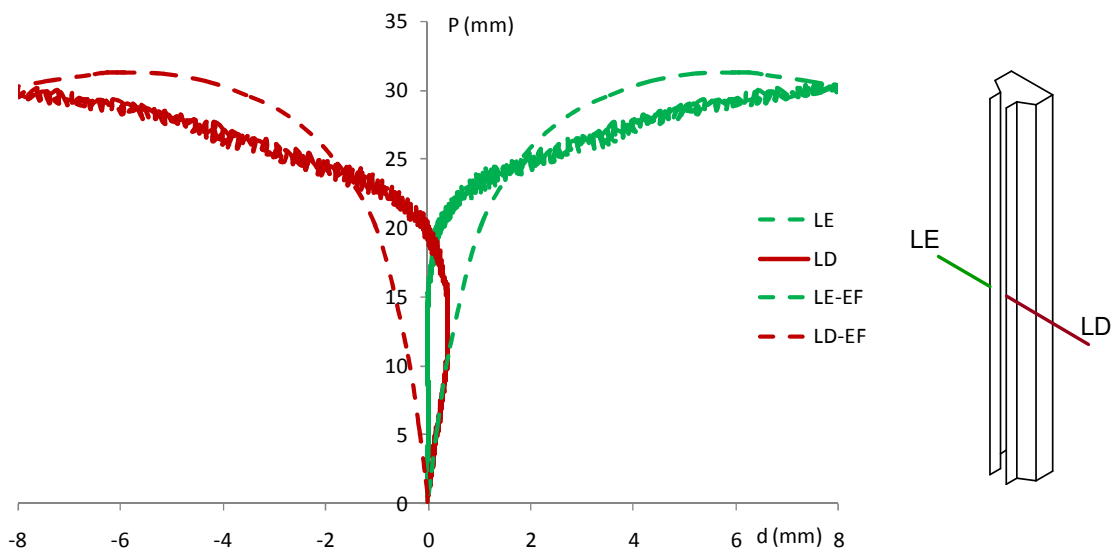


Fig. C.48. Comparação entre os deslocamentos no flange de ligação e os resultados numéricos.

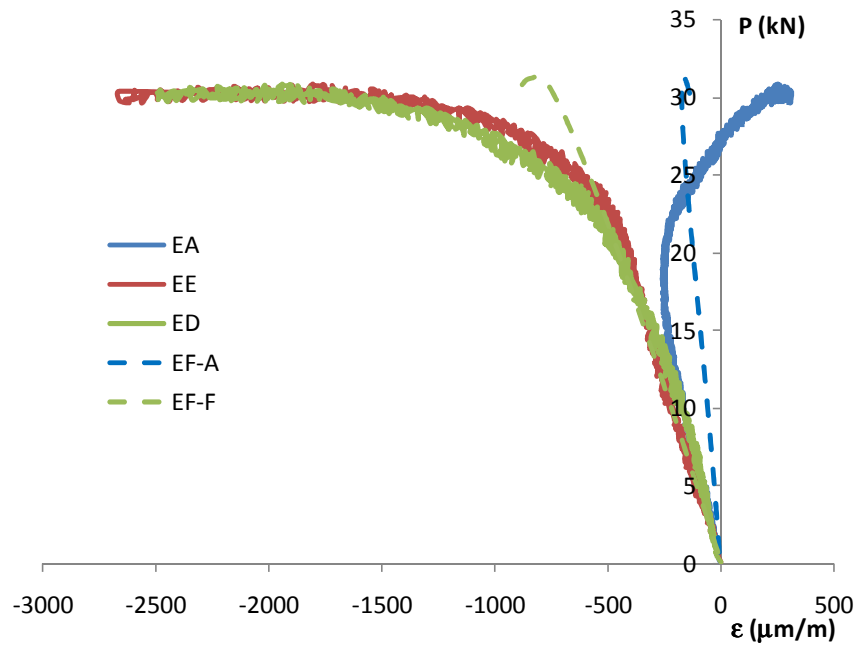
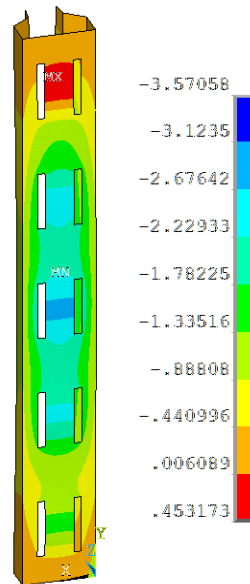
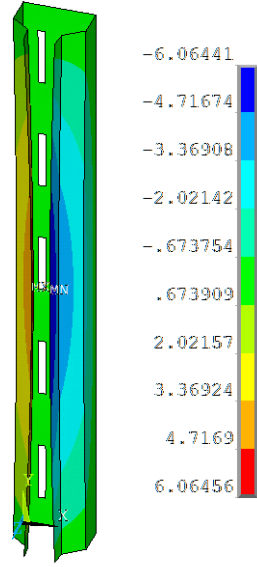


Fig. C.49. Comparação entre as deformações no protótipo e os resultados numéricos.



(a)

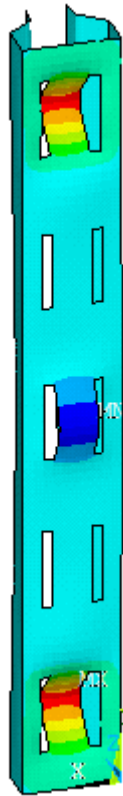




(b)

**Fig. C.50. Comparação dos deslocamentos experimentais e numéricos.**

### C.6.2. Protótipo CM-F80-2



Modo 1  
 $\delta = 0,25 \text{ mm}$

**Fig. C.51. Modos utilizados para introduzir a imperfeição inicial e suas amplitudes.**

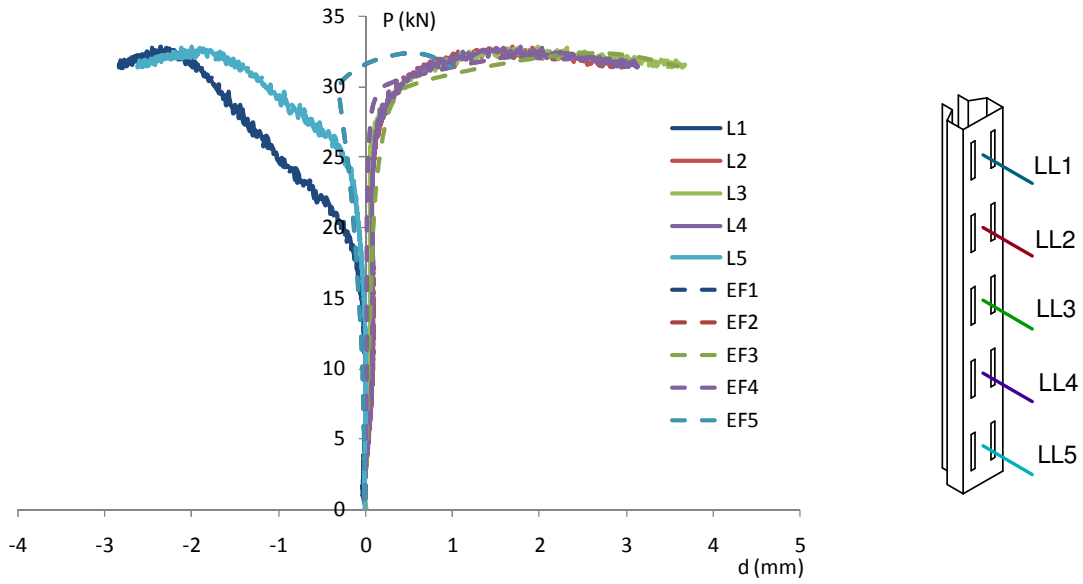


Fig. C.52. Comparação entre os deslocamentos na alma e os resultados numéricos.

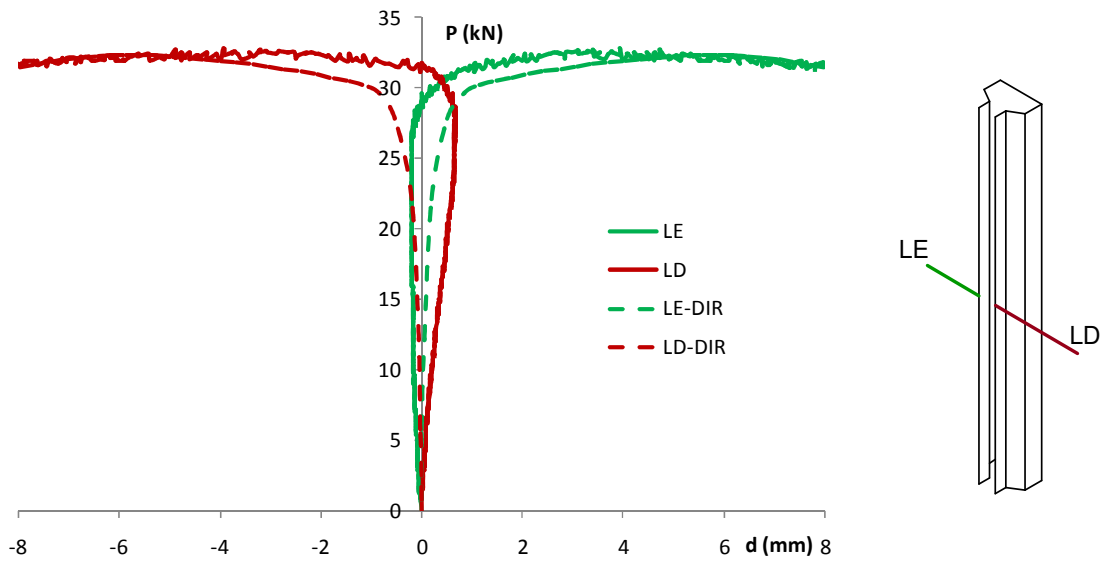


Fig. C.53. Comparação entre os deslocamentos no flange de ligação e os resultados numéricos.

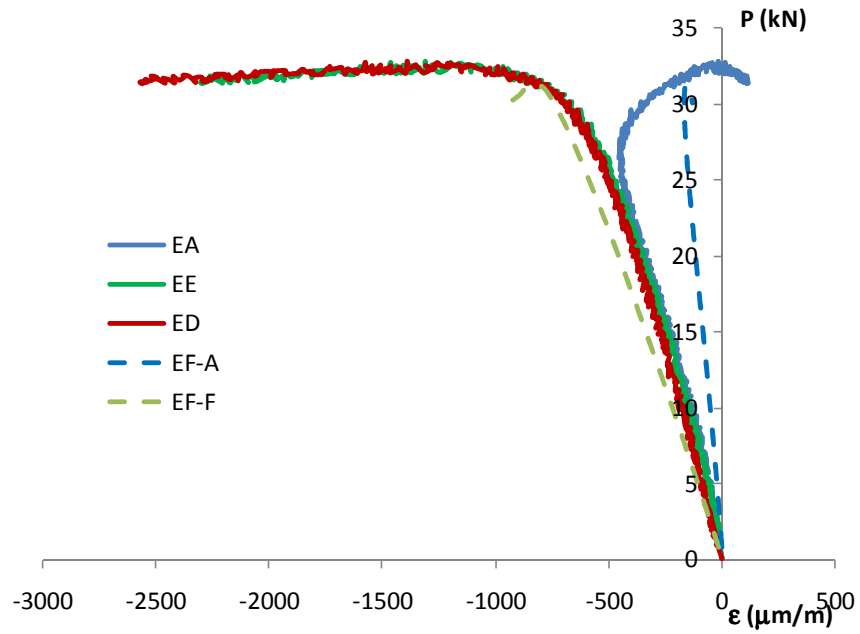
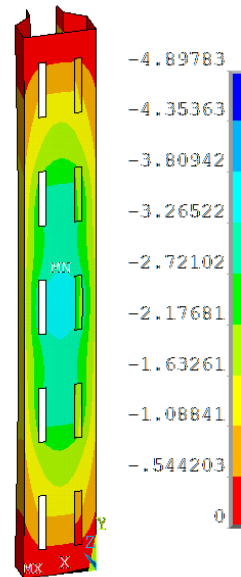
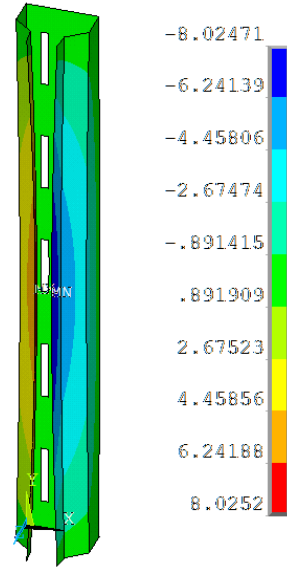


Fig. C.54. Comparação entre as deformações no protótipo e os resultados numéricos.



(a)



(b)

**Fig. C.55. Comparação dos deslocamentos experimentais e numéricos.**