

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

**ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE COLUNAS CURTAS  
PERFURADAS**

**GUILHERME GABRIEL DA SILVA**

ORIENTADORES: Profa. Dra. Arlene Maria Sarmanho Freitas

Prof. Dr. Marcílio Sousa da Rocha Freitas

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

Ouro Preto, Novembro de 2011


S586a	<p data-bbox="456 1182 1284 1265">Silva, Guilherme Gabriel da. Análise teórico-experimental de colunas curtas perfuradas [manuscrito] / Guilherme Gabriel da Silva - 2011.</p> <p data-bbox="496 1301 807 1328">ix, 65f.: il. color.; graf.; tabs.</p> <p data-bbox="491 1364 1107 1420">Orientadora: Profa. Dra. Arlene Maria Sarmanho Freitas Co-orientador: Prof. Dr. Marcílio Sousa da Rocha Freitas</p> <p data-bbox="451 1456 1270 1543">Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.</p> <p data-bbox="496 1547 975 1574">Área de concentração: Construção Metálica.</p> <p data-bbox="456 1610 1284 1697">1. Estruturas metálicas - Perfis formados a frio - Teses. 2. Estabilidade estrutural - Teses. 3. Flambagem local - Teses. I. Universidade Federal de Ouro Preto. II. Título.</p> <p data-bbox="975 1733 1155 1758">CDU: 624.014.2</p>
-------	---

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

# ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE COLUNAS CURTAS PERFURADAS

**AUTOR: GUILHERME GABRIEL DA SILVA**

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 30 de novembro de 2011, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:

  
Prof. Dra. Arlene Maria Sarmanho Freitas (Orientadora / UFOP)

  
Prof. Dr. Marcílio Sousa da Rocha Freitas (Orientador / UFOP)

  
Prof. Dr. Francisco de Assis das Neves (UFOP)

  
Prof. Dr. João Alberto Venegas Requena (UNICAMP)

## **Agradecimentos**

Agradeço a Deus primeiramente por toda saúde, força e determinação em cada dia empregado na realização deste trabalho.

Aos meus pais. À minha mãe, novamente. Mãe, obrigado por todos os dias sempre a me apoiar, por acreditar em todo o meu esforço, por me lembrar que não estou sozinho.

À Juliana por fazer parte de minha vida, pelo seu amor, apoio, e compreensão em todos os momentos em que não pude estar presente.

A todos os meus familiares, tias e tios por todo carinho e atenção.

Aos primos e primas que nunca serão esquecidos, sempre estarão presentes aqui comigo.

À prima Gina, por todo carinho e apoio, muito obrigado por tudo.

Aos meus amigos de Abre Campo, aos amigos Sérgio, Sineval pelo companheirismo durante todo tempo.

Aos professores Arlene e Marcílio.

Ao companheiro Flávio, por toda ajuda e apoio durante a realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Ouro Preto e a todos do Laboratório de Estruturas.

Ao CNPQ pelo apoio e financiamento deste trabalho.

À FAPEMIG.

## Resumo

Os sistemas de armazenagem industrial são amplamente utilizados em depósitos, uma vez que permitem o melhor aproveitamento do espaço e permitem fácil acesso às cargas armazenadas. Os sistemas são constituídos com perfis formados a frio, estando então sujeitos aos fenômenos de instabilidade característicos de seções de paredes esbeltas e deste tipo de estrutura. Além disto, as colunas possuem perfurações ao longo do comprimento que visam a montagem através de ligações encaixadas e/ou parafusadas que influenciam no seu comportamento. Neste trabalho foi realizado um estudo teórico-experimental de colunas curtas perfuradas com carregamento centrado, com uma análise da influencia das perfurações no seu comportamento local. O programa experimental foi realizado para protótipos definidos pelo estudo numérico e ensaiados no Laboratório de Estruturas “Prof. Altamiro Tibiriçá Dias” do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Os resultados experimentais são analisados por modelos numéricos utilizando elementos finitos. A comparação dos resultados numéricos e experimentais indicaram boa correlação em termos de cargas de flambagem e comportamento das colunas.

## **Abstract**

Industrial Storage Racks are used in warehouses, because they improve the space occupation, and let easy access to the products. They are built with cold formed profiles, and presents the instability phenomena like local and distortional modes, common in thin-walled members. The uprights of these structures shows holes to easy the assemblage. This work shows a theoretical-experimental evaluation of stub columns with perforations. The local behavior and the perforation influence are evaluated. The experimental tests were performed at the Prof. Altamiro Tibiriçá Dias Structures Laboratory of the Civil Engineering Department in the School of Mines, at the Universidade Federal de Ouro Preto. The experimental results were compare with numerical models using finite element methods. The experimental data are compared with numerical results, and had good correlation for critical load and columns behavior.

## Sumário

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Perfis Formados a Frio .....	2
1.2	Sistemas de Armazenagem Industrial – Rack .....	3
1.3	Objetivo e Descrição do Trabalho .....	4
1.4	Justificativa .....	5
1.5	Revisão Bibliográfica .....	6
<b>2.</b>	<b>MÉTODOS DE ANÁLISE DE MODOS DE FLAMBAGEM .....</b>	<b>9</b>
2.1	Introdução .....	9
2.2	Métodos de Análise Numérica dos Modos de Flambagem .....	11
2.3	Métodos de Análise Numérica .....	12
<b>3.</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>24</b>
3.1	Introdução .....	24
3.2	Protótipos Ensaiaados .....	24
3.3	Caracterização do Material .....	28
3.4	Instrumentação e Aquisição de Dados .....	29
3.5	Metodologia de Ensaio .....	33
3.6	Apresentação dos Resultados Experimentais .....	34
<b>4.</b>	<b>ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>46</b>
4.1	Introdução .....	46
4.2	Análise da Influência do Enrijecedor Intermediário .....	46
4.3	Análise Não-linear dos Protótipos Ensaiaados .....	50
4.4	Comparação dos Resultados Numéricos e Experimentais .....	50
<b>5.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>59</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>62</b>

## Listas de Figuras

Figura 1.1: Seções em perfis formados a frio utilizadas como colunas: (a) Perfil U enrijecido; (b) Perfil caixa (formado por dois U enrijecidos); (c) Perfil rack ou garrafa.	2
Figura 1.2: Seções em perfis formados a frio utilizadas como colunas: (a) Perfil U enrijecido; (b) Perfil caixa (formado por dois U enrijecidos); (c) Perfil rack ou garrafa.	3
Figura 1.3: Elementos que compõem as seções tipo rack ou garrafa.	4
Figura 2.1: Modos de Flambagem em perfis de aço formados a frio tipo U enrijecido: 1) Modo global por flexão do eixo de maior inércia; 2) Modo global por flexão do eixo de menor inércia; 3) Modo global por torção pura; 4) e 5) Modo distorcional; 6) Modo local de placa.	9
Figura 2.2: Dimensões nominais, em mm, da seção tipo rack.	13
Figura 2.3: Dimensões das seções transversais obtidas: (a) Seção do Modelo 1; (b) Seção do Modelo 2.	14
Figura 2.4: Gráfico carga crítica ( $P_{cr}$ ) versus comprimento da coluna ( $L$ ) – Modelo 1.	14
Figura 2.5: Gráfico carga crítica ( $P_{cr}$ ) versus comprimento da coluna ( $L$ ) – Modelo 1.	15
Figura 2.6: Modo de flambagem local do modelo 1 apresentando 3 meias ondas obtido pela GBT.	15
Figura 2.7: Elemento SHELL 181 – Programa ANSYS (Ansys 2010).	16
Figura 2.8: Malha empregada no modelo no MEF: (a) Malha empregada na alma do perfil rack; (b) Malha empregada nos enrijecedores; (c) Malha empregada no flange; (d) Malha empregada no flange de ligação do perfil rack.	17
Figura 2.9: Condições de contorno e carregamento: (a) Restrição a translações $U_x$ e $U_y$ nos extremos da coluna e $U_z$ no nó central da alma; (b) Acoplamento de todos os graus de liberdade dos nós extremos da coluna; (c) Aplicação da carga de compressão axial.	18
Figura 2.10: Modo de flambagem local desenvolvido: (a) Modelo via GBT; (b) Modelo via MEF.	19
Figura 2.11: Gráfico deslocamento $U_y$ versus comprimento da coluna. Obtenção da senóide e posições dos pontos de máximos, mínimos e inflexões para o modelo sem perfurações via MEF.	20



Figura 2.12: Coluna apresentando perfurações na alma e estas deslocadas da linha central de nós. ....	21
Figura 2.13: Dimensões das perfurações: (a) Modelo com dimensão de perfuração 2x2 elementos; (b) Modelo com dimensão de perfuração 4x4 elementos; (c) Modelo com dimensão de perfuração 6x6 elementos.....	22
Figura 3.1: Dimensões nominais das colunas ensaiadas com a identificação da dobra ou enrijecedor em função do processo de fabricação. ....	26
Figura 3.2: Equipamento utilizado para o levantamento das dimensões reais da seção. 26	
Figura 3.3: Chapas soldadas nas extremidades. ....	27
Figura 3.4: Posicionamento dos LVDT's utilizados nos ensaios. ....	30
Figura 3.5: Posicionamento dos extensômetros elétricos: (a) perfis sem furos; (b) perfis com furos. ....	31
Figura 3.6: Esquema geral de montagem da instrumentação com LVDT's e extensômetros para a coluna sem furos. ....	32
Figura 3.7: Posicionamento centralizado das colunas com a coincidência dos gabaritos. ....	33
Figura 3.8: Medição e respectivas médias dos valores – corpo de prova 2F-1,5-CP1 ((Faria, V. O. (2011)). ....	35
Figura 3.9: Carregamento versus a amplitude dos deslocamentos para o ensaio SF-1,8-CP2. ....	36
Figura 3.10: Evolução da amplitude da meia-onda senoidal medida para o ensaio SF-1,8-CP2. ....	37
Figura 3.11: Carregamento versus a amplitude dos deslocamentos para o ensaio 2F-1,8-CP2. ....	38
Figura 3.12: Evolução da amplitude da meia-onda senoidal medida para o ensaio 2F-1,8-CP2. ....	38
Figura 3.13: Valores das deformações específicas medidas pelos EER do ensaio 2F-1,8-CP2. ....	39
Figura 3.14: Carregamento versus a amplitude dos deslocamentos para o ensaio SF-1,5-CP2. ....	40
Figura 3.15: Evolução da amplitude da meia-onda senoidal medida para o ensaio SF-1,5-CP2. ....	40

Figura 3.16: Carregamento versus a amplitude dos deslocamentos para o ensaio 2F-1,8-CP3. ....	41
Figura 3.17: Evolução da amplitude da meia-onda senoidal medida para o ensaio 2F-1,5-CP3. ....	42
Figura 3.18: Fotos dos protótipos da série SF-1,8 após realização dos ensaios. ....	43
Figura 3.19: Fotos dos protótipos da série 2F-1,8 após realização dos ensaios. ....	44
Figura 3.20: Fotos dos protótipos da série 2F-1,5 após realização dos ensaios. ....	44
Figura 3.21: Fotos dos protótipos da série 2F-1,5 após realização dos ensaios. ....	45
Figura 4.1: Modelo de elementos finitos com o enrijecedor de alma. ....	47
Figura 4.2: Modos de flambagem local para modelos 1: (a) Modelo 1 SF; (b) Modelo 1 2F.....	48
Figura 4.3: Modos de flambagem local para modelos 2: (a) Modelo 2 SF; (b) Modelo 2 2F.....	48
Figura 4.4: Carregamento versus a amplitude dos deslocamentos para comparação entre o resultado numérico e experimental do ensaio SF-1,8-CP2.....	52
Figura 4.5: Evolução da amplitude da meia-onda senoidal medida para comparação entre o resultado numérico e experimental do ensaio SF-1,8-CP2.....	52
Figura 4.6: Carregamento versus a amplitude dos deslocamentos para comparação entre o resultado numérico e experimental do ensaio 2F-1,8-CP2. ....	54
Figura 4.7: Evolução da amplitude da meia-onda senoidal medida para comparação entre o resultado numérico e experimental do ensaio 2F-1,8-CP2. ....	54
Figura 4.8: Valores das deformações específicas obtidas pelo modelo numérico e medidas pelos EER do ensaio 2F-1,8-CP2. ....	55
Figura 4.9: Carregamento versus a amplitude dos deslocamentos para comparação entre o resultado numérico e experimental do ensaio SF-1,5-CP2.....	56
Figura 4.10: Evolução da amplitude da meia-onda senoidal medida para comparação entre o resultado numérico e experimental do ensaio SF-1,5-CP2.....	57
Figura 4.11: Carregamento versus a amplitude dos deslocamentos para comparação entre o resultado numérico e experimental do ensaio 2F-1,5-CP3.....	58
Figura 4.12: Evolução da amplitude da meia-onda senoidal medida para comparação entre o resultado numérico e experimental do ensaio 2F-1,5-CP3.....	58

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Relação do número de elementos utilizados na composição da malha dos modelos no MEF. ....	17
Tabela 2.2: Cargas de flambagem local dos modelos – Modelo GBT e Modelo MEF. 19	
Tabela 2.3: Nomenclatura e descrição para os modelos 1 e 2 via MEF.....	22
Tabela 2.4: Resultados das cargas críticas, cargas de escoamento e modo obtido para os Modelos 1. ....	23
Tabela 2.5: Resultados das cargas críticas, cargas de escoamento e modo obtido para os Modelos 2. ....	23
Tabela 3.1: Protótipos ensaiados.....	25
Tabela 3.2: Identificação dos protótipos. ....	27
Tabela 3.3: Característica Mecânica do aço utilizado. ....	28
Tabela 3.4: Resultados experimentais das cargas críticas obtidas para os Modelos 1. .	42
Tabela 3.5: Resultados experimentais das cargas críticas obtidas para os Modelos 2. .	43
Tabela 4.1: Resultados de cargas críticas para os modelos com presença do .....	47
Tabela 4.2: Resultados de cargas críticas para os modelos com presença do .....	47

### 1. INTRODUÇÃO

Economia, eficiência e durabilidade aliada à segurança sempre foram princípios para o desenvolvimento de novas soluções e materiais da engenharia estrutural. Uma destas soluções envolve o emprego de perfis de aço de parede esbelta como os perfis formados a frio. As seções transversais são obtidas a partir da conformação a frio de chapas de aço podendo atingir grande variabilidade de seções transversais.

Perfis formados a frio, compostos por chapas finas, estão sujeitos ao desenvolvimento de fenômenos de instabilidade tal como a flambagem local das paredes que compõem sua seção. Para avaliação da resistência e comportamento desta tipologia de perfis são necessários estudos de teorias de placas esbeltas e modos de estabilidade. Métodos experimentais, estudos teóricos e numéricos vêm sendo realizados e tem sido de grande importância para a avaliação do comportamento destes elementos.

Dentre as diversas aplicações estruturais dos perfis formados a frio têm-se os Sistemas de Armazenagem Industrial conhecidos também como *RACKs*. Geralmente, esses sistemas apresentam elementos com elevada esbeltez e imperfeições geométricas devidas à fabricação e montagem. Alguns dos elementos que compõem o sistema apresentam perfurações ao longo de seu comprimento para facilitar o encaixe das ligações. Estas perfurações influenciam significativamente o comportamento dos elementos isoladamente, bem como no comportamento global do sistema. As seções transversais utilizadas nos diversos elementos que compõem os *RACKs* são de

tipologias variadas, como por exemplo, o U enrijecido, caixa e a seção tipo rack ou garrafa, conforme apresentado na figura 1.1.

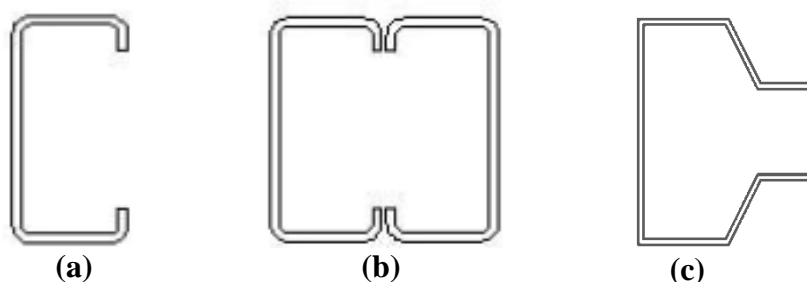


Figura 1.1: Seções em perfis formados a frio utilizadas como colunas: (a) Perfil U enrijecido; (b) Perfil caixa (formado por dois U enrijecidos); (c) Perfil rack ou garrafa.

Os sistemas *RACKs* utilizam para avaliação de seus elementos tanto prescrições relativas ao dimensionamento de perfis formados a frio, como no Brasil a norma NBR 14762 (2010), ou normas internacionais como o Eurocode 3 (1992) e AISI (1996). Porém, as considerações particulares, como os furos, carregamentos e etc. são previstos em prescrições adicionais e específicas que foram propostas por associações de fabricantes destes sistemas. Entre estas prescrições destacam-se a americana (RMI (1997)) e europeia (FEM (1996)).

Neste capítulo apresenta-se uma breve descrição sobre os perfis formados a frio, sistemas de armazenagem industrial e os estudos realizados na revisão bibliográfica aplicada no desenvolvimento do trabalho. Apresentam-se ainda o objetivo e a justificativa do presente estudo.

## 1.1 Perfis Formados a Frio

São denominados perfis de aço formados a frio elementos estruturais obtidos a partir de processos de conformação à temperatura ambiente, por dobramento, em uma prensa dobradeira, ou por perfilagem, tratando-se de conformação em mesa de roletes. Desta forma, são geralmente utilizadas chapas finas de aço para a sua produção, com espessura de até 8 mm (NBR 14762:10 (2010)). Isto leva a perfis com relações largura-

espessura dos elementos que compõem a seção transversal maiores do que aquelas encontradas em perfis laminados ou soldados.

Tratando mais especificamente de elementos solicitados à compressão, a elevada esbeltez local traz grande influência no comportamento estrutural do perfil, pois o torna ainda mais susceptível à ocorrência dos modos de instabilidade locais. Ressalta-se que, devido a problemas de instabilidade, é comum que os perfis de paredes finas atinjam sua capacidade resistente mesmo apresentando valores de tensões inferiores à tensão de escoamento do material.

Dentre as seções mais utilizadas em perfis formados a frio submetidos à compressão, destacam-se o U enrijecido, caixa e a seção tipo rack ou garrafa, e estão apresentados na Figura 1.2.

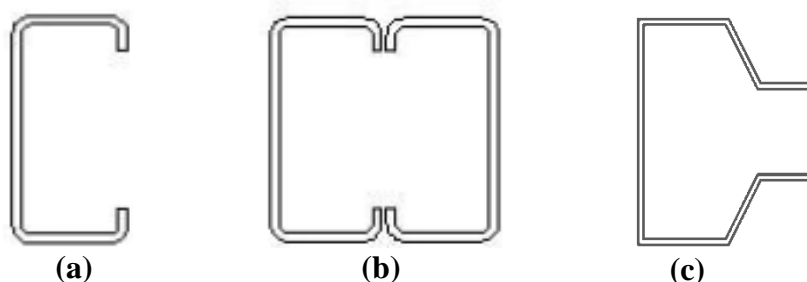


Figura 1.2: Seções em perfis formados a frio utilizadas como colunas: (a) Perfil U enrijecido; (b) Perfil caixa (formado por dois U enrijecidos); (c) Perfil rack ou garrafa.

## 1.2 Sistemas de Armazenagem Industrial – Rack

Os sistemas de armazenagem são amplamente utilizados em estocagem em fábricas, atacadistas, supermercados, etc. O meio onde são armazenados os produtos apresenta uma grande versatilidade, pois há a estocagem de produtos por períodos variados, volumetrias e pesos diversos. O armazenamento tem que ter uma utilização eficiente do espaço e permitir o fácil acesso aos produtos (Godley (1991)).

Assim, há uma diversidade de tamanhos e tipos de sistemas de armazenagem que se adaptam às características dos produtos armazenados. Ao longo dos anos, foi observado

um desenvolvimento significativo destes sistemas em relação aos seus elementos e as ligações entre eles, proporcionando considerável redução dos custos de montagem com a melhoria da eficiência das ligações e ganho de rigidez da estrutura. Isto possibilitou a obtenção de sistemas que podem variar de simples estantes, a sistemas automatizados de mais de 30 metros de altura. Elementos como, por exemplo, a coluna passou por uma evolução significativa sendo criadas seções especificamente utilizadas no emprego destes sistemas. A seção rack (Figura 1.3) é caracterizada por uma seção aberta, apresentando perfurações de configurações diversas ao longo de seu comprimento (facilitando o encaixe das ligações) e possuindo flanges de ligação que permitem a fixação do sistema de contraventamento diretamente no perfil, facilitando e agilizando a montagem nos depósitos.

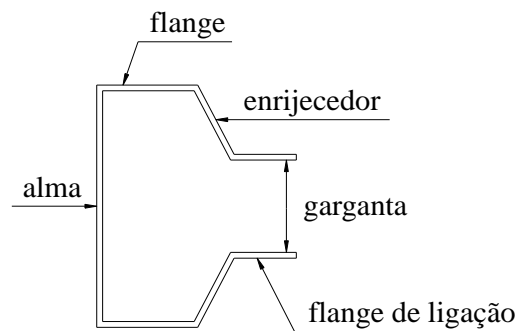


Figura 1.3: Elementos que compõem as seções tipo rack ou garrafa.

### 1.3 Objetivo e Descrição do Trabalho

O objetivo deste trabalho é a avaliação da ocorrência do modo de instabilidade local de placa de colunas curtas em perfis formados a frio de seção rack, considerando a influência de perfurações no comportamento destas seções. Os estudos foram realizados por análises numéricas e experimentais.

A seguir tem-se a descrição da estrutura da dissertação.

No capítulo 2 são apresentados os modos de instabilidade desenvolvidos por perfis formados a frio compostos de chapas finas, destacando-se a flambagem local de placa

que estão presentes na maioria das seções compostas por este perfil. Também são apresentados os métodos numéricos empregados existentes e utilizados para a determinação dos modos de flambagem. Em seguida é apresentado o método numérico utilizado neste trabalho, Método dos Elementos Finitos, seguindo a modelagem e elementos do software comercial ANSYS (ANSYS 11.0 (2011)).

No capítulo 3 é apresentado o programa experimental utilizado no ensaio de compressão centrada de colunas curtas, envolvendo a definição dos protótipos, a verificação de prováveis imperfeições geométricas dos mesmos, a instrumentação e aquisição de dados, a metodologia do ensaio e os resultados obtidos. São apresentados também os valores encontrados para tensão limite de escoamento do aço ( $f_y$ ), tensão limite de resistência à tração ( $f_u$ ) e alongamento residual após a ruptura ( $a$ ), todos obtidos através de ensaios de tração.

No capítulo 4 é descrita a metodologia empregada para calibração dos modelos numéricos compostos por perfis de aço formados a frio de seção tipo rack, com e sem perfurações na parede mais esbelta da coluna. Os resultados obtidos para os modelos numéricos são comparados aos resultados provenientes dos ensaios experimentais realizados. No capítulo 5 têm-se as conclusões do estudo e as sugestões para trabalhos futuros.

#### **1.4 Justificativa**

Um parâmetro importante para a avaliação do comportamento e da resistência de seções em perfis formados a frio é o efeito da flambagem local dos elementos que compõem a seção transversal. Neste sentido as avaliações numérica e experimental tornam-se importantes instrumentos na determinação da carga de flambagem do modo local. Os estudos do modo local de flambagem considerando placas e seções sem perfurações são conhecidos e utilizados em normas de dimensionamento, no entanto, em seções com perfurações há poucos estudos que considerem a magnitude do furo, disposição e forma dos mesmos, bem como a influência destes na resistência dos elementos. Assim, o presente trabalho visa avaliar a influência no modo de flambagem local na seção tipo



rack com e sem a presença de perfurações. As avaliações visam uma contribuição para a consideração dos furos no modo local e conseqüentemente na determinação da resistência dos elementos perfurados.

## 1.5 Revisão Bibliográfica

Nos últimos anos, vêm sendo desenvolvidas pesquisas de caráter experimental, numérico e analítico sobre o comportamento pós-crítico de elementos compostos por perfis formados a frio apresentando como modo de colapso algum modo de instabilidade ou interação entre eles.

A seguir é apresentada uma síntese de alguns dos principais trabalhos desenvolvidos recentemente nesta área por alguns pesquisadores.

**Camotim, Silvestre e Dinis (2007)** relatam os resultados numéricos obtidos por análises elásticas e elastoplásticas sobre o comportamento pós-crítico de colunas de seção U enrijecido, formado a frio, desenvolvendo a interação entre os modos de flambagem local e distorcional. Estes estudos foram realizados utilizando o método dos elementos finitos através do software ABAQUS. Os critérios definidos para a modelagem computacional da coluna consistiram na definição de uma seção transversal que assegurasse o desenvolvimento da interação entre os modos, local e distorcional, apresentando para análises não-lineares a consideração de imperfeições geométricas iniciais, com a inserção da deformada dos modos, baseada em diferentes formas de configurações para amplitudes iguais dos deslocamentos impostos a estas imperfeições. Os resultados numéricos descreveram a trajetória de equilíbrio pós-crítico e a evolução da configuração deformada da coluna, para as análises elásticas e elastoplásticas, apresentando ainda os mecanismos plásticos desenvolvidos.

**Rasmussen, Zandonini e Eccher (2007)** realizaram estudos envolvendo a consideração de perfurações em perfis de paredes finas como os perfis formados a frio, e ainda o caso particular dos perfis racks. Desenvolveram uma ferramenta numérica avançada complementando o Método das Faixas Finitas, originalmente limitado a situações sem

perfurações. Denominado Spline finite strip, o método numérico trata-se de uma técnica de mapeamento isoparamétrico, remodelando as faixas em áreas perfuradas e possibilitando análises de auto-valor lineares e não-lineares (geométrica). Codificado em linguagem Fortran, diversas rotinas foram desenvolvidas e apresentadas. Exemplos analíticos e testes experimentais foram realizados a fim de investigar o efeito de perfurações nos perfis, e utilizados como meio de avaliação e validação do método.

**Schafer e Moen (2008)** apresentaram em publicação recente um estudo, pelo Método da Resistência Direta (Direct Strength Method – DSM), do comportamento de flambagem elástica para a resistência máxima de perfis de aço formados a frio com presença de perfurações. Trata-se do desenvolvimento de método para prever a flambagem elástica de colunas e vigas com perfurações nos elementos que as compõem, utilizando métodos para previsão de flambagem para elementos rígidos ou não, com perfurações. Aproximações utilizando método das faixas finitas através do CUFSM são desenvolvidas e verificadas para os modos de flambagem local e distorcional. Ainda, as equações clássicas de flambagem são usadas para prever o modo de flambagem global de colunas e vigas perfuradas. O estudo é dedicado à complementação do Método da Resistência Direta.

No Brasil, diversos estudos teórico-experimentais têm sido realizados para avaliação dos modos de instabilidade dos perfis de paredes finas, como o modo local, distorcional e global, bem como o acoplamento entre eles (Sarmanho (1991), Vasquez (1998), Souza (2005), Ribeiro (2006), Santos (2010))

**Batista e Sarmanho (1991)** realizaram um estudo teórico-experimental do comportamento pós-crítico de perfis formados a frio e paredes esbeltas submetidos à compressão. Com base nos resultados experimentais, estes são comparados ao estudo teórico baseado no método da largura efetiva, propondo-se uma formulação geral que descreve o comportamento pós-crítico dos perfis estudados, perfil U enrijecido. A formulação é ainda analisada diante a aplicabilidade em estudos numéricos através de um programa de elementos finitos.

**Batista e Vazquez (1998)** apresentaram estudo teórico-experimental sobre a flambagem local, distorcional e global de perfis formados a frio, com ênfase para o modo distorcional. A pesquisa experimental baseou-se em estudo de geometrias variadas da

seção tipo rack, analisando os modos de flambagem local e distorcional, através de ensaios de compressão centrada. Foram verificadas formulações e modelos que possibilitaram considerações como, por exemplo, a dominância do modo distorcional para certas faixas de comprimentos dependendo das características geométricas da seção transversal.

**Souza (2005)** realizou um estudo teórico-experimental do sistema drive-in (sistemas de armazenagem industrial), composto de perfis de aço formados a frio de paredes esbeltas, com uma análise de seu comportamento global e a avaliação da interação entre seus diversos componentes. Os resultados experimentais são confrontados aos resultados numéricos, que consideram parâmetros como a influência da fixação da base e a rigidez das ligações entre a longarina e a coluna e, entre o braço e a coluna.

**Ribeiro (2006)** apresentam análises experimentais realizadas em colunas curtas de seção tipo rack de diferentes espessuras, com e sem furos, avaliando a influência das perfurações na capacidade de carga dos modelos ensaiados. Os resultados para colunas com furos, foram comparados com prescrições do RMI e formulação proposta por Sarawit e Peköz (2003), e para as colunas sem furos, comparações foram realizadas com prescrições da norma americana e norma brasileira (NBR 14762 (2010)). Para esta última, foi proposta uma formulação aplicável às colunas com furos, utilizando método indicado pelo RMI para cálculo da área efetiva.

**Batista e Santos (2010)** analisaram a interação entre os modos de flambagem local, distorcional e global em colunas compostas por perfis formados a frio de seção tipo U enrijecidos. O programa experimental foi realizado com a captação do desenvolvimento do modo de flambagem, para barras sobre compressão centrada, baseada previamente em estudos da estabilidade elástica destas, via método dos elementos finitos (MEF) e teoria generalizada de vigas (GBT). Diante dos resultados, foram verificadas as prescrições de projeto, com base no método da resistência direta e das seções efetivas.

## 2. MÉTODOS DE ANÁLISE DE MODOS DE FLAMBAGEM

### 2.1 Introdução

Os perfis formados a frio são compostos por chapas finas, dobradas, geralmente de seções abertas e podem ser considerados como uma associação de placas esbeltas. Os modos de instabilidade que se desenvolvem neste tipo de perfil são caracterizados como flambagem local, distorcional e global, sendo este de flexão, torção ou flexo-torção (Figura 2.1). Os modos podem ocorrer de forma isolada ou conjunta, o que é chamado acoplamento, e estão condicionados às características geométricas dos perfis e às condições de apoio e carregamento.

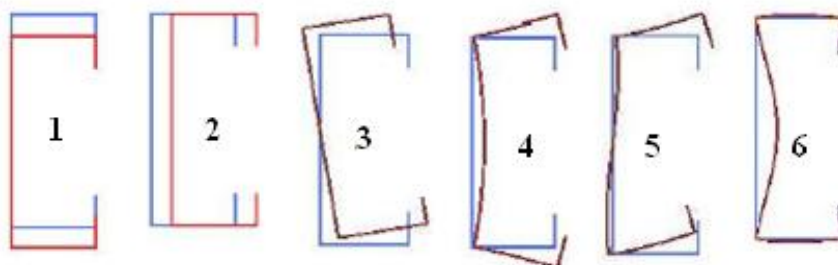


Figura 2.1: Modos de Flambagem em perfis de aço formados a frio tipo U enrijecido: 1) Modo global por flexão do eixo de maior inércia; 2) Modo global por flexão do eixo de menor inércia; 3) Modo global por torção pura; 4) e 5) Modo distorcional; 6) Modo local de placa.

Perfis compostos por chapas que apresentam elevada relação largura ( $b/t$ ) quando submetidos à compressão axial, propiciam o surgimento do modo de flambagem local. O modo de flambagem local é caracterizado pela flexão das placas que compõem a seção transversal de um perfil de paredes esbeltas em que as dobras da seção transversal permanecem retas, os deslocamentos são normais aos planos médios dos elementos do perfil. Geralmente, perfis que desenvolvem este modo de instabilidade, apresentam resistência pós-flambagem, tornando a carga última de colapso maior que a carga crítica de flambagem local devido à redistribuição das tensões originais no plano médio das placas que flambaram.

O modo de flambagem distorcional é comum em perfis com enrijecedores de bordas como, por exemplo, perfis Z enrijecidos, perfis cartola ou perfis rack. A distorção do perfil é caracterizada pela rotação e possível translação do conjunto formado pelo elemento comprimido e seu enrijecedor, alterando a forma inicial da seção. Perfis que desenvolvem este fenômeno apresentam uma menor capacidade de resistência pós-flambagem se comparado com a do modo local de placa.

Por sua vez, no modo de instabilidade global, ocorre deslocamento de translação ou de rotação da seção transversal do perfil. Dependendo das características geométricas da seção transversal, a flambagem global pode ser por flexão, torção ou flexo-torção. No modo global por flexão ocorre deslocamento lateral da seção enquanto na torção ocorre rotação da mesma. Já o modo global por flexo-torção é caracterizado pela interação da flambagem por flexão na direção de menor momento de inércia com a flambagem por torção em torno do centro de cisalhamento.

O objetivo deste trabalho é estudo do modo de instabilidade por flambagem local em perfis formados a frio de seção tipo rack e a influência de furos no elemento mais esbelto da seção (alma). Serão empregadas análises numéricas e experimentais para a avaliação deste modo e a influência de perfurações no modo local de placa.

## 2.2 Métodos de Análise Numérica dos Modos de Flambagem

Dentre várias técnicas de análise estrutural, destaca-se a utilização da modelagem computacional com a aplicação de métodos numéricos. Estes métodos possuem a capacidade de modelar matematicamente estruturas complexas permitindo a solução de problemas cuja resolução analítica é complexa e às vezes inviável.

Neste trabalho a análise numérica é utilizada para a avaliação do comportamento da coluna curta do tipo rack. Este modelo permite o estudo do modo local de placa, e possibilita a avaliação da influência das perfurações na alma do perfil, no seu comportamento e na resistência da seção.

Os métodos numéricos utilizados neste trabalho foram o Método das Faixas Finitas, pelo software CUFSM (Schaffer e Adani (2006)), a Teoria Generalizada de Vigas (GBT), pelo software GBTul (Camotim et al (2008)) e o Método dos Elementos Finitos, pelo software comercial ANSYS (Ansys (2010)).

O Método das Faixas Finitas baseia-se na discretização da seção em faixas, o que lhe confere boa eficiência computacional. Neste trabalho este método foi utilizado na análise preliminar das seções pelo software CUFSM.

A Teoria Generalizada de Vigas, desenvolvida por Schardt (1989) e posteriormente por Silvestre e Camotim (2002) é uma extensão da teoria convencional que considera a distorção da seção transversal após a solicitação, sendo, portanto, adequada a esta análise. O GBTul permite a utilização de extremidades engastadas, porém não contempla a inclusão de perfurações no modelo.

Ambos os programas citados permitem a avaliação dos modos de flambagem e das cargas críticas da seção em um amplo espectro de comprimentos. Seus resultados foram utilizados para a calibração do modelo de elementos finitos.

O Método dos Elementos Finitos (MEF), sendo utilizado neste trabalho o software ANSYS, consiste basicamente na discretização de um meio contínuo em pequenos elementos, mantendo as mesmas propriedades do meio original. Esses elementos usam

funções de interpolação para a formação de um sistema de equações resolvidas numericamente para que sejam obtidos os resultados desejados. A teoria básica envolvida no MEF é bastante conhecida e pode ser encontrada na literatura. Como sugestões têm-se Zienkiewicz (1971), Gallagher (1975), Zienkiewicz e Taylor (1989), Kleiber e Hien (1992) e Bathe (1996). O pacote comercial utilizado neste trabalho é o ANSYS versão 11.0 que é um programa de grande versatilidade, podendo ser aplicado em problemas de análise de estruturas estáticas e dinâmicas, análise de transferência de calor e fluidodinâmica, análise de problemas acústicos e também de eletromagnetismo, além de permitir a construção de diversas geometrias, condições de bordo e introdução das propriedades do material.

## **2.3 Métodos de Análise Numérica**

### **2.3.1 Análise pela GBT**

As seções analisadas nesta etapa do trabalho foram inicialmente escolhidas a partir de parâmetros geométricos e dimensionais possíveis de fabricação por empresa do setor. Assim, adotou-se o perfil representado na Figura 2.2 composto pelos elementos apresentados na Figura 1.2. Outro parâmetro geométrico estabelecido foi a espessura de chapa ( $t$ ), que foram aquelas utilizadas comercialmente no valor nominal de 1,5mm e 1,8mm.

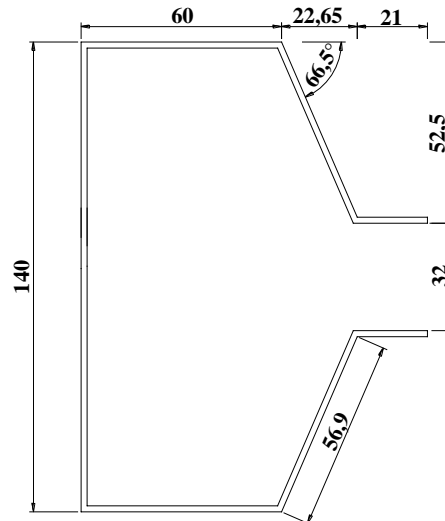


Figura 2.2: Dimensões nominais, em mm, da seção tipo rack.

Visando o estudo do modo de flambagem local da seção da Figura 2.3, foram realizadas análises com variações da esbeltez da alma visando obter uma seção propícia ao desenvolvimento predominante do modo local. A partir dos estudos de diversas seções e seguindo os limites descritos anteriormente quanto à fabricação da seção, duas esbeltezes foram obtidas (utilizando o software GBTul) considerando que o modo de flambagem local ocorra antes da plastificação da seção. Assim obteve-se a relação largura pela espessura igual a 77,77 e 93,33, ou seja, espessuras de chapas de 1,8 mm e 1,5 mm respectivamente e largura da alma igual a 140 mm. As duas configurações denominadas **Modelo 1** e **Modelo 2** escolhidas para os estudos experimentais e numéricos deste trabalho estão ilustradas na Figura 2.3.

Outro parâmetro definido foi o comprimento ( $L$ ) das colunas estudadas, no qual o modo de flambagem local se desenvolvesse. Para obtenção deste valor, os Modelos 1 e 2 foram analisados no software GBTul, considerando as extremidades engastadas visto que esta é bem representada em modelos experimentais. Foram expandidos os dois primeiros modos de flambagem para uma série de comprimentos ( $L$ ) pré-estabelecida, obtendo-se a curva de flambagem apresentada na Figura 2.4 para o primeiro modo de flambagem.



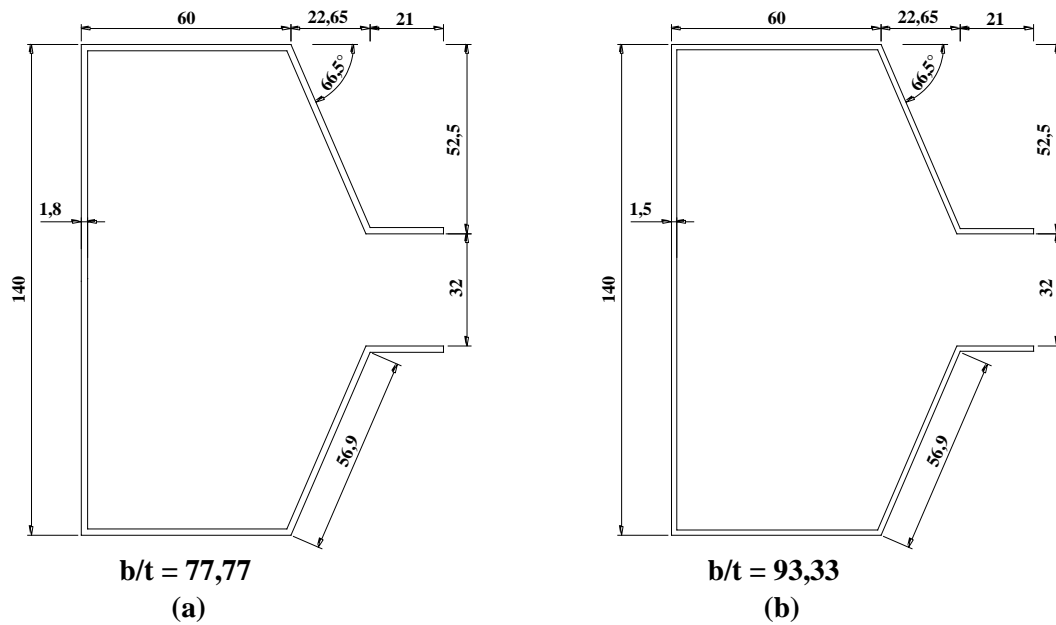


Figura 2.3: Dimensões das seções transversais obtidas: (a) Seção do Modelo 1; (b) Seção do Modelo 2.

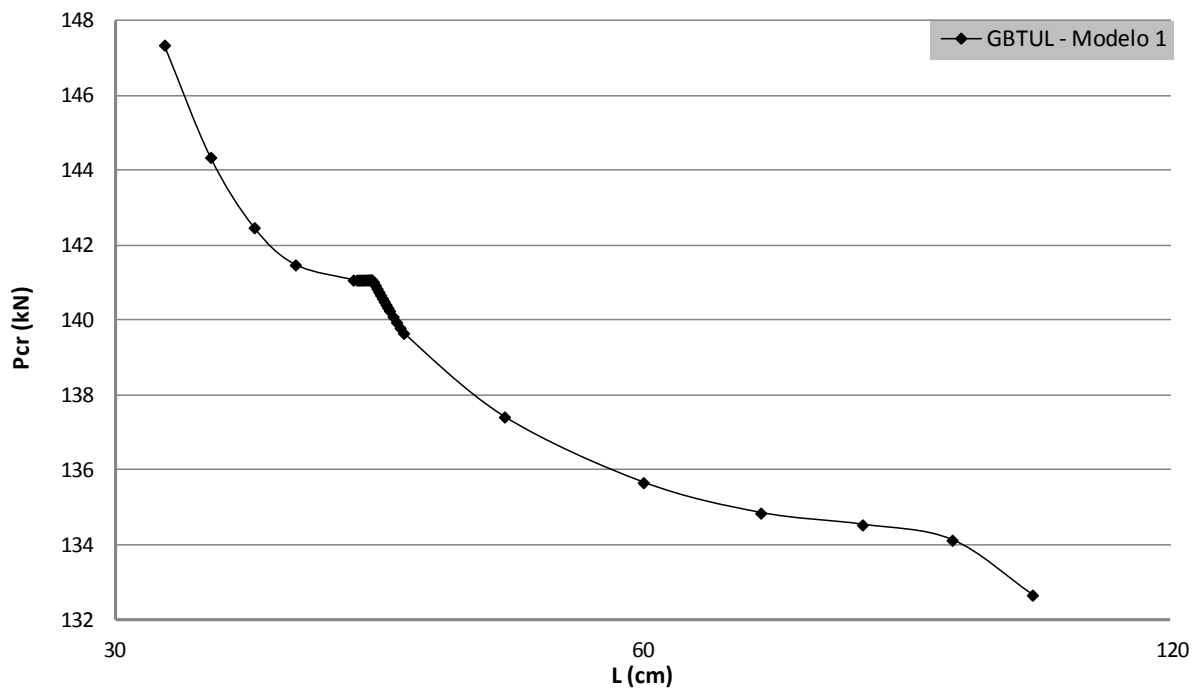


Figura 2.4: Gráfico carga crítica ( $P_{cr}$ ) versus comprimento da coluna ( $L$ ) – Modelo 1.

Numa primeira verificação, notou-se um ponto de mínimo entre o intervalo  $L$  igual a 34 cm a 42 cm. Este intervalo foi melhor discretizado em outras análises chegando assim no comprimento de 412 mm (Figura 2.5). Para este comprimento a carga crítica de

flambagem  $P_{cr}$  do Modelo 1 foi de 141,07 kN com 95,93% de desenvolvimento do modo Local. A Figura 2.6 apresenta a visualização 3D da deformada do perfil para o comprimento escolhido. Observa-se, em ambas as seções, o desenvolvimento do modo local com 3 meias ondas.

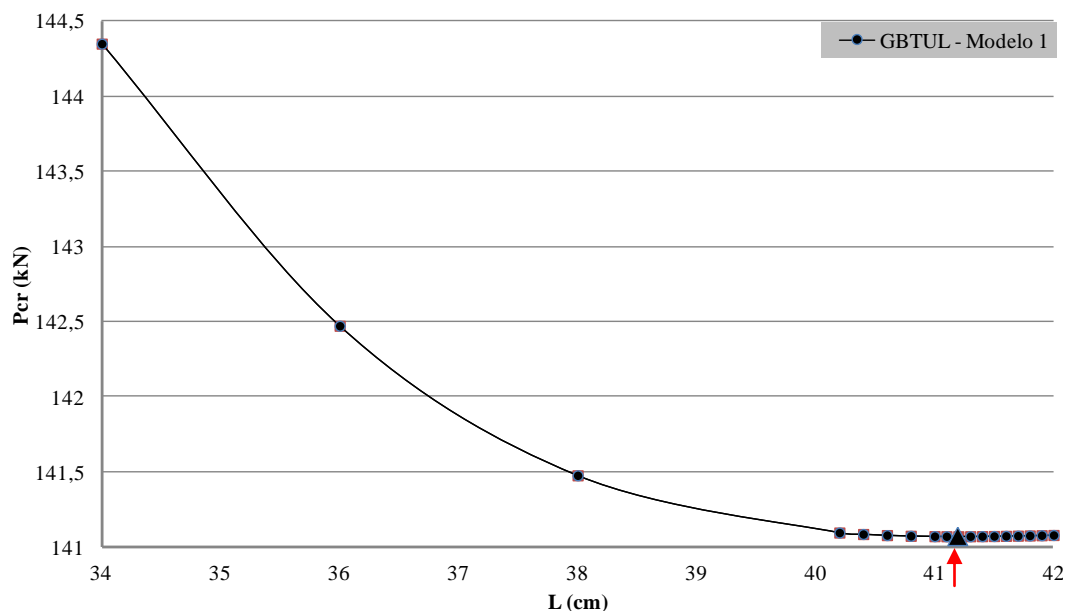


Figura 2.5: Gráfico carga crítica ( $P_{cr}$ ) versus comprimento da coluna ( $L$ ) – Modelo 1.

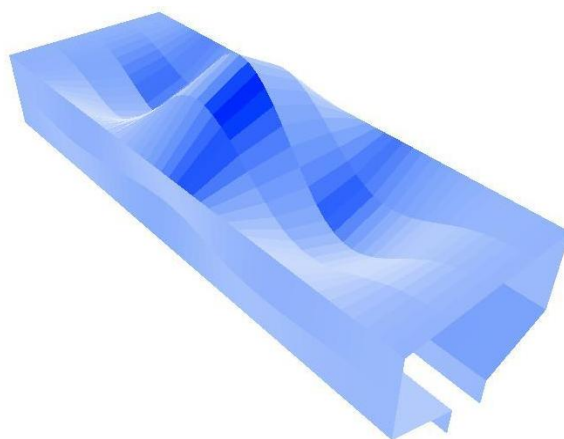


Figura 2.6: Modo de flambagem local do modelo 1 apresentando 3 meias ondas obtido pela GBT.

Como descrito anteriormente os perfis utilizados em sistemas de armazenagem possuem perfurações ao longo da sua altura para facilitar a montagem. Estas perfurações influenciam a resistência e o comportamento destas colunas. A análise da influência das

perfurações na ocorrência do modo local é objeto de interesse deste trabalho e não podem ser considerados pela Teoria Generalizada de Vigas (GBTul). Assim, foi realizada uma análise utilizando o MEF que será apresentada na seção seguinte para calibração do modelo numérico que será utilizado para a análise das seções com perfuração.

### 2.3.2 Análise via MEF

O método numérico empregado para a coluna com perfurações foi o Método dos Elementos Finitos através do software ANSYS. Os primeiros estudos envolveram a análise de autovalor, para a obtenção da carga crítica e dos modos de flambagem, e seus resultados comparados com aqueles obtidos via GBT a fim de calibrar o modelo.

Para a geração da malha foi utilizado o elemento SHELL 181, sendo esta escolha baseada em estudos anteriormente realizados considerando seções perfuradas (Freitas, Freitas, Souza (2010)).

O elemento SHELL 181 (Figura 2.7) possui quatro nós, I, J, K e L com seis graus de liberdade em cada nó (translações e rotações em X, Y e Z) e se usado como membrana (desprezando-se o efeito de flexão), possuirá apenas graus translacionais.

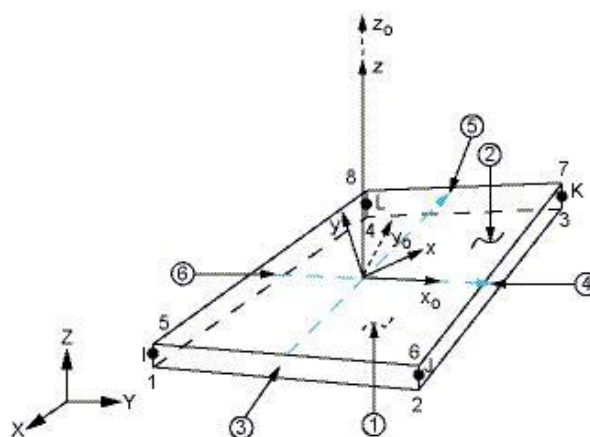


Figura 2.7: Elemento SHELL 181 – Programa ANSYS (Ansys 2010).

Outro aspecto importante no modelo é o refinamento da malha de elementos finitos. Numa primeira análise, observaram-se variações na carga crítica de acordo com o refinamento da malha. Buscou-se então um refinamento adequado ao problema, aliando precisão e custo computacional. A Figura 2.8 e a Tabela 2.1 apresentam o refinamento mais adequado ao problema.

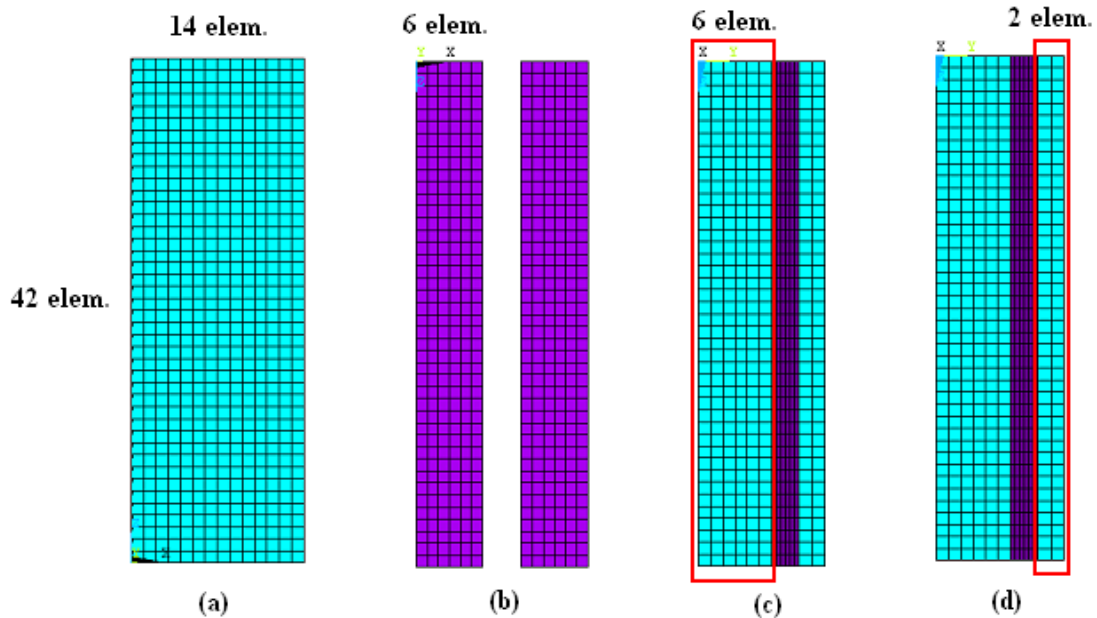


Figura 2.8: Malha empregada no modelo no MEF: (a) Malha empregada na alma do perfil rack; (b) Malha empregada nos enrijecedores; (c) Malha empregada no flange; (d) Malha empregada no flange de ligação do perfil rack.

Tabela 2.1: Relação do número de elementos utilizados na composição da malha dos modelos no MEF.

Elemento da Seção	Quantidade de Elementos	
	Em relação à Largura (b)	Em relação ao Comprimento (L)
ALMA	14	42
FLANGE	6	42
ENRIJECADOR	6	42
FLANGE DE LIGAÇÃO	2	42

Os critérios de carregamento e condições de contorno adotados foram os seguintes:

- ✓ Restrição à translação em relação aos eixos X e Y, Figura 2.9(a), os quais definem o plano da seção transversal, dos nós extremos da seção, ficando livre apenas o deslocamento no sentido axial (eixo Z).
- ✓ Foram acoplados todos os graus de liberdade dos nós extremos que definem a seção transversal do rack, conforme Figura 2.9(b). Com isso, é garantido que toda a linha de nós acoplados se deslocam uniformemente em relação aos eixos.
- ✓ Para que o modelo não apresentasse movimento de corpo-rígido, empregou-se a restrição da translação em relação ao eixo Z (eixo ao longo do comprimento L) do nó central localizado na alma da coluna, representado ainda na Figura 2.9(a).
- ✓ O carregamento foi aplicado uniformemente distribuído em todos os nós das extremidades a fim de se garantir a centralização das cargas (Figura 2.9(c)).

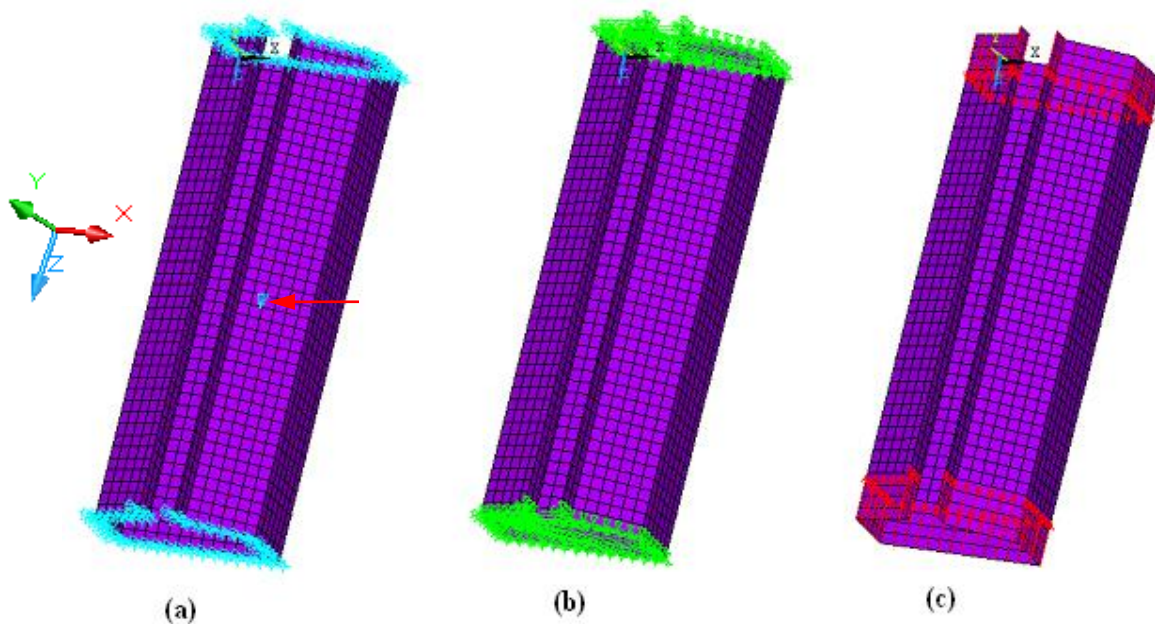


Figura 2.9: Condições de contorno e carregamento: (a) Restrição a translações  $U_x$  e  $U_y$  nos extremos da coluna e  $U_z$  no nó central da alma; (b) Acoplamento de todos os graus de liberdade dos nós extremos da coluna; (c) Aplicação da carga de compressão axial.

A calibração dos modelos numéricos via elementos finitos foi feita a partir da comparação dos resultados da coluna sem perfuração obtidos via GBTul e via ANSYS.

Assim, foi realizada a análise de autovalor nos modelos via elementos finitos, e foram obtidas sua carga crítica ( $P_{cr}$ ) e seus modos modos de flambagem, e seus resultados foram comparados com os resultados do GBTul. Na tabela 2.2 são comparadas as cargas críticas de flambagem e na figura 2.10 são comparados os modos de flambagem observados.

Tabela 2.2: Cargas de flambagem local dos modelos – Modelo GBT e Modelo MEF.

Modelo Numérico	Pcr via GBT (kN)	Pcr via MEF (kN)	$\frac{P_{crMEF} - P_{crGBT}}{P_{crGBT}} \times 100$
SF	141	143	+1,4

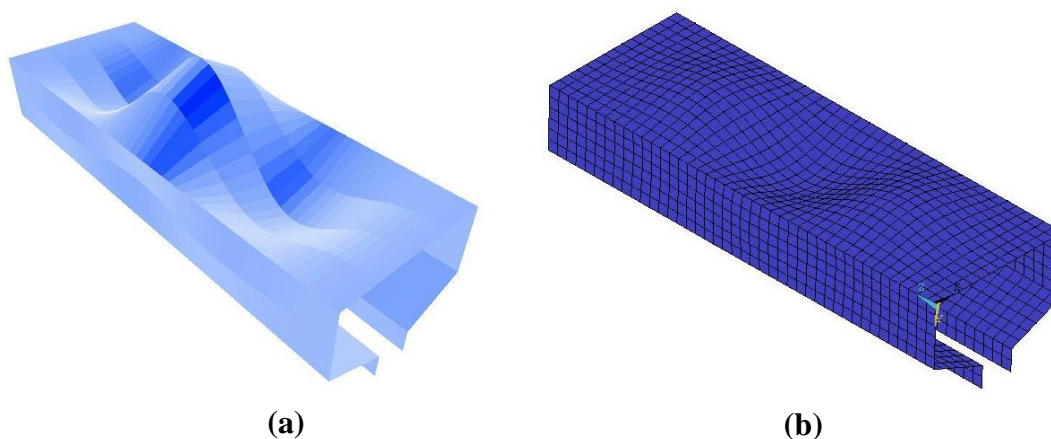


Figura 2.10: Modo de flambagem local desenvolvido: (a) Modelo via GBT; (b) Modelo via MEF.

As cargas críticas obtidas para cada método apresentaram boa correlação e foram observados modos de flambagem semelhantes, em que três meias ondas senoidais são formadas ao longo do comprimento da coluna.

Diante do estudo realizado, o modelo numérico via MEF pôde ser calibrado inicialmente, mostrando-se bastante eficiente para representar o comportamento dos perfis. Assim, o modelo numérico via elementos finitos será utilizado para a análise de colunas perfuradas.

Para a inserção de furos no modelo, novos critérios foram estudados para que este provocasse a maior influência possível no comportamento da coluna quando desenvolvesse o modo local.

Crítérios de geometria das perfurações como quantidades e a localização destas foram estabelecidas da seguinte maneira:

- ✓ As perfurações foram inseridas na alma da coluna. Devido à esbeltez ( $b/t$ ), a alma do perfil rack caracterizou o colapso da coluna mediante desenvolvimento do modo de flambagem local por meio do surgimento de 3 meias ondas em forma de uma senóide, contendo as amplitudes máximas e mínimas numa linha central da alma ao longo do comprimento da coluna;
- ✓ Uma senóide qualquer possui amplitudes máximas, mínimas e pontos de inflexão. Além das perfurações estarem localizadas na alma da coluna, estas foram posicionadas segundo as amplitudes máximas, mínimas e a inflexões da senóide. Assim, foram posicionados furos nos pontos de máximo deslocamento da senóide e também em seus pontos de inflexão.

Para que as perfurações estivessem posicionadas nos pontos de interesse da senóide, os deslocamentos dos nós situados na linha central da alma foram analisados, conforme apresenta a Figura 2.11.

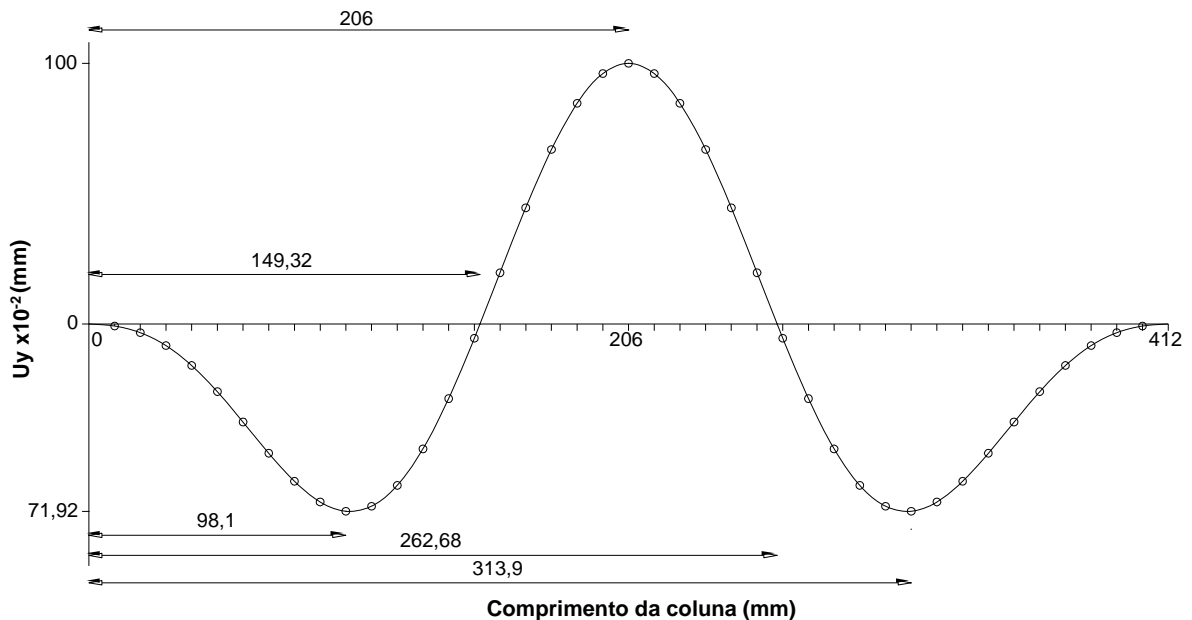


Figura 2.11: Gráfico deslocamento  $U_y$  versus comprimento da coluna. Obtenção da senóide e posições dos pontos de máximos, mínimos e inflexões para o modelo sem perfurações via MEF.

Estabelecidos os posicionamentos das perfurações para os modelos numéricos Modelo 1 e Modelo 2, a determinação de critérios da forma e variação dos tamanhos das perfurações passaram a compor a próxima etapa do trabalho. Estes critérios são definidos a seguir:

- ✓ A forma das perfurações acompanhou a malha de elementos empregada nos modelos. A malha de elementos que compõe os modelos é caracterizada por uma malha quadrangular. Para que uma mudança na malha não ocorresse, descaracterizando o refinamento previamente desenvolvido, a perfuração acompanhou a forma da malha apresentando-se também quadrangular;
- ✓ Para perfurações deslocadas da linha de centro da alma como ilustrado na Figura 2.12, os mesmos critérios acima descritos são empregados, com limitação apenas no distanciamento. Duas perfurações muito próximas geram concentração de níveis altos de tensões podendo causar o efeito de plastificação localizada no material antes do desenvolvimento do modo local.

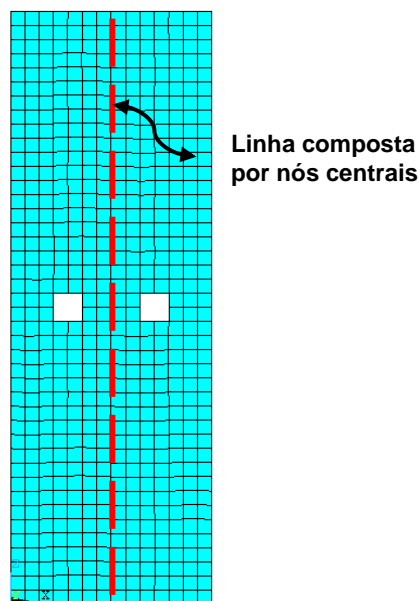


Figura 2.12: Coluna apresentando perfurações na alma e estas deslocadas da linha central de nós.

- ✓ Dimensões das perfurações (Figura 2.13): O menor furo (Figura 2.13a) é definido por 2 elementos no sentido da largura  $b$  da alma (eixo X) e 2 elementos no sentido do comprimento  $L$  da coluna (eixo Z), denominando-se 2x2. O



segundo valor das dimensões da perfuração (Figura 2.13b) é composta de 4x4 (quatro elementos no sentido de b e 4 elementos no sentido de L) e por último, a perfuração caracterizada de 6x6 conforme Figura 2.13c.

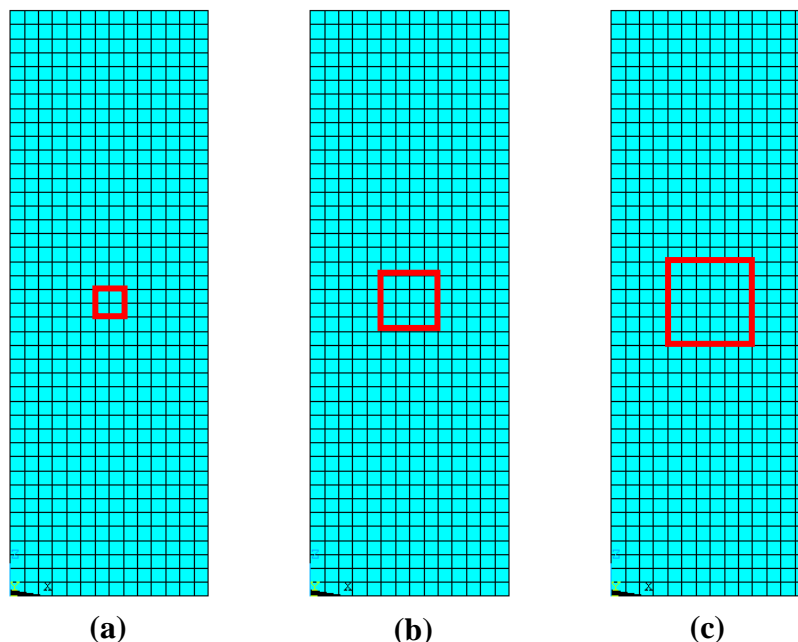


Figura 2.13: Dimensões das perfurações: (a) Modelo com dimensão de perfuração 2x2 elementos; (b) Modelo com dimensão de perfuração 4x4 elementos; (c) Modelo com dimensão de perfuração 6x6 elementos.

Foi então definida a série de modelos ensaiada, cuja nomenclatura e descrição é apresentada na Tabela 2.3, considerando a disposição e a dimensão de 2x2 (Figura 2.13 (a)) elementos das perfurações apresentadas. Foram empregas duas espessuras de chapa: 1,8 mm (Modelo 1) e 1,5 mm (Modelo 2).

Tabela 2.3: Nomenclatura e descrição para os modelos 1 e 2 via MEF.

Nomenclatura do Modelo Numérico	Descrição
SF	Coluna sem Perfuração
2F.2T_2Elem	2 Perfurações, no sentido transversal, localizadas simetricamente em relação ao centro da alma, de tamanhos 2x2 elementos

A série de modelos com perfurações foram submetidas a análises lineares de flambagem no ANSYS, que possibilitou a obtenção dos autovalores (cargas críticas  $P_{cr}$ ) e o autovetores (modos de instabilidade das colunas). Na Tabela 2.4 são apresentados os resultados para o Modelo 1, contendo também a carga de escoamento ( $P_y$ ) da seção efetiva. No caso dos modelos sem perfuração, a seção efetiva é a seção bruta da coluna. Os valores dos modelos apresentados restringem-se aos resultados em que  $P_{cr}$  é menor que  $P_y$  e o modo com três meias ondas, o que será considerado no estudo da flambagem local deste trabalho. Novamente os resultados apresentados se restringem aos modelos ensaiados em laboratório. Destaca-se que em todos os modelos a carga de escoamento é superior a carga crítica.

Comparando-se os valores das cargas críticas das colunas com e sem furos (Tabelas 2.4 e 2.5), observa-se uma diferença de 4,4% no Modelo 1 e 4% no Modelo 2. Conclui-se que a alteração da carga crítica para esta tipologia de furos é pequena. A mesma metodologia foi aplicada para o Modelo 2 com espessura igual a 1,5 mm e estão apresentados na Tabela 2.5.

Tabela 2.4: Resultados das cargas críticas, cargas de escoamento e modo obtido para os Modelos 1.

<b>Modelo 1</b>	<b><math>P_{cr}</math> (kN)</b>	<b><math>P_y</math> (kN)</b>	<b>Modo de flambagem</b>
SF	143	263,4	Local _ 3 meias ondas
2F.2T_2Elem	137	237,8	Local _ 3 meias ondas

Tabela 2.5: Resultados das cargas críticas, cargas de escoamento e modo obtido para os Modelos 2.

<b>Modelo 2</b>	<b><math>P_{cr}</math> (kN)</b>	<b><math>P_y</math> (kN)</b>	<b>Modo de flambagem</b>
SF	82,7	137,1	Local _ 3 meias ondas
2F.2T_2Elem	79,5	123,8	Local _ 3 meias ondas

### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

#### 3.1 Introdução

O programa experimental realizado no presente estudo tem o objetivo de estudar perfis de aço formados a frio de seção do tipo rack sem e com a presença de perfurações na alma, para os quais o modo de flambagem local é predominante. Estas seções foram definidas através de análises numéricas, conforme apresentado no capítulo anterior. Os ensaios foram sob compressão centrada em colunas curtas e o programa experimental envolveu o projeto dos protótipos, o levantamento das imperfeições geométricas, a instrumentação utilizada e a metodologia da realização dos ensaios.

#### 3.2 Protótipos Ensaaiados

Os protótipos ensaiados são seções do tipo rack, cujas dimensões, esbeltez e comprimentos, foram definidos com base em estudo numérico através da GBT (programa computacional GBTul) e pelo Método dos Elementos Finitos (programa computacional ANSYS) apresentados no capítulo 2 e Apêndice A.

A Tabela 3.1 apresenta os protótipos fabricados, identificados pela nomenclatura como Modelo 1, compostos por chapas de espessuras igual a 1,8 mm e Modelo 2 compostos por chapas de espessura 1,5 mm, sendo todos com comprimento de 412 mm. O programa experimental inclui colunas sem perfurações e com perfurações visando avaliar a influência dos furos no comportamento das colunas.

Tabela 3.1: Protótipos ensaiados

		<b>Quantidade de Corpos de prova</b>
<b>Modelo 1</b>	SF	<b>3</b>
	2F.2T_2Elem	<b>3</b>
<b>Modelo 2</b>	SF	<b>3</b>
	2F.2T_2Elem	<b>3</b>

O comprimento de 412 mm dos protótipos foi definido na análise numérica, e foram ensaiados três protótipos de cada tipologia.

A série de protótipos das colunas apresentou em função do processo de fabricação uma dobra ou enrijecedor central à alma da coluna, demandando assim uma análise da sua influência na seção. Por definição o modo de flambagem (como apresentado no Capítulo 2) seria o distorcional, no entanto, as análises indicam que o modo local com sua carga crítica é o dominante sendo o estudo desenvolvido segundo o modo local.

A Figura 3.1 apresenta a seção transversal e suas características geométricas com a presença da dobra, localizada ao centro da alma do perfil e ao longo de seu comprimento.

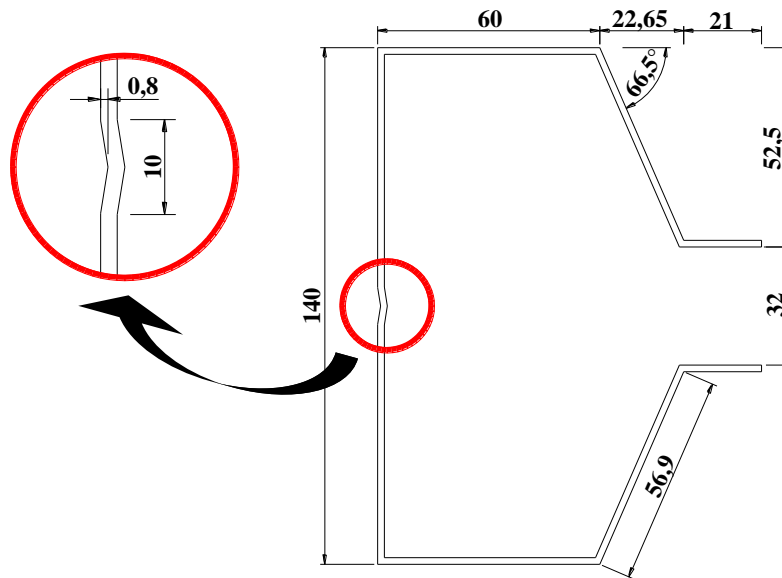


Figura 3.1: Dimensões nominais das colunas ensaiadas com a identificação da dobra ou enrijecedor em função do processo de fabricação.

Para avaliar as imperfeições geométricas dos protótipos foi realizado o levantamento das dimensões utilizando instrumentos de medida (Figura 3.2). A partir das medições pôde-se quantificar a magnitude destas imperfeições não sendo observado em nenhum protótipo, nenhuma dispersão significativa entre as dimensões nominais e as reais. Todas as medições realizadas dos protótipos ensaiados encontram-se no Anexo A (Faria, V. O. (2011)).

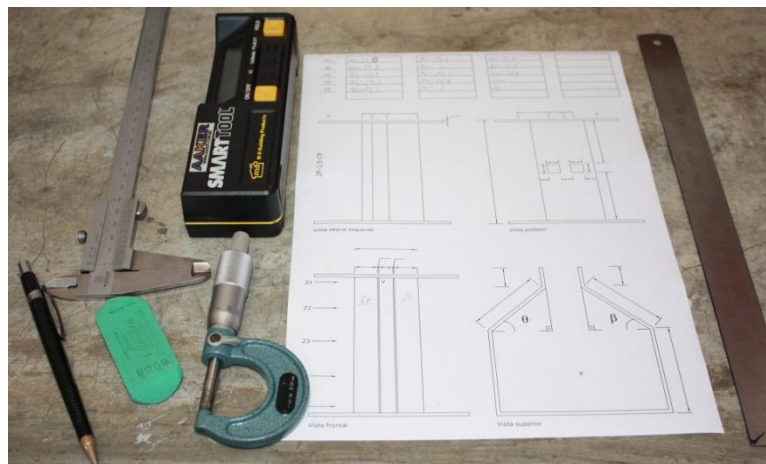


Figura 3.2: Equipamento utilizado para o levantamento das dimensões reais da seção.

Os protótipos ensaiados foram identificados considerando-se a espessura da chapa e a quantidade de perfurações. Esta identificação dos perfis é apresentada na Tabela 3.2 e correlacionada com a nomenclatura da análise numérica apresentada no capítulo 2.

Tabela 3.2: Identificação dos protótipos.

	<b>Modelo Numérico</b>	<b>Modelo Experimental</b>	<b>Descrição</b>
<b>Modelo 1</b>	SF	SF-1,8-CP1	Corpo de prova 1 sem perfuração
		SF-1,8-CP2	Corpo de prova 2 sem perfuração
		SF-1,8-CP3	Corpo de prova 3 sem perfuração
	2F.2T_2Elem	2F-1,8-CP1	Corpo de prova 1 com duas perfurações
		2F-1,8-CP2	Corpo de prova 2 com duas perfurações
		2F-1,8-CP3	Corpo de prova 3 com duas perfurações
<b>Modelo 2</b>	SF	SF-1,5-CP1	Corpo de prova 1 sem perfuração
		SF-1,5-CP2	Corpo de prova 2 sem perfuração
		SF-1,5-CP3	Corpo de prova 3 sem perfuração
	2F.2T_2Elem	2F-1,5-CP1	Corpo de prova 1 com duas perfurações
		2F-1,5-CP2	Corpo de prova 2 com duas perfurações
		2F-1,5-CP3	Corpo de prova 3 com duas perfurações

A fim de garantir as condições de engastes e empenamento restringido foram soldadas chapas de 4,75 mm de espessura em ambas as extremidades dos protótipos, conforme mostra a Figura 3.3



Figura 3.3: Chapas soldadas nas extremidades.

### 3.3 Caracterização do Material

A tensão limite de escoamento do aço ( $f_y$ ), a tensão limite de resistência a tração ( $f_u$ ) e o alongamento residual após a ruptura ( $a$ ) foram medidos através de ensaios a tração, conforme especificações indicadas pela “American Society for Testing and Material”, ASTM (1995).

Os corpos de prova foram retirados das paredes dos perfis destinados ao ensaio de tração. Os valores médios encontrados para tensão limite de escoamento ( $f_y$ ), tensão limite de resistência à tração ( $f_u$ ) e alongamento residual após a ruptura do aço ( $a$ ) estão indicados na Tabela 3.3 de acordo com o tipo de Modelo.

Tabela 3.3: Característica Mecânica do aço utilizado.

<b>Corpo de prova Espessura 1,5 mm</b>	<b><math>f_y</math> (MPa)</b>	<b><math>f_u</math> (MPa)</b>	<b>Alongamento (%)</b>
CP1	235,4	401,04	27,5
CP2	217,7	378,12	29,5
CP3	213,4	355,26	28,5
CP4	221,4	382,81	30,5
<b>Média</b>	<b>221,98</b>	<b>379,31</b>	<b>29</b>
<b>Corpo de prova Espessura 1,8 mm</b>	<b><math>f_y</math> (MPa)</b>	<b><math>f_u</math> (MPa)</b>	<b>Alongamento (%)</b>
CP1	346,22	510,22	19,9
CP2	368,9	524	20,0
CP3	349,52	487,31	18,5
<b>Média</b>	<b>354,88</b>	<b>507,18</b>	<b>19,47</b>

### **3.4 Instrumentação e Aquisição de Dados**

Para a instrumentação dos ensaios, foram utilizados transdutores de deslocamentos (LVDT) e extensômetros elétricos de resistência. Para a aquisição de dados do LVDT e carregamento foi utilizado o sistema de aquisição de dados controlados pelo software Partner da prensa servohidráulica (fabricante: Instron). Em função da limitação do número de canais de aquisição e devido a necessidade de utilizar mais de um LVDT e também de extensômetros, foi montado um sistema complementar (Spider 8 da HBM) controlado pelo software Catman. A seguir tem-se a instrumentação utilizada.

#### **3.4.1 Transdutores de Deslocamentos (LVDT)**

Para acompanhar os deslocamentos oriundos da amplitude das semi-ondas do modo de flambagem local foram utilizados transdutores de deslocamento (LVDT's) na linha média central, da alma do perfil onde tem-se a maior amplitude de deslocamentos devido a flambagem local. Foram utilizados cinco LVDT fabricados pela SENSOTEC, para medir estes deslocamentos.

A Figura 3.4 mostra o posicionamento dos LVDT's, sendo um central (linha média central da coluna) e outros quatro, dois acima do central e dois abaixo, distantes entre si de 30 mm.



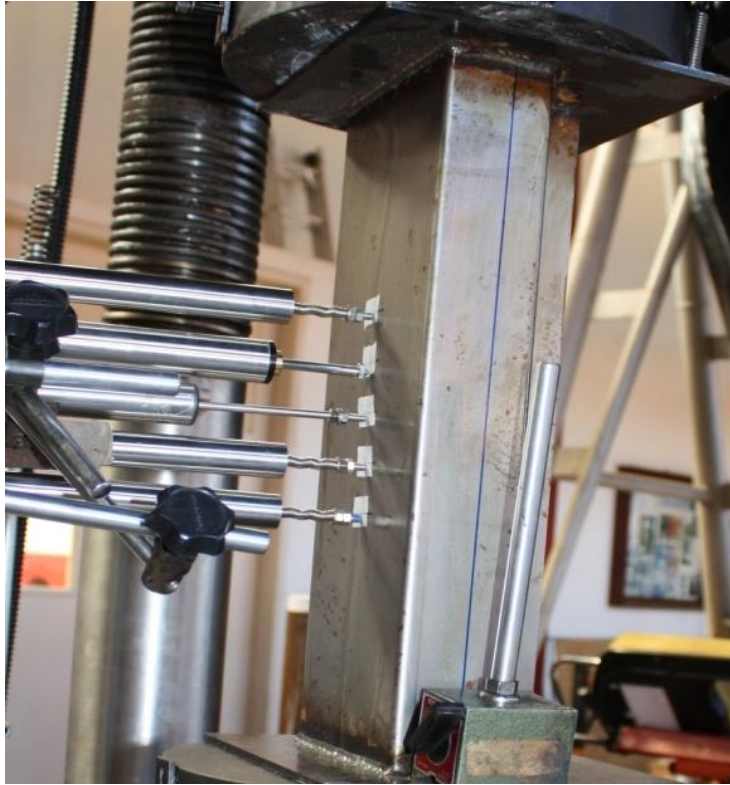


Figura 3.4: Posicionamento dos LVDT's utilizados nos ensaios.

### 3.4.2 Extensômetros

As simulações numéricas envolvendo análises não-lineares permitem o acompanhamento da distribuição de tensões em quaisquer pontos de interesse no modelo, possibilitando obter o comportamento do aço da coluna. Visando a avaliação futura das tensões foram utilizados extensômetros elétricos de resistência, uniaxiais de 5mm, posicionados na alma da coluna. O posicionamento destes extensômetros é apresentado na Figura 3.5 para as colunas sem furos e as com perfurações.

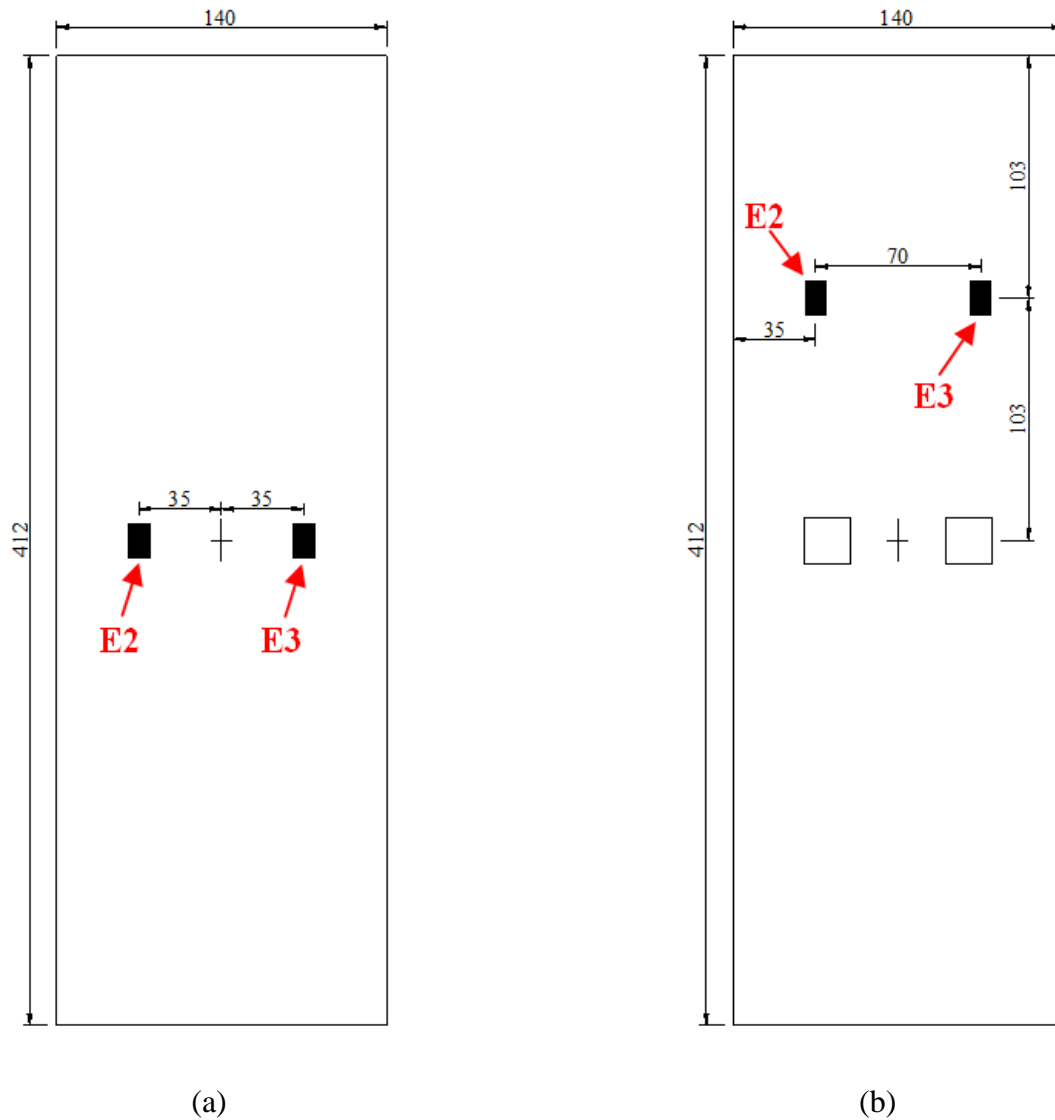


Figura 3.5: Posicionamento dos extensômetros elétricos: (a) perfis sem furos; (b) perfis com furos.

A instrumentação utilizada para os protótipos SF-1,8-CP1 e SF-1,8-CP3 foram de apenas um LVDT central à alma, os protótipos 2F-1,8-CP1, 2F-1,8-CP3, SF-1,5-CP1, SF-1,5-CP3, 2F-1,5-CP1 e 2F-1,5-CP3 foram instrumentados utilizando os cinco LVDT's, e os protótipos SF-1,8-CP2, 2F-18-CP2, SF-1,5-CP2 e 2F-1,5-CP2 foram instrumentados com os cinco LVDT mais extensômetros. A Figura 3.6 apresenta o um esquema geral de instrumentação com 5 LVDT's e extensômetros para o perfil sem perfuração que é análoga ao das colunas com furos.

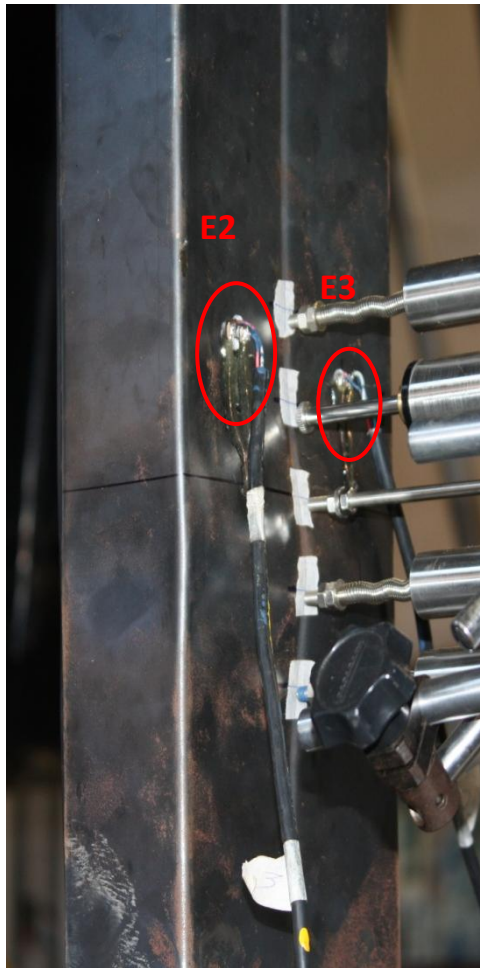


Figura 3.6: Esquema geral de montagem da instrumentação com LVDT's e extensômetros para a coluna sem furos.

### 3.4.3 Sistema de Aquisição de Dados

O sistema de aquisição de dados da prensa servohidráulica Instron possui um canal de saída para LVDT controlado pelo software Partner, assim neste canal e para todos os ensaios foi conectado o LVDT central das colunas. A aquisição do carregamento foi feita por meio de célula de carga e aquisitado pelo Partner. No sistema de aquisição de dados da HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik (referência)), Spider8, controlado pelo software Catman foram conectados quatro LVDT's dos cinco utilizados e ainda os extensômetros elétricos quando existentes.

### 3.5 Metodologia de Ensaio

Os ensaios foram realizados em prensa servohidráulica (Instron - modelo 600HVL). Para o controle do ensaio, foram realizados incrementos de deslocamento na velocidade de 0,05 mm/min. Este controle de velocidade de deslocamento imposta ao ensaio possibilita uma melhor obtenção do comportamento da coluna e conseqüentemente análise dos resultados.

Os corpos de prova ensaiados foram posicionados entre sistemas de rótulas que garantem, durante todo o ensaio, a verticalidade da carga aplicada. A centralização do perfil foi uma etapa importante e realizada cuidadosamente. O processo de centralização adotado foi geométrico, onde o ajuste foi feito através de marcações dos centros geométricos do prato inferior e da coluna através da chapa soldada nos extremos desta. Diante dos valores obtidos anteriormente na verificação das imperfeições geométricas dos protótipos (descrito no item 3.2), fez-se os cálculos das características geométricas, inclusive a posição do centro de gravidade. Finalmente, marcou-se o centro de gravidade da seção por linhas ortogonais definindo os eixos na chapa extrema inferior e superior da máquina. O posicionamento centralizado da coluna em relação ao centro de carga da máquina foi possibilitado pela coincidência dos gabaritos, mostrado na Figura 3.7.



Figura 3.7: Posicionamento centralizado das colunas com a coincidência dos gabaritos.

### **3.6 Apresentação dos Resultados Experimentais**

Neste item é apresentada uma avaliação do nível de imperfeição das seções reais e os resultados experimentais dos ensaios realizados. Os resultados para as colunas visam identificar o modo local de placa e a influência no modo quando perfurações estão presentes na alma da coluna. A partir do tratamento dos dados computacionais são feitos gráficos com as respostas dos transdutores de deslocamentos e extensômetros, sendo a carga crítica das colunas determinada por meio destes gráficos.

#### **3.6.1 Levantamento Geométrico**

Como descrito na seção 3.2, as imperfeições influenciam no fenômeno de instabilidade, ocasionando comportamento estrutural distinto dos resultados numéricos para seções perfeitas. Tanto para os Modelos 1 como para os Modelos 2, concluiu-se que as diferenças nas medidas não são significativas em função da comparação entre as médias dos valores medidos (experimentais) de todos exemplares e os valores nominais dos protótipos.

A Figura 3.8 exemplifica a medição realizada para o corpo de prova 2F-1,5-CP1, com as respectivas médias dos valores calculadas, sendo os demais valores das medições das imperfeições apresentadas no Anexo A ((Faria, V. O. (2011)).

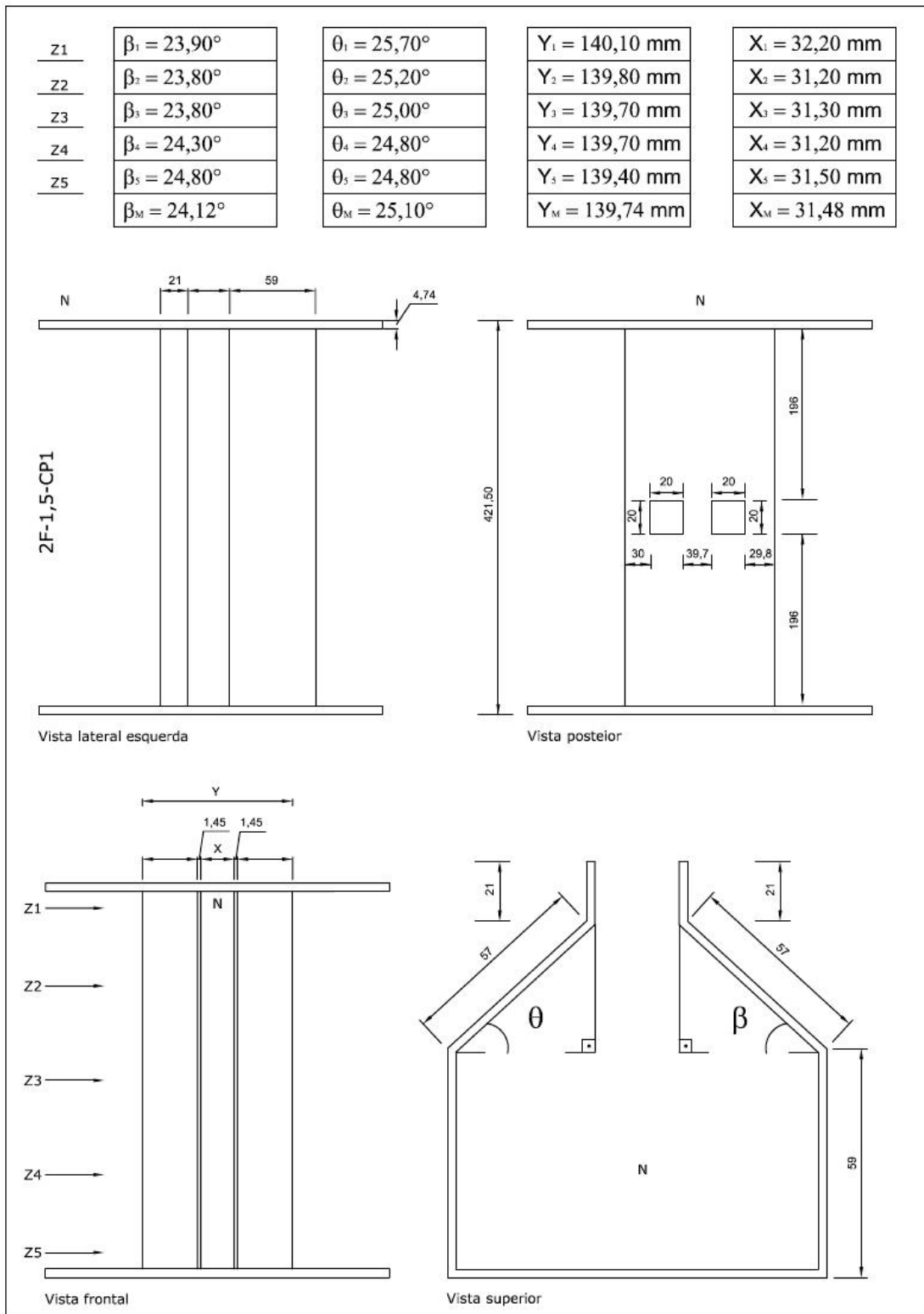


Figura 3.8: Medição e respectivas médias dos valores – corpo de prova 2F-1,5-CP1 ((Faria, V. O. (2011))).

### 3.6.2 Resultados Experimentais

Para obtenção dos resultados de carga crítica dos protótipos ensaiados foi avaliado o deslocamento, amplitude, da semi-onda senoidal medidas pelos LVDT's (Figura 3.4). A seguir tem-se os gráficos de resultados para dois protótipos do Modelo 1 e para dois do Modelo 2, sendo um com furos e outro sem furação. Assim serão apresentados detalhadamente os gráficos de 4 ensaios sendo os demais 8 ensaios, estão no Apêndice B. Os protótipos apresentados a seguir são: Modelo 1: SF-1,8-CP2 e 2F-1,8-CP2; Modelo 2: SF-1,5-CP2 e 2F-1,5-CP3.

#### a) Modelo 1: SF-1,8-CP2

Na Figura 3.9 tem-se os valores do carregamento versus os deslocamentos, chamados de amplitude, A, medidos por meio dos 5 LVDT's posicionados a meia altura da coluna. Observa-se o início da mudança de deslocamentos caracterizando a carga crítica de flambagem local sendo identificada uma carga crítica de 121 kN.

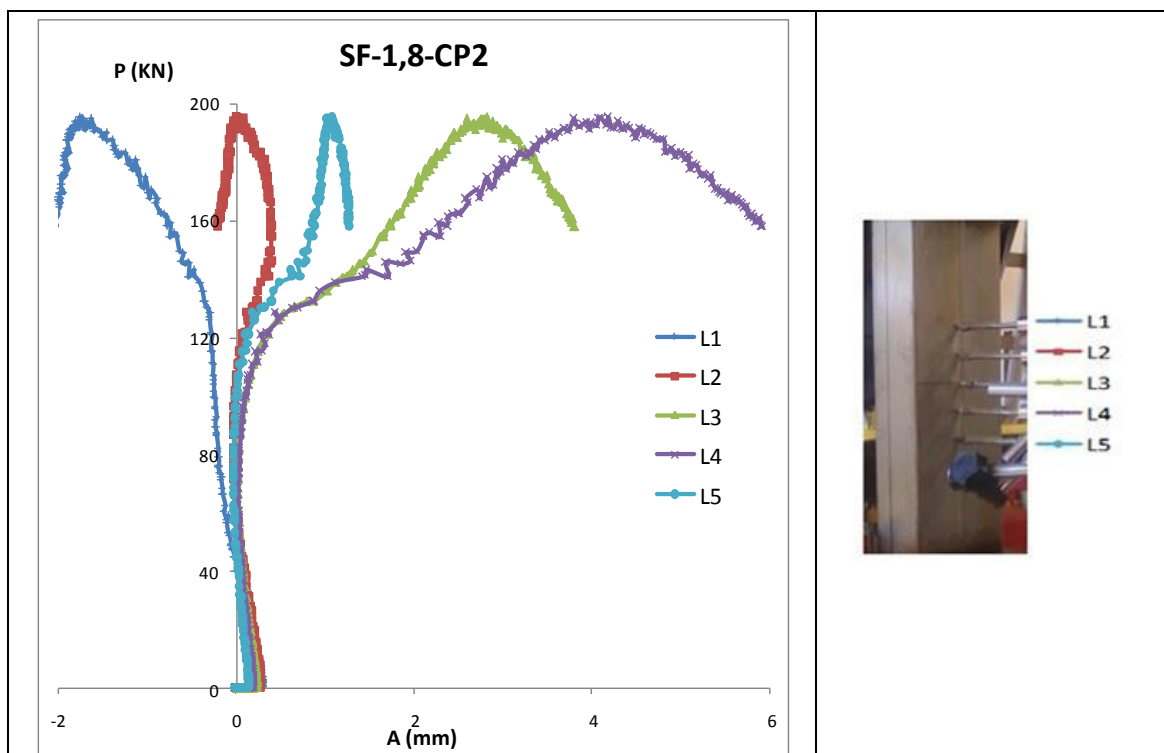


Figura 3.9: Carregamento versus a amplitude dos deslocamentos para o ensaio SF-1,8-CP2.

Na Figura 3.10 tem-se os valores da amplitude,  $A$ , ao longo do comprimento do perfil,  $y$ , caracterizando a evolução da semi-onda senoidal em função do carregamento aplicado. Observa-se também a deformada obtida para o protótipo.

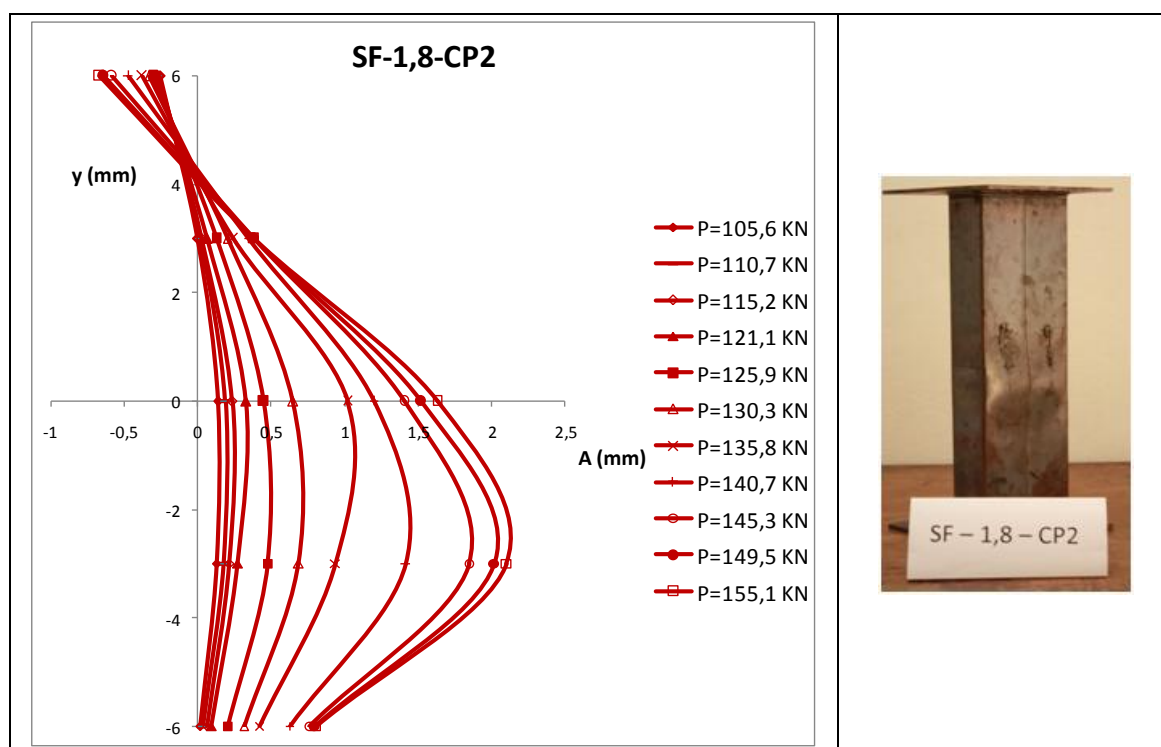


Figura 3.10: Evolução da amplitude da meia-onda senoidal medida para o ensaio SF-1,8-CP2.

#### b) Modelo 1: 2F-1,8-CP2

Na Figura 3.11 tem-se os valores do carregamento versus a amplitude,  $A$ , para o modelo com perfuração e de espessura 1,8mm relativo ao Modelo 1. Observa-se o início da mudança de deslocamentos caracterizando a carga crítica de flambagem local sendo identificada uma carga crítica de 129 kN.

Na Figura 3.12 tem-se os valores da amplitude,  $A$ , ao longo do comprimento do perfil,  $y$ , caracterizando a evolução da semi-onda senoidal em função do carregamento aplicado. Observa-se também a deformada obtida para o protótipo.



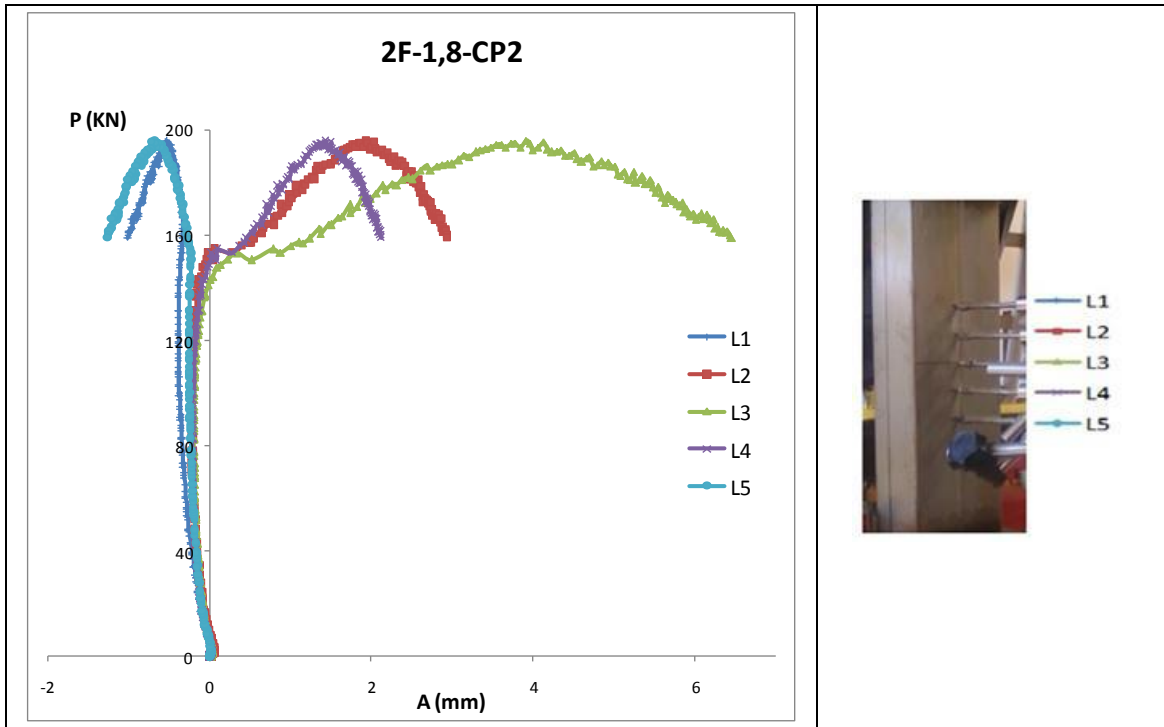


Figura 3.11: Carregamento versus a amplitude dos deslocamentos para o ensaio 2F-1,8-CP2.

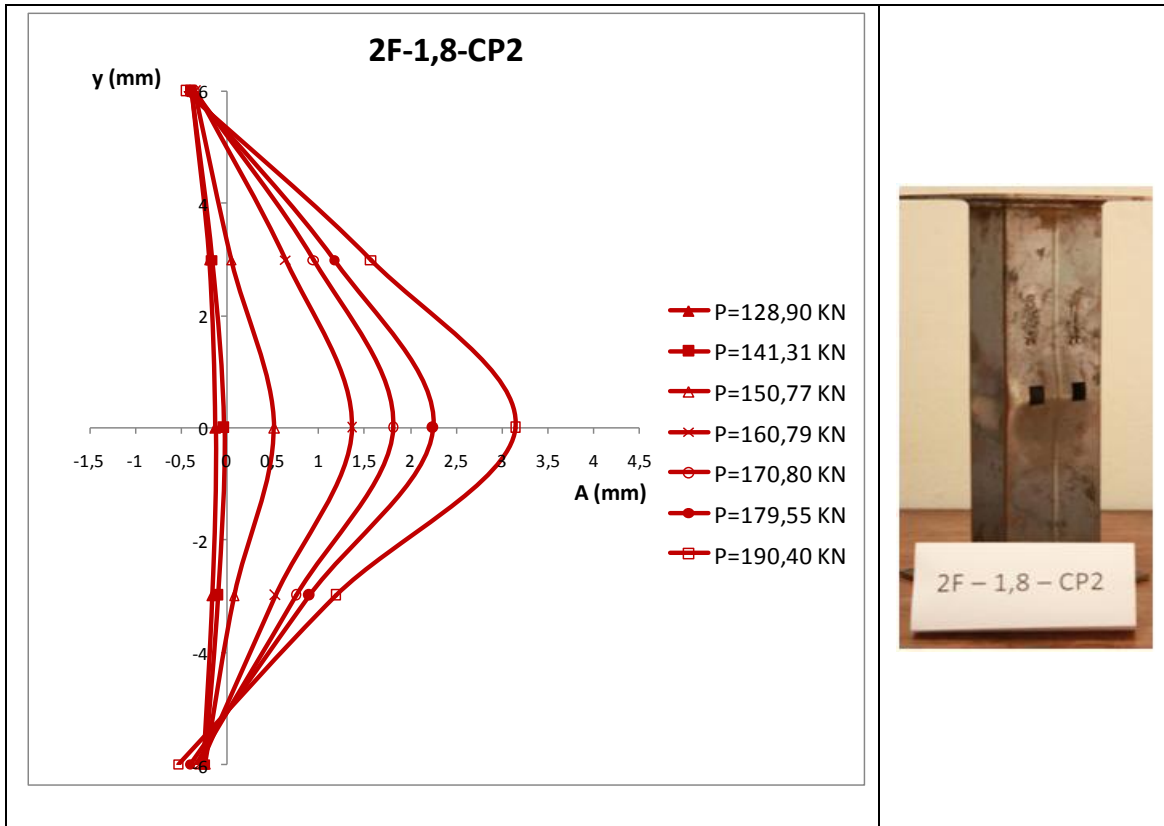


Figura 3.12: Evolução da amplitude da meia-onda senoidal medida para o ensaio 2F-1,8-CP2.

A Figura 3.13 mostra as deformações medidas nos extensômetros colados na coluna e observa-se a carga última da seção transversal instrumentada.

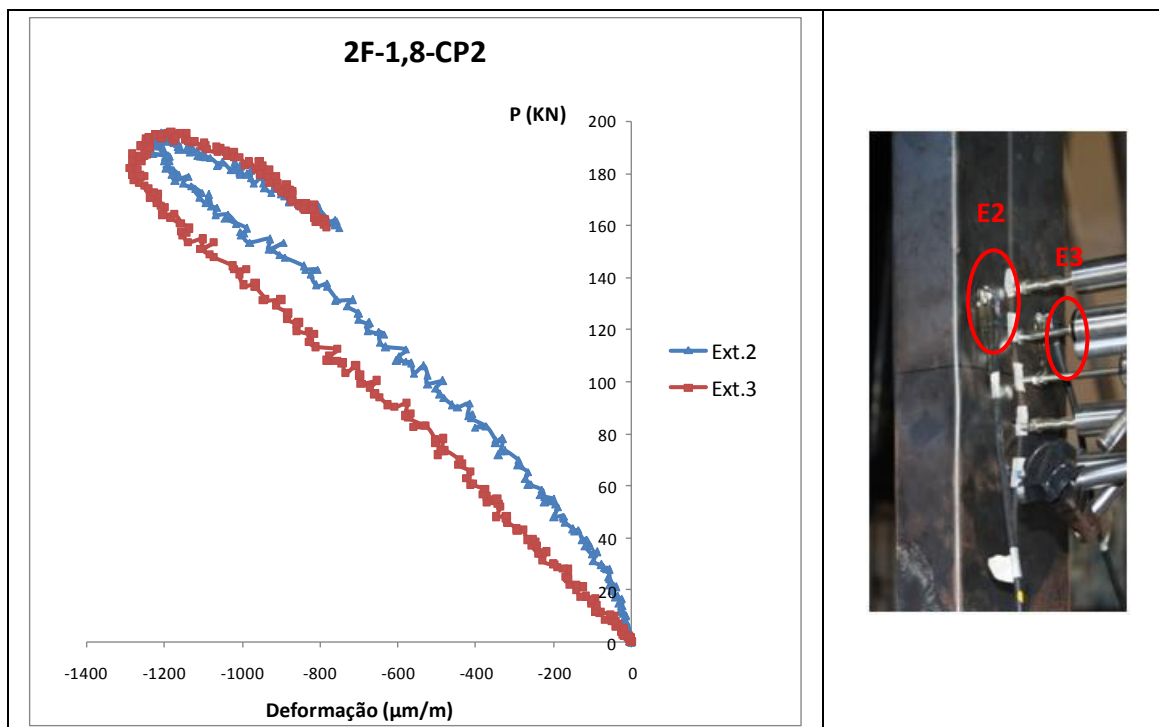


Figura 3.13: Valores das deformações específicas medidas pelos EER do ensaio 2F-1,8-CP2.

### c) Modelo 2: SF-1,5-CP2

Na Figura 3.14 tem-se os valores do carregamento versus a amplitude,  $A$ , para o modelo sem perfuração e de espessura 1,5 mm relativo ao Modelo 2. Observa-se o início da mudança de deslocamentos caracterizando a carga crítica de flambagem local sendo identificada uma carga crítica de 69,27 kN.

Na Figura 3.15 têm-se os valores da amplitude,  $A$ , ao longo do comprimento da coluna sem perfurações,  $y$ , caracterizando a evolução da semi-onda senoidal em função do carregamento aplicado. Observa-se também a deformada obtida para o protótipo.

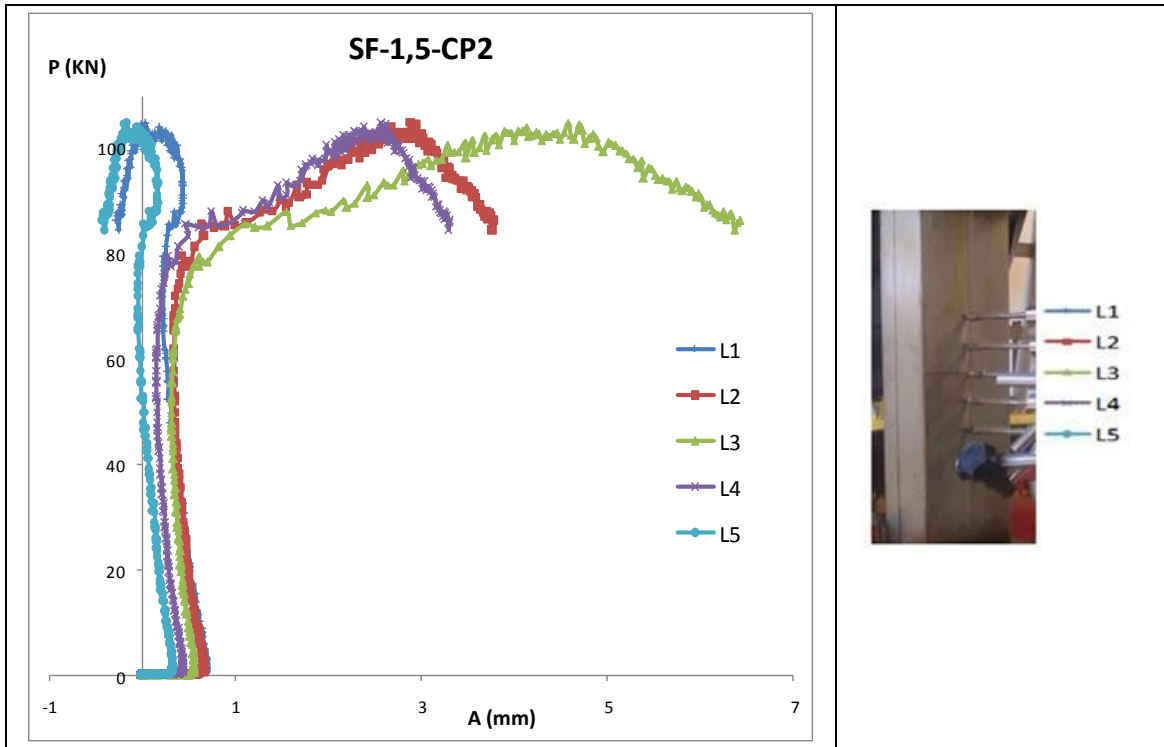


Figura 3.14: Carregamento versus a amplitude dos deslocamentos para o ensaio SF-1,5-CP2.

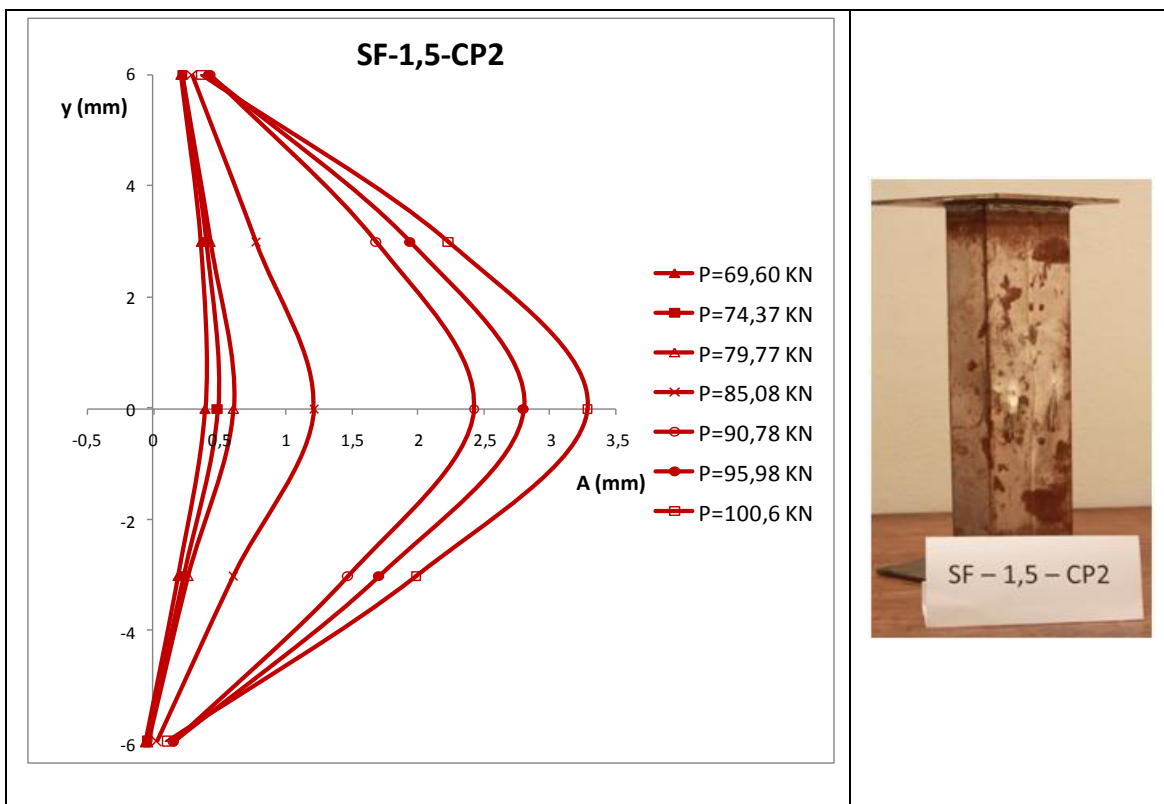


Figura 3.15: Evolução da amplitude da meia-onda senoidal medida para o ensaio SF-1,5-CP2.

Neste ensaio foram colados extensômetros, mas por problemas na aquisição dos dados os resultados foram descartados das análises.

d) Modelo 2: 2F-1,5-CP3

Na Figura 3.16 tem-se os valores do carregamento versus a amplitude,  $A$ , para o modelo com perfuração e de espessura 1,5mm relativo ao Modelo 2. Observa-se o início da mudança de deslocamentos caracterizando a carga crítica de flambagem local sendo identificada uma carga crítica de 77,07 kN.

Na Figura 3.17 tem-se os valores da amplitude,  $A$ , ao longo do comprimento do perfil,  $y$ , caracterizando a evolução da semi-onda senoidal em função do carregamento aplicado. Observa-se também a deformada obtida para o protótipo.

Neste ensaio não houve instrumentação com extensômetros.

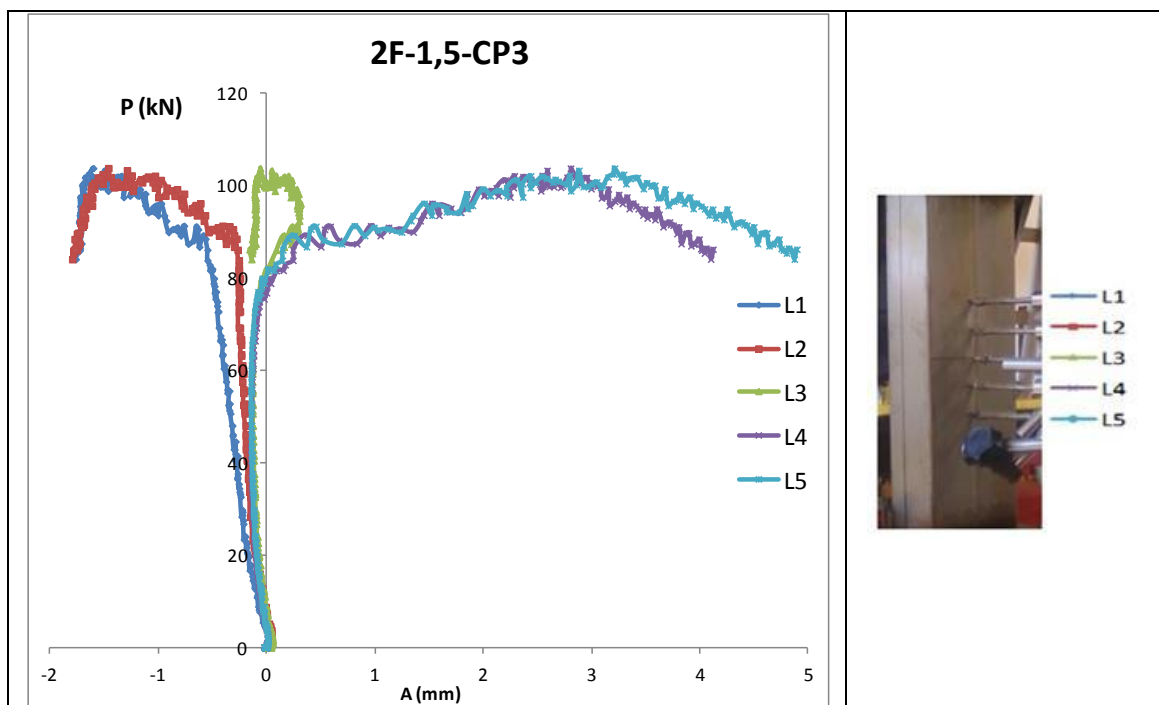


Figura 3.16: Carregamento versus a amplitude dos deslocamentos para o ensaio 2F-1,8-CP3.

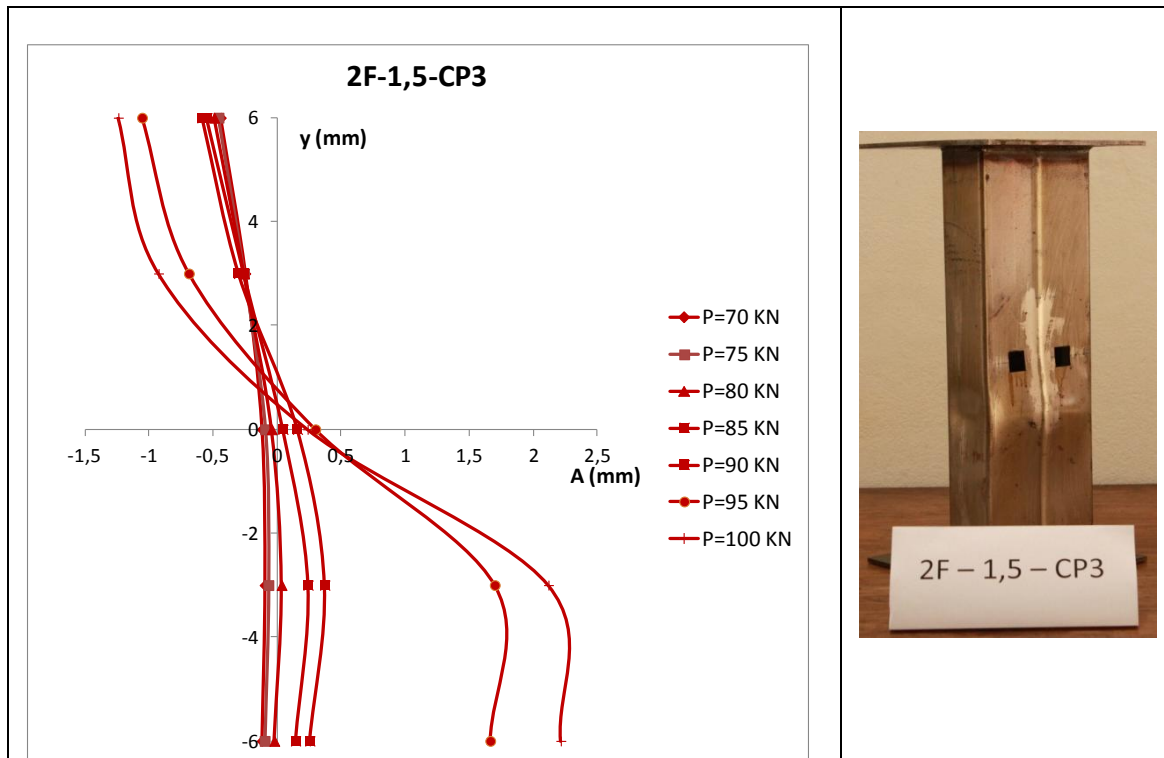


Figura 3.17: Evolução da amplitude da meia-onda senoidal medida para o ensaio 2F-1,5-CP3.

Os demais ensaios e resultados de carga crítica previsto nos protótipos estão no Apêndice B e na Tabela 3.4 e 3.5 têm-se os resultados de carga crítica para todos os protótipos ensaiados.

Tabela 3.4: Resultados experimentais das cargas críticas obtidas para os Modelos 1.

Modelo 1	P <sub>cr</sub> (kN)
SF-1,8-CP1	105,0
SF-1,8-CP2	121,07
SF-1,8-CP3	128,2
2F-1,8-CP1	126,7
2F-1,8-CP2	128,9
2F-1,8-CP3	86,16

Tabela 3.5: Resultados experimentais das cargas críticas obtidas para os Modelos 2.

<b>Modelo 2</b>	<b>P<sub>cr</sub> (kN)</b>
SF-1,5-CP1	83,28
SF-1,5-CP2	69,27
SF-1,5-CP3	51,04
2F-1,5-CP1	77,19
2F-1,5-CP2	60,11
2F-1,5-CP3	77,07

Observou-se em todos os ensaios o desenvolvimento predominante do modo de flambagem local nas colunas, sendo a plastificação ocorrendo na região onde foi desenvolvida a maior amplitude de flambagem (Figuras 3.18 a 3.21).

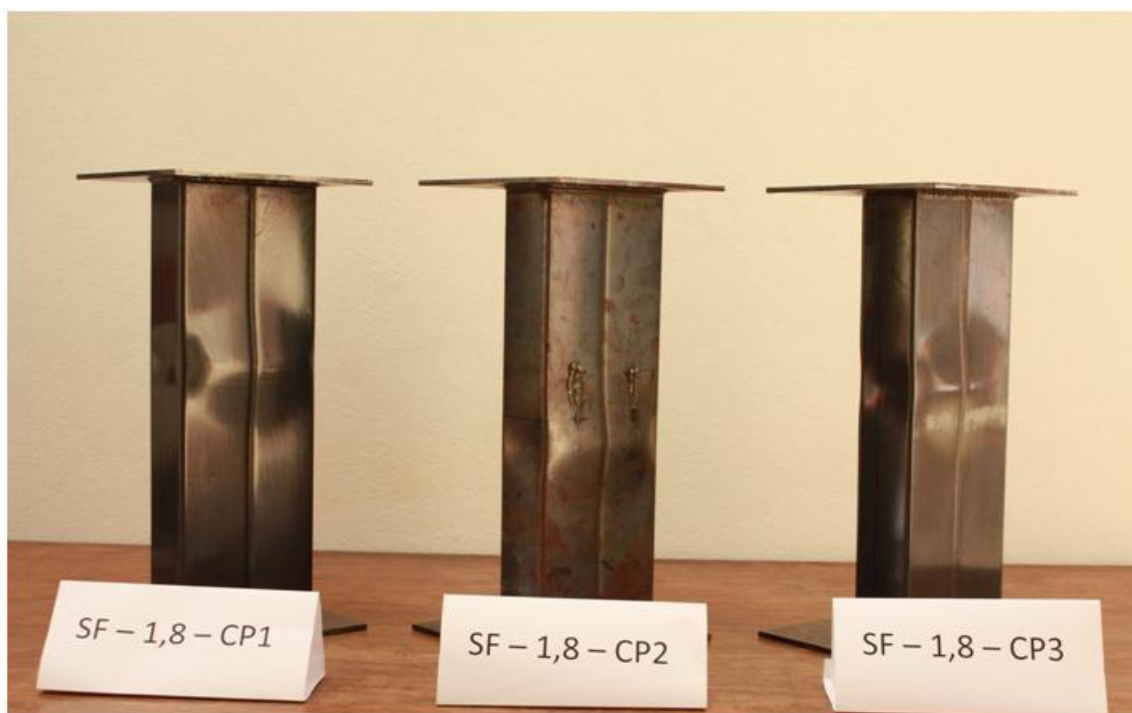


Figura 3.18: Fotos dos protótipos da série SF-1,8 após realização dos ensaios.

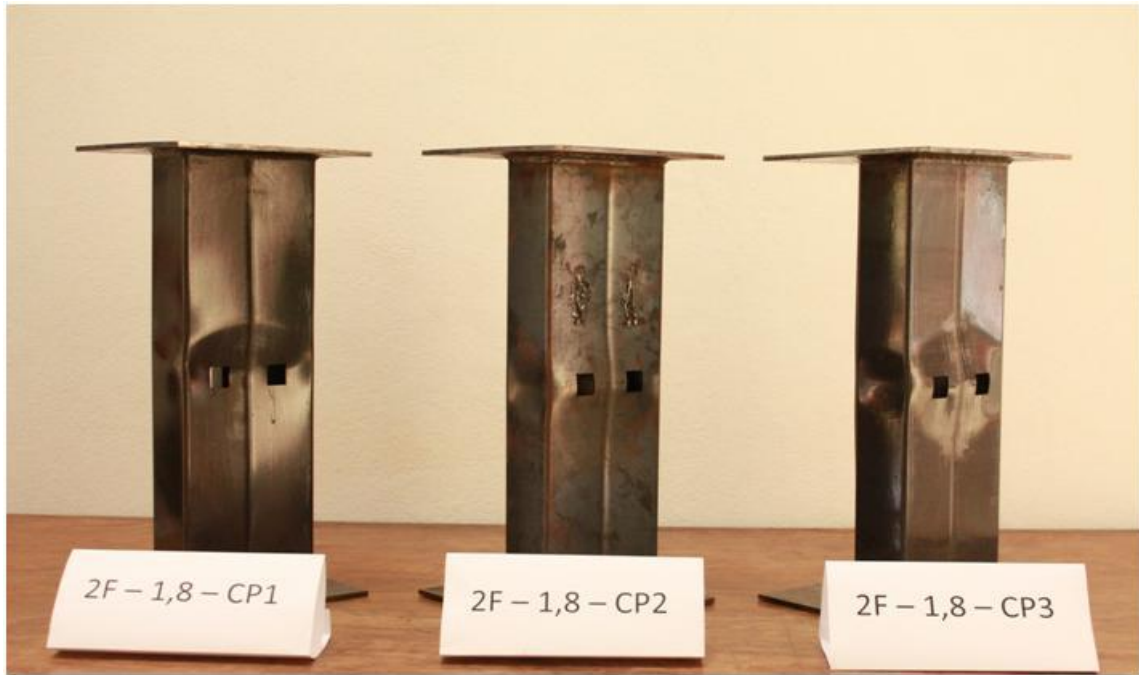


Figura 3.19: Fotos dos protótipos da série 2F-1,8 após realização dos ensaios.

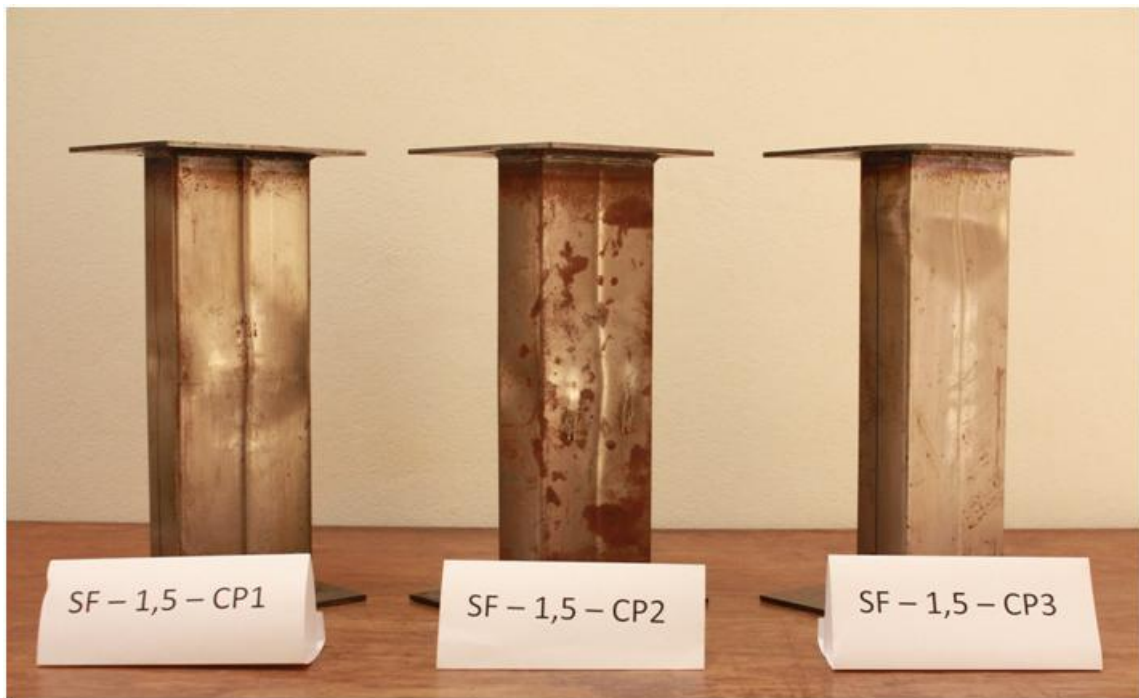


Figura 3.20: Fotos dos protótipos da série SF-1,5 após realização dos ensaios.

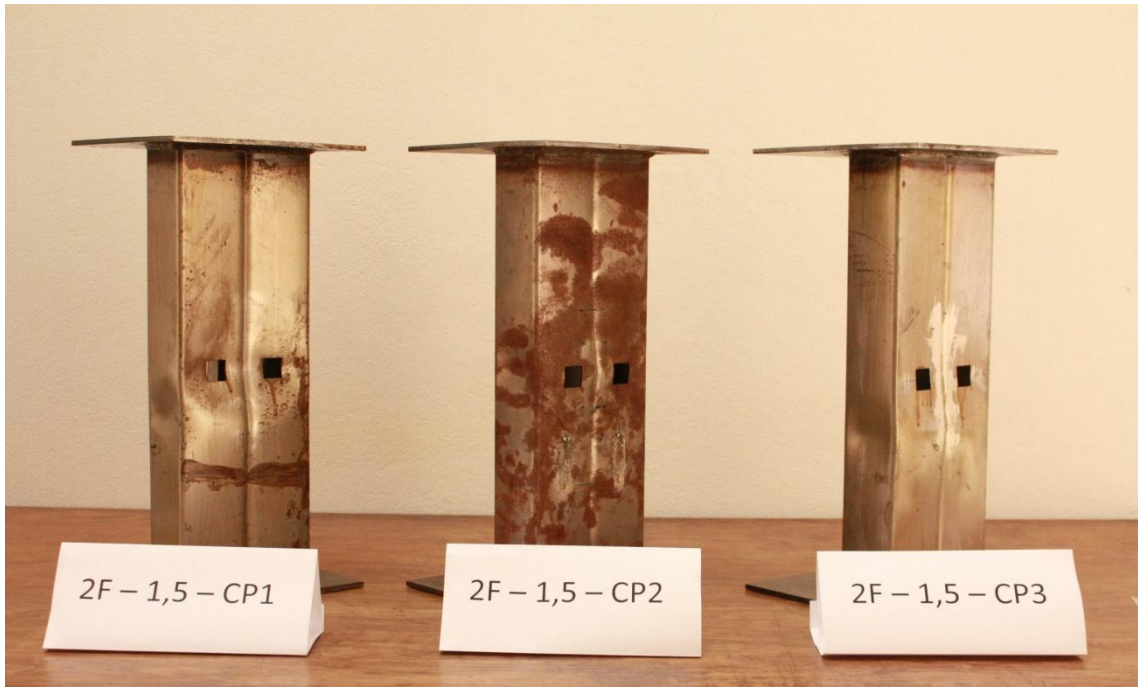


Figura 3.21: Fotos dos protótipos da série 2F-1,5 após realização dos ensaios.



### 4. ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

#### 4.1 Introdução

Este capítulo apresenta a comparação entre os resultados experimentais e numéricos e, a partir destas comparações, realiza-se a avaliação da influência das imperfeições e perfurações no comportamento e na resistência das seções.

Inicialmente, o enrijecedor intermediário é considerado no modelo, e é feita a análise linear para a determinação da carga crítica e do modo de flambagem da seção enrijecida. Em seguida, é realizada a análise da flambagem não linear da coluna. Nesta etapa são consideradas as propriedades elasto-plásticas do aço (através de resultados obtidos e descritos na seção 3.3 e introduzidas imperfeições no modelo).

#### 4.2 Análise da Influência do Enrijecedor Intermediário

No capítulo 3 foi descrita a ocorrência, em função do processo de fabricação dos protótipos, da inclusão de um enrijecedor intermediário na alma. A fim de quantificar a seção com o enrijecedor intermediário foram determinadas a carga crítica e o modo de flambagem dos protótipos. A Figura 4.1 apresenta o modelo de elementos finitos gerado, destacando-se o enrijecedor intermediário e as Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam a

carga crítica obtida para os modelos com espessura de chapa 1,8 mm e 1,5 mm, respectivamente. Os modelos numéricos foram identificados como: SF-1,8 para o modelo sem furo com espessura de 1,8mm; 2F-1,8 modelo com dois furos e espessura de 1,8mm; SF-1,5 para o modelo sem furo com espessura de 1,5mm; 2F-1,5 modelo com dois furos e espessura de 1,5mm.

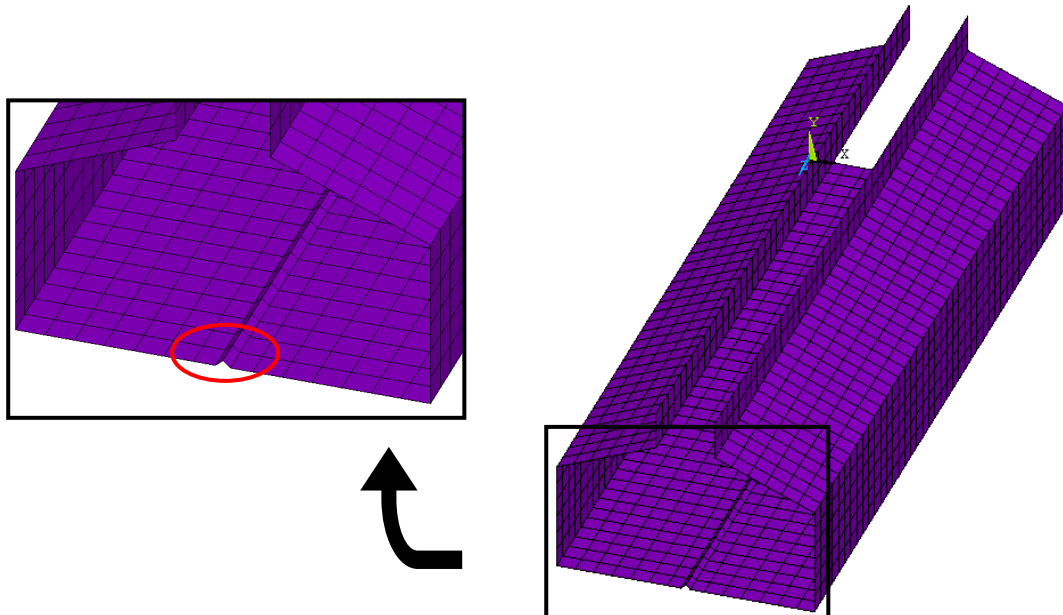


Figura 4.1: Modelo de elementos finitos com o enrijecedor de alma.

Tabela 4.1: Resultados de cargas críticas para os modelos com presença do enrijecedor e espessura 1,8 mm.

Modelo 1	Pcr (kN)
SF-1,8	146,16
2F-1,8	141,06

Tabela 4.2: Resultados de cargas críticas para os modelos com presença do enrijecedor e espessura 1,5 mm.

Modelo 2	Pcr (kN)
SF-1,5	85,85
2F-1,5	83,03

As Figuras 4.2 e 4.3 apresentam os modos de flambagem local desenvolvidos para os modelos com e sem perfurações e espessura de chapa 1,8 mm e 1,5 mm, respectivamente.

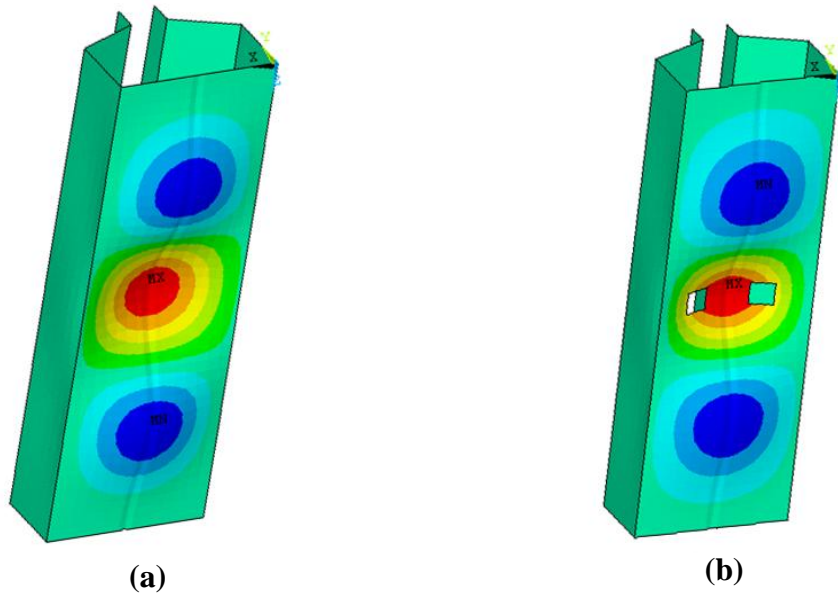


Figura 4.2: Modos de flambagem local para modelos 1: (a) Modelo 1 SF; (b) Modelo 1 2F.

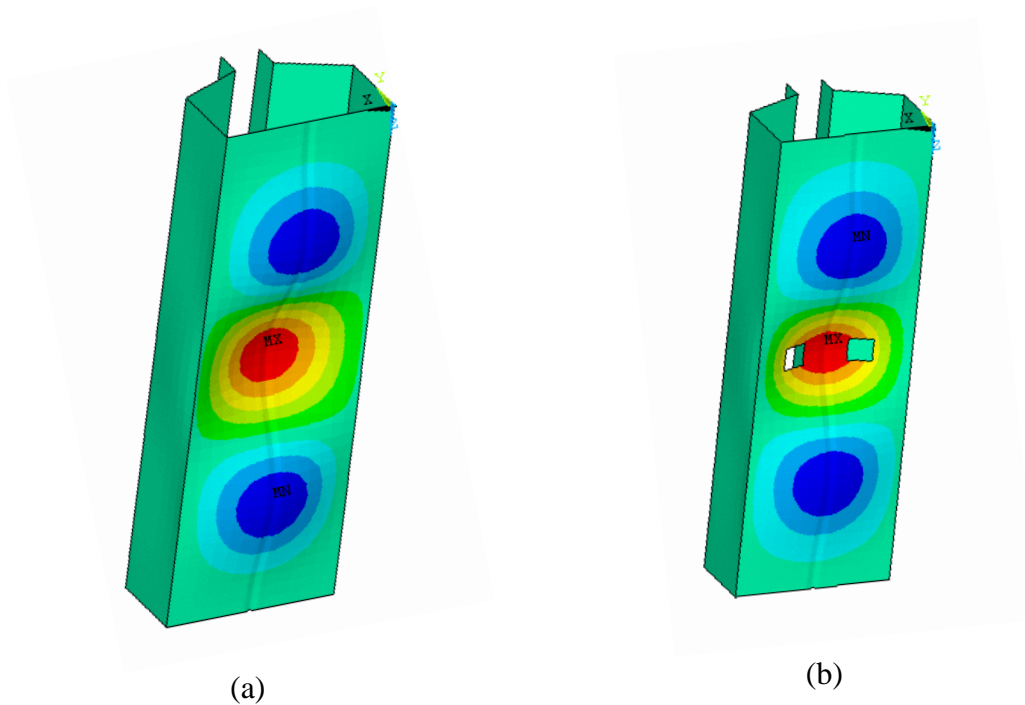


Figura 4.3: Modos de flambagem local para modelos 2: (a) Modelo 2 SF; (b) Modelo 2 2F.

Comparando-se os valores das cargas críticas das colunas com e sem os furos (Tabela 4.3 e 4.4) observa-se boa correlação de resultados para os modelos em negrito. Observa-se que as cargas críticas dos modelos experimentais e numéricos para os modelos com e sem furo são muito próximas. A existência do furo considerado neste trabalho reduz muito pouco a carga crítica das colunas com perfurações, assim pequenas imperfeições nos modelos podem levar, por exemplo, a coluna sem perfurações (Modelo 1) ter valores mais baixos de carga crítica em relação a perfurada, o que pode ser observado nos valores das Tabelas a seguir. Os valores das cargas crítica numéricas estão maiores que os experimentais, o que se deve a imperfeições no modelo.

Tabela 4.3: Comparação dos valores das cargas críticas experimentais e numéricas para o Modelo 1.

<b>Modelo 1</b>	<b>Pcr<sub>exp</sub> (kN) experimental</b>	<b>Pcr<sub>num</sub> (kN) numérico</b>	<b><u>Pcr<sub>num</sub></u> Pcr<sub>exp</sub></b>
SF-1,8-CP1	105,0	143	1,36
<b>SF-1,8-CP2</b>	<b>121</b>		<b>1,18</b>
<b>SF-1,8-CP3</b>	<b>128,2</b>		<b>1,12</b>
<b>2F-1,8-CP1</b>	<b>126,7</b>	137	<b>1,08</b>
<b>2F-1,8-CP2</b>	<b>128,9</b>		<b>1,06</b>
2F-1,8-CP3	86,16		1,59

Tabela 4.4: Comparação dos valores das cargas críticas experimentais e numéricas para o Modelo 2.

<b>Modelo 2</b>	<b>Pcr<sub>exp</sub> (kN) experimental</b>	<b>Pcr<sub>num</sub> (kN) numérico</b>	<b><u>Pcr<sub>num</sub></u> Pcr<sub>exp</sub></b>
<b>SF-1,5-CP1</b>	<b>83,28</b>	82,7	<b>0,99</b>
<b>SF-1,5-CP2</b>	<b>79,77</b>		<b>1,04</b>
SF-1,5-CP3	51,04		1,62
<b>2F-1,5-CP1</b>	<b>77,19</b>	79,5	<b>1,03</b>
2F-1,5-CP2	60,11		1,32
<b>2F-1,5-CP3</b>	<b>77,07</b>		<b>1,03</b>

### **4.3 Análise Não-linear dos Protótipos Ensaiaados**

Um aspecto importante quanto à análise numérica não-linear de perfis de aço formados a frio, é o relativo às imperfeições geométricas iniciais. Diferentes panoramas podem alterar significativamente a resposta dos modelos. Conforme apresentado no capítulo 3, o levantamento das imperfeições não detectou valores significativos. Desta forma, a introdução das imperfeições no modelo foi realizada através da alteração da geometria a partir dos deslocamentos obtidos na análise de flambagem linear realizada anteriormente e descrita no item 4.2. O fator de escala das imperfeições foi definido pela ordem de grandeza dos valores medidos.

As condições de contorno e carregamento adotados seguem os mesmos critérios definidos no capítulo 2. Considerou-se a não-linearidade geométrica e aplicou-se uma carga superior à carga crítica, a fim de que se possa observar os efeitos do escoamento no comportamento dos protótipos.

As propriedades físicas do aço foram consideradas de acordo com os resultados obtidos no ensaio de caracterização do aço conforme descrito Capítulo 3, e introduzidas a partir da aproximação do diagrama tensão x deformação por um diagrama bilinear.

A fim de se obter a trajetória de equilíbrio da coluna, foi empregado o método do Comprimento de Arco. O critério de parada adotado foi a limitação do deslocamento horizontal do nó central da alma em 10 mm, deslocamento suficiente (conforme observado em resultados experimentais, item 3.6.2) a fim de garantir a obtenção do colapso do modelo antes de atingir a interrupção da solução.

Adotando-se os procedimentos descritos, foram feitas análises não-lineares das seções em estudo e seus resultados foram comparados aos resultados experimentais, conforme apresentado a seguir.

### **4.4 Comparação dos Resultados Numéricos e Experimentais**

Os resultados numéricos e experimentais serão comparados graficamente, sendo os dados numéricos apresentados nestes gráficos capturados nos nós correspondentes à posição dos transdutores de deslocamentos ou dos extensômetros nos protótipos ensaiados.

Ressalta-se que, neste capítulo, assim como no capítulo 3, é apresentado apenas um protótipo de cada série ensaiada. Os resultados experimentais para os demais protótipos são apresentados no Apêndice C.

a) Modelo 1: Coluna sem perfurações e chapa de 1,8 mm de espessura (SF-1,8)

Na Figura 4.4 são apresentadas as curvas carga x deslocamento horizontal da alma obtidas experimentalmente e numericamente. Pode-se observar que o aspecto das curvas obtidas numérica e experimentalmente é semelhante, e que a carga crítica de flambagem local obtida na análise numérica para este protótipo é de 143 kN, enquanto a carga crítica experimental média (SF-1,8-CP2 e SF-1,8-CP3) é de 124,63 kN.

Quanto ao comportamento pós-crítico, observa-se que a análise numérica leva a resultados superiores aos observados experimentalmente.

Na Figura 4.5 tem-se os valores da amplitude,  $A$ , ao longo do comprimento do perfil,  $y$ , caracterizando a evolução da semi-onda senoidal em função do carregamento aplicado. Observa-se que as amplitudes obtidas experimentalmente são superiores às obtidas via elementos finitos.

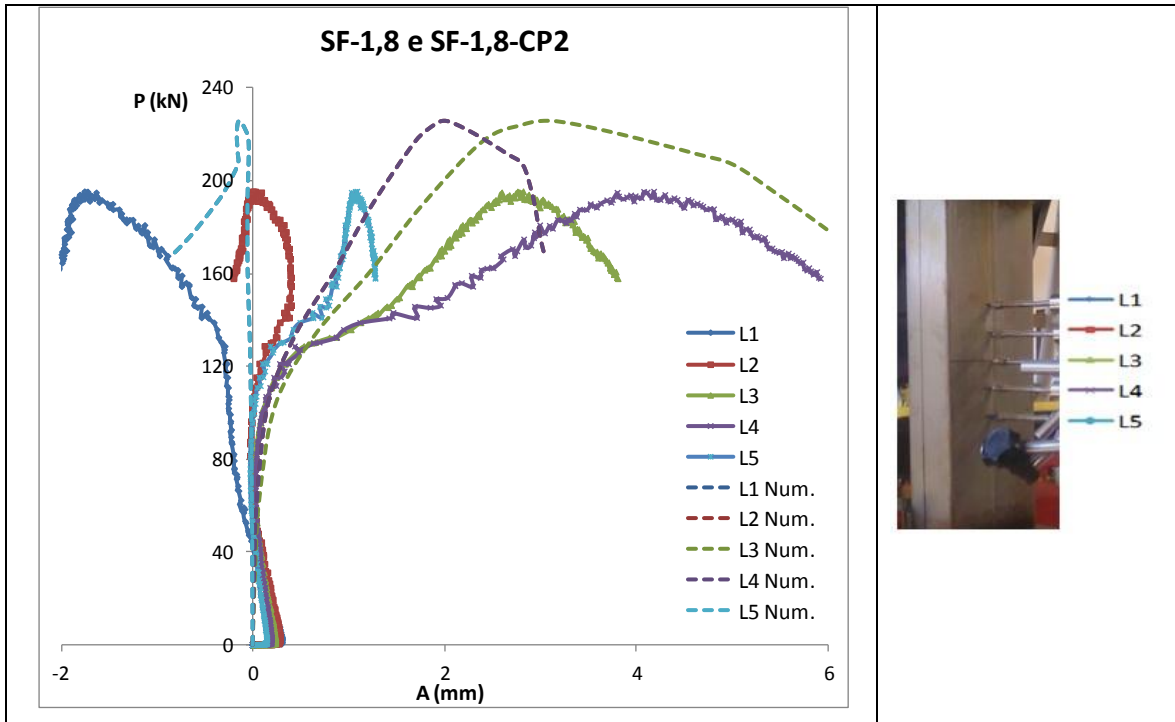


Figura 4.4: Carregamento versus a amplitude dos deslocamentos para comparação entre o resultado numérico e experimental do ensaio SF-1,8-CP2.

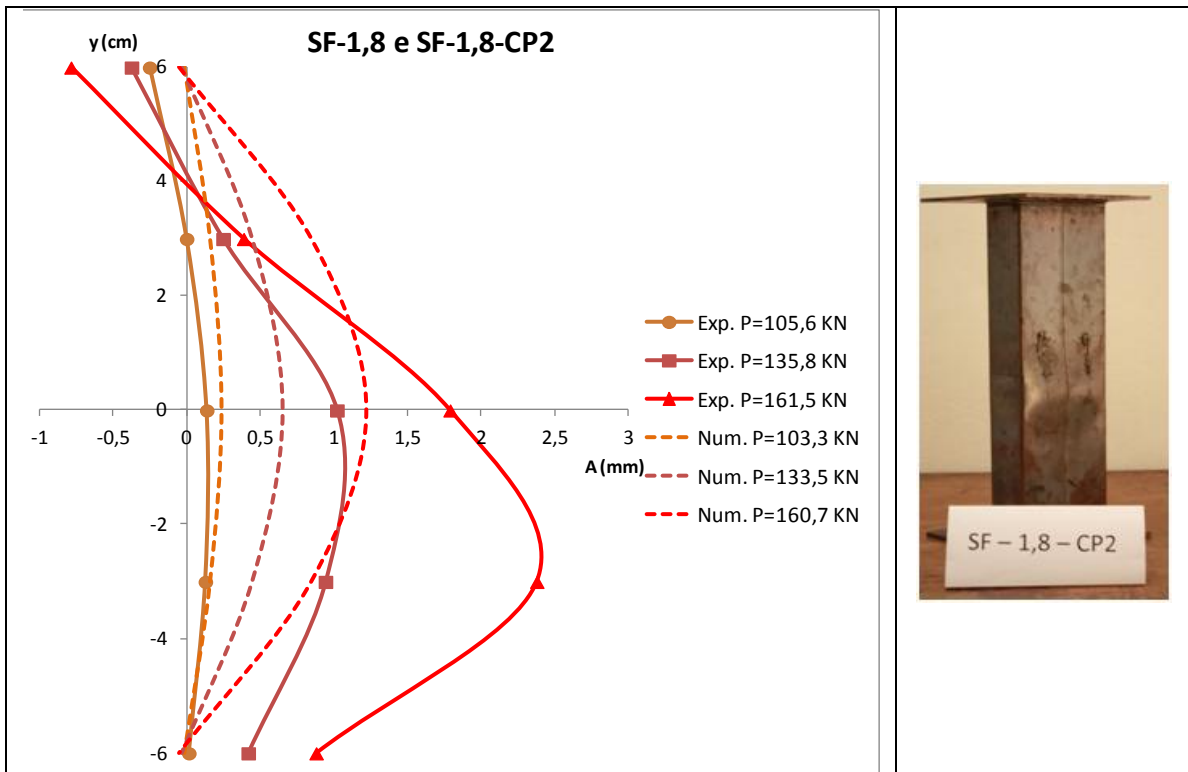


Figura 4.5: Evolução da amplitude da meia-onda senoidal medida para comparação entre o resultado numérico e experimental do ensaio SF-1,8-CP2.

b) Modelo 1: Coluna com perfurações e chapa de 1,8 mm de espessura (2F-1,8)

Na Figura 4.6 são apresentadas as curvas carga x deslocamento horizontal da alma obtidas experimentalmente e numericamente. Pode-se observar que o aspecto das curvas é semelhante, e que a carga crítica elástica de flambagem local obtida na análise numérica para este protótipo é de 137 kN, enquanto a carga crítica elástica experimental média (2F-1,8-CP1 e 2F-1,8-CP2) é de 127,8 kN.

Quanto ao comportamento pós-crítico, observa-se que a análise numérica leva a resultados superiores aos observados experimentalmente. Observa-se, porém, uma melhor correlação entre os resultados numéricos e experimentais em relação à Figura 4.4.

Na Figura 4.7 tem-se os valores da amplitude,  $A$ , ao longo do comprimento do perfil,  $y$ , caracterizando a evolução da semi-onda senoidal em função do carregamento aplicado. Observa-se que as amplitudes obtidas experimentalmente são superiores às obtidas via elementos finitos considerando o mesmo nível de carga.

Neste caso a deformada experimental é semelhante a do modelo numérico (central) com amplitude diferentes, o que caracteriza que as imperfeições introduzidas no modelo numérico são semelhantes, porém inferiores às experimentais.



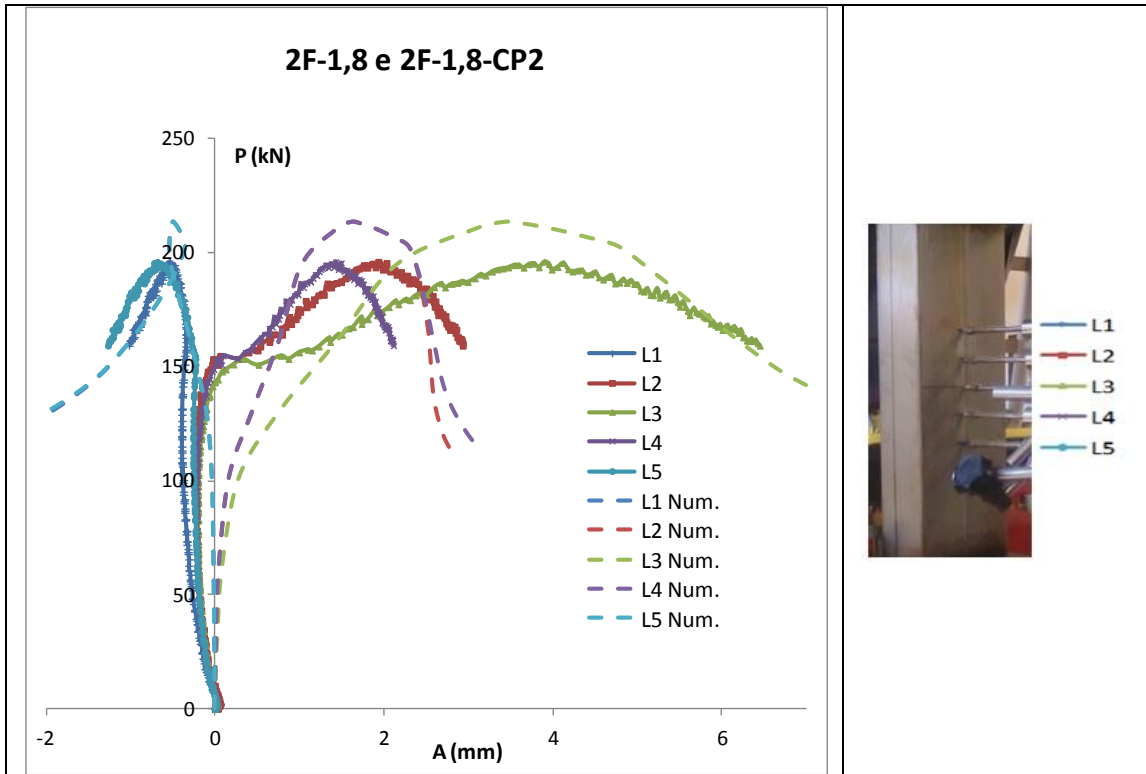


Figura 4.6: Carregamento versus a amplitude dos deslocamentos para comparação entre o resultado numérico e experimental do ensaio 2F-1,8-CP2.

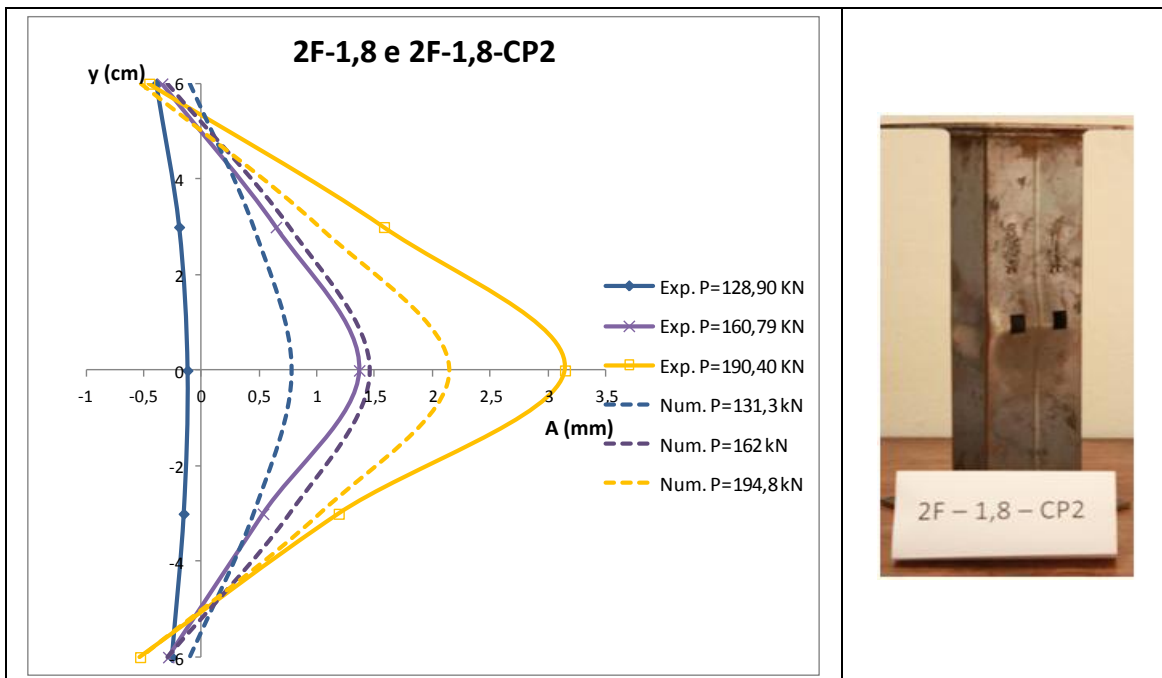


Figura 4.7: Evolução da amplitude da meia-onda senoidal medida para comparação entre o resultado numérico e experimental do ensaio 2F-1,8-CP2.

A Figura 4.8 mostra as deformações medidas nos extensômetros instalados nos protótipos experimentais e as deformações obtidas nos nós correspondentes à posição dos extensômetros no modelo numérico.

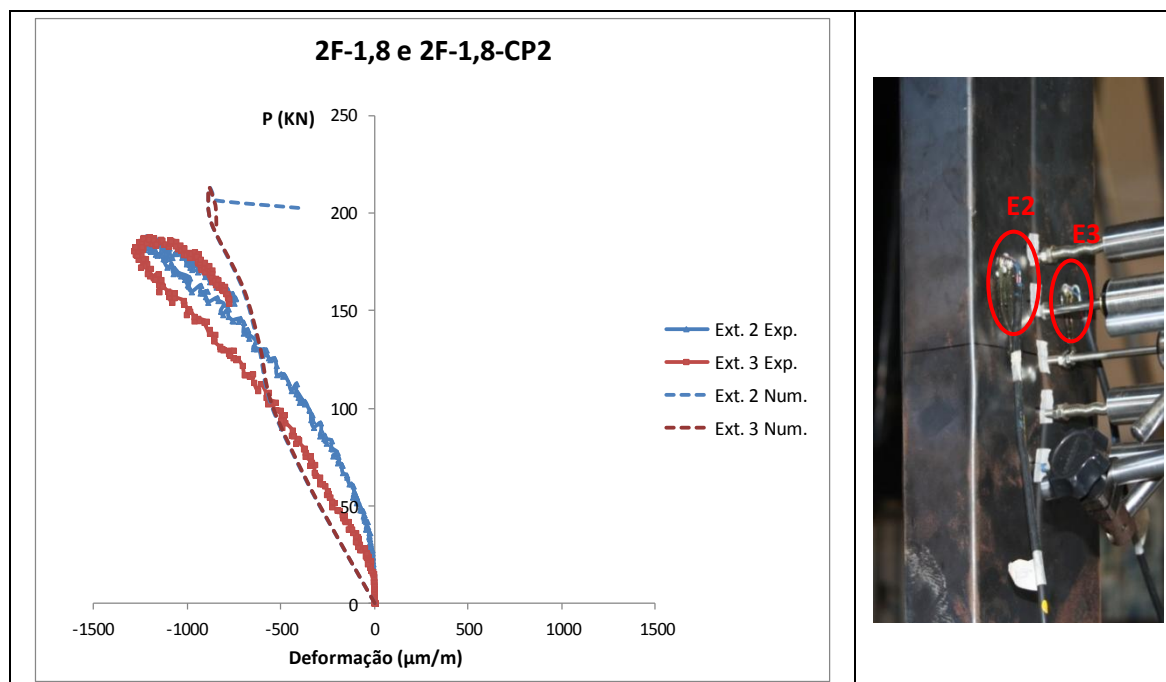


Figura 4.8: Valores das deformações específicas obtidas pelo modelo numérico e medidas pelos EER do ensaio 2F-1,8-CP2.

c) Modelo 2: Coluna sem perfurações e chapa de 1,5 mm de espessura (SF-1,5)

Na Figura 4.9 são apresentadas as curvas carga x deslocamento horizontal da alma obtidas experimentalmente e numericamente. Pode-se observar que o aspecto das curvas é semelhante, e que a carga crítica de flambagem local obtida na análise numérica para este protótipo é de 82,7 kN, enquanto a carga crítica experimental média (SF-1,5-CP1 e SF-1,5-CP2) é de 81,52 kN.

Quanto ao comportamento pós-crítico, observa-se que a análise numérica leva a resultados superiores aos observados experimentalmente. Esta diferença, porém, é inferior àquela observada para a coluna sem furos e espessura 1,8 mm.

Na Figura 4.10 tem-se os valores da amplitude,  $A$ , ao longo do comprimento do perfil,  $y$ , caracterizando a evolução da semi-onda senoidal em função do carregamento

aplicado. Observa-se que as amplitudes obtidas experimentalmente são superiores às obtidas via elementos finitos.

Neste caso a deformada experimental é semelhante a do modelo numérico (central) com amplitude diferentes, o que caracteriza que as imperfeições introduzidas no modelo numérico são semelhantes porém inferiores às experimentais.

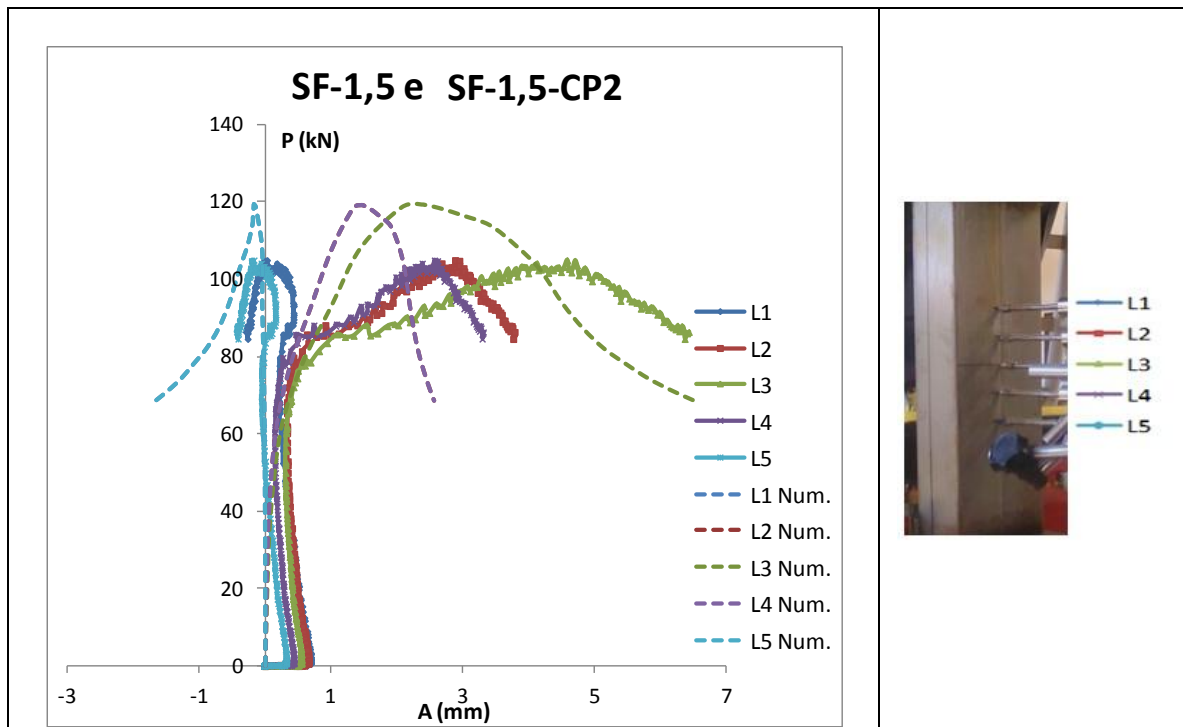


Figura 4.9: Carregamento versus a amplitude dos deslocamentos para comparação entre o resultado numérico e experimental do ensaio SF-1,5-CP2.

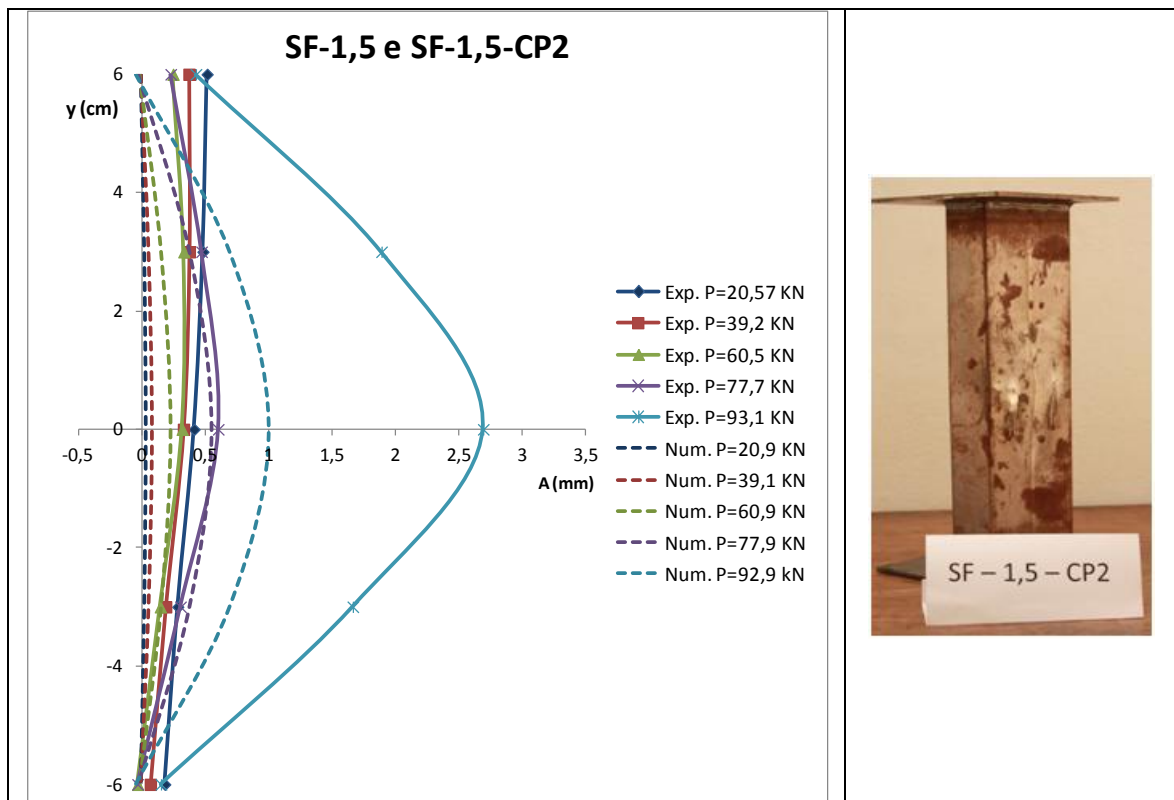


Figura 4.10: Evolução da amplitude da meia-onda senoidal medida para comparação entre o resultado numérico e experimental do ensaio SF-1,5-CP2.

Neste ensaio foram utilizados extensômetros, mas por problemas na aquisição dos dados os resultados foram descartados das análises.

d) Modelo 2: Coluna com perfurações e chapa de 1,5 mm de espessura (2F-1,5)

Na Figura 4.11 são apresentadas as curvas carga x deslocamento horizontal da alma obtidas experimentalmente e numericamente. Pode-se observar que o aspecto das curvas é semelhante, e que a carga crítica de flambagem local obtida na análise numérica para este protótipo é de 79,5 kN, enquanto a carga crítica experimental média (2F-1,5-CP1 e 2F-1,5-CP3) é de 77,13 kN.

Quanto ao comportamento pós-crítico, observa-se que a análise numérica leva a resultados superiores aos observados experimentalmente.

Na Figura 4.12 tem-se os valores da amplitude, A, ao longo do comprimento do perfil, y, caracterizando a evolução da semi-onda senoidal em função do carregamento

aplicado. Observa-se que as amplitudes obtidas experimentalmente são superiores às obtidas via elementos finitos.

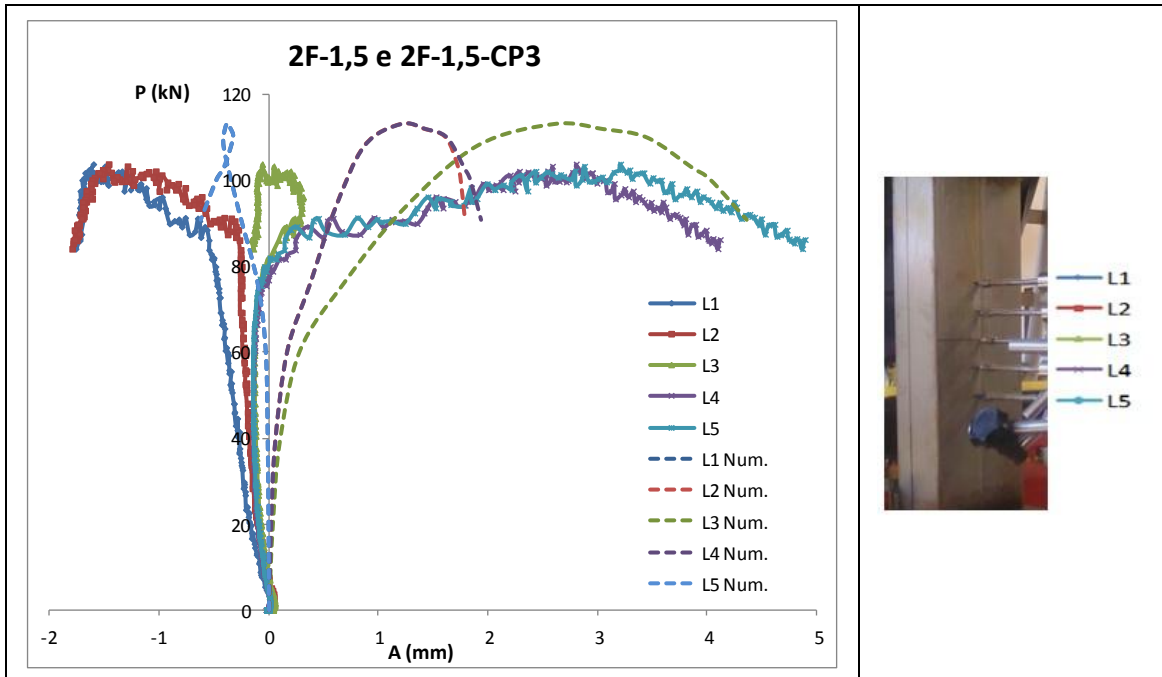


Figura 4.11: Carregamento versus a amplitude dos deslocamentos para comparação entre o resultado numérico e experimental do ensaio 2F-1,5-CP3.

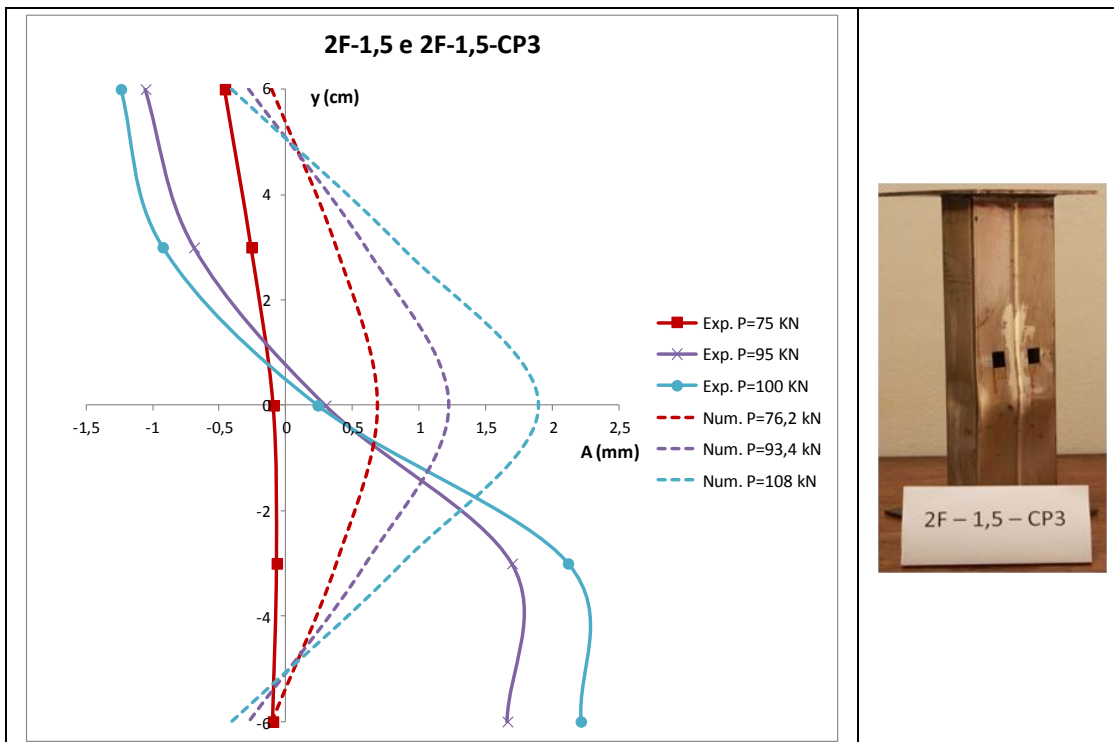


Figura 4.12: Evolução da amplitude da meia-onda senoidal medida para comparação entre o resultado numérico e experimental do ensaio 2F-1,5-CP3.

### 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste trabalho é o estudo do modo de instabilidade por flambagem local em perfis formados a frio de seção tipo rack e a influência de furos no elemento mais esbelto da seção (alma). São empregadas análises numéricas e experimentais para a avaliação deste modo e da influência de perfurações no modo local de placa.

A série de protótipos das colunas apresentou, em função do processo de fabricação, uma dobra ou enrijecedor central na alma da coluna, de forma que o modo de flambagem por definição seria o distorcional. No entanto, as análises indicam que as cargas críticas para o modo local são dominantes.

Os métodos numéricos empregados neste estudo envolveram a Teoria Generalizada de Vigas, com o emprego do software GBTul 1.0 $\beta$ , seguida do MEF através do software ANSYS 11.0.

Diante do estudo realizado, o modelo numérico via MEF pôde ser calibrado inicialmente para colunas sem perfurações, mostrando-se bastante eficiente para representar o comportamento dos perfis. As cargas críticas obtidas em cada método apresentaram boa correlação e os modos observados foram semelhantes, com três meias

ondas senoidais formadas ao longo do comprimento da coluna. Assim, o modelo numérico via elementos finitos foi o utilizado para a análise de colunas perfuradas.

Para a inserção de furos no modelo, novos critérios foram estudados para que este provocasse a maior influência possível no comportamento da coluna quando desenvolvesse o modo local. Mesmo assim, a influência foi verificada e apresentou-se pouca significativa em relação ao comportamento da coluna.

A série de modelos com perfurações foi submetida a análises elástico-lineares de flambagem no ANSYS, que possibilitou a obtenção dos autovalores (cargas críticas,  $P_{cr}$ ) e dos autovetores (modos de instabilidade das colunas), e os resultados foram comparados com os obtidos nos ensaios em laboratório. Comparando-se os valores das cargas críticas das colunas com e sem furos conclui-se que a alteração da carga crítica para esta tipologia de furos é pequena.

A técnica experimental utilizada mostrou-se eficiente. Foi necessário o uso de controle de deslocamentos para obtenção de resultados precisos, além de possibilitar melhor acompanhamento do comportamento da coluna. A aquisição de dados foi precisa e os resultados indicaram a real amplitude dos deslocamentos.

Observou-se em todos os ensaios o desenvolvimento predominante do modo de flambagem local nas colunas, sendo que a plastificação ocorreu na região onde foi desenvolvida a maior amplitude de flambagem.

Comparando-se os valores das cargas críticas das colunas sem os furos observou-se boa correlação de resultados experimentais e numéricos. Observou-se também que as cargas críticas dos modelos experimentais e numéricos para os modelos sem furo são muito próximas, confirmando assim os resultados obtidos através da análise numérica.

A existência de furos, nas dimensões consideradas neste trabalho, reduz pouco a carga crítica das colunas com perfurações em relação aquelas sem perfurações. Isto foi observado tanto nos ensaios experimentais quanto na análise numérica.

Observou-se que as amplitudes obtidas experimentalmente são superiores às obtidas via método dos elementos finitos para um mesmo nível de carga. Em alguns ensaios verificou-se que a deformada, em função das imperfeições geométricas e da proximidade do carregamento aplicado, ficou deslocada em relação ao centro da coluna ensaiada. Em outros casos a deformada obtida experimentalmente é semelhante a do modelo numérico (central) mas com amplitude diferente, o que caracteriza que as imperfeições introduzidas no modelo numérico são semelhantes porém inferiores às do modelo experimental.

As comparações entre o modelo experimental e numérico indicam que pequenas imperfeições nos modelos podem levar, por exemplo, a coluna sem perfurações a ter valores mais baixos de carga crítica que a coluna com perfurações. Em alguns casos os valores das cargas críticas obtidas numericamente estão maiores que os experimentais, o que se deve a imperfeições no modelo.

Como trabalhos futuros pode-se enumerar:

- Análise teórico-experimental e numérica de novas tipologias de furo;
- Análise teórico-experimental e numérica de outros modos de flambagem;
- Análise teórico-experimental e numérica de colunas médias e longas;



## Bibliografia

- [1] ABNT (2010). NBR 14762/2010: Dimensionamento de Estruturas de Aço constituídas por Perfis Formados a Frio – Procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro.
- [2] Águia (2005). Águia Sistemas de Armazenagem Ltda. <http://www.aguiasistemas.com.br> - 12/01/2005.
- [3] AISI (1997). Cold-Formed Steel Design Manual – 1996 Edition. American Iron and Steel Institute, Washington DC.
- [4] ANSYS (2010). User’s manual for revision 11. Swanson Analysis Systems Inc.; Houston, PA; 2010.
- [5] ASTM (1995). E8M-95A-Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials (Metric). American Society for Testing and Materials.
- [6] Camotim D, Bebiano R., Pina P., Silvestre N. (2008). GBTul – Buckling and Vibration Analysis of Thin-Walled Members, DECivil/IST, Technical University of Lisbon (<http://www.civil.ist.utl.pt/gbt>).
- [7] Camotim, D, Dinis, P.B., Silvestre N., “Local/distortional mode interaction in lipped channel steel columns: post-buckling behaviour, strength and DSM design”. In: Proceedings of Fifth International Conference on Thin-Walled Structures (ICTWS), 18-20/6, 2008.
- [8] Dinis, P.B., Silvestre, N., Camotim, D., “Analysis of the local-plate/ distortional mode interaction in cold-formed steel lipped channel columns”. In: Proceedings of Tenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing, B. Topping (ed.), Civil-Comp Press, pp. 371-372, Rome, 30/8-2/9, 2005.

- [9] Dinis, P.B., Camotim, D., “Post-Buckling behaviour of cold-formed steel lipped channel columns affected by distortional/global mode interaction”. In: Proceedings of SSRC 2008 Annual Stability Conference, pp. 405-431, Nashville, 2-5/4, 2008.
- [10] Eurocode 3 (1992). Design of Steel Structures. Draft issue, Nov.
- [11] Faria, V. O. Análise da influência dos modos locais na carga última de perfis leves, Relatório de pesquisa. Escola de Minas/UFOP- PROBIC/FAPEMIG, 2011 (em andamento).
- [12] FEM (1997). Recommendation for the Design of Steel Pallet Racking and Shelving, Section X of the Federation Europeenne de la Manutention.
- [13] Freitas, Arlene M.S. ; FREITAS, M. S. R. ; Souza, Flavio T. . Theoretical Analysis of Perforated rack Columns. SDSS Rio 2010 International Colloquium Stability and Ductility of Steel Structures. Rio de Janeiro: UFRJ, 2010. v. 2. p. 953-960.
- [14] 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.
- [15] Godley M.H.R. “The behaviour of drive-in storage structures”, Proc. of 16th international specialty conference on cold-formed steel structures. Orlando, 340-352, 2002.
- [16] Isma (2004). Isma S/A Indústria Silveira de Móveis de Aço. – <http://www.isma.com.br> - 12/11/2004.
- [17] Moen, C. D., Schaffer, B. W. “Direct Strength Design of Cold Formed Steel Members with Perforations”. Research Report. The John Hopkins University, 2008.
- [18] Oliveira, A.M. (2000). Análise Teórico-Experimental de Sistemas Industriais de Armazenagem (“Racks”). Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto.

- [19] Ribeiro, F. S. (2006). Análise Teórico-Experimental de Colunas Curtas em Perfis Formados a Frio de Seção Transversal tipo Rack. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo.
- [20] RMI (1997). Specification for the Design, Testing, and Utilization of Industrial Steel Storage Racks. Racks Manufactures Institute, Charlotte, North Carolina.
- [21] Santos, E. S. (2010). Análise da Estabilidade e da Resistência de Perfis de Aço Formados a Frio sujeitos a Interação entre os Modos de Flambagem Local, Distorcional e Global. Dissertação de Mestrado. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [22] Sarawit, A.T.; Peköz, T. (2003). Cold-formed Steel Frame and Beam-column Design. Research Report N° 03-03, Cornell University, Ithaca, NY.
- [23] Sarmanho, A. M. C. (1991). Estudo do Comportamento Pós-Crítico de Paredes Esbeltas de Perfis Metálicos. Dissertação de Mestrado. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [24] Schafer, B. W. (2010). CUFSM 4.04 Software. User Manual and Tutorials, [www.ce.jhu.edu/bschafer/cufsm](http://www.ce.jhu.edu/bschafer/cufsm).
- [25] Schaffer, B., Ádáni, 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.
- [26] Schafer B., Moen C. (2008). Direct Strength Design for Cold-Formed Steel Members with Perforations. Progress Report n° 5, Johns Hopkins Engineering, Department of Civil Engineering.
- [27] Schafer, B. W., Li, Z., Moen, C. D. (2010). Computational Modeling of Cold-Formed Steel. Thin-Walled Structures, Vol. 48, p. 725-878.
- [28] Schardt, R., 1989, Verallgemeinerte Technische Biegetheorie, Germany, Springer-Verlang.

- [29] Silvestre, N., Camotim, D., Dinis, P.B., “DSM design of fixed lipped channel columns against local-plate/distortional interactive buckling”. In: Proceedings of the 6th International Conference on Steel & Aluminium Structures (ICSAS’07), R. Beale (ed.), pp. 752-759, Oxford, 24-27/7, 2007.
- [30] Silvestre, N., Camotim, D., Dinis, P.B., “Direct strength prediction of lipped channel columns experiencing local-plate/distortional interaction”, *Advanced Steel Construction - an International Journal*, 2008.
- [31] Silvestre N., Camotim D., Dinis P.B., “Direct strength approach to the design of lipped channel steel columns against local/distortional interactive buckling”, *Advanced Steel Construction - an International Journal*, 2008.
- [32] Silvestre, N., Camotim, D., Dinis, P.B., “DSM Design Against Local/Distortional Interactive buckling Fixed Rack-Section Columns Experiencing Multiple Wave Mode Interaction”. *EUROSTEEL*, Graz, Austria, 3-5/9, 2008.
- [33] Sivakumaran, K. S., Abdel-Rahman, N. (1998). A Finite Element Analysis Model for the Behavior of Cold-formed Steel Members. *Thin-Walled Structures*, Vol. 31, p. 305-324.
- [34] Souza, F. T. (2005). *Análise Teórico-Experimental de Sistemas Aporticados com Elementos Perfurados em Perfis Formados a Frio – Racks*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto.
- [35] Souza, F. T. (2011). *Análise Teórico-Experimental dos Modos de Flambagem em Seções do Tipo Rack com Perfurações Submetidos à Compressão Centrada*. Qualificação ao Doutorado. Universidade Federal de Ouro Preto.
- [36] Vasquez, E. G. (1998). *Estabilidade e Resistência de Perfis de Chapa Dobrada Afetados pelo Modo Distorcional*. Dissertação de Mestrado. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

- [37] Zandonini, R., Rasmussen, K.J.R., Eccher, G. (2007). Isoparametric spline finite strip analysis of perforated thin-walled steel structures. PhD Thesis, The University of Sydney, School of Civil Engineering, Sydney, Australia.
- [38] Zienkiewicz, O.C., 1971 -"The finite element method in engineering science"- McGraw-Hill, 2a ed.

## **APÊNDICES E ANEXOS**

## **APÊNDICE A**

## APÊNDICE A – ESPECIFICAÇÕES DOS MODELOS FABRICADOS PARA O PROGRAMA EXPERIMENTAL

**Dados:**

**bw:** Largura da Alma do perfil rack;

**tw:** Espessura da Chapa;

**L:** Comprimento do perfil rack;

Medidas em mm; Ângulos em graus;

➤ ESPECIFICAÇÃO DAS **CHAPAS DE AÇO** A SEREM SOLDADAS NOS EXTREMOS DOS PERFIS:

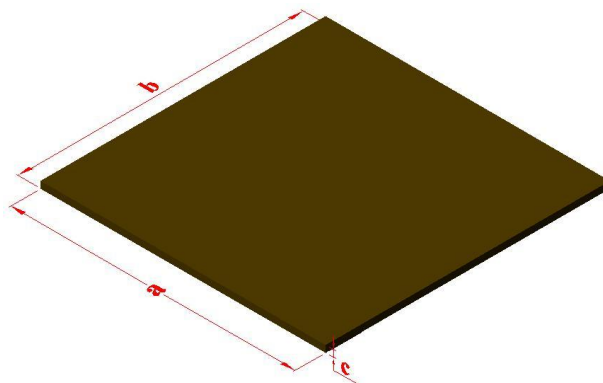


Tabela: Dimensões da chapa.

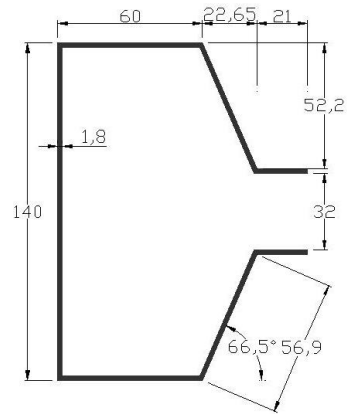
a (mm)	b (mm)	c (mm)	Observação
200	200	4,75	2 chapas por perfil



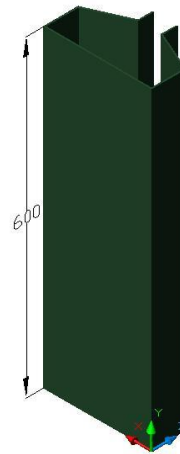
## MODELO 1

- **Sem Furo (SF-1,8)** para caracterização do aço

**$bw = 140\text{mm}$  ;  $tw = 1,8\text{mm}$  ;  $L = 600\text{mm}$**



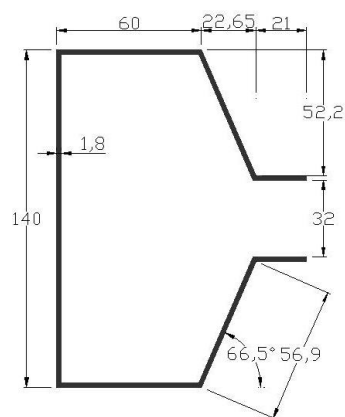
**Seção transversal**



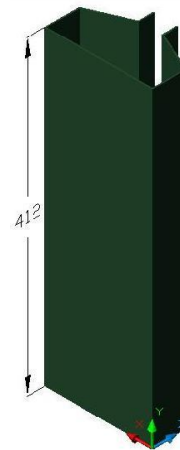
**Vista 3D**

- **SF-1,8**

**$bw = 140\text{mm}$  ;  $tw = 1,8\text{mm}$  ;  $L = 412\text{mm}$**



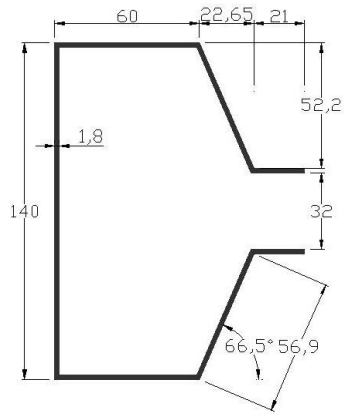
**Seção transversal**



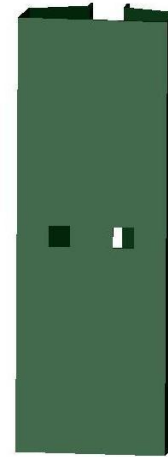
**Vista 3D**

➤ **2F-1,8**

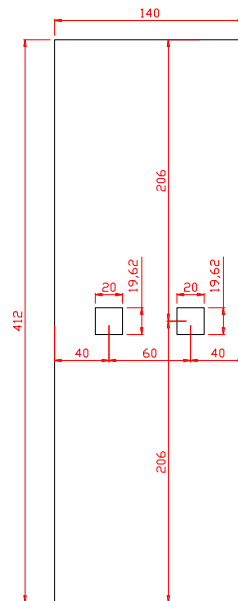
**bw = 140mm ; tw = 1,8mm ; L = 412mm**



**Seção transversal**



**Vista 3D**

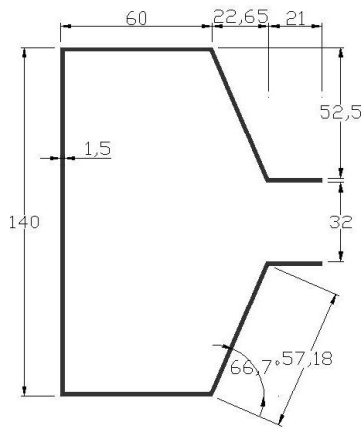


**Perfuração e dimensões da Alma do perfil rack**

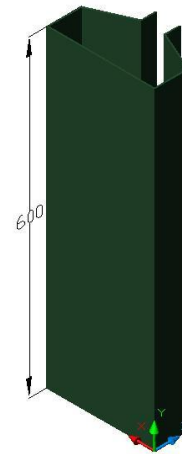
## MODELO 2

- **Sem Furo (SF-1,5)** para caracterização do aço

**$bw = 140\text{mm}$  ;  $tw = 1,5\text{mm}$  ;  $L = 600\text{mm}$**



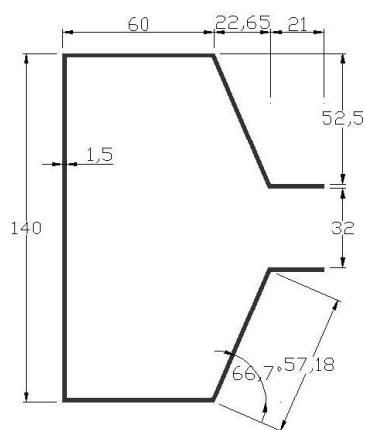
**Seção transversal**



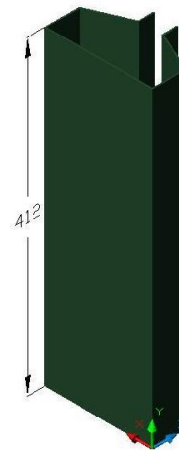
**Vista 3D**

- **SF-1,5**

**$bw = 140\text{mm}$  ;  $tw = 1,5\text{mm}$  ;  $L = 412\text{mm}$**



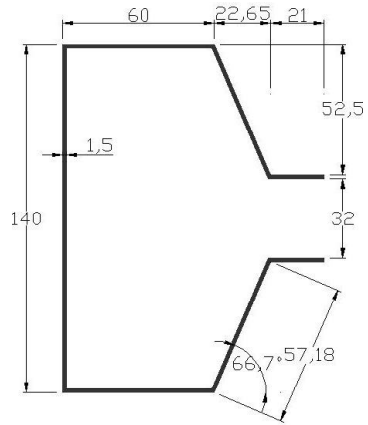
**Seção transversal**



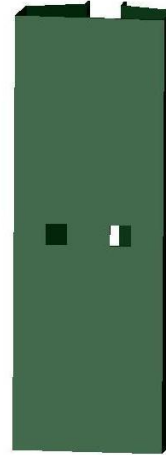
**Vista 3D**

➤ **2F-1,5**

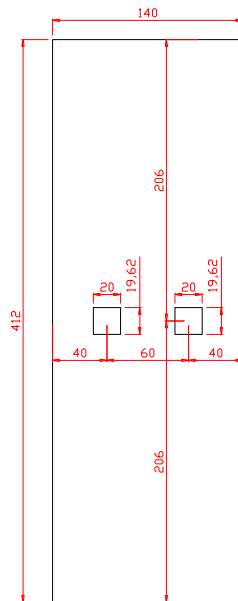
**bw = 140mm ; tw = 1,5mm ; L = 412mm**



**Seção transversal**



**Vista 3D**



**Perfuração e dimensões da Alma do perfil rack**

## **APÉNDICE B**

## APÊNDICE B – GRÁFICOS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

### ➤ SF-1,8-CP1

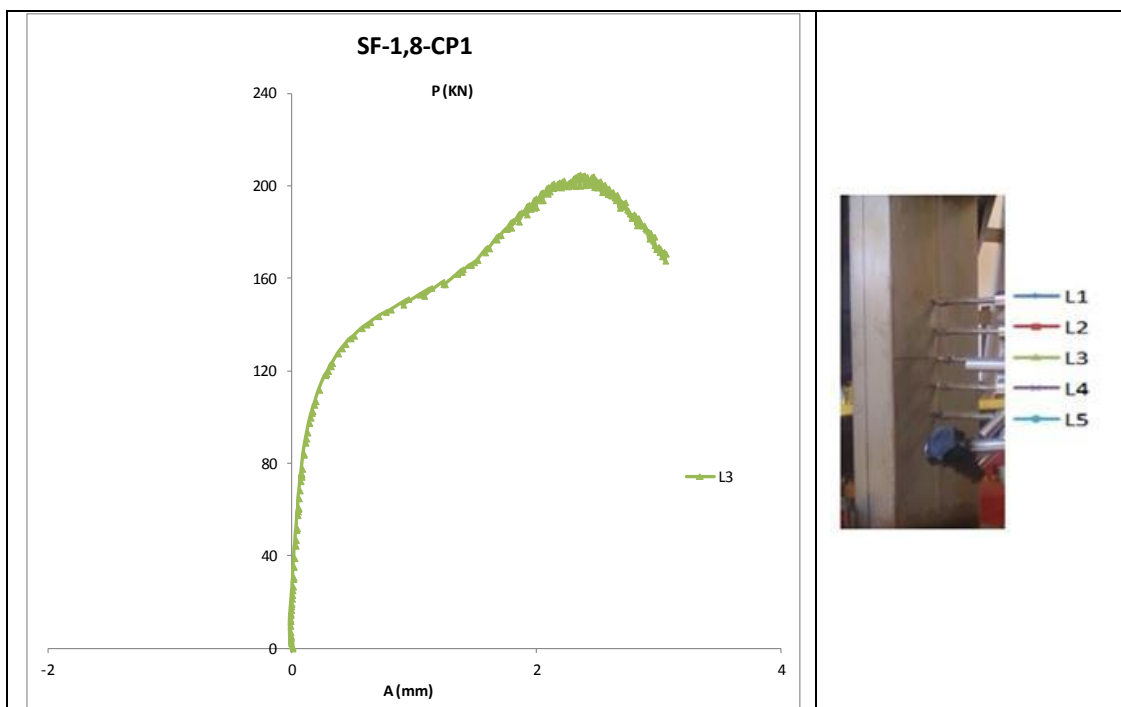


Figura: Carregamento versus a amplitude dos deslocamentos para o ensaio SF-1,8-CP1.

### ➤ SF-1,8-CP3

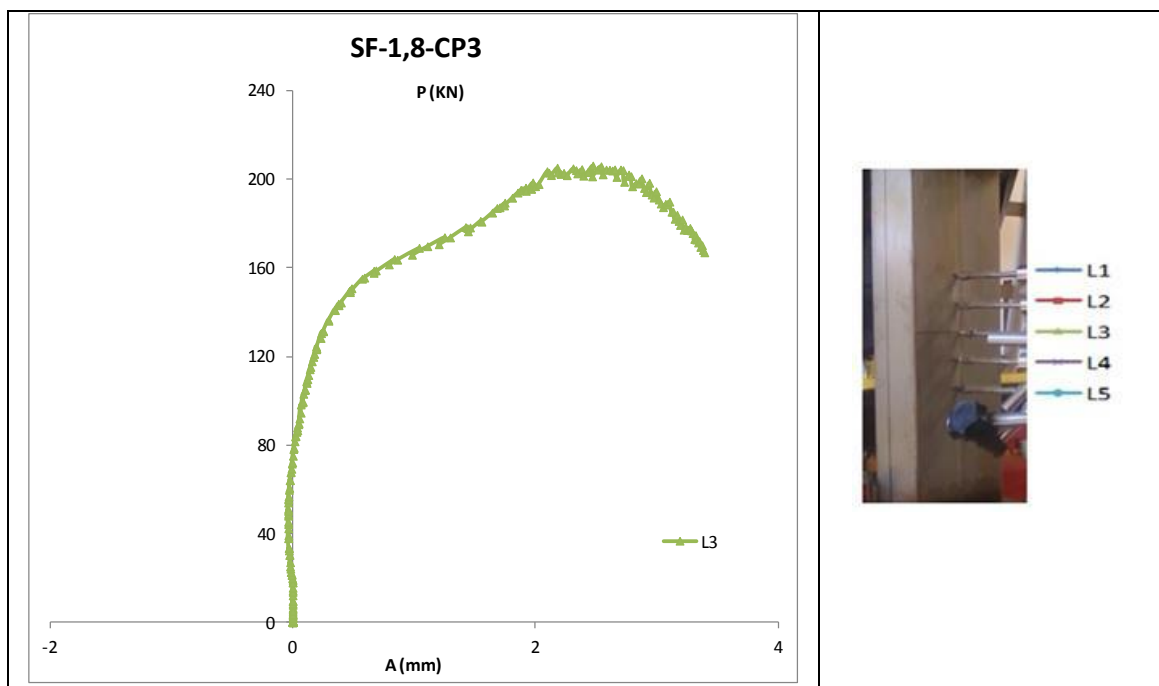


Figura: Carregamento versus a amplitude dos deslocamentos para o ensaio SF-1,8-CP3.

➤ SF-1,5-CP1

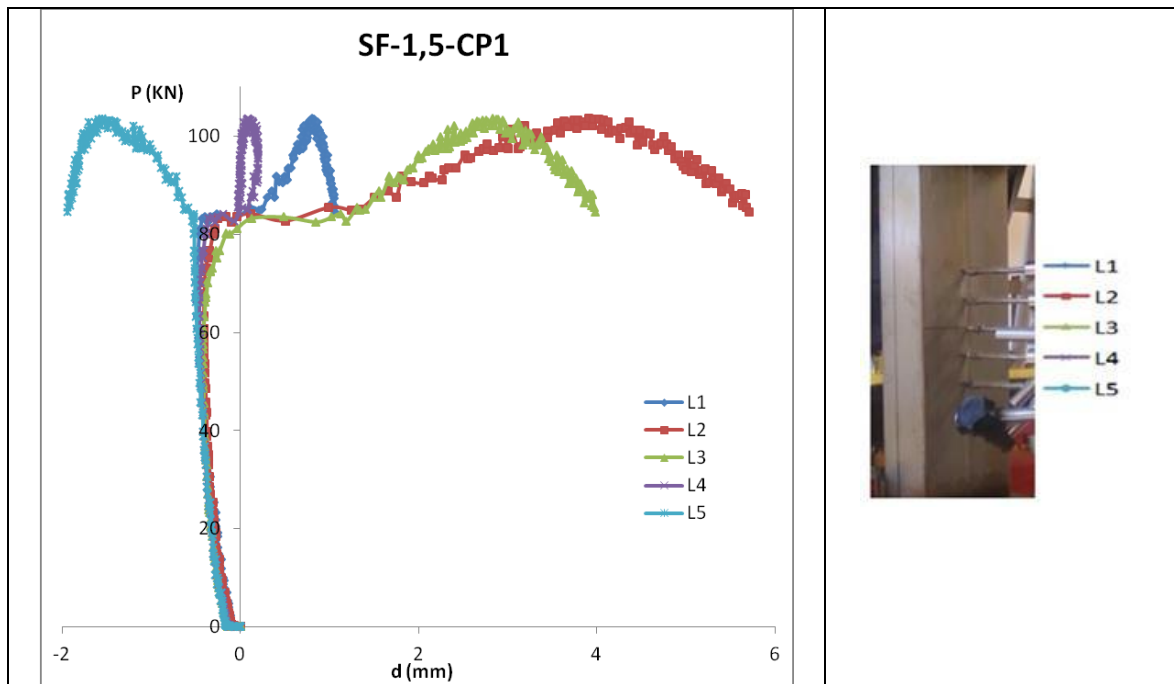


Figura: Carregamento versus a amplitude dos deslocamentos para o ensaio SF-1,5-CP1.

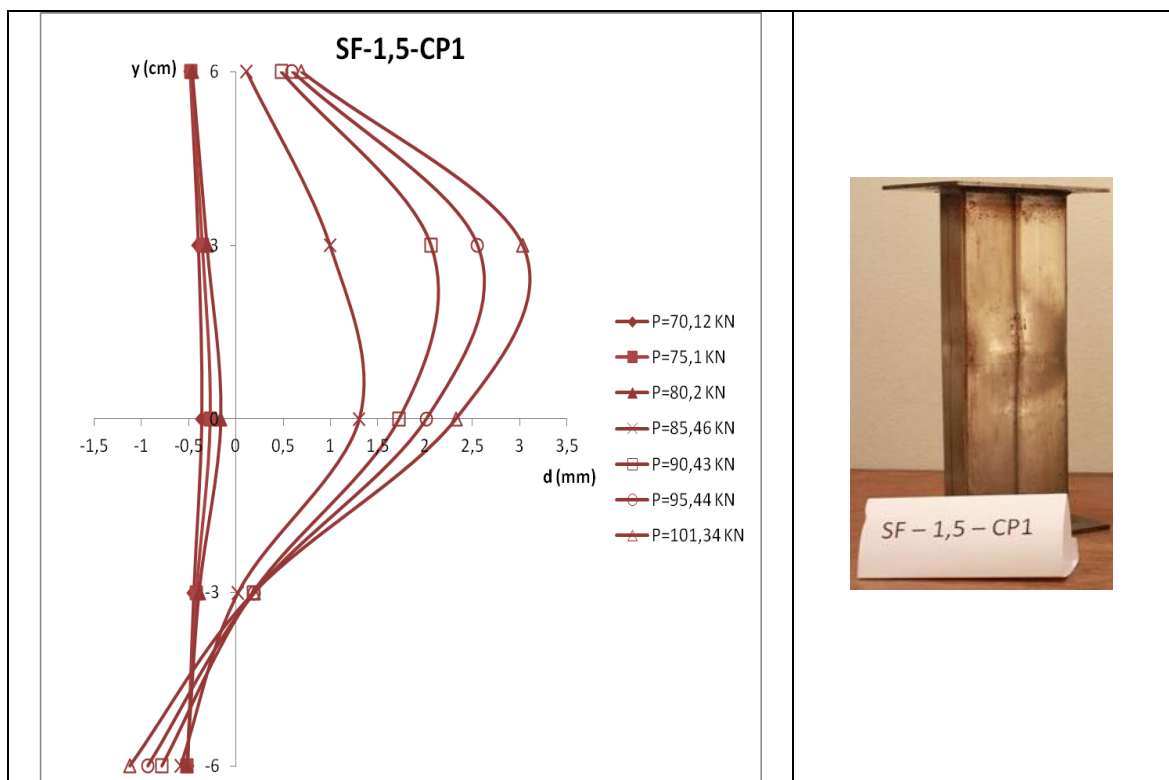


Figura: Evolução da amplitude da meia-onda senoidal medida para o ensaio SF-1,5-CP1.

➤ SF-1,5-CP3

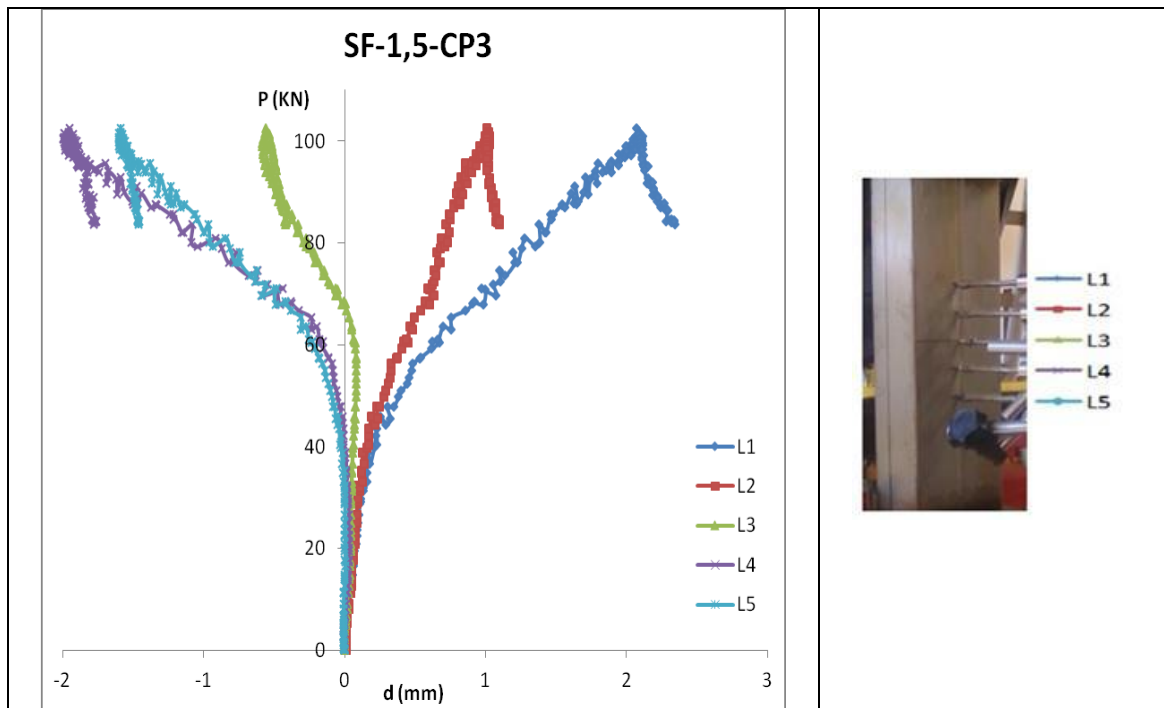


Figura: Carregamento versus a amplitude dos deslocamentos para o ensaio SF-1,5-CP3.

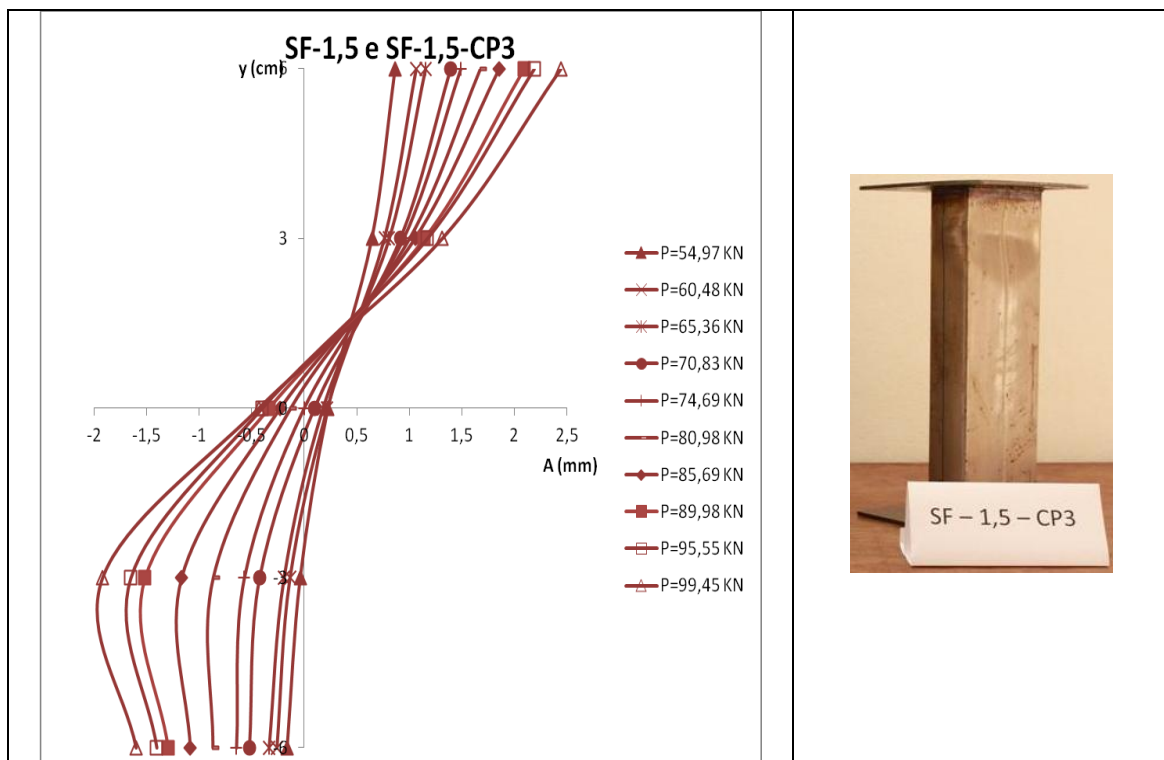


Figura: Evolução da amplitude da meia-onda senoidal medida para o ensaio SF-1,5-CP3.



➤ **2F-1,8-CP1**

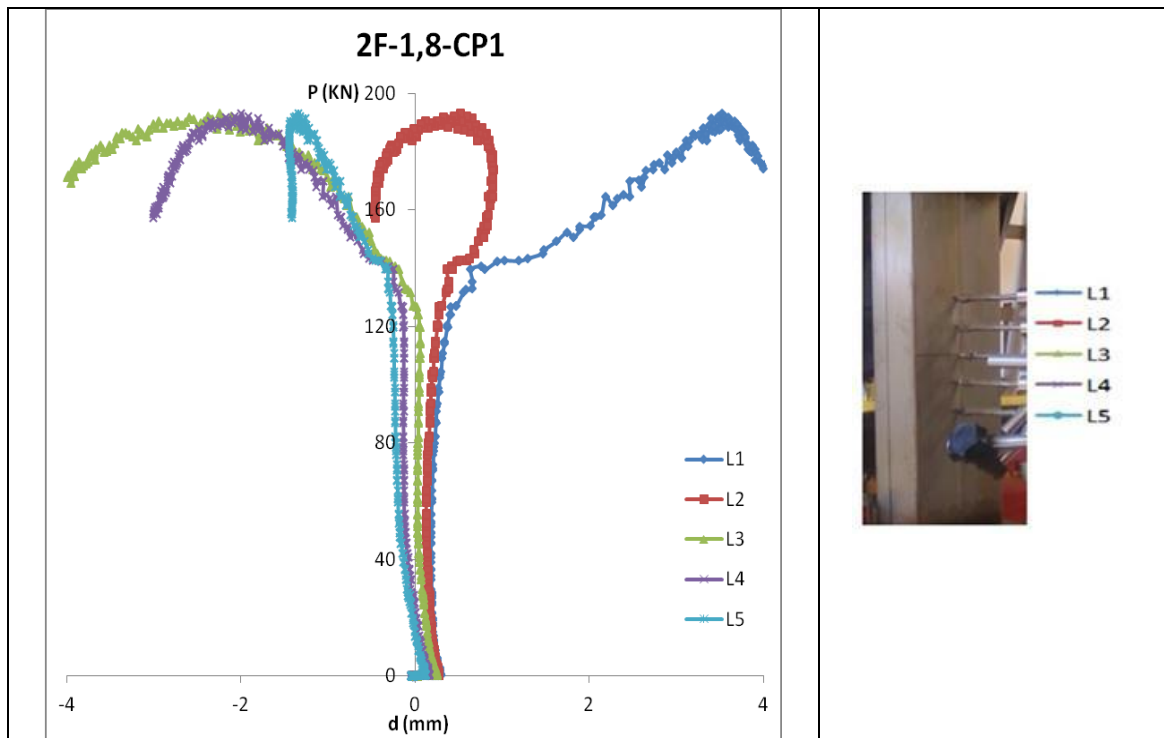


Figura: Carregamento versus a amplitude dos deslocamentos para o ensaio 2F-1,8-CP1.

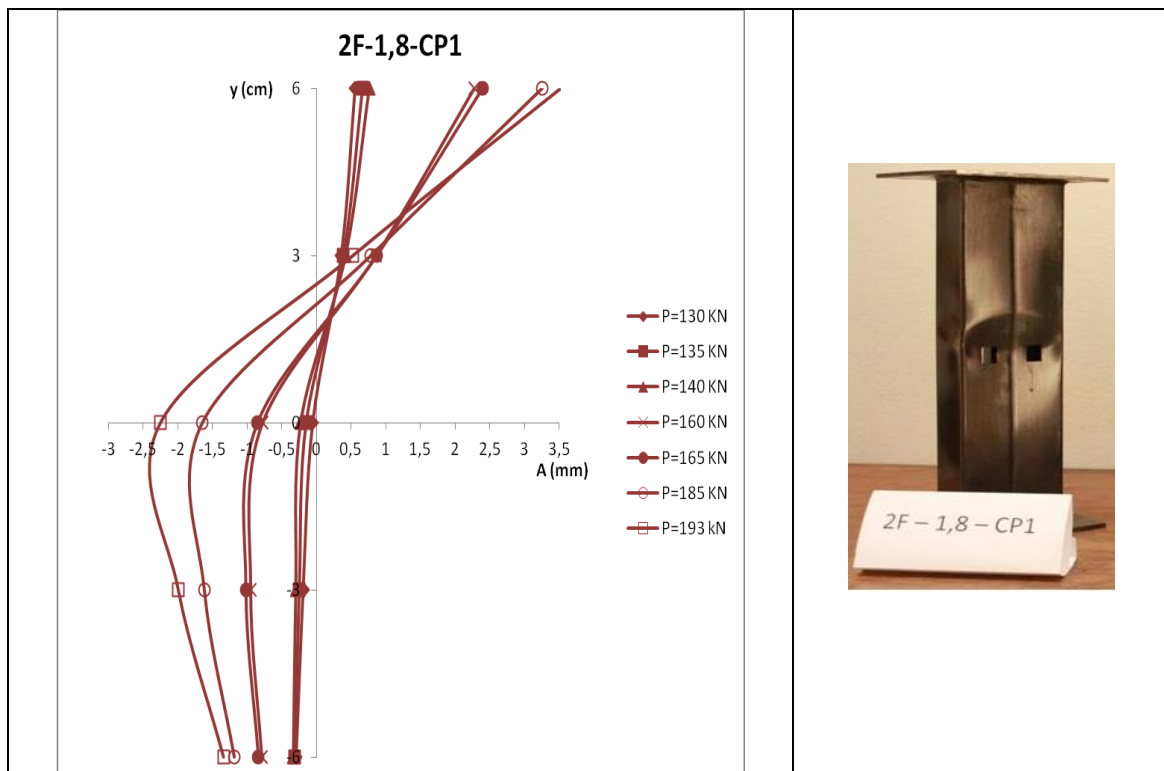


Figura: Evolução da amplitude da meia-onda senoidal medida para o ensaio 2F-1,8-CP1.

➤ **2F-1,8-CP3**

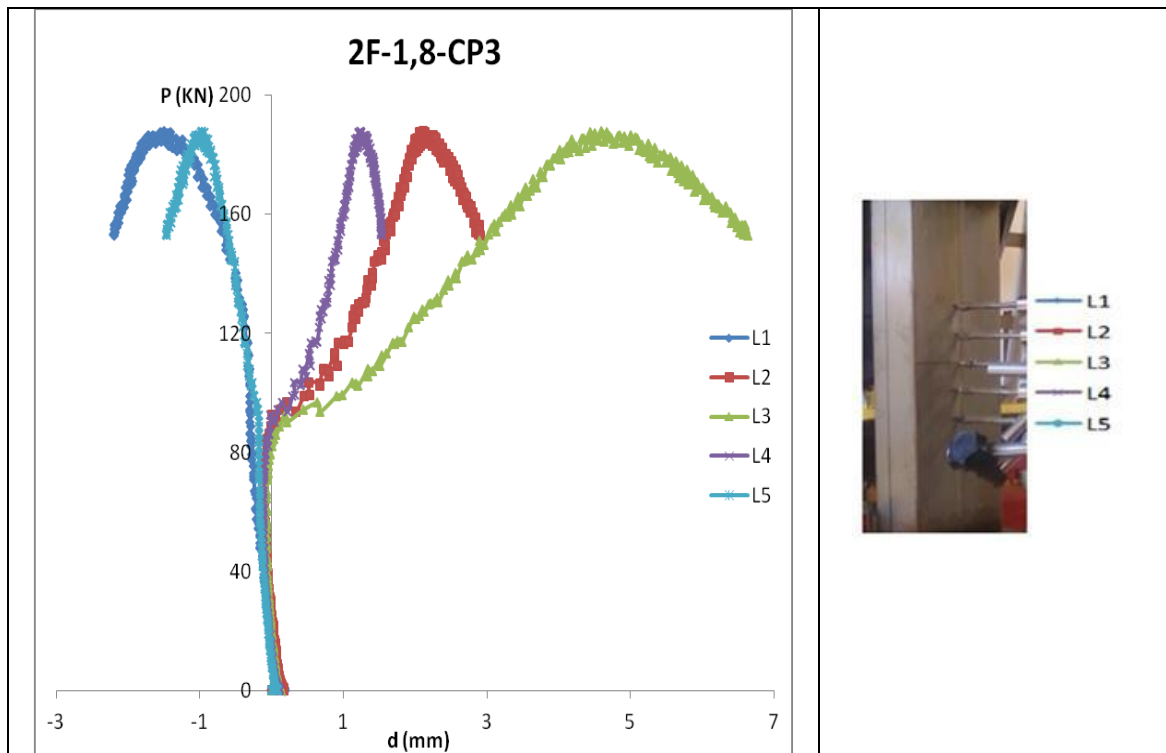


Figura: Carregamento versus a amplitude dos deslocamentos para o ensaio 2F-1,8-CP3.

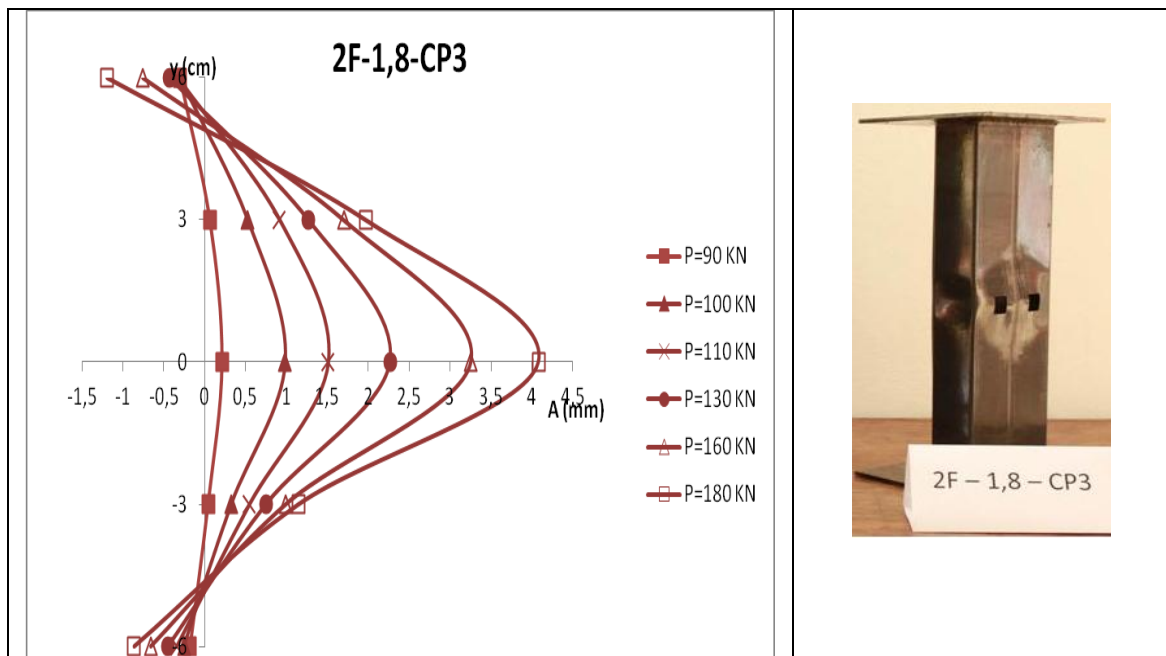


Figura: Evolução da amplitude da meia-onda senoidal medida para o ensaio 2F-1,8-CP3.

➤ 2F-1,5-CP1

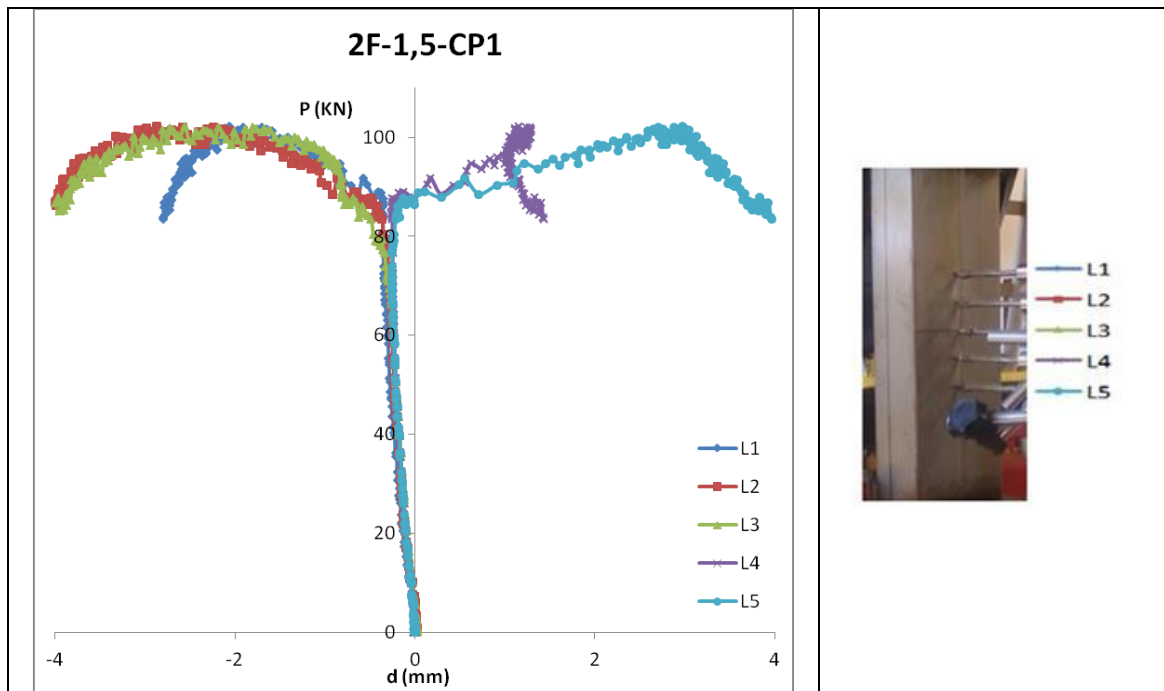


Figura: Carregamento versus a amplitude dos deslocamentos para o ensaio 2F-1,5-CP1.

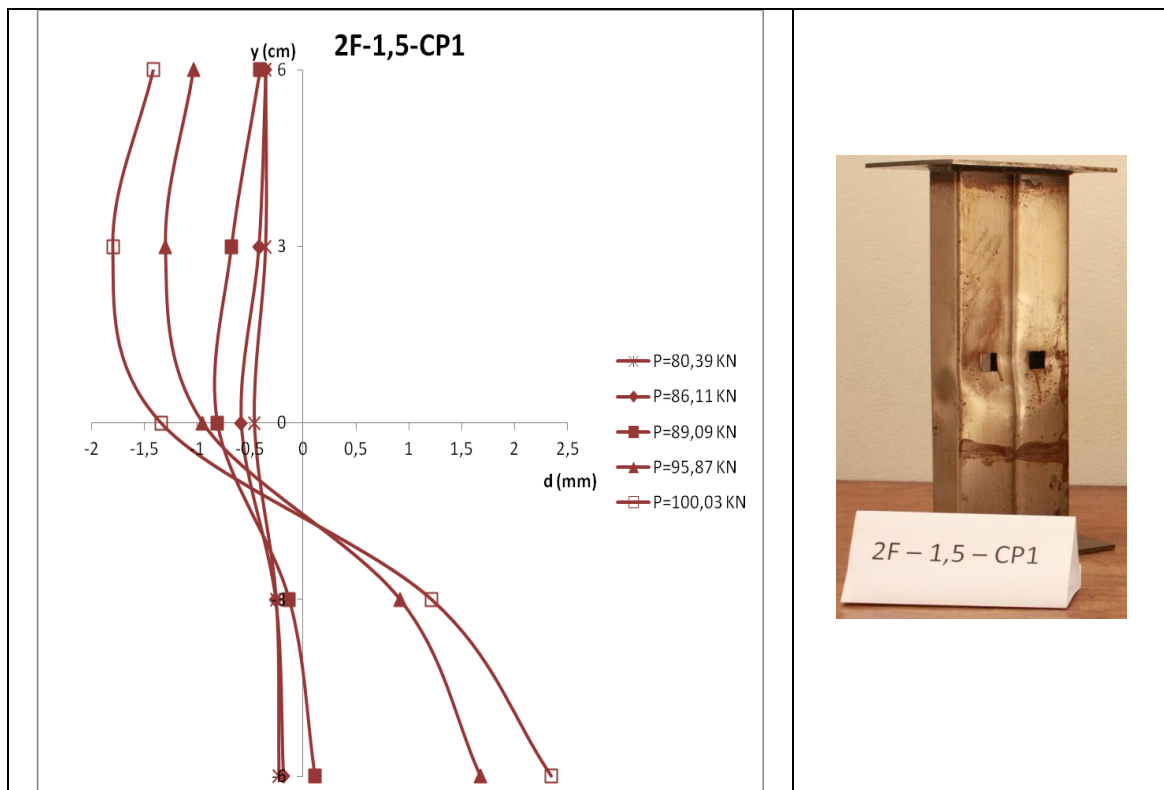


Figura: Evolução da amplitude da meia-onda senoidal medida para o ensaio 2F-1,5-CP1.

➤ 2F-1,5-CP2

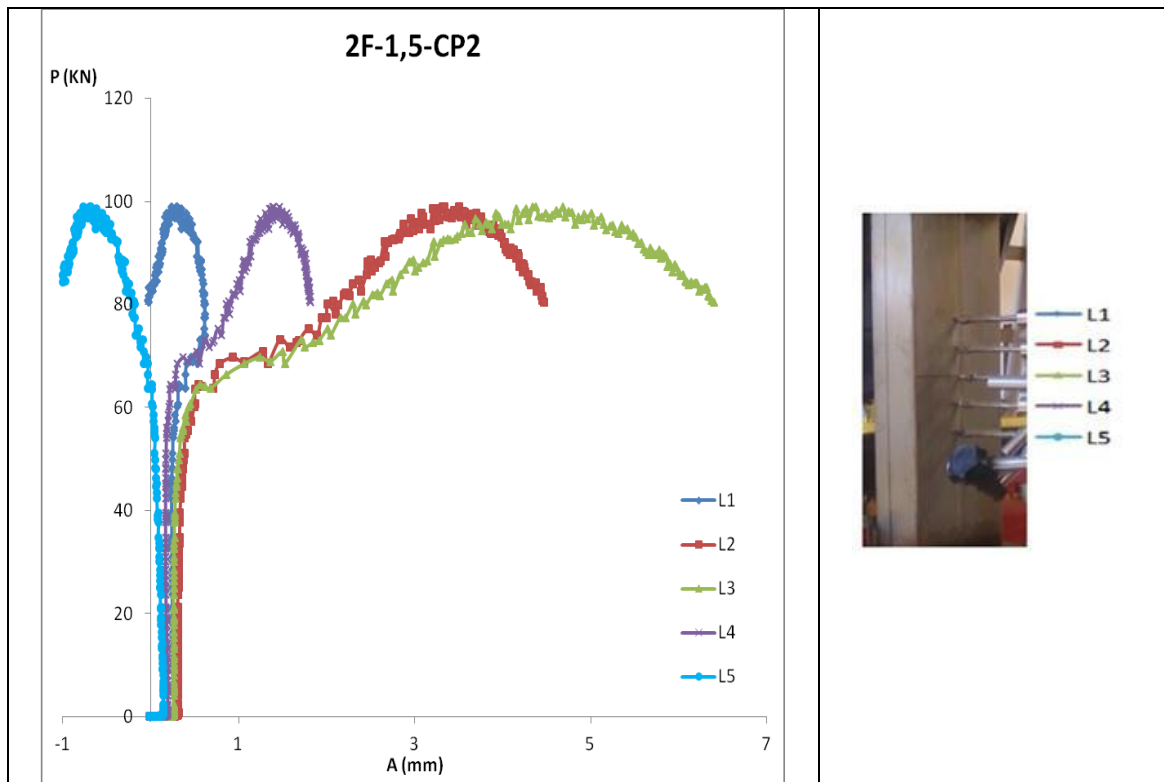


Figura: Carregamento versus a amplitude dos deslocamentos para o ensaio 2F-1,5-CP2.

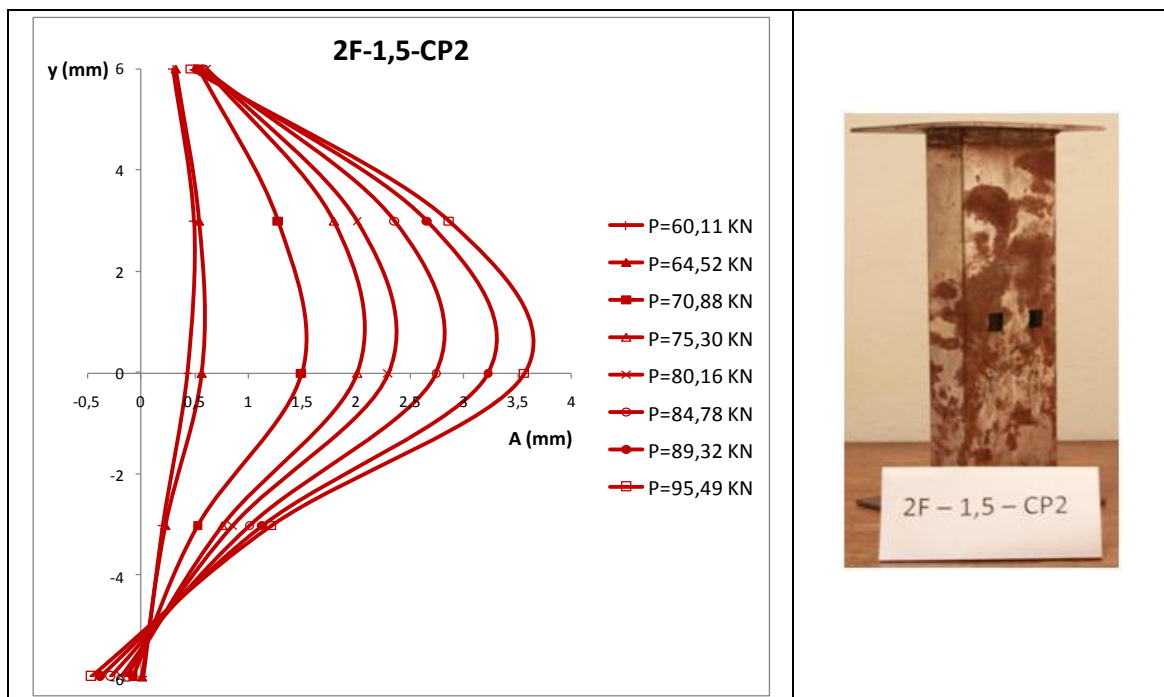


Figura: Evolução da amplitude da meia-onda senoidal medida para o ensaio 2F-1,5-CP2.

## **APÊNDICE C**

## APÊNDICE C – GRÁFICOS DE COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS NUMÉRICO E EXPERIMENTAL

### ➤ SF-1,8-CP1

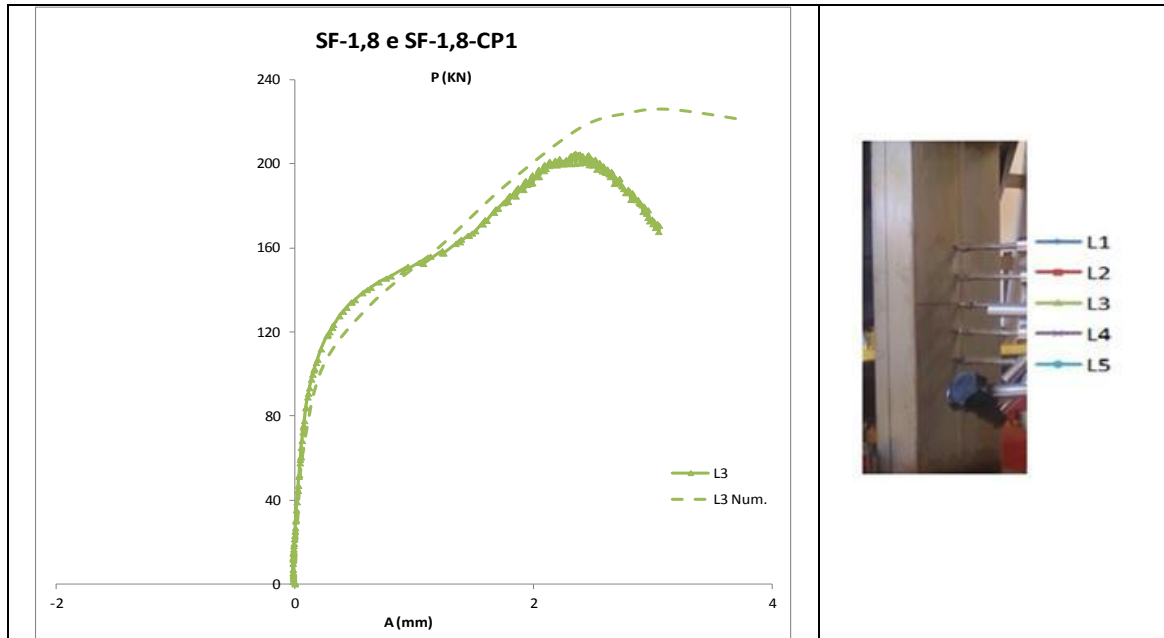


Figura: Carregamento versus a amplitude dos deslocamentos para comparação entre o resultado numérico e experimental do ensaio SF-1,8-CP1.

### ➤ SF-1,8-CP3

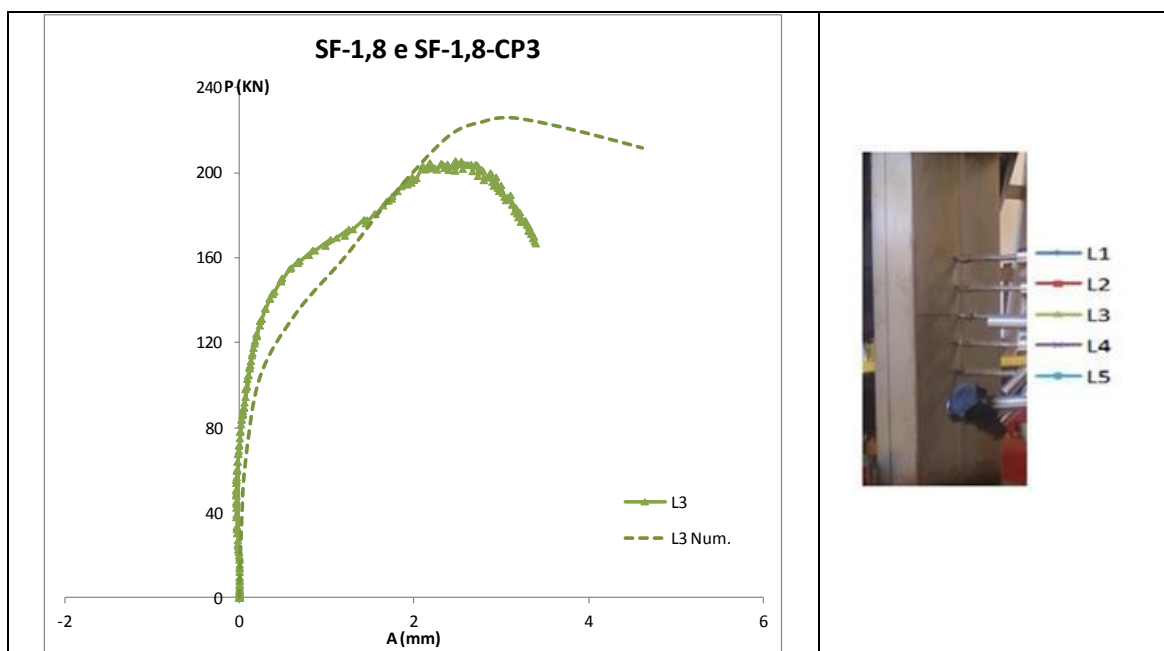


Figura: Carregamento versus a amplitude dos deslocamentos para comparação entre o resultado numérico e experimental do ensaio SF-1,8-CP3.

➤ SF-1,5-CP1

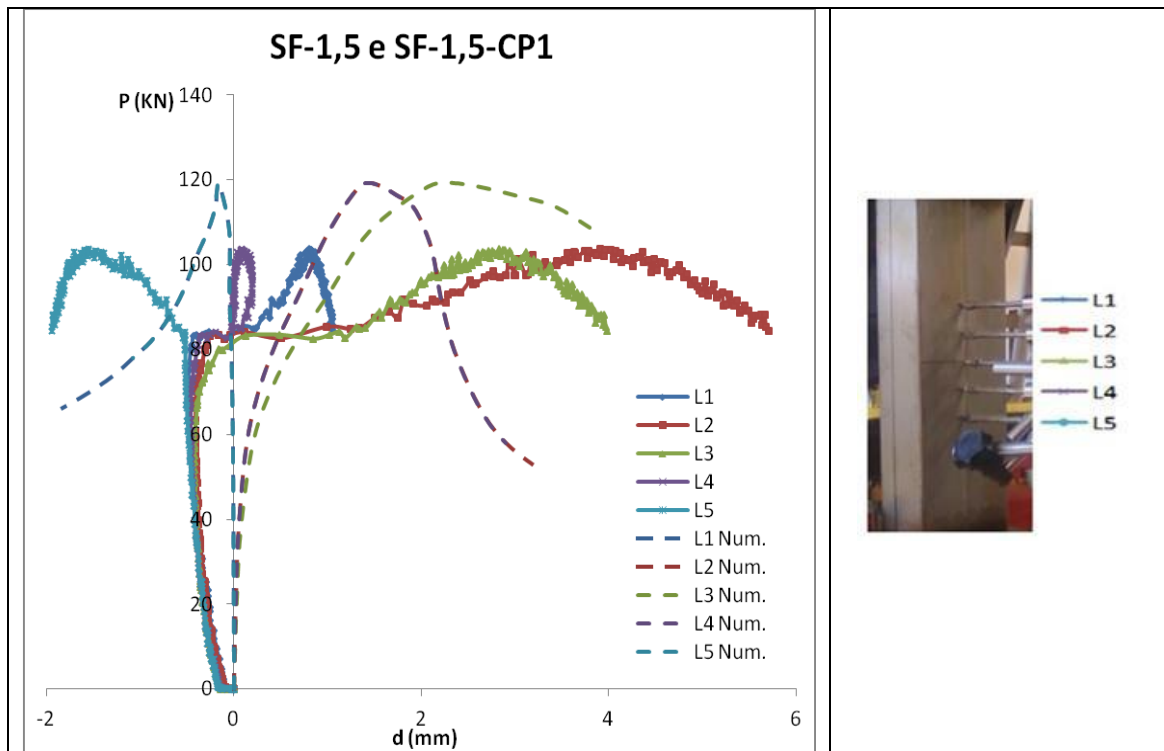


Figura: Carregamento versus a amplitude dos deslocamentos para comparação entre o resultado numérico e experimental do ensaio SF-1,5-CP1.

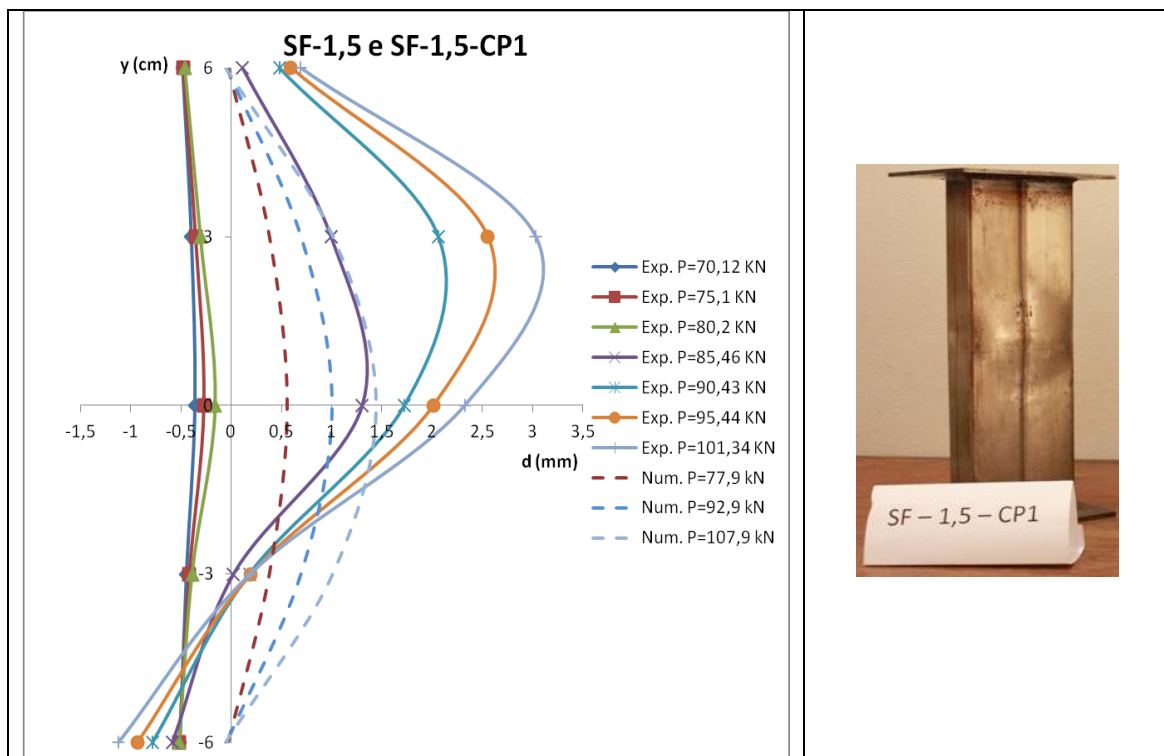


Figura: Evolução da amplitude da meia-onda senoidal medida para comparação entre o resultado numérico e experimental do ensaio SF-1,5-CP1.

➤ SF-1,5-CP3

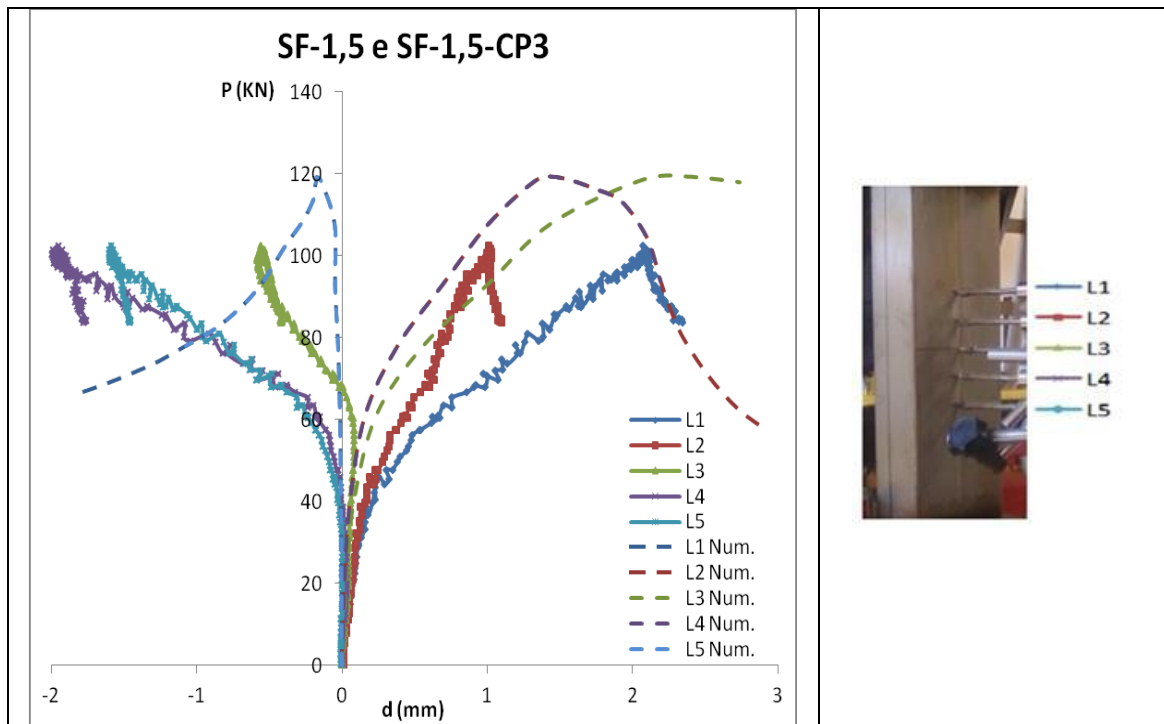


Figura: Carregamento versus a amplitude dos deslocamentos para comparação entre o resultado numérico e experimental do ensaio SF-1,5-CP3.

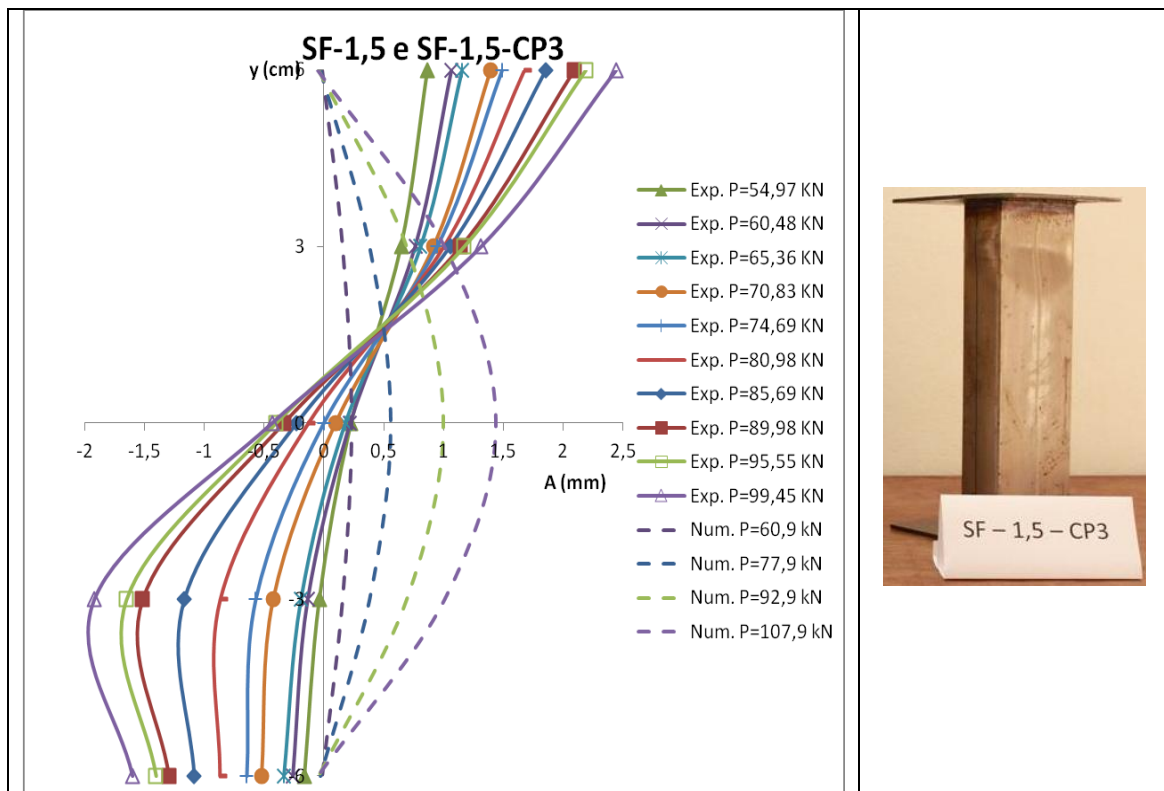


Figura: Evolução da amplitude da meia-onda senoidal medida para comparação entre o resultado numérico e experimental do ensaio SF-1,5-CP3.



➤ 2F-1,8-CP1

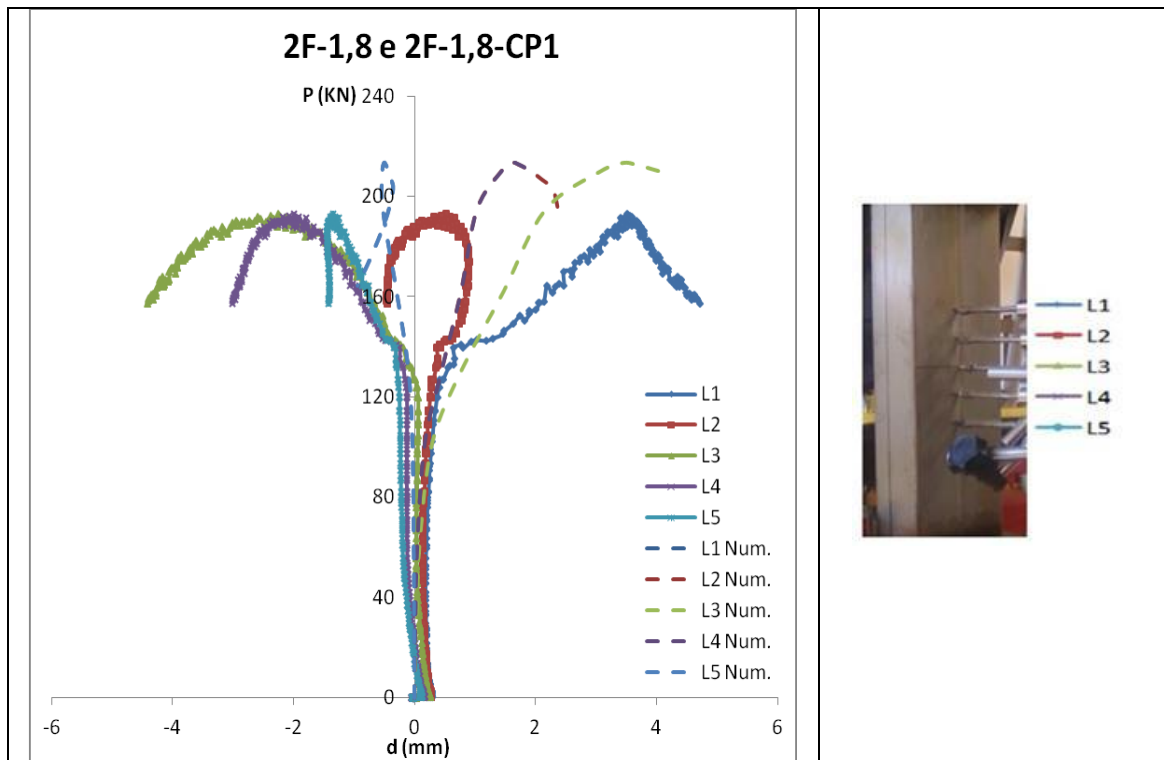


Figura: Carregamento versus a amplitude dos deslocamentos para comparação entre o resultado numérico e experimental do ensaio 2F-1,8-CP1.

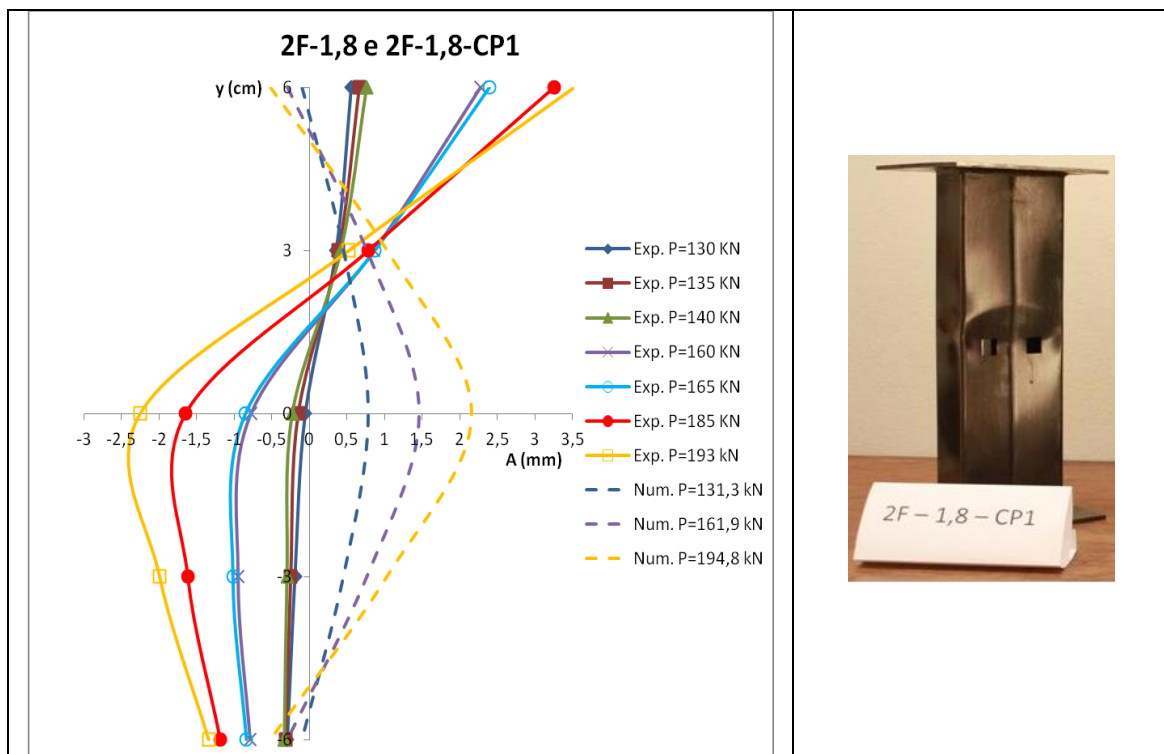


Figura: Evolução da amplitude da meia-onda senoidal medida para comparação entre o resultado numérico e experimental do ensaio 2F-1,8-CP1.

➤ **2F-1,8-CP3**

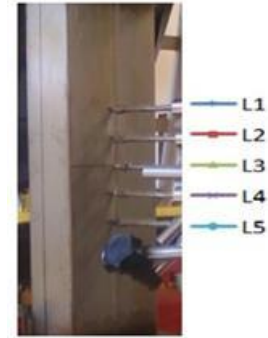
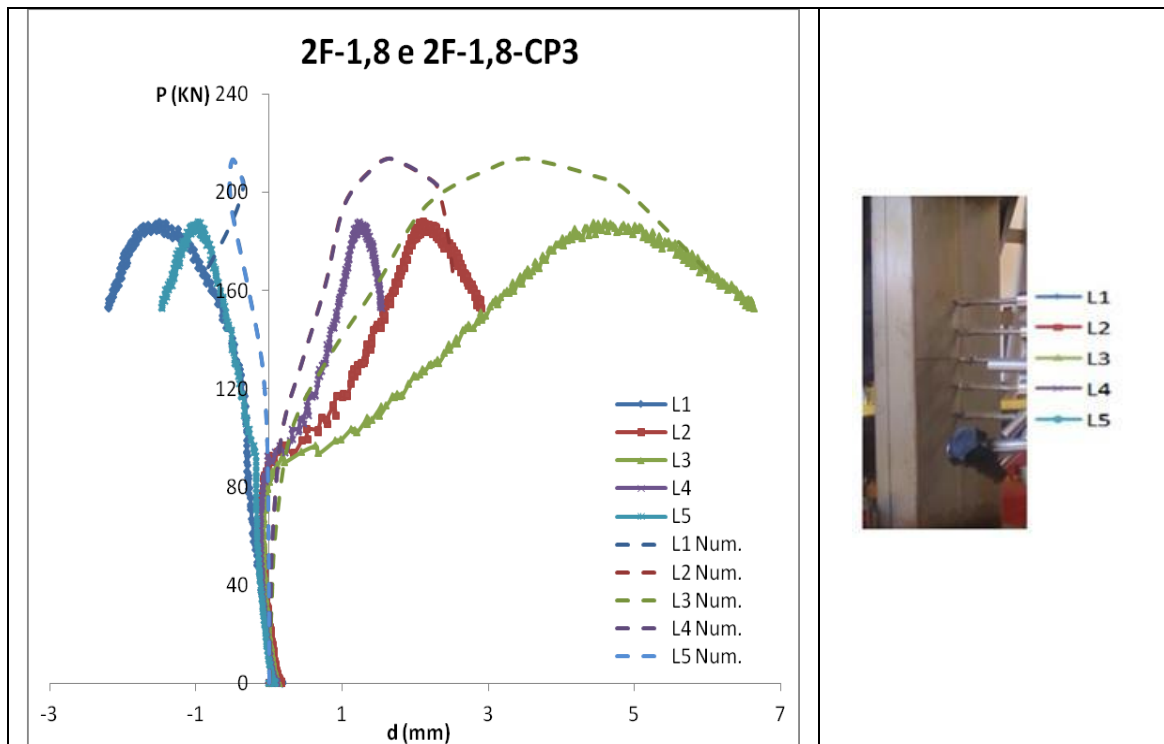


Figura: Carregamento versus a amplitude dos deslocamentos para comparação entre o resultado numérico e experimental do ensaio 2F-1,8-CP3.

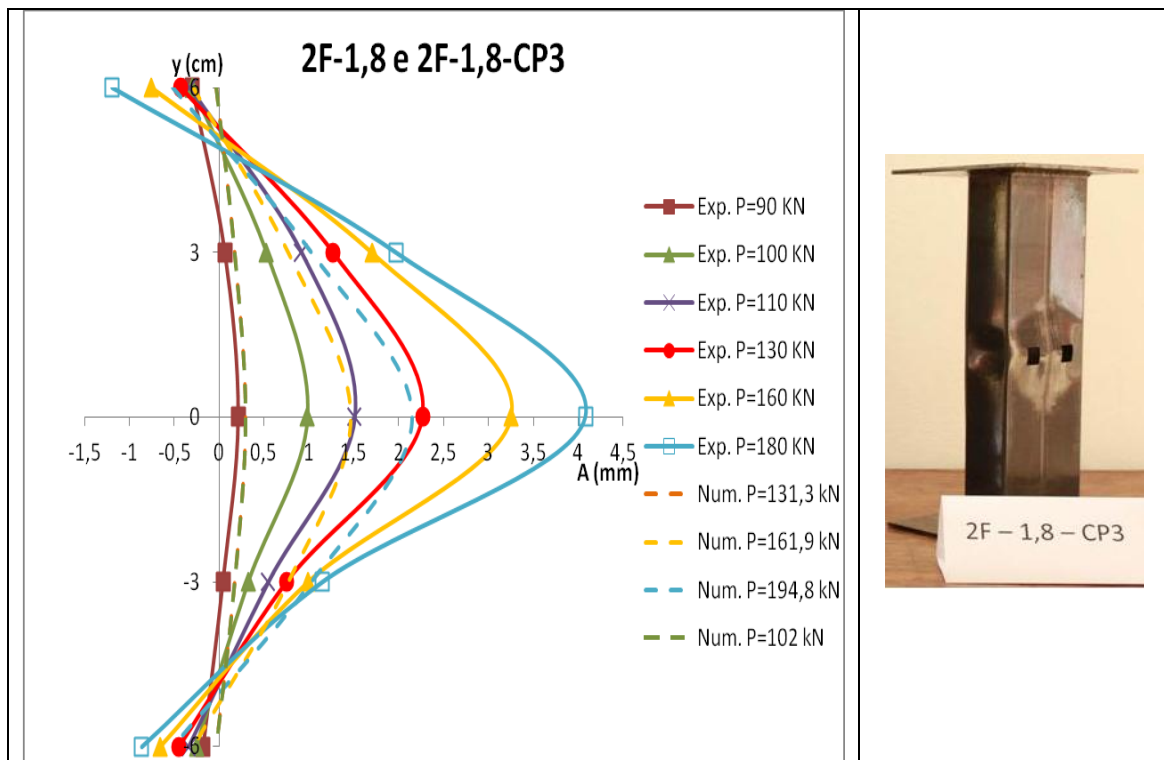


Figura: Evolução da amplitude da meia-onda senoidal medida para comparação entre o resultado numérico e experimental do ensaio 2F-1,8-CP3.

➤ 2F-1,5-CP1

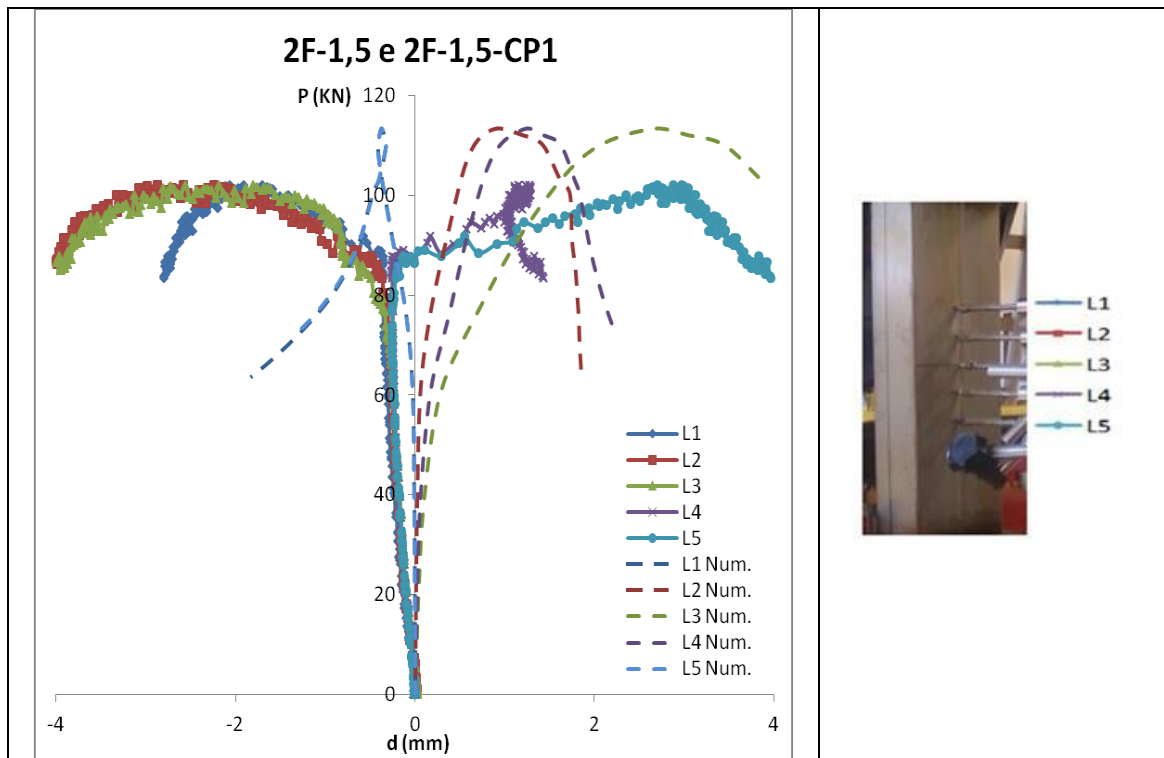


Figura: Carregamento versus a amplitude dos deslocamentos para comparação entre o resultado numérico e experimental do ensaio 2F-1,5-CP1.

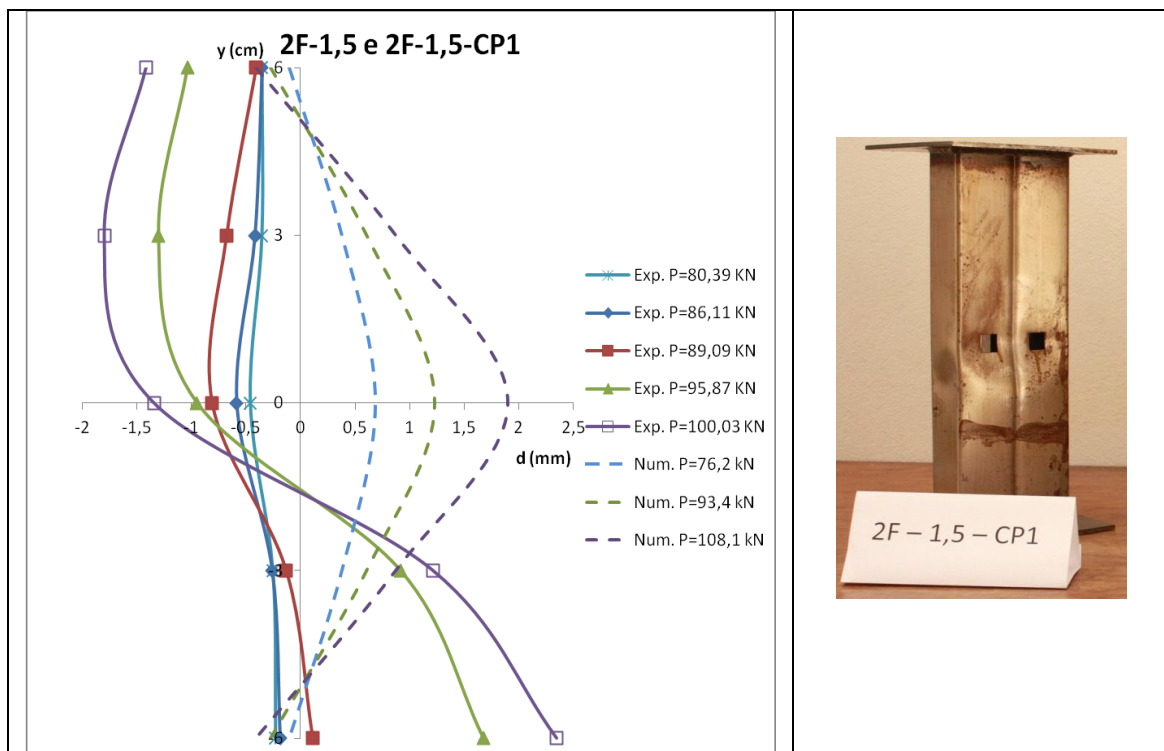


Figura: Evolução da amplitude da meia-onda senoidal medida para comparação entre o resultado numérico e experimental do ensaio 2F-1,5-CP1.

➤ 2F-1,5-CP2

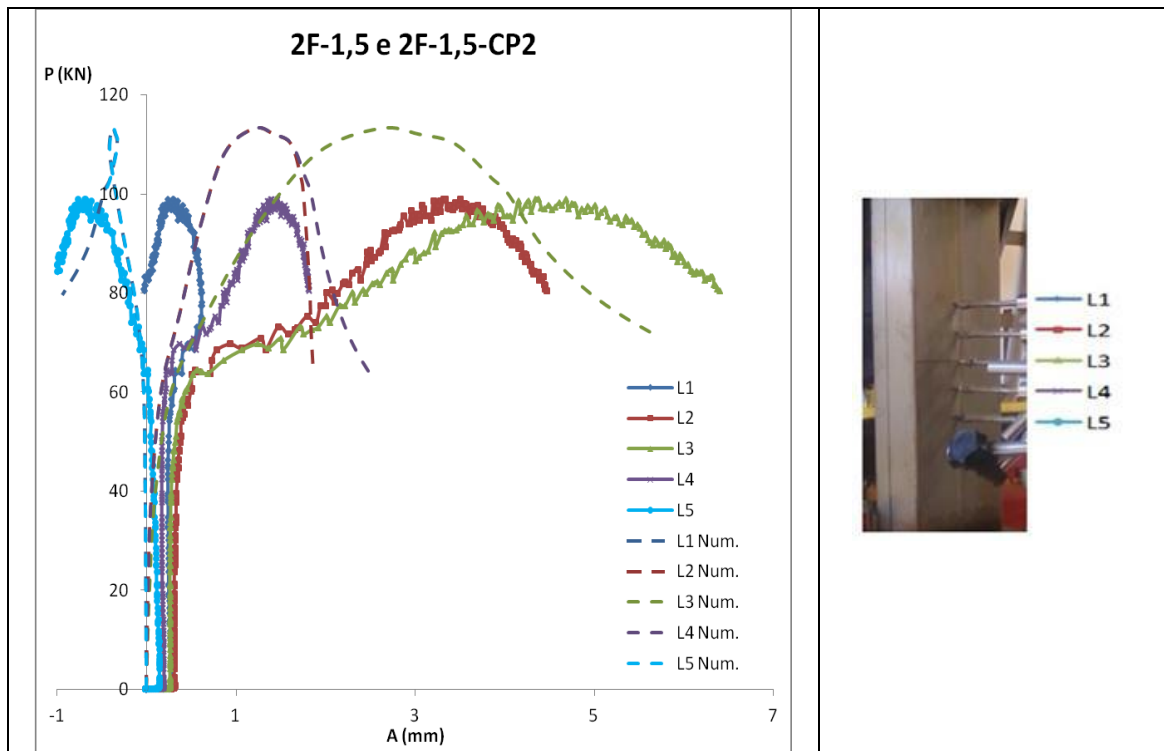


Figura: Carregamento versus a amplitude dos deslocamentos para comparação entre o resultado numérico e experimental do ensaio 2F-1,5-CP2.

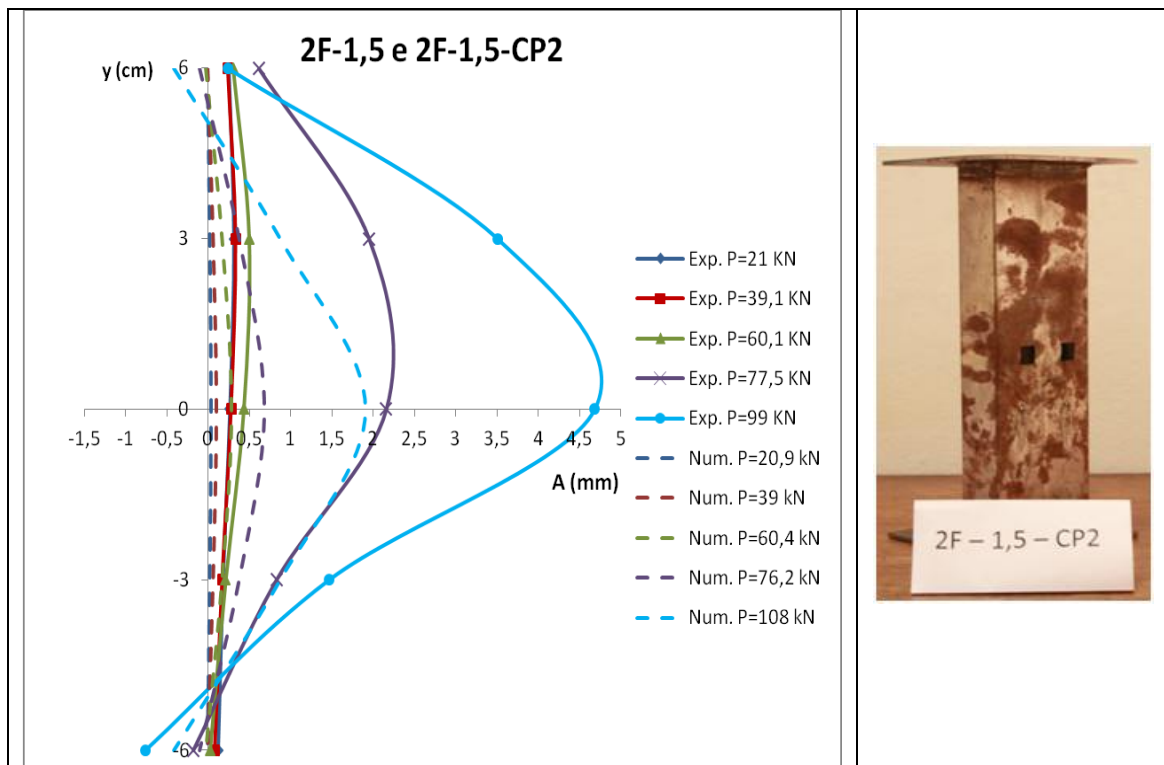


Figura: Evolução da amplitude da meia-onda senoidal medida para comparação entre o resultado numérico e experimental do ensaio 2F-1,5-CP2.

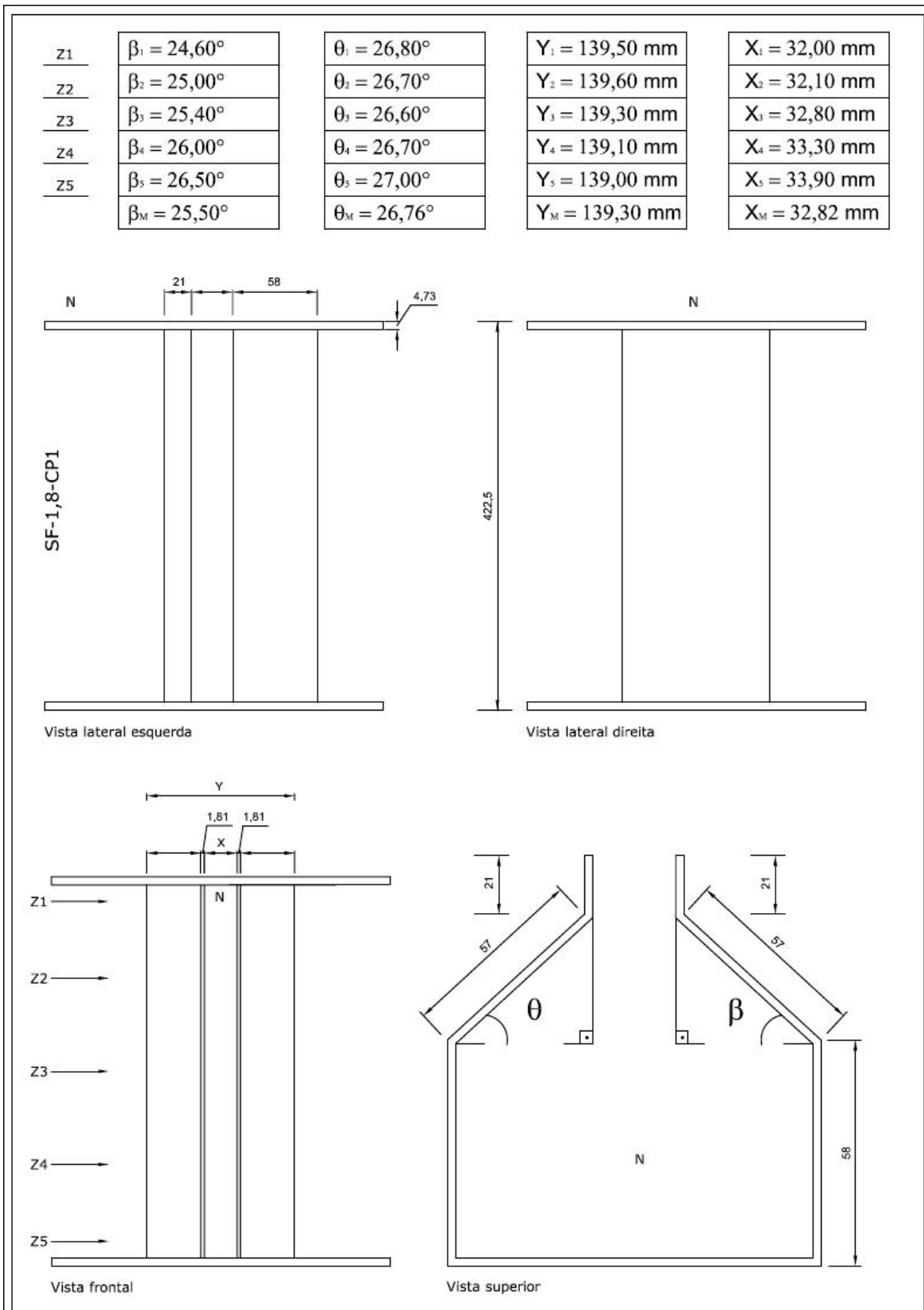
## **ANEXO A**

## **ANEXO A – MEDIÇÃO E CONTROLE DE IMPERFEIÇÕES GEOMÉTRICAS INICIAIS DOS MODELOS FABRICADOS**

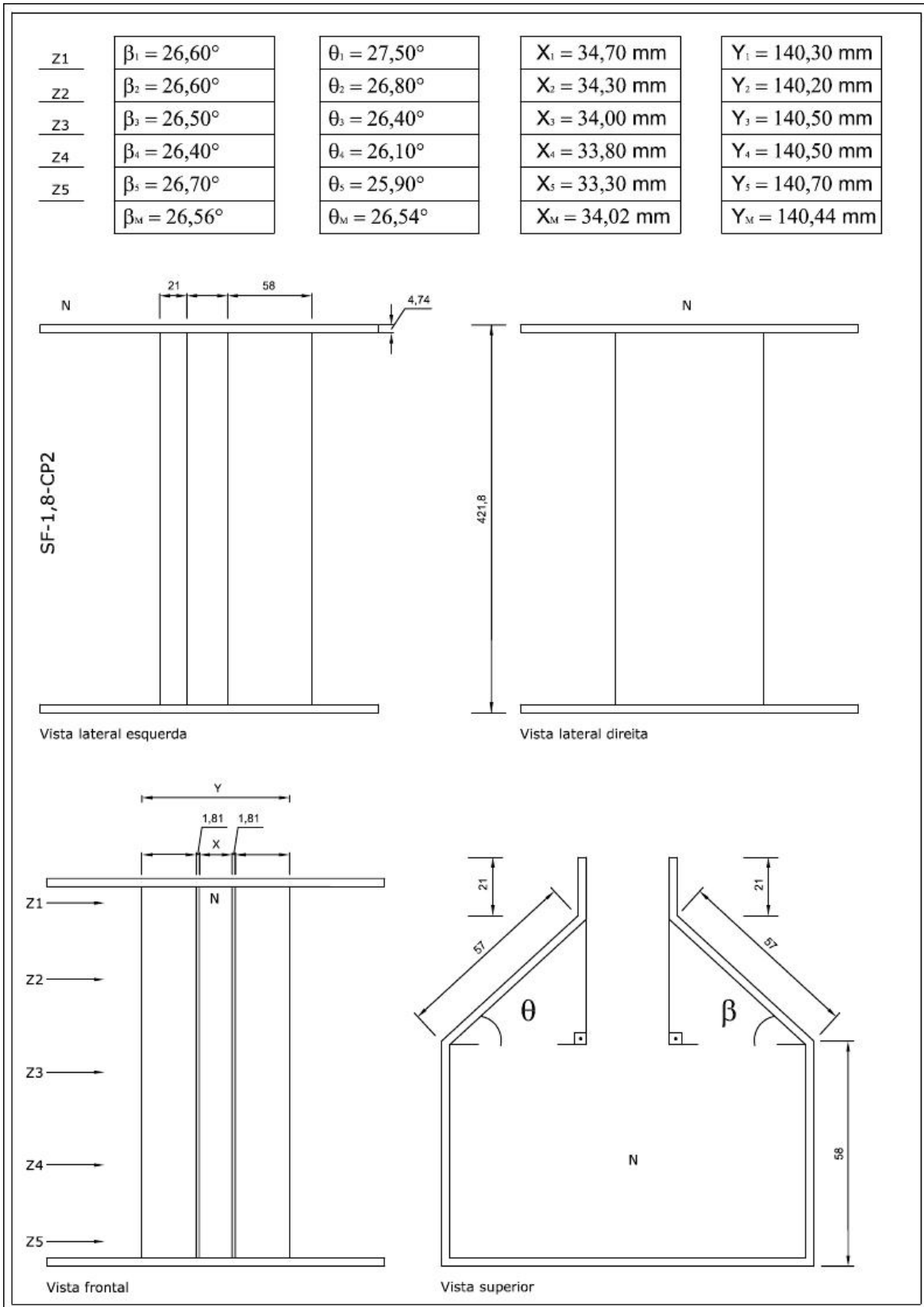
### **Dados:**

- NOTA 1: A letra "N", localizada nos perfis, indica a posição onde foi gravado o nome dos protótipos.
- NOTA 2: As medidas dos ângulos foram obtidas utilizando uma média aritmética, simbolizada pelo subscrito "M".
- NOTA 3: "Z1", "Z2", "Z3", "Z4" e "Z5" significam as posições onde as medidas, usadas na média, foram obtidas.

➤ SF-1,8-CP1

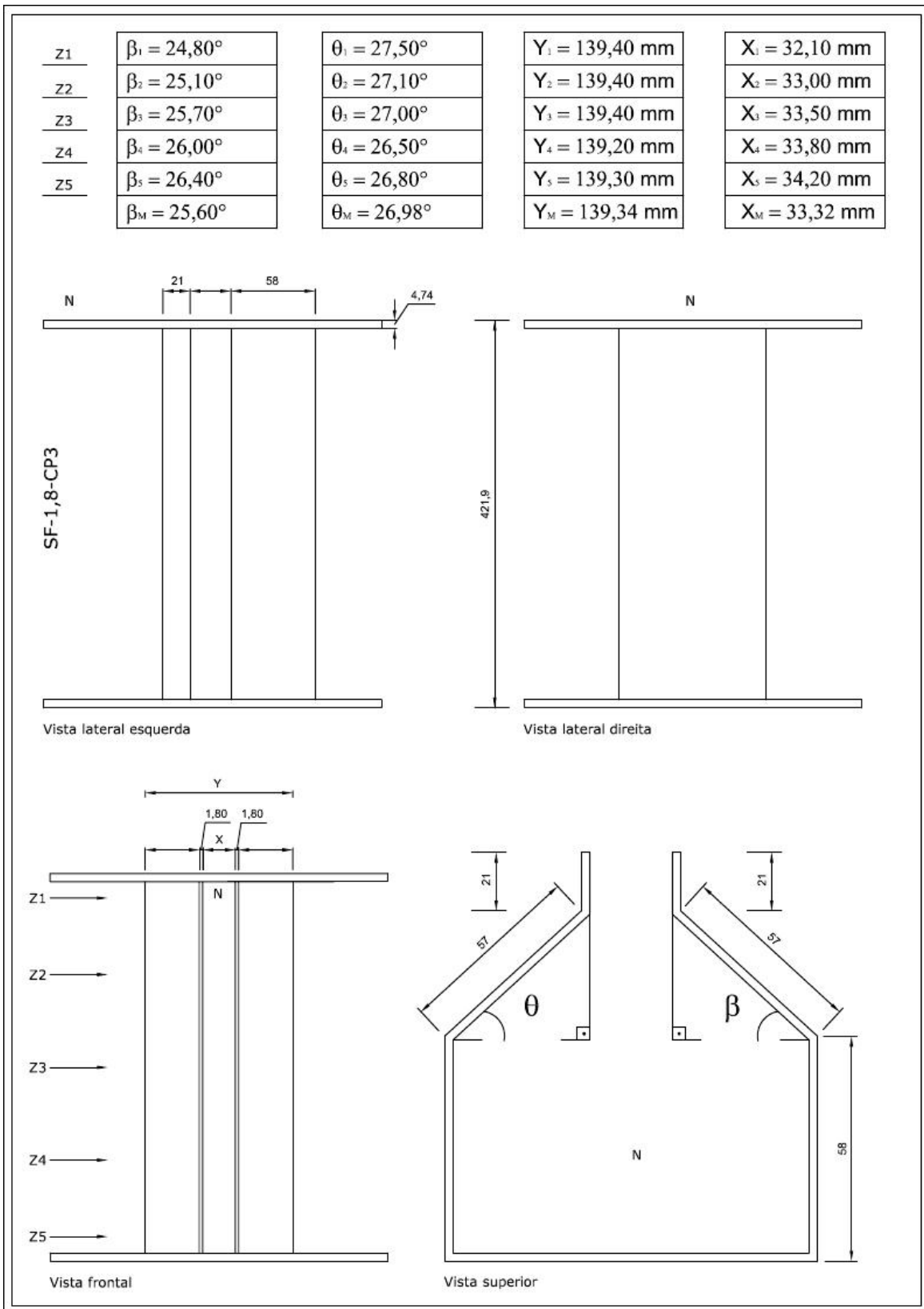


➤ SF-1,8-CP2

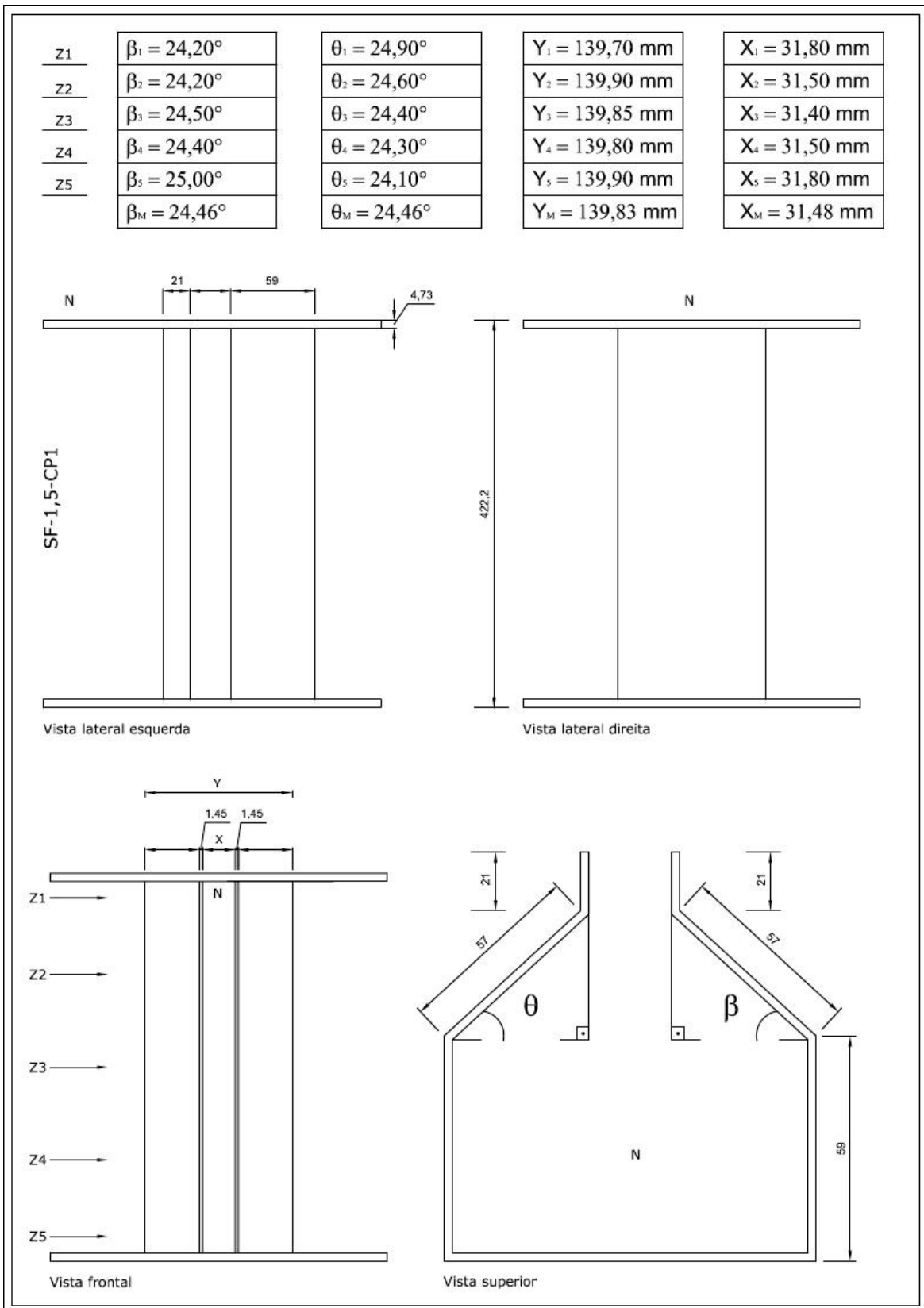




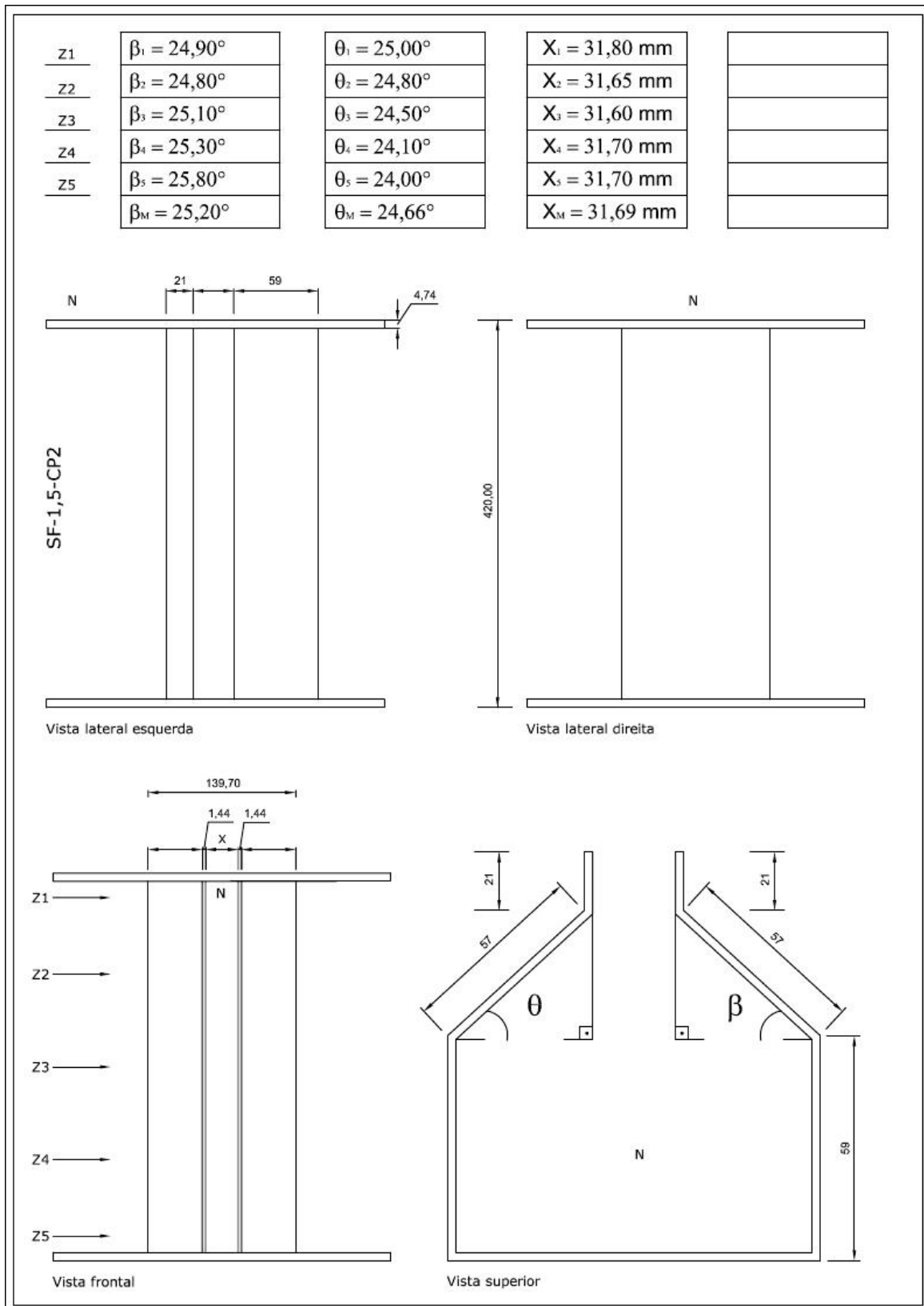
➤ SF-1,8-CP3



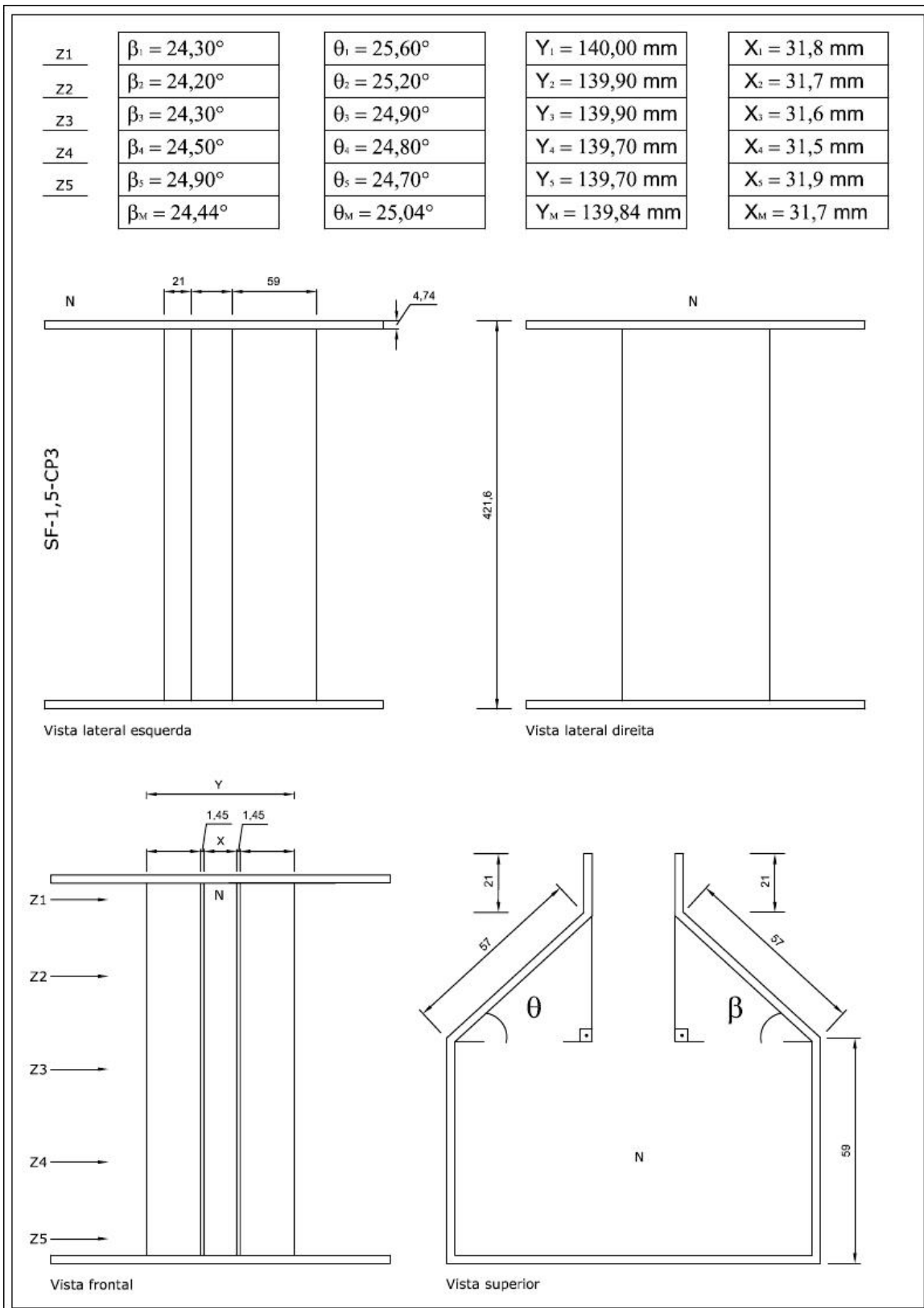
➤ SF-1,5-CP1



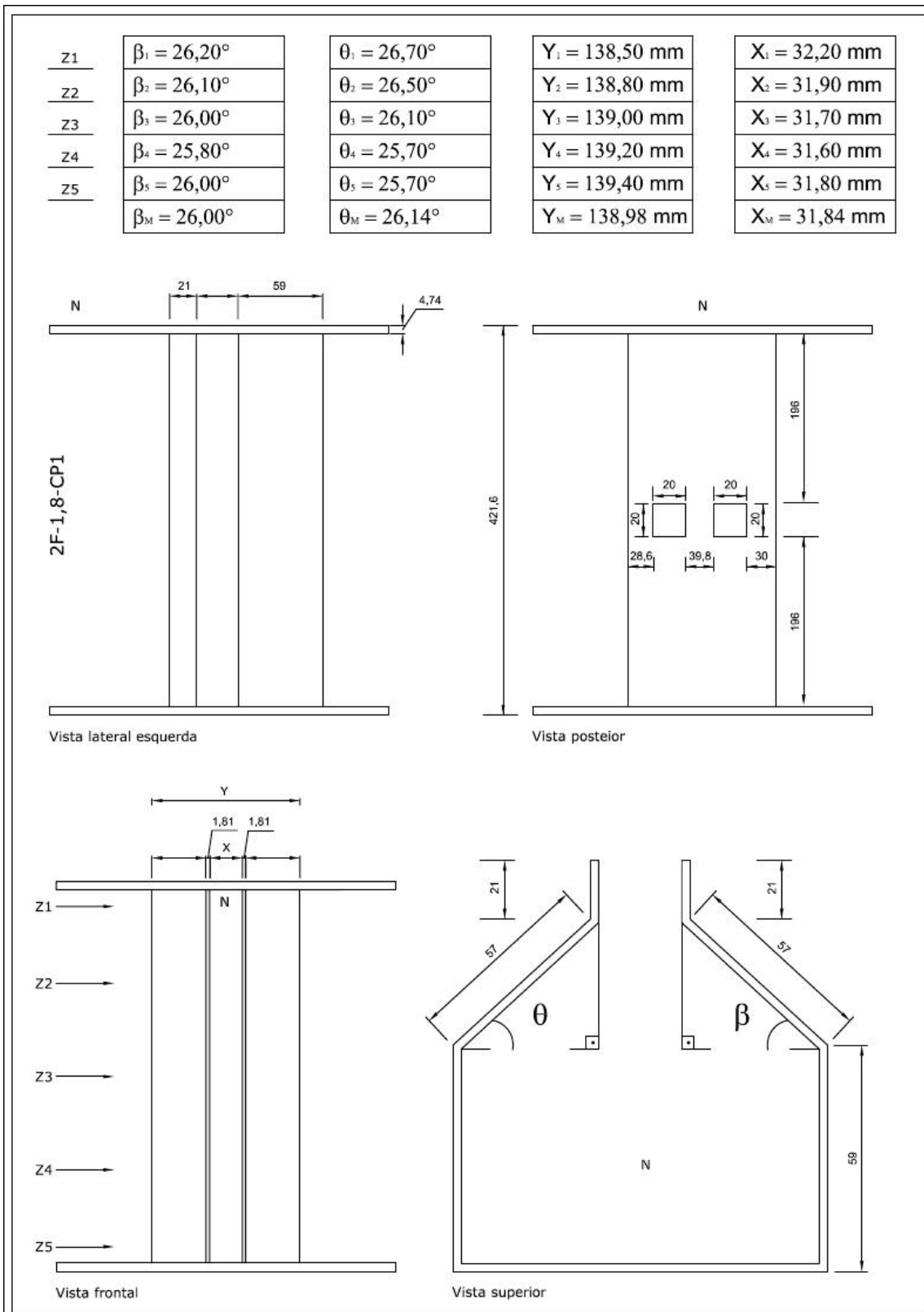
➤ SF-1,5-CP2



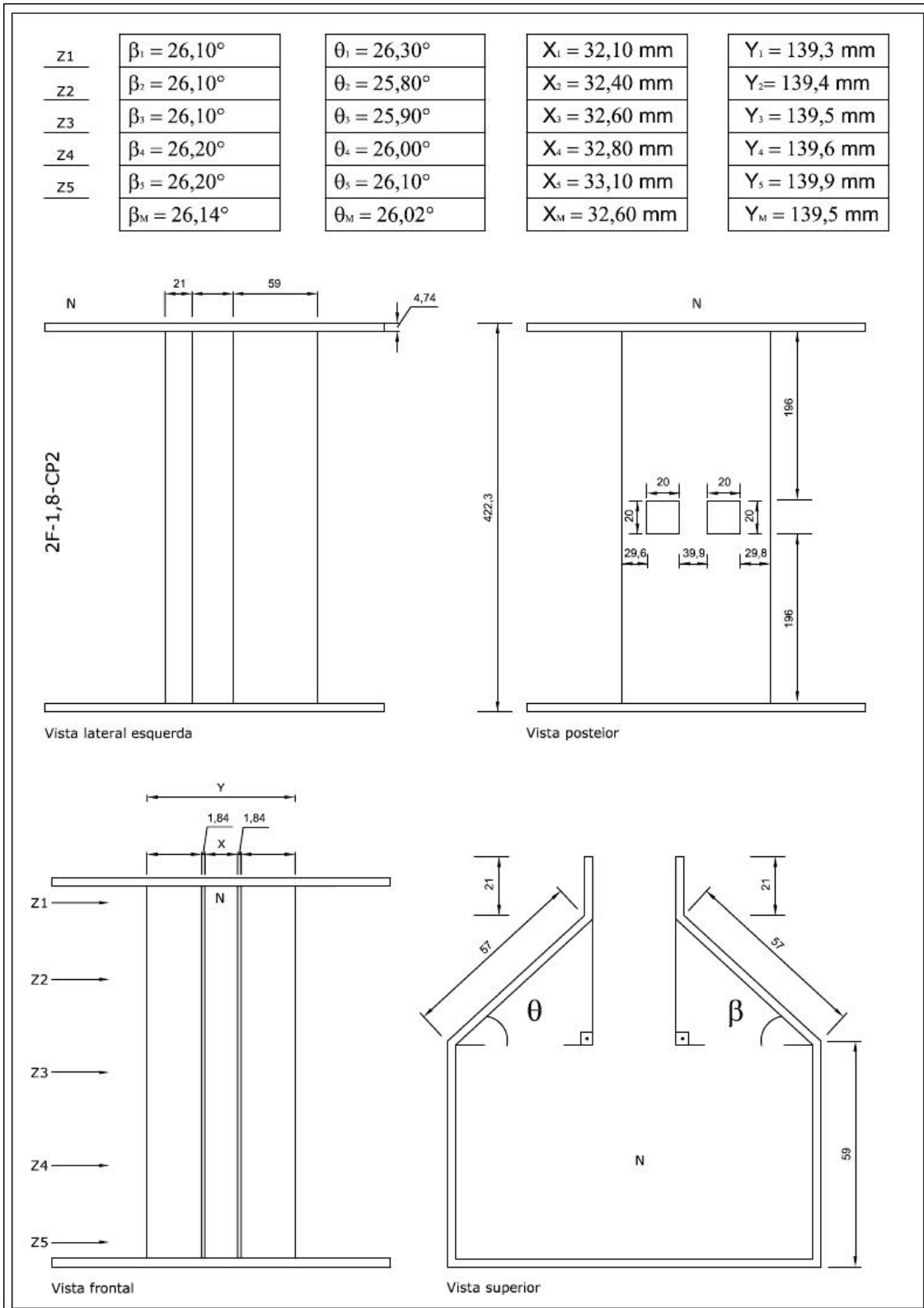
➤ SF-1,5-CP3



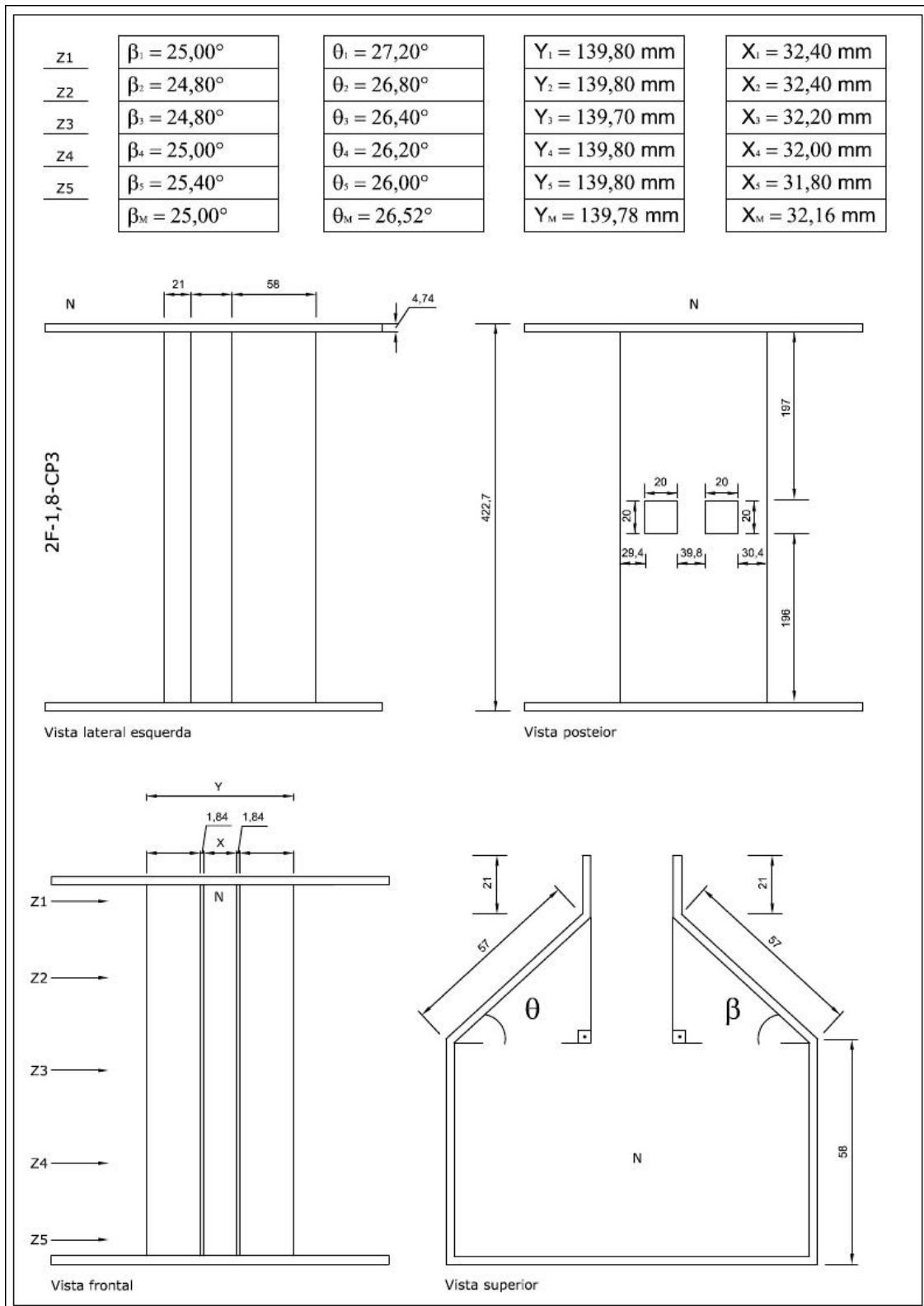
➤ **2F-1,8-CP1**



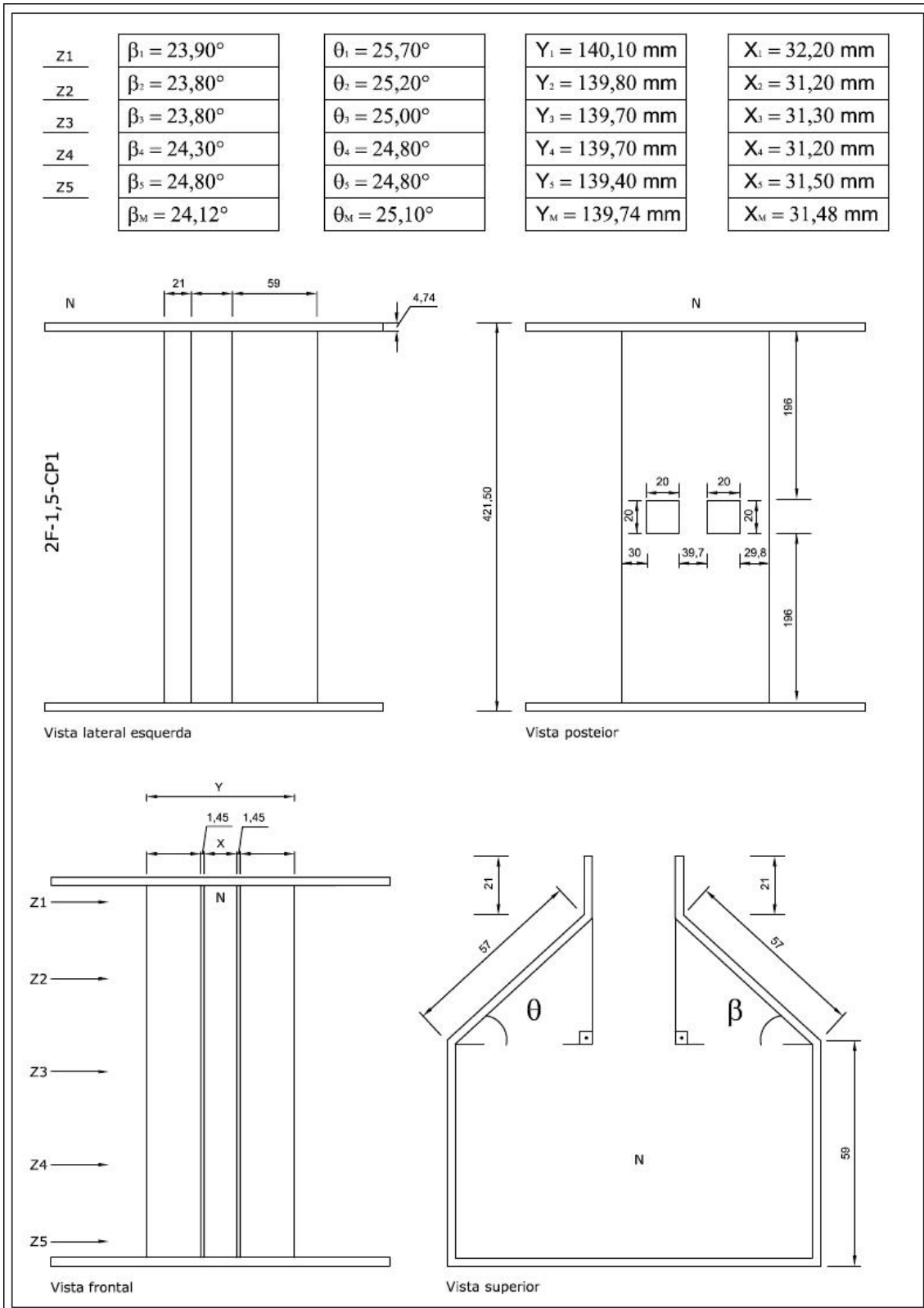
➤ **2F-1,8-CP2**



➤ **2F-1,8-CP3**

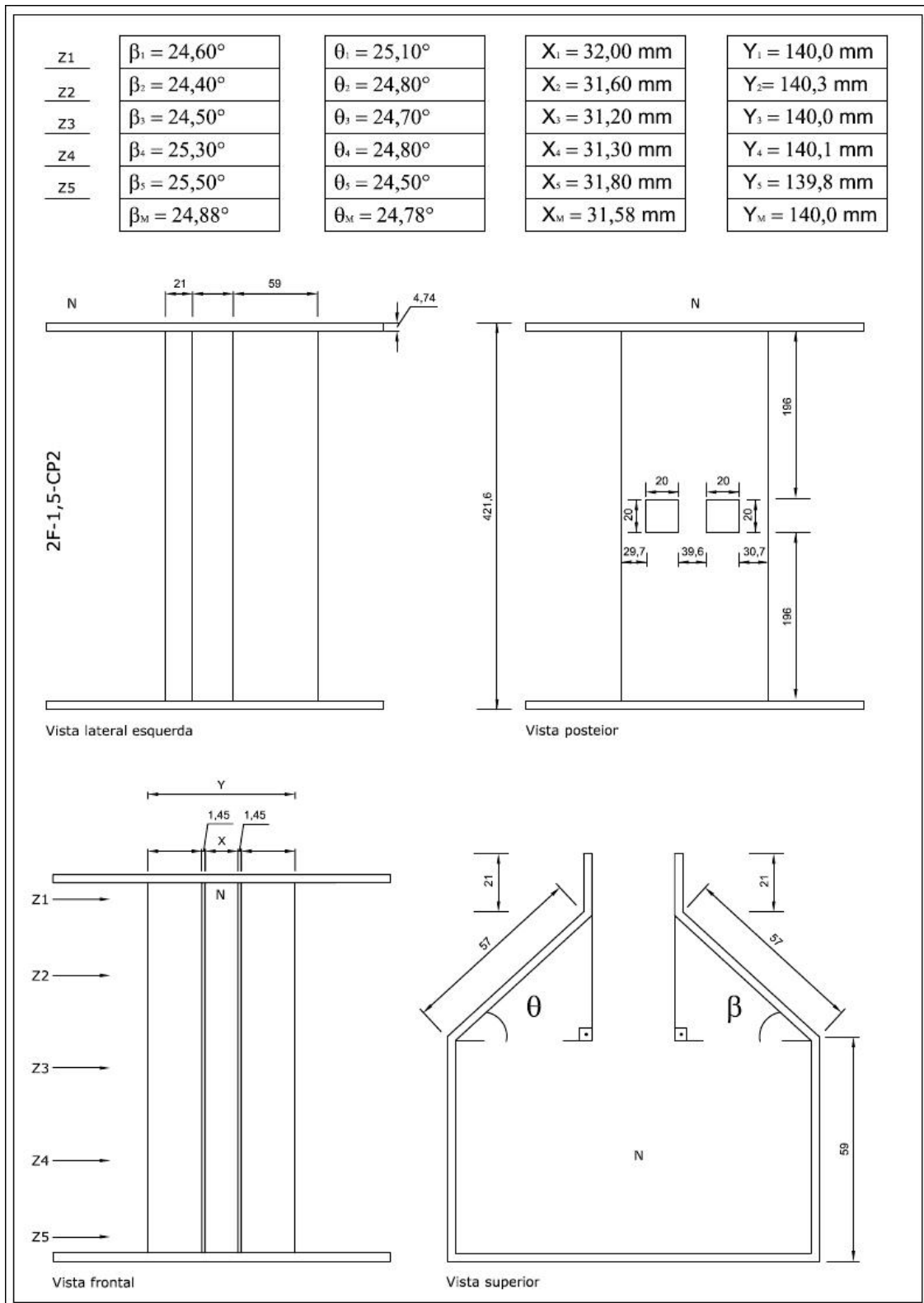


➤ **2F-1,5-CP1**





➤ **2F-1,5-CP2**



➤ **2F-1,5-CP3**

